

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE VUELO
FOTOGRAFÉTICO CON RPAS EN LA ESTIMACIÓN DE
ALTURA EN ÁRBOLES DE LA UNALM”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL

JENER ALEXIS SALDIVAR AYALA

LIMA-PERÚ

2024

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art.24-Reglamento de propiedad intelectual)**

Document Information

Analyzed document	tesis 2022 ALEXIS SALDIVAR_lev_OBS_AS_21_06 (2).docx (D160282052)
Submitted	3/6/2023 11:45:00 PM
Submitted by	Víctor Barrena
Submitter email	vbarrena@lamolina.edu.pe
Similarity	2%
Analysis address	vbarrena.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / DATOS TESIS.docx Document DATOS TESIS.docx (D147105945) Submitted by: hpcbioinformatica@lamolina.edu.pe Receiver: hpcbioinformatica.unalm@analysis.arkund.com	 10
SA	URKUN_GERSON CASTILLO.pdf Document URKUN_GERSON CASTILLO.pdf (D113776868)	 1
SA	1A - Cano Anicama, Degianyra.docx Document 1A - Cano Anicama, Degianyra.docx (D157033505)	 1
SA	Borrador 1.docx Document Borrador 1.docx (D41422629)	 3
SA	APLICACION DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL DE OBJETO CERCANO EN INFRAESTRUCTURA MINA, PROYECTO MINERO LAS BAMBAS-APURIMAC.pdf Document APLICACION DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL DE OBJETO CERCANO EN INFRAESTRUCTURA MINA, PROYECTO MINERO LAS BAMBAS-APURIMAC.pdf (D60816183)	 1

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
"EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE VUELO FOTOGRAMÉTRICO CON RPAS EN LA ESTIMACIÓN DE ALTURA EN ÁRBOLES DE LA UNALM"

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO FORESTAL
JENER ALEXIS SALDIVAR AYALA
LIMA-PERÚ
2022

La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación (Art.24-Reglamento de propiedad intelectual)
DEDICATORIA

A mis padres Matilde Ayala y Raúl Saldivar, por creer siempre en mí y brindarme su apoyo incondicional durante todos estos años. A Sintia, mi hermana. A mis queridas sobrinas. A mi papá Thomas. A mi querida Leia Aitana.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

A mi asesor Víctor barrena arroyo por guiarme en la realización de este trabajo de investigación, por los consejos y el tiempo dedicado. A mis buenos amigos de la Dirección de Inventario y Valoración del SERFOR, en especial al biólogo David Velarde. A Carlos Garnica por motivarme a realizar investigaciones con sensores remotos en especial los RPAS. A Consultores Asociados en Naturales y Desarrollo-CANDES por el apoyo brindado en la obtención del grado de piloto de RPAS. A mis amigos, por motivarme día a día.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE VUELO
FOTOGRAMÉTRICO CON RPAS EN LA ESTIMACIÓN DE
ALTURA EN ÁRBOLES DE LA UNALM”**

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL
JENER ALEXIS SALDIVAR AYALA**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

*Ing. Ethel Rubin de Celis Llanos, Dra.
Presidente*

*Ing. Rafael Mauricio Ramírez Arroyo, Dr.
Miembro*

*Ing. Juan Carlos Ocaña Canales
Miembro*

*Ing. Víctor Manuel Barrera Arroyo, M.Sc.
Asesor*

DEDICATORIA

A mis padres Matilde Ayala y Raúl Saldivar, por creer siempre en mí y brindarme su apoyo incondicional durante todos estos años.

A Sintia, mi hermana.

A mis queridas sobrinas.

A mi papá Thomas.

A mi querida Leia Aitana.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

A mi asesor Víctor barrena arroyo por guiarme en la realización de este trabajo de investigación, por los consejos y el tiempo dedicado.

A mis buenos amigos de la Dirección de Inventario y Valoración del SERFOR, en especial al biólogo David Velarde.

A Carlos Garnica por motivarme a realizar investigaciones con sensores remotos en especial los RPAS.

A Consultores Asociados en Naturales y Desarrollo-CANDES por el apoyo brindado en la obtención del grado de piloto de RPAS.

A mis amigos y amigas Karen Fabián, Sara Ferreyra, Jessica Figueroa, Yordy Príncipe y Cristhian Clemente, por su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Antecedentes.....	3
2.2 Altura.....	4
2.2.1 Tipos de altura	4
2.2.2 Medición de altura	5
2.2.3 Instrumentos para la medición de altura	5
2.2.4 Hipsómetro Vertex IV	6
2.3 Fotogrametría clásica.....	8
2.3.1 Definición	8
2.3.2 Estereoscopia	8
2.3.3 Principio de la marca flotante	10
2.3.4 Paralaje.....	11
2.3.5 Clasificación de la fotogrametría.....	11
2.4 Fotogrametría digital aérea.....	12
2.4.1 La fotografía digital	12
2.4.2 Tipos de fotografías digitales.....	13
2.5 Sistema de aeronave piloteada a distancia (RPAS)	14
2.5.1 Definición	14
2.5.2 Partes de un RPAS	15
2.5.3 Tipos de RPA.....	15
2.5.4 Mavic 2 pro.....	16
2.6 Proyectos de vuelos fotogramétricos con RPAS	17
2.6.1 Cálculos previos al plan de vuelo	18
2.6.2 Plan de vuelo.....	20
2.6.3 Vuelo fotogramétrico en campo	25
2.7 Procesamiento digital de fotografías	26
2.7.1 Proceso fotogramétrico digital.....	26
2.7.2 Software de procesamiento digital Pix4D mapper	30
2.8 Obtención de atributos en árboles	30

2.8.1	Frugoviewer	30
2.8.2	Fusion.....	31
III.	METODOLOGÍA.....	32
3.1	Área de estudio	32
3.2	Materiales	33
3.2.1	Equipos	33
3.2.2	Softwares	33
3.2.3	Materiales.....	33
3.3	Métodos	34
3.3.1	Vuelos fotogramétricos con RPAS Mavic 2 pro	34
a.	Plan del vuelo	34
b.	Ejecución de vuelos fotogramétricos	37
3.3.2	Procesamiento fotogramétrico	40
3.3.3	Ubicación espacial de árboles.....	43
3.3.4	Estimación de altura total en árboles	44
3.3.5	Comparación de estados bajo distintos parámetros de vuelo	48
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1	Vuelos fotogramétricos con RPAS mavic 2 pro.....	50
4.2	Procesamiento fotogramétrico	52
4.3	Ubicación espacial de los árboles	58
4.4	Estimación de altura total en árboles.....	63
4.4.1	Estimación de altura total de árboles en Fusion	63
4.4.2	Medición de altura total de árboles en campo	67
4.5	Comparación de estados bajo distintos parámetros de vuelo	70
4.5.1	Análisis Exploratorio	70
4.5.2	Prueba de Friedman	72
V.	CONCLUSIONES	79
VI.	RECOMENDACIONES	80
VII.	BIBLIOGRAFÍA	81
VIII.	ANEXOS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características principales de los vehículos aéreos no tripulados de ala fija y multirotor.....	16
Tabla 2: Especificaciones técnicas resaltantes del RPAS Mavic 2 pro.....	17
Tabla 3: Configuración de parámetros de vuelo fotogramétrico para el RPAS Mavic 2 pro en el Jardín botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen	37
Tabla 4: Tratamientos a utilizar en la identificación y estimación de altura total en árboles	39
Tabla 5: Resumen de informe de vuelo fotogramétrico del RPAS Mavic 2 pro.....	51
Tabla 6: Indicadores de calidad del procesamiento fotogramétrico de 4 tratamientos de vuelo	52
Tabla 7: Porcentaje de ubicación de árboles por cada tratamiento de evaluación	59
Tabla 8: Árboles ubicados en sub-parcelas de densidad alta y densidad baja.....	62
Tabla 9: Estadísticos descriptivos de la variable altura total en base a 5 tratamientos	64
Tabla 10: Árboles evaluados en campo pertenecientes al Jardín botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen.....	67
Tabla 11: Estadísticos descriptivos de la altura en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen	70
Tabla 12: Prueba de Friedman para cinco tratamientos de medición de altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen	73
Tabla 13: Análisis Post Hoc de Friedman	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Transporter T3 (Izquierda) Vertex IV (Derecha).....	6
Figura 2: Vista del lado derecho(superior) e izquierdo(inferior) del Vertex.....	7
Figura 3: Partes del Transporter T3	7
Figura 4: Condiciones de tomas y puntos homólogos para fotogrametría	8
Figura 5: Método de observación anaglifo (Izquierda). Método de observación por polarización (Derecha)	9
Figura 6: Estereoscopio de bolsillo (Izquierda). Estereoscopio de espejos (Derecha).....	10
Figura 7: Concepto de la marca flotante de un punto homólogo en dos fotografías sucesivas	10
Figura 8: Paralaje estereoscópica	11
Figura 9: Clasificación de la fotogrametría	11
Figura 10: Proceso fotogramétrico digital	12
Figura 11: Fotografía digital mono banda	13
Figura 12: Clasificación de las fotografías según la inclinación del eje de toma y las deformaciones generadas.....	13
Figura 13: Geometría de las fotografías en base a la distancia focal	14
Figura 14: Perfil del Mavic 2 Pro	16
Figura 15: Plan de adquisición de fotografías en terrenos con variación del relieve	19
Figura 16: Vuelo fotogramétrico sobre terreno con variaciones de elevación	20
Figura 17: Importancia del recubrimiento o traslape en vuelos fotogramétricos	21
Figura 18: Planificación de vuelo para evaluar masas forestales	22
Figura 19: Representación del GSD para vuelos fotogramétricos	23
Figura 20: Parámetros a tomar en cuenta para definir el GSD deseado	24
Figura 21: Distribución de puntos de control para un proyecto de vuelo fotogramétrico... ..	25
Figura 22: Transformación de coordenadas en la orientación interna (Izquierda) Orientación interna con cámaras digitales (Derecha).....	27
Figura 23: Orientación relativa de un par estereoscópico	27
Figura 24: Condición de Colinealidad.....	28
Figura 25: Condición de Coplanariedad.....	28
Figura 26. Orientación absoluta del modelo.....	29
Figura 27: Interfaz del software Frugoviewer	31
Figura 28: Ubicación del Jardín botánico Octavio Velarde Núñez	32
Figura 29: Proceso metodológico para la estimación de altura total en árboles a partir de vuelos fotogramétricos	34
Figura 30: Interfaz de entrada de Pix4D capture 4.8.0	35
Figura 31: Interfaz de edición de parámetros de vuelo de Pix4D capture 4.8.0.....	35
Figura 32: Despegue del RPAS Mavic 2 pro	38
Figura 33: Chequeo post-vuelo del RPAS Mavic 2 pro	39
Figura 34: Configuración del proyecto en Pix4D Mapper	40
Figura 35: Ajustes generales del procesamiento inicial en Pix4D	41
Figura 36: Informe de calidad de la nube de puntos en Pix4D.....	42
Figura 37: Ajustes de MDS y Ortomosaico del procesamiento en Pix4D	43
Figura 38: Línea de comando de “GridSurfaceCreate”	43
Figura 39: Línea de comando de “CanopyModel”	44
Figura 40: Línea de comando de “CanopyMaxima”	45
Figura 41: Línea de comando de “PolyClipData”	45

Figura 42: Toma de coordenadas de árboles con GPS Garmin 64s	46
Figura 43: Medición de la altura de un árbol con vertex IV	47
Figura 44: Medición de altura de árboles con Vertex IV	47
Figura 45: Información del vuelo fotogramétrico realizado con el RPAS Mavic 2 pro	50
Figura 46: Ortomosaico del tratamiento C3	54
Figura 47: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C1 (Altura de vuelo 80 m - Ángulo de cámara:45°)	56
Figura 48: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C2 (Altura de vuelo 80 m - Ángulo de cámara:70°)	56
Figura 49: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C3 (Altura de vuelo 100 m - Ángulo de cámara:45°)	57
Figura 50: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C4 (Altura de vuelo 100 m - Ángulo de cámara:70°)	57
Figura 51: Localización de árboles del Jardín botánico de la UNALM.....	60
Figura 52: Ubicación espacial de árboles evaluados del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen.....	61
Figura 53: Ortofoto (Izquierda) e imagen Raster (Derecha) del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen	63
Figura 54: Perfil de altura total de árboles en el visualizador de datos lidar del software fusion	65
Figura 55: Modelos tridimensionales de árboles obtenidos del tratamiento C4	66
Figura 56: Distribución de altura en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez.	69
Figura 57: Histograma de frecuencias para los tratamientos de medición de altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen.....	71
Figura 58: Diagrama de cajas para los tratamientos de medición de altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen	72
Figura 59: Altura total medida con Vertex IV versus Altura total estimada con los tratamientos C1, C2, C3 y C4 de árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen	75

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES DEL HIPSOMETRO VERTEX	87
ANEXO 2: ESPECIFICACIONES DEL MAVIC 2 PRO	89
ANEXO 3: ENTRENAMIENTO EN EL USO DE INSTRUMENTOS DE MEDICION EN CAMPO	94
ANEXO 4: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAFICO DEL TRATAMIENTO RPAS C1.....	96
ANEXO 5: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAFICO DEL TRATAMIENTO RPAS C2.....	105
ANEXO 6: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAFICO DEL TRATAMIENTO RPAS C3.....	114
ANEXO 7: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAFICO DEL TRATAMIENTO RPAS C4.....	123
ANEXO 8: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C1	132
ANEXO 9: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C2.....	133
ANEXO 10: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C3.....	134
ANEXO 11: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C4.....	135
ANEXO 12: SISTEMATIZACIÓN DE DATOS OBTENIDOS	136
ANEXO 13: ARBOLES INDIVIDUALIZADOS	139
ANEXO 14: PRUEBA DE FRIEDMAN Y POST HOC FRIEDMAN.....	145

RESUMEN

La presente investigación se realizó en el Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez de la Universidad Nacional Agraria la Molina; distrito de la Molina, departamento de Lima. El objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial de los vuelos fotogramétricos con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) Mavic 2pro, bajo distintos parámetros de altura de vuelo y ángulo de cámara, en la ubicación y estimación de altura total en árboles. Se estableció 4 tratamientos a partir de vuelos fotogramétricos con RPAS, donde: RPASC1 represento al vuelo fotogramétrico realizado bajo parámetros de altura de vuelo de 80 metros y ángulo de cámara de 45 °; RPASC2 realizado a una altura de 80 metros y ángulo de 70°; RPASC3 realizado a una altura de 100 metros y ángulo de 45 °; RPASC4 realizado a una altura de 100 metros y ángulo de 70° y un tratamiento de medición de altura total en campo con GPS Garmin 64s y Vertex IV. Se generó ortofotos y nube de puntos densificada en el software Pix4D Mapper 4.4.12. Utilizando el software FUSION se ubicó y estimó la altura total de los árboles. Se realizó el análisis estadístico con una prueba de Friedman y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los resultados mostraron que el tratamiento RPASC1 ubicó al 76.8 % de árboles evaluados en campo, RPASC2 al 83.8 %, RPASC3 al 77.8% y RPASC4 al 88.9%. Así mismo, la prueba de Friedman evidenció la existencia de diferencia estadística entre los tratamientos usados para la estimación de altura de árboles con RPAS frente a la medición en campo, llegando a la conclusión que el tratamiento RPAS C4 es el único que no presenta diferencia estadística significativa en la estimación de altura en árboles frente a la medición en campo. Además, presentó un RMSE de 1.08 m.

Palabras clave

Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS); Fotogrametría; Pix4D; FUSION; nube de puntos SfM; Altura de árbol.

ABSTRACT

This research was carried out in the Octavio Velarde Núñez Botanical Garden of the La Molina National Agrarian University; La Molina district, Lima department. The objective of this research was to evaluate the potential of photogrammetric flights with remotely piloted aircraft systems (RPAS) Mavic 2pro, under different parameters of flight height and camera angle, in the location and estimation of total height in trees. Four treatments were established from photogrammetric flights with RPAS, where: RPASC1 represented the photogrammetric flight carried out under parameters of a flight height of 80 meters and a camera angle of 45 °; RPASC2 performed at a height of 80 meters and an angle of 70°; RPASC3 performed at a height of 100 meters and an angle of 45°; RPASC4 performed at a height of 100 meters and an angle of 70° and a total height measurement treatment in the field with GPS Garmin 64s and Vertex IV. Orthophotos and densified point cloud were generated in the Pix4D Mapper 4.4.12 software. Using the FUSION software, the total height of the trees was located and estimated. Statistical analysis was performed with a Friedman test and root mean square error (RMSE). The results showed that the RPASC1 treatment located 76.8% of trees evaluated in the field, RPASC2 at 83.8%, RPASC3 at 77.8% and RPASC4 at 88.9%. Likewise, the Friedman test showed the existence of a statistical difference between the treatments used to estimate the height of trees with RPAS compared to the field measurement, reaching the conclusion that the RPAS C4 treatment is the only one that does not present a statistical difference. significant in the estimation of height in trees compared to the measurement in the field. In addition, it presented an RMSE of 1.08 m.

Key words

Remote Piloted Aircraft System (RPAS); Photogrammetry; Pix4D; FUSION; SfM point cloud; Tree height.

I. INTRODUCCIÓN

La altura de los árboles representa una de las variables más significativas al evaluar los recursos forestales, ya que es uno de los insumos para la estimación del volumen, biomasa y carbono de un árbol o de un rodal (SERFOR, 2017). La medición directa y de precisión de esta variable disminuye en campo de manera proporcional a la densidad del rodal a evaluar, por la estructura propia de los árboles y del bosque o plantación al que pertenece. Por ello, se recurre a múltiples instrumentos y metodologías para su medición indirecta o estimación ocular (Cancino, 2007).

Es así que la medición de alturas, en especial la altura total en árboles, representa una de las variables más difíciles de recolectar en campo, que toma mayor tiempo y aun así presenta errores que pueden ser significativos al momento de realizar estimaciones de volumen, biomasa o carbono (Barrena & Llerena, 1988). Realizar la medición de la altura de árboles en campo con instrumentos como hipsómetros se traduce en un incremento en costos de evaluación, por lo cual se recurre a otras metodologías como la estimación ocular. Sin embargo, esta metodología es muy variable entre observadores, lo cual se traduce en errores mucho más grandes en volumen, biomasa y carbono (Imaña, 2011) los cuales terminan siendo parte de la problemática actual entre los propietarios, el ente encargado de la administración y el ente fiscalizador en la subestimación y sobreestimación de volúmenes maderables (OSINFOR, 2012).

Los Sistema de Aeronaves Pilotada a Distancia (RPAS) han obtenido avances significativo frente a los métodos tradicionales de “teledetección”, hoy en día los RPAS tienen la capacidad de recolectar información de alta resolución por debajo de la cubierta de nubes, pueden llegar a ser muy portables (Carretero, 2015) y realizar sobrevuelos con múltiples sensores como RGB, Lidar, Térmico (García, 2017), características que resultan útiles al momento de realizar evaluaciones forestales, en especial al permitir la reconstrucción tridimensional de estructuras boscosas con la ayuda de softwares especializados como Pix 4D, Agisoft Photoscan, entre otros. La reconstrucción tridimensional de objetos se realiza a

partir de principios de la fotogrametría clásica como la estereoscopia, paralaje y el principio de la marca flotante, los cuales con la aparición de nuevas herramientas como los RPAS evolucionan a la fotogrametría digital aérea que se basa en vuelos fotogramétricos con RPAS que aplican estos principios básicos en procesos computarizados más complejos y semiautomáticos los cuales llegan a hacer de la fotogrametría digital aérea una fuente de información del estado de los bosques y en especial de la variable altura total de árboles.

Por lo expuesto anteriormente, el propósito de esta investigación es evidenciar el aporte de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), en especial modelos portátiles y económicamente accesibles, como herramientas innovadoras en la medición de atributos de los árboles en menor tiempo y la reducción de errores de medición. Además, supone un soporte teórico necesario en la fotogrametría aplicado al sector forestal en la búsqueda de una combinación óptima entre el uso de RPAS y mediciones en campo para la estimación de altura, demostrando la entrega de datos valiosos por parte de técnicas fotogramétricas con RPAS multirrotores.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

Ojeda & Terrazas (1987) evidenciaron las bondades de las fotografías aéreas en la estimación del volumen maderable de bosques mixtos, concluyendo que la técnica de muestreo doble por regresión haciendo uso de fotografías aéreas es una alternativa confiable en la estimación de volúmenes maderables en bosques. Resaltaron que, para el éxito de esta técnica, las fotografías aéreas tienen que tener una escala constante, ser recientes y con revelado de calidad.

Con la aparición de los sistemas de aeronaves piloteadas a distancia (RPAS) y la incorporación de cámaras fotográficas en estas, se dio inicio a una nueva etapa de obtención de atributos del bosque. Dandois & Ellis (2013) utilizaron una cámara de bajo costo montada en un RPAS para sobrevolar un área de 6.25 ha en el campus de la Universidad del condado de Maryland Baltimore con el objetivo de evaluar la dinámica fenológica en la estructura del dosel. Llegaron a la conclusión que el uso de los RPAS representa una opción económica y con aplicaciones diversas en la evaluación de los recursos forestales.

Puliti, Ørka, Gobakken, & Næsset (2015) hicieron uso de los RPAS para la obtención de variables dasométricas propias de inventarios forestales, se demostró que los RPAS pueden proporcionar información propia de inventarios forestales en campo de una forma precisa y oportuna a escala local, proponiendo que próximos inventarios se realicen con la asistencia de RPAS.

Claros (2019) utilizó fotografías aéreas tomadas con un RPAS para estimar el volumen de árboles estableciendo ecuaciones de volumen a través de la relación diámetro de copa-diámetro a la altura del pecho, concluyendo que los RPAS son herramientas útiles para la estimación de volumen en árboles, resaltando el ahorro en tiempo y costos de trabajo en campo.

2.2 Altura

Se la define como la longitud de línea recta que va desde la base del fuste hasta algún punto del árbol (Cancino, 2007), probablemente la altura es uno de los parámetros menos estudiados y uno de los más difíciles de medir o evaluar (Malleux, 1982), estas mediciones casi siempre están sesgadas, ya que es difícil valorar el tamaño vertical de objetos con alturas mayores a 10 metros (Chave, 2005). La altura es una de las variables de importancia que se mide en las diferentes formas de vida vegetal (Ministerio del Ambiente, 2015).

FAO (1974, como se citó en Barrena & Llerena, 1988) consideran a la altura como una variable importante debido a:

- La altura del árbol conjuntamente con el diámetro y la forma del fuste, permiten estimar el valor de volumen.
- Refleja la calidad del sitio.
- Nos permite caracterizar la estructura de la población arbórea.

2.2.1 Tipos de altura

FAO (1974, como se citó en Barrena & Llerena, 1988) distingue los siguientes tipos de altura:

- **Altura total:** Es la medida considerada desde el suelo hasta la cima de su copa o corona.
- **Altura del fuste:** Es la medida del árbol desde el suelo hasta el inicio de la ramificación. Se utiliza para estimar el volumen maderable, biomasa y carbono del suelo.

- Altura comercial: distancia medida desde el nivel de suelo y la última porción que pueda ser usada del árbol.
- Altura de tocón: Medida desde el nivel del suelo hasta la posición basal del fuste que fue cortado.

2.2.2 Medición de altura

La medición de atributos de los árboles, como la altura, abarca los datos e información recolectados durante la medición de individuos arbóreos y la descripción del bosque (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR], 2017), implica la comparación de un elemento frente un patrón estandarizado, esta comparación implica un contacto físico, óptico o de otra naturaleza. Si la comparación se realiza de forma directa con el patrón se denomina medición directa y si la comparación se realiza por medio de soluciones geométricas o trigonométricas se denomina medición indirecta (Prodan, Peters, Cox, & Real, 1997).

2.2.3 Instrumentos para la medición de altura

La medición de árboles se puede realizar de forma directa (árboles menores a 15 m) mediante cintas y varas telescópicas o de forma indirecta (altura mayor a 15 m) se realiza mediante instrumentos denominados hipsómetros (O. Garcia, 1995), estos miden la altura en base a relaciones de lados de triángulos semejantes (Christen y Merrit) o en base a tangentes de ángulos (Haga, Blume-Leiss y Suunto) (Cancino, 2007).

La medición indirecta de la altura de los árboles a partir de hipsómetros es muy lenta, por lo tanto, es costosa. Se sustituye en algunos casos donde no es indispensable la precisión con un método denominado estimación ocular, este método es engañoso y puede producir errores considerables (Barrena & Llerena, 1988) para ambos casos se recomienda realizar la medición de las alturas a una distancia de medición que sea por lo menos igual a la altura del árbol (Philip, 1983). En otros casos se hace uso de instrumentos más avanzados denominados Vertex, el cual hace uso de impulsos electrónicos para obtener la altura de árboles a diferentes distancias y de forma más rápida (Zuñiga, 2014).

2.2.4 Hipsómetro Vertex IV

Este instrumento se compone dos unidades, como se aprecia en la **Figura 1**, el hipsómetro propiamente y su emisor, para usarlo se fija al árbol y luego desde una distancia cualquiera se apunta al emisor hasta que en la pantalla aparezca la distancia horizontal, luego se apunta a la copa, se oprime el botón y se lee la altura requerida, permite registrar hasta tres alturas diferentes (Zuñiga, 2014).



Figura 1: Transporter T3 (Izquierda) Vertex IV (Derecha)

a. Características generales

Según Zuñiga (2014) las características resaltantes de este instrumento son:

- La humedad, la presión del aire, los ruidos de los alrededores y, sobre todo, la temperatura puede afectar el rango y la extensión de las señales ultrasónicas.
- El instrumento Vertex tiene incorporado un sensor de temperatura que automáticamente compensa las divergencias causadas por variaciones en la temperatura.
- En algunos casos, distancias de 40 metros o más pueden ser medidas sin problemas, y en otros casos, la máxima distancia puede ser menor que 30 metros.

b. Partes del Vertex IV

El Vertex IV está conformado por el hipsómetro propiamente (**Figura 2**), el cual es usado por el operario para medir la altura del árbol y el emisor (**Figura 3**), el cual se fija al árbol para emitir y recibir los impulsos eléctricos (Zuñiga, 2014).

- Vertex

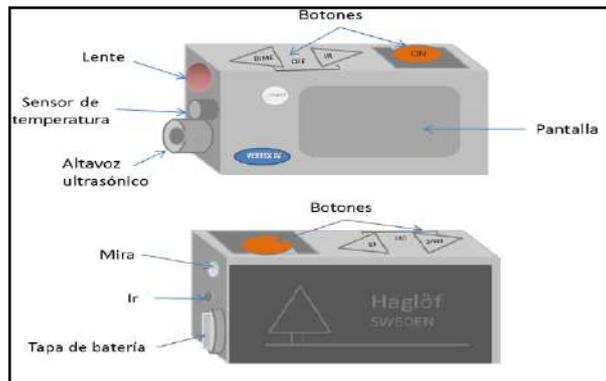


Figura 2: Vista del lado derecho(superior) e izquierdo(inferior) del Vertex

Fuente: Zúñiga (2014). Manual práctico del uso del Vertex para inventarios forestales

- Transporter T3

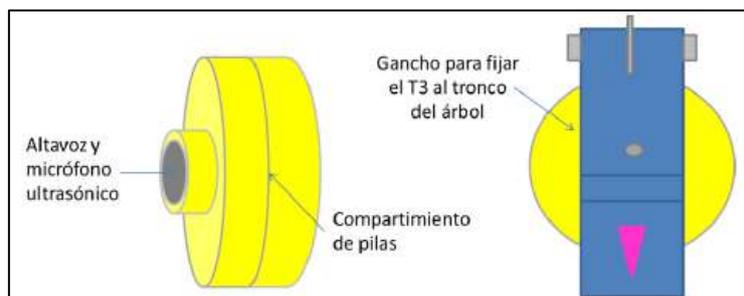


Figura 3: Partes del Transporter T3

Fuente: Zúñiga (2014). Manual práctico del uso del Vertex para inventarios forestales

2.3 Fotogrametría clásica

2.3.1 Definición

La fotogrametría se basa en la toma de fotos con una superficie del terreno en común para ser observada desde dos puntos de vista diferentes, esta área de terreno en común se denomina recubrimiento (Centro de Geociencias Aplicadas, 2014).

Para Pacheco & Pozzobon (2011) la fotogrametría debe permitir la realización de mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías y de esta manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del objeto fotografiado. En general, la fotogrametría se basa en 3 principios básicos: Estereoscopia, el principio de la marca flotante y paralaje.

2.3.2 Estereoscopia

La estereoscopia es una ciencia que trata con modelos en tres dimensiones y los métodos por los que este fenómeno se produce (Otero, Ezquerria, Rodriguez, & Martín, 2010). Se basa principalmente en la convergencia de dos imágenes de un mismo objeto, el cual es visto desde diferentes posiciones, como se puede apreciar en la **Figura 4**, obteniendo como resultado una percepción en tres dimensiones (Braulio Vite, 2005).

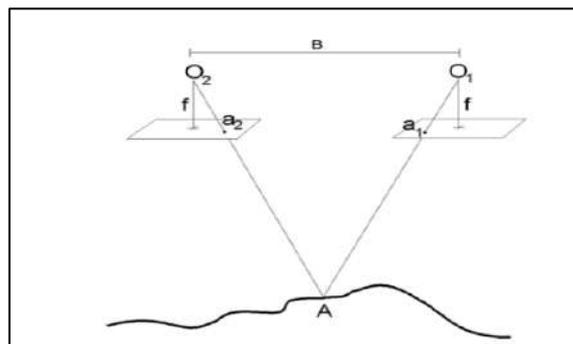


Figura 4: Condiciones de tomas y puntos homólogos para fotogrametría

Fuente: Sánchez (2014). Introducción a La Fotogrametría

La fotogrametría se basa en el principio de estereoscopia para conseguir que mediante fotografías del terreno tomadas desde dos puntos de vista (fotogramas consecutivos con una parte en común denominada recubrimiento) y bajo unas ciertas condiciones se logre obtener una sensación tridimensional de la zona (Sánchez, 2014). La visión estereoscópica se puede lograr mediante la observación con ejes convergentes (Quirós, 2014) y mediante la observación con ejes paralelos (Braulio Vite, 2005).

- a. **Observación con ejes convergentes:** es el método normal de observación, en la **Figura 5** se aprecia como las dos fotografías están superpuestas es necesario hacer la observación a través de filtros para que cada ojo reciba una sola imagen (Quirós, 2014).

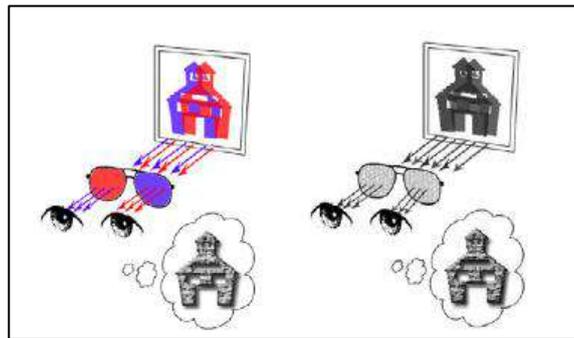


Figura 5: Método de observación anaglifo (Izquierda). Método de observación por polarización (Derecha)

Fuente: Quirós (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

- b. **Observación con ejes paralelos:** Este método es cansado debido a que los ojos convergen al infinito. Se usan lentes y las fotografías se colocan a una distancia igual a la distancia focal. La **Figura 6** presenta los métodos más conocidos a través de estereoscopios de bolsillo y estereoscopios de espejos (Braulio Vite, 2005).



Figura 6: Estereoscopio de bolsillo (Izquierda). Estereoscopio de espejos (Derecha)

Fuente: Braulio, C. (2005). Principios básicos de la fotogrametría actual

2.3.3 Principio de la marca flotante

Al observar un par estereoscópico de fotografías se colocan marcas idénticas sobre puntos homólogos ubicados en cada una de las fotos, las dos marcas serán vistas como una sola “marca flotante” integrada al modelo estereoscópico, formando aparentemente parte de la imagen a la misma altura de la zona en la que se encuentra (**Figura 7**). Al mover las marcas con respecto a la otra en dirección paralela a la línea de toma, se verá a la marca flotante subir y bajar con respecto al terreno, este principio tiene importantes repercusiones en todo el proceso teórico y práctico de la fotogrametría (Braulio Vite, 2005).

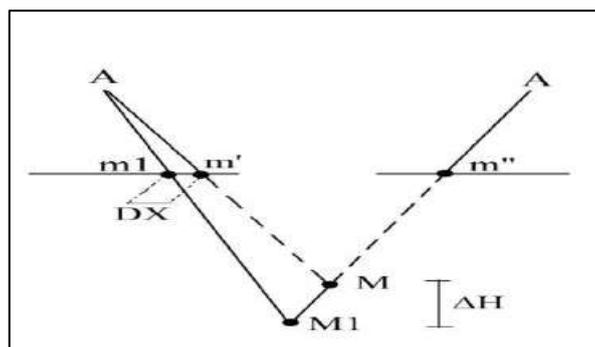


Figura 7: Concepto de la marca flotante de un punto homólogo en dos fotografías sucesivas

Fuente: Sánchez (2014). Introducción a la fotogrametría

Cabe resaltar que independientemente del sistema a utilizar en el proceso fotogramétrico, la medición de la altitud en cualquier sistema se hace gracias al principio de la marca flotante (Sánchez, 2014).

2.3.4 Paralaje

Se denomina paralaje de un punto a la diferencia de abscisas en valor absoluto de la imagen del punto en dos fotogramas consecutivos (Santamaria & Sanz, 2011). En otras palabras, es el desplazamiento relativo que sufre dicho objeto al ser observado desde dos puntos de vista diferentes (**Figura 8**). Es posible verificarlo realizando un ejercicio que consiste en observar alternadamente un lápiz con un ojo y luego con el otro; así es posible distinguir ese desplazamiento relativo (Sánchez, 2014).

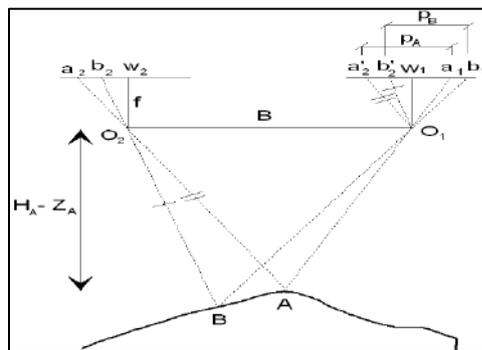


Figura 8: Paralaje estereoscópica

Fuente: Sánchez, J. (2014). Introducción a la fotogrametría

2.3.5 Clasificación de la fotogrametría

La **Figura 9** muestra los aspectos en los cuales puede clasificarse la fotogrametría:



Figura 9: Clasificación de la fotogrametría

Fuente: Centro de Geociencias Aplicadas (2014). Principios de fotogrametría I

2.4 Fotogrametría digital aérea

La evolución de la fotografía analítica a la digital supone un cambio en instrumentación, el proceso fotogramétrico y los resultados (Zelaya, Aguiar, Cruz, & Ricardo, 2016). Se basa en la entrada de datos en formato digital, reconstruyendo así el modelo de forma numérica o digital (Tacca Qquelca, 2015); pasando por un procesamiento casi completamente automatizado y el uso de softwares especializados; finalmente una salida en formato enteramente digital. La segunda y tercera fase suelen desarrollarse casi siempre de la misma forma y es en la primera donde puede haber variaciones y condiciones (Zelaya et al., 2016).

El proceso fotogramétrico digital aéreo se presenta en la **Figura 10**:

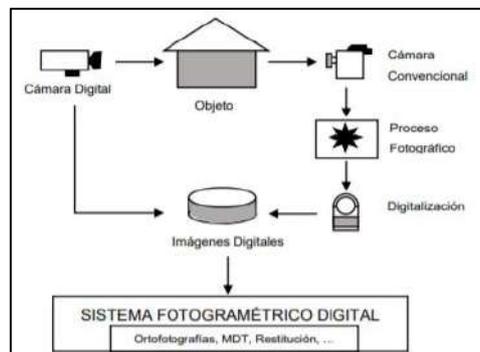


Figura 10: Proceso fotogramétrico digital

Fuente: Zelaya et al., (2016). Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados

2.4.1 La fotografía digital

La fotografía digital consiste en la obtención de imágenes mediante una cámara que posee un sensor electrónico que dispone de distintas unidades fotosensibles las cuales aprovechan el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en una señal eléctrica, la cual es digitalizada y almacenada en una memoria (Zelaya et al., 2016). La imagen capturada es una matriz (x,y) donde x e y son las coordenadas en elementos diferenciales de imagen llamado pixel (**Figura 11**) que tienen como atributo cierto valor que hace referencia a un nivel en una escala de grises, es decir, cada pixel tiene un valor denominado Nivel Digital (Sánchez, 2014). Las fotografías digitales no son equivalentes a un mapa, debido a que esta última se basa en una proyección ortogonal (Neira, 2005).

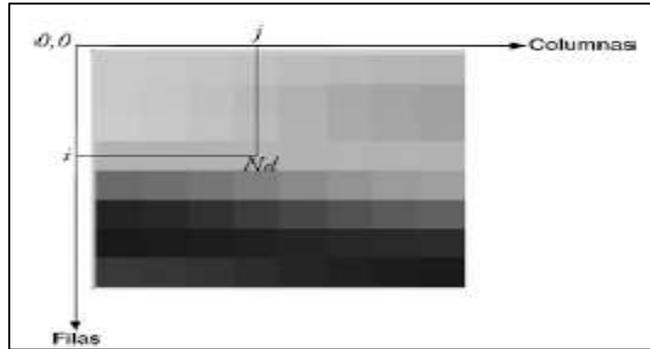


Figura 11: Fotografía digital mono banda

Fuente: Quirós (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

2.4.2 Tipos de fotografías digitales

a. Por el ángulo de la cámara

Jauregui (s.f.) define tres tipos de fotografías por el ángulo de cámara (**Figura 12**):

- Verticales: La inclinación del eje principal con respecto a la vertical es menor de cinco grados. Se aprecia mayor uniformidad en la escala.
- Oblicuas: La inclinación del eje principal es mayor de cinco grados, pero no se observa el horizonte.
- Muy oblicua: En estas fotografías se observa el horizonte; su escala varía mucho, presentando deformación en forma de trapecio.

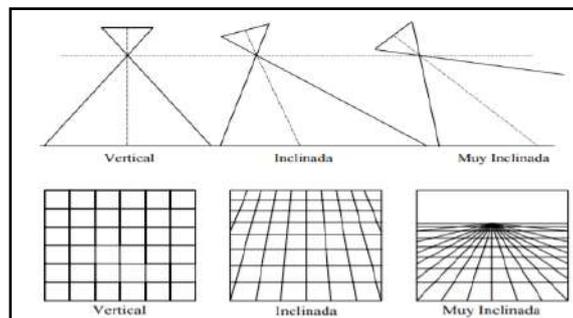


Figura 12: Clasificación de las fotografías según la inclinación del eje de toma y las deformaciones generadas

Fuente: Jauregui (s.f.). Fotogrametría básica

b. Por la distancia focal

Jauregui (s.f.) y Otero et al. (2010) coinciden en definir cuatro tipos de fotografías de acuerdo a la distancia focal usada en la cámara (**Figura 13**):

- Normal: Se denomina normal a aquellas que abarcan un ángulo aproximado de 77° similar al ojo humano.
- Gran angular: Abarca un ángulo aproximado de 95° , hace parecer menores a los objetos situados a distancia y presenta perspectivas exageradas.
- Super gran angular: Abarca un ángulo de 122° , cubren más terreno, su empleo es aconsejable en casis en los que se precisen escalas grandes, ya que la precisión métrica es inferior.
- Teleobjetivos: Abarca un ángulo menor a los 75° .

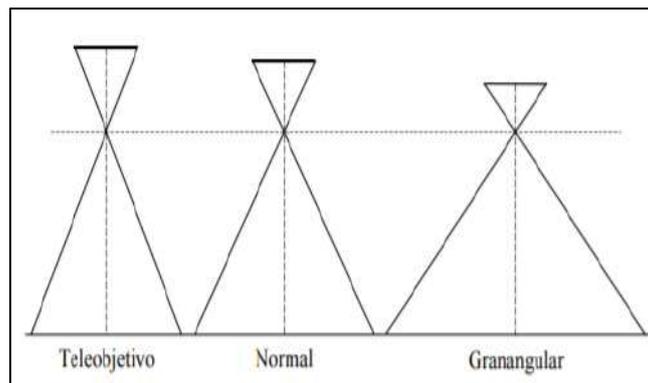


Figura 13: Geometría de las fotografías en base a la distancia focal

Fuente: Jauregui (s.f.). Fotogrametría básica

2.5 Sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)

2.5.1 Definición

Para la Dirección General de Aeronautica Civil (2015) se define como un RPA a aquella aeronave pilotada por un “piloto remoto”, el RPA requiere de una estación ubicada fuera de la aeronave (es decir en tierra, en barco, en otra aeronave, en el espacio), el cual lo monitorea y tiene responsabilidad directa de la conducción segura de la aeronave durante todo su vuelo.

El Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS), abarca la implementación de elementos configurables al RPA, el establecimiento de los enlaces de mando y control del mismo (Dirección General de Aeronautica Civil, 2015).

2.5.2 Partes de un RPAS

Las partes básicas de un RPAS según García (2017), son:

- a. Motores y ESC: Vienen a ser los componentes fundamentales para mantener el vehículo en el aire, el control electrónico de velocidad (ESC) regula la potencia eléctrica que ira a los motores por lo tanto la velocidad de giro del eje para elevar o descender al RPAS.
- b. Controlador de vuelo: Detecta y controla todos los componentes electrónicos, se lo denomina el cerebro del RPAS.
- c. Mando o control remoto: Dispositivo con un par de palancas multidireccionales para introducir los movimientos que realiza el RPAS.
- d. Baterías: encargado de proporcionar de energía a la aeronave para que realice todas sus funciones.

De acuerdo al nivel de avance tecnológico del RPAS, pueden incluir sistemas de posicionamiento global, sensores de proximidad, unidades de medición inercial y la capacidad de incorporar más sensores al sistema (DJI, 2019).

2.5.3 Tipos de RPA

Dentro de la clasificación de aeronaves existen los aerostatos (globos aerostáticos y dirigibles) y los aerodinos, dentro de este último se encuentran los RPA (Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, 2015). En la **Tabla 1** se aprecia como los RPA se pueden clasificar según su principio de sustentación en ala fija y multirotor (Tabuchi, 2015).

Tabla 1: Características principales de los vehículos aéreos no tripulados de ala fija y multirrotor

CARACTERISTICAS	ALA FIJA	MULTIROTOR
Vuelo estacionario	No posee	Muy bueno
Velocidad de desplazamiento	Muy bueno	Regular
Maniobrabilidad	Malo	Muy bueno
Autonomía de vuelo	Bueno	Regular
Resistencia al viento	Muy bueno	Bueno
Estabilidad	Bueno	Bueno
Capacidad de vuelo vertical	No posee	Muy bueno
Capacidad de vuelo en interiores	No posee	Muy bueno
Techo de vuelo	Muy bueno	Regular
Costo	Muy elevado	Regular

Fuente: Elaboración propia.

2.5.4 Mavic 2 pro

El Mavic 2 pro es un RPAS multirrotor fabricado por la empresa china DJI (**Figura 14**), lanzado al mercado en el 2018 como un avance en tecnología de vehículos aéreos no tripulados por características resaltantes (**Tabla 2**), por ejemplo incorporar sensores de proximidad, alcance de hasta 8 km y ser uno de los RPAS más pequeños del mercado con una cámara RGB de gran calidad de imagen (DJI, 2019).



Figura 14: Perfil del Mavic 2 Pro

Fuente: DJI (2019). Mavic 2 pro/zoom User manual v2.0

Tabla 2: Especificaciones técnicas resaltantes del RPAS Mavic 2 pro

CARACTERISTICAS	MAVIC 2 PRO
Dimensiones	91x214x84 mm
Peso	907 gr
Altura máxima de vuelo	6000 msnm
Batería	31 minutos, intercambiables
Velocidad de vuelo máxima	72 km/h
Frecuencia de funcionamiento	2,4 y 5,5 Ghz
GNSS	GPS y Glonass
Sistema de detección	Detección de obstáculos omnidireccional
Cámara	Hasselblad
Sensor	Sensor 1” CMOS 20MP
Shutter	Electrónico
Fotografía	Resolución máxima 5472 x 3648
Precio	6000 soles

Fuente: Mavic 2 Pro / Zoom User manual v2.0. Copyright 2019 DJI.

2.6 Proyectos de vuelos fotogramétricos con RPAS

Se denomina proyecto de vuelo fotogramétrico al conjunto de cálculos previos a la ejecución de un vuelo fotogramétrico y a la adquisición de fotografías aéreas en el área de interés, así como de todas las actividades topográficas requeridas para mejorar la precisión del mismo; mediante los cuales se organiza la operación para conseguir un producto fotogramétrico propuesto, es decir, un proyecto de vuelo fotogramétrico involucra las actividades de cálculos previos al plan de vuelo, elaboración del plan de vuelo y la ejecución del vuelo en campo. (Zelaya et al., 2016).

El uso de vehículos aéreos no tripulados para realizar vuelos fotogramétricos usa el principio de visión binocular (estereoscopia) y el cambio de visión de un objeto que se está viendo en movimiento (paralaje), sirve para generar Objetos en 3D a partir de fotografías superpuestas, comúnmente se usa para la reconstrucción y generación de nube de puntos densa de una

superficie partiendo de imágenes en formato digital y un producto final en el mismo formato (Iglhaut et al., 2019).

Como antecedentes del uso y aplicabilidad de los RPAS para la estimación de altura en árboles, Panagiotidis, Abdollahnejad, Surový, & Chiteculo (2017) hicieron uso de los RPAS en inventarios forestales. En este estudio se propuso estimar la altura de los árboles y el diámetro de las copas a través de vuelos fotogramétricos con RPAS para generar modelos 3D generados. Se concluyó que la precisión de los resultados fue aceptable y los métodos factibles para su aplicación.

Balenović, Jurjević, Milas, & Gašparović (2019) evaluaron la aplicabilidad del uso de RPAS en la estimación de altura en árboles, encontrando valores de hasta 80 cm de RMSE entre los valores medidos en campo y los estimados a partir de vuelos fotogramétricos con RPAS.

En Perú, instituciones públicas como universidades a través de estudios en el uso de fotografías aéreas para estimar volúmenes maderables en bosque (Claros Canales, 2019), el Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP) a través de cursos y talleres sobre el uso de vehículos aéreos no tripulados en el mapeo de vegetación (Tagle, 2019) vienen haciendo uso de los RPAS para evaluar los atributos del bosque. Sin embargo, en cuanto al estudio de los parámetros de vuelo, su influencia en la precisión de modelos y estimación de altura total en árboles, no se encuentran antecedentes en Perú, por lo tanto, este estudio tiene carácter preliminar y de generar una línea base para próximas investigaciones en el país, considerando a los parámetros de vuelo fotogramétrico como parte trascendental al momento de elaborar y ejecutar proyectos fotogramétricos con RPAS orientados a la estimación de altura en árboles.

2.6.1 Cálculos previos al plan de vuelo

a. Tipo de Terreno

La fisiografía del terreno influye en la escala de las fotografías obtenidas en el vuelo fotogramétrico, cuando se tiene un terreno uniforme la escala fotográfica será similar en toda la foto (López de la Sierra, 2014).

Zelaya (2016) recomienda tomar en cuenta las siguientes características del terreno al momento de realizar el plan de vuelo:

- Ejecutando un solo vuelo a una altura constante independientemente de los cambios de altitud en el terreno, se tendrá una variación de la escala en el proyecto (mayor en el punto más bajo) y en el traslape (**Figura 15a**).
- Ejecutando varios vuelos a diferentes alturas, Estos deberán ejecutarse con las líneas de vuelo perpendiculares a la pendiente del terreno y se debe mantener un buen traslape entre vuelos. Para este caso la escala se mantendrá casi constante para el proyecto (**Figura 15b**).
- Realizando un vuelo único siguiendo la variación de la elevación del terreno, este método brinda mejores resultados ya que la escala se mantendrá constante para el proyecto (**Figura 15c**).

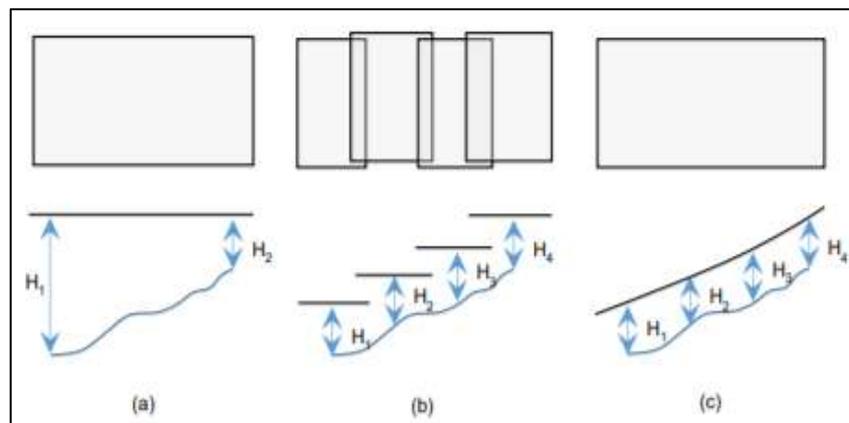


Figura 15: Plan de adquisición de fotografías en terrenos con variación del relieve

Fuente: Zelaya (2016). Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados

b. Condiciones atmosféricas

Resulta importante para el éxito de un proyecto de vuelo fotogramétrico tener un registro completo de las condiciones atmosféricas del día y las horas aproximadas en las que se desea realizar los vuelos (Otero et al., 2010).

c. Variaciones en la distancia focal

Es importante usar la misma distancia focal en todas las fotografías. La elección se hace en base a las exigencias de precisión y condiciones económicas (Otero et al., 2010).

2.6.2 Plan de vuelo

Establecer un plan de vuelo se define como aquellas actividades de configuración de los parámetros de vuelo de la aeronave, para que, en la etapa de campo, la aeronave se desplace de forma automatizada sin la intervención directa del piloto (Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, 2015).

a. Altura de vuelo

También conocido como *Altitude above Ground Level* (AGL) que viene a ser la altura sobre el nivel del terreno donde se tomaran las fotografías (Ruiz, 2013). En el proceso fotogramétrico, se recomienda que las fotografías sean capturadas a la misma altura de vuelo ya que tendrán el mismo GSD, usando la misma cámara. Las fotografías tendrían el mismo nivel de detalles y facilita la coincidencia de puntos significativos entre fotografías para lograr una mejor reconstrucción (Zelaya et al., 2016).

La **Figura 16** presenta las variaciones de la altura de vuelo en un terreno con variación de elevación.

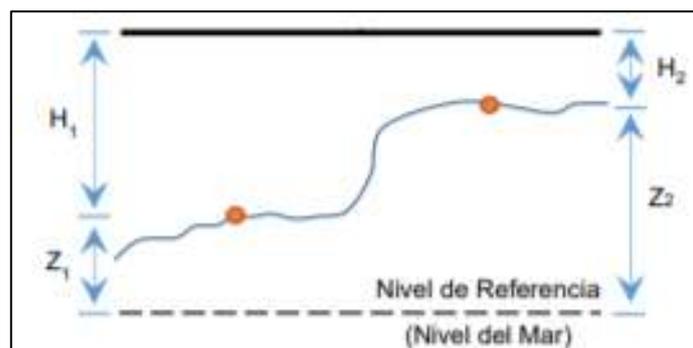


Figura 16: Vuelo fotogramétrico sobre terreno con variaciones de elevación

Fuente: Zelaya (2016). Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados

b. Ángulo de la cámara

Usar el ángulo de cámara en vertical ofrece fotografías con menor distorsión y abarca una porción menor del terreno en comparación con fotografías captadas con ángulo de cámara horizontales, la cual obtiene una mayor porción del terreno y a su vez incrementa la distorsión de la fotografía (Ruiz, 2013).

c. Recubrimiento o traslape

Al realizar vuelos con RPAS se busca establecer zonas comunes entre las fotografías (Ruiz, 2013). En la fotogrametría digital con el uso de RPAS es necesario un incremento en el traslape entre fotografías, ya que las cámaras de los RPAS no son cámaras métricas y contienen el error conocido como “ojo de pez” (Otero et al., 2010).

La **Figura 17** representa los diferentes recubrimientos o traslapes que se pueden observar en el desplazamiento del RPA a momento de ejecutar el plan de vuelo.

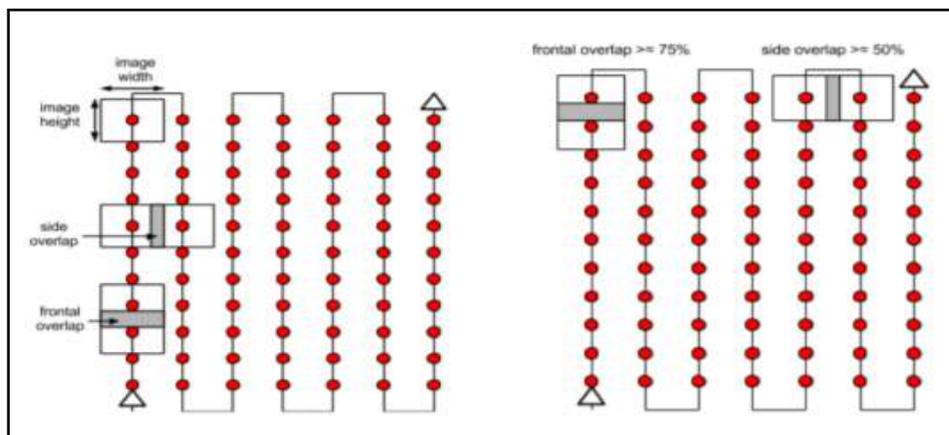


Figura 17: Importancia del recubrimiento o traslape en vuelos fotogramétricos

Fuente: Pix4D (2017). USER MANUAL Pix4Dmapper 4.1

d. Ajuste de traslape

Zelaya et al. (2016) sustenta que en la fotogrametría digital se hace uso de software que se encargan de la búsqueda de forma automática de puntos comunes entre fotografías de las

cuales se generará un punto 3D. por lo tanto mientras mayor sea el traslape se podrá identificar más puntos significativos entre sí, cuantas más coincidencias, se obtendrá mayor precisión en los puntos 3D. Para evitar fallas y en especial para generar modelos 3D en bosques o masas forestales, que a menudo tienen apariencia muy diferente entre fotografías traslapadas debido a su compleja geometría

Zelaya et al. (2016) sugiere las siguientes condiciones de recubrimiento:

- Adquisición de fotografías en doble rejilla.
- Aumentar la superposición entre fotografías al menos 80 % de la superposición frontal y 70% de superposición lateral.
- Aumentar la altura de vuelo, ya que a mayor altura menor distorsión de la perspectiva

En la **Figura 18** se sugiere el recorrido y traslape adecuado para planes de vuelo que tienen el objetivo de evaluar masas forestales.

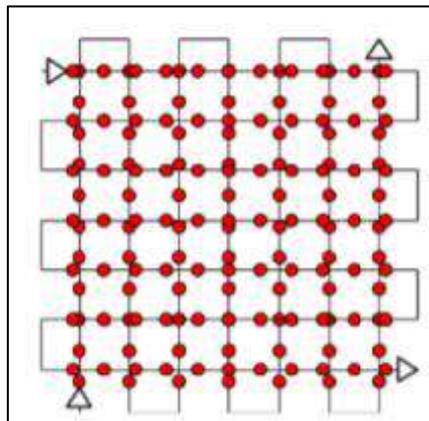


Figura 18: Planificación de vuelo para evaluar masas forestales

Fuente: Pix4D (2017). USER MANUAL Pix4Dmapper 4.1

e. Velocidad del RPAS

De acuerdo al modelo de RPAS que se utiliza para realizar el proyecto fotogramétrico existen valores estándar para lograr un buen contraste y nitidez. Los valores más comunes de velocidad van desde los 5 hasta los 15 m/s (Pix4D, 2017a).

f. GSD

Proviene del inglés *Ground Sample Distance* o distancia de muestreo en el terreno. Se la define como la distancia medida entre centros de los píxeles en el terreno (**Figura 19**), es decir si se tiene una imagen con un GSD de un metro, 1 píxel de la imagen abarca la superficie de 1m^2 ($1 \times 1\text{m}$) en el terreno (López de la Sierra, 2014).

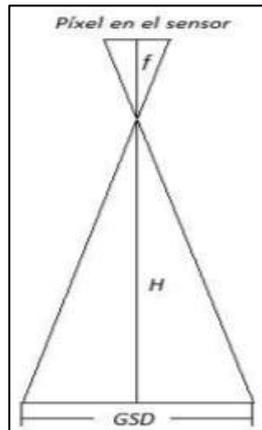


Figura 19: Representación del GSD para vuelos fotogramétricos

Fuente: López de la Sierra (2014). Planificación de vuelos fotogramétricos para uav sobre cliente qgis

Los vuelos fotogramétricos suelen ejecutarse con resoluciones en el rango de 1 a 10 cm/píxel y alturas de vuelo entre 60 y 200 metros. El GSD está relacionado a otros factores que presentan en la siguiente ecuación (Zelaya et al., 2016).

$$\text{GSD} = \frac{H \times S_w \times 100}{f_c \times \text{Ancho}_{\text{imagen}}}$$

Donde:

H: altura de vuelo (m)

Sw: ancho del sensor óptico (mm)

F_c: Distancia focal (mm)

Ancho_{imagen}: Ancho de la imagen (pixel)

Por lo tanto, el GSD estará definido en base a los parámetros de la **Figura 20**:

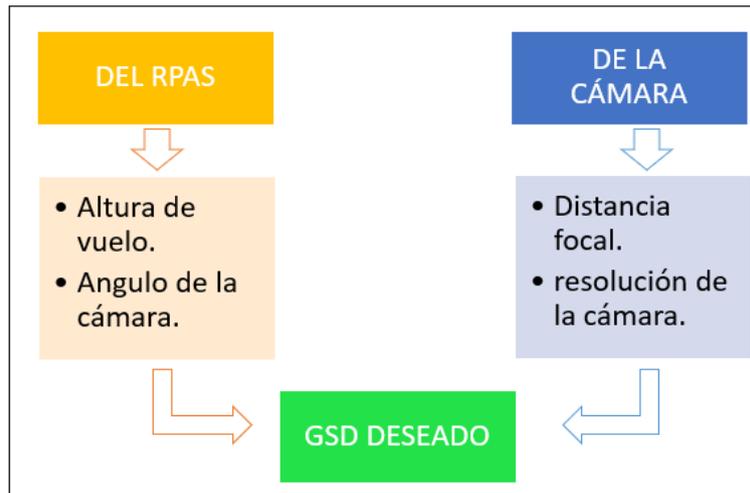


Figura 20: Parámetros a tomar en cuenta para definir el GSD deseado

g. Apoyo topográfico

Pix4D (2019) señala que el apoyo topográfico mediante puntos de control y puntos de apoyo en el terreno es importante para mejorar la precisión del proyecto (**Figura 21**), sin embargo, es necesario aclarar los tipos de precisiones que se pueden observar en los proyectos fotogramétricos:

- Precisión relativa: Es la precisión derivada de la comparación de las características dentro de una reconstrucción. Por ejemplo, si el modelo de un edificio muestra ventanas separadas por dos metros de distancia, y esta es la misma distancia en el edificio real, el modelo tiene una alta precisión relativa.
- Precisión absoluta: Es la precisión de la reconstrucción en relación con su posición real en el planeta. Si el mismo modelo del edificio no está en el lugar correcto en el mapa de base, significa que la precisión absoluta es baja, incluso si tiene una alta precisión relativa.

Es decir, la proporción de los objetos en el modelo 3D estará relacionado a la precisión relativa del proyecto, por otro lado, para que el proyecto sea correctamente referenciado debe de tener una elevada precisión absoluta, por lo tanto, se requiere del apoyo topográfico para la incorporación de puntos de control y puntos de apoyo (López de la Sierra, 2014).

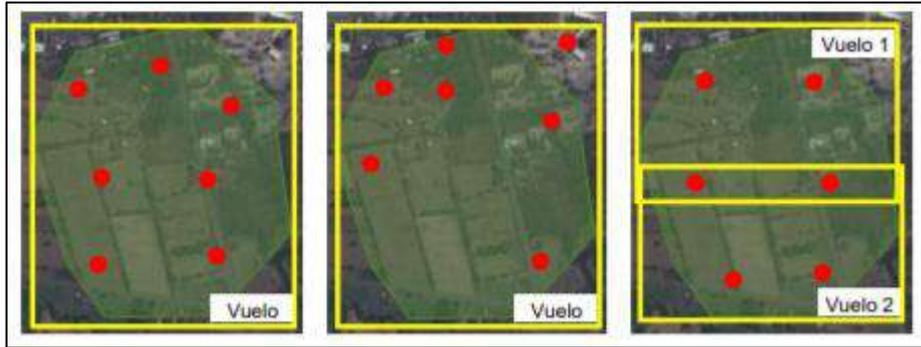


Figura 21: Distribución de puntos de control para un proyecto de vuelo fotogramétrico

Fuente: Zelaya (2016). Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados

En áreas que son inaccesibles, donde no se puede colocar puntos de control en tierra y se requiere una elevada precisión absoluta un estudio realizado por Tomaščík, Mokroš, Surový, Grznárová, & Merganič (2019), probó que los RPAS en modo de vuelo RTK Y PPK, las cuales son técnicas de corrección del posicionamiento GPS, RTK (Real Time Kinematic) realiza la corrección en tiempo real y PPK(Post Processed Kinematic) realiza la corrección posteriormente, obtienen precisiones absolutas muy buenas y en algunos casos superior a la que se obtiene con puntos de control.

2.6.3 Vuelo fotogramétrico en campo

El vuelo fotogramétrico consiste en ir a campo y realizar las actividades necesarias para la adquisición de las fotografías que servirán para el procesamiento del proyecto fotogramétrico. Carretero (2015) recomienda tomar en cuenta:

- a. **Chequeo pre vuelo:** Antes de realizar el vuelo fotogramétrico se tiene que verificar que se cuentan con todos los componentes y condiciones necesarios para realizar el vuelo.
- b. **Preparación del equipo:** Consiste en el armado del RPAS y comprobar el estado de la aeronave, así como de la cámara, es decir, calibrar el RPAS, comprobar el modo de vuelo, verificar la conexión entre el radio control y la aeronave, verificar el estado de la batería. Con la aeronave lista para despegar se procede a verificar el estado de la cámara, la velocidad de obturación, apertura y la ISO se deben establecer en

automático, limpiar la lente, verificar la luminosidad, verificar la distancia focal de la captura y comprobar la estabilidad de captura.

- c. **Ejecución del vuelo:** En esta etapa es importante verificar que la altura de vuelo de la aeronave sea estable, comprobar que siga la línea de vuelo, verificar el estado de la batería y no perder de vista al RPAS mientras ejecuta el plan de vuelo.
- d. **Chequeo post vuelo:** Se recomienda que al desarmar el RPAS se verifique el estado de las partes del mismo y revisar las fotografías para evaluar la posibilidad de realizar un vuelo adicional si los resultados no son los esperados.

2.7 Procesamiento digital de fotografías

2.7.1 Proceso fotogramétrico digital

Para Otero et al. (2010) reconstruir un objeto a partir de la fotografía aérea requiere un proceso de restitución que contemple las operaciones correlativas que se muestran en los siguientes métodos:

Método 1: orientación interna + orientación relativa + orientación absoluta.

Método 2: orientación interna + orientación exterior.

a. Orientación interna

Determina el centro perspectivo interior de la fotografía aérea tal como estaba al momento de la captura (Otero et al., 2010), por lo tanto, es un proceso de transformación del sistema de coordenadas pixel (filas y columnas) al sistema de coordenadas de la cámara expresada en mm y referido a un sistema 3D cuyo origen está en el centro de proyección de la cámara (**Figura 22**). En fotografías adquiridas con cámaras digitales como las que están montados en los RPAS el proceso consiste en la determinación de la posición del punto principal de la foto con respecto a centro de la fotografía digital en filas y columnas (Quirós, 2014).

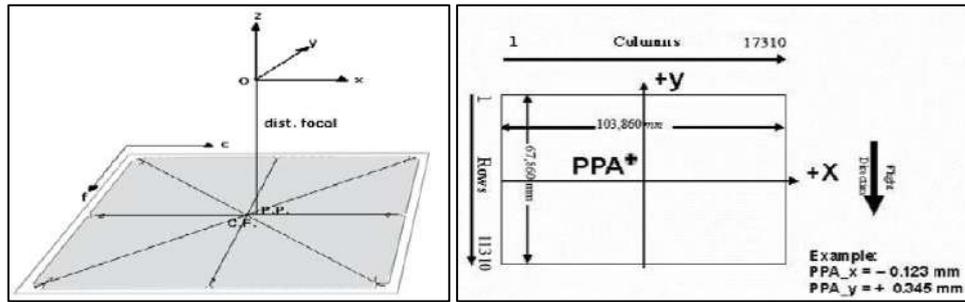


Figura 22: Transformación de coordenadas en la orientación interna (Izquierda) Orientación interna con cámaras digitales (Derecha)

Fuente: Quirós, E. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

b. Orientación relativa

Es la etapa del proceso donde se reconstruye el modelo estereoscópico en la misma posición relativa que tenía cuando se realizó la toma fotográfica (Figura 23), para lo cual es preciso identificar los puntos homólogos en cada fotografía para la reconstrucción de los haces que se intercepten en el espacio (Otero et al., 2010).

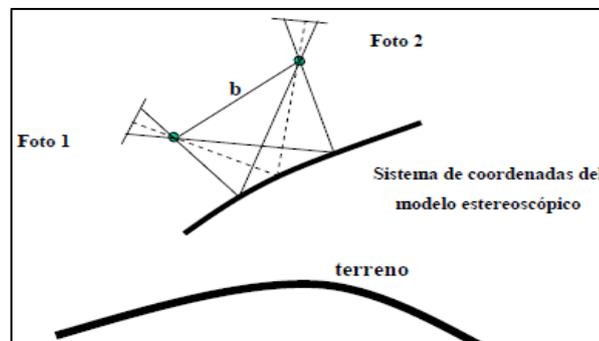


Figura 23: Orientación relativa de un par estereoscópico

Fuente: Otero et al. (2010). Fotogrametría I

Otero et al. (2010) reconoce que, en la fotogrametría, la orientación relativa se da basándose en las condiciones de colinealidad y coplanariedad:

- **Condición de colinealidad:** En esta condición se parte de un principio básico donde el centro de proyección (O), el punto imagen en la fotografía (a) y el punto del terreno (A) se encuentren alineados sobre la misma recta (Sánchez, 2014).

En la **Figura 24** se presenta el principio de Colinealidad:

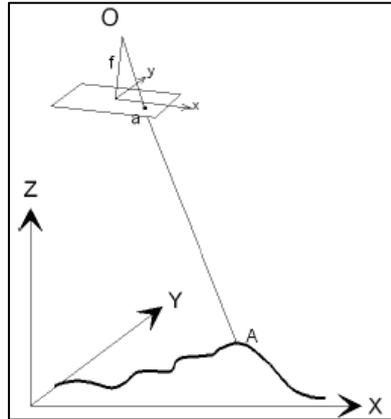


Figura 24: Condición de Colinealidad

Fuente: Sánchez (2014). Introducción a La Fotogrametría

- **Condición de coplanariedad:** Esta condición se establece a partir de que los dos centros de proyección izquierdo y derecho (O_1 y O_2), un punto cualquiera en el terreno (A) y sus homólogos (a_1 y a_2) estén en el mismo plano (Sánchez, 2014).

En la **Figura 25** se presenta el principio de Coplanariedad:

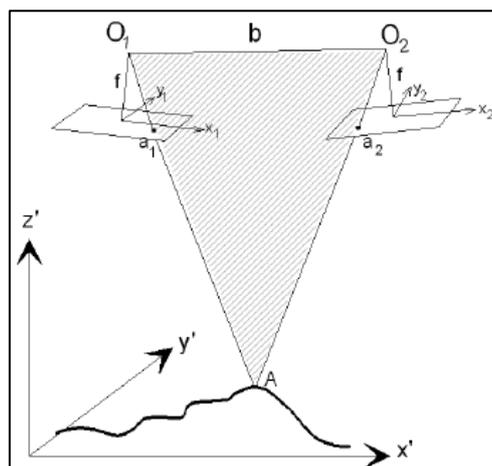


Figura 25: Condición de Coplanariedad

Fuente: Sánchez (2014). Introducción a La Fotogrametría

En la fotogrametría digital con RPAS se le asigna a cada fotografía tomada datos provenientes de los sensores inerciales como el GPS en el que la mayoría de RPAS trabaja con las constelaciones GPS y Glonass. El IMU que viene a ser la unidad de medición inercial, permite conocer la posición relativa del RPAS con respecto a su estado inmediatamente anterior, conocer sus aceleraciones, desplazamientos, por lo tanto la posición de la aeronave en cada momento (Ruiz, 2013).

c. Orientación absoluta:

Una vez formado el modelo se procede a nivelarlo, escalarlo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio (Quirós, 2014), para esto se hace uso de los puntos de apoyo y puntos de control que se definió anteriormente. **Ver Figura 26.**

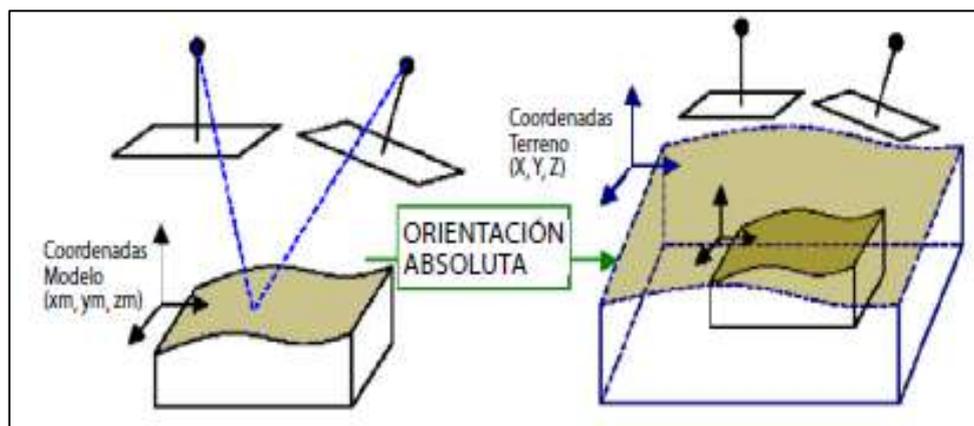


Figura 26. Orientación absoluta del modelo

Fuente: Quirós (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

d. Orientación exterior:

El proceso de orientación relativa y absoluta se suele realizar en un solo paso en algunos restituidores digitales, de manera que se obtienen los parámetros para la transformación de coordenadas imagen en el sistema de la cámara al sistema terreno (Quirós, 2014).

e. Restitución fotogramétrica:

La restitución fotogramétrica propiamente consiste en obtener el registro tridimensional del terreno, es decir, extraer información métrica del modelo estereoscópico con ayuda de un índice móvil según el principio de la marca flotante. En base a este principio el operador fotogramétrico podrá posarse sobre todos los elementos del terreno y obtener el registro de coordenadas tridimensionales de estos. El resultado de este proceso es la cartografía vectorial que finalmente deriva en una ortofoto (Quirós, 2014).

2.7.2 Software de procesamiento digital Pix4D mapper

Pix4D Mapper es un software semi automatizado que se encarga del procesamiento digital de fotografías, es capaz de generar resultados a partir de imágenes aéreas o terrestre y ofrece varias herramientas para aplicaciones en ingeniería como: Ortomosaicos de alta precisión con calidad métrica; DSM (modelo digital de superficie); DTM (modelo digital de terreno); *structure from motion* (SFM) nube de puntos densa y modelación 3D, en poco tiempo con un flujo de trabajo muy intuitivo. (Pix4D, 2017a).

2.8 Obtención de atributos en árboles

2.8.1 Frugoviewer

Este software puede descargarse de manera gratuita; sin embargo, el código no puede ser modificado, en general es un visor que permite la representación de puntos por atributos, así como una opción de visualización en 3D (**Figura 27**). Es útil para hacer el análisis exploratorio de los datos de nube de puntos que vienen en formatos .las o .laz (García Alonso, 2008).

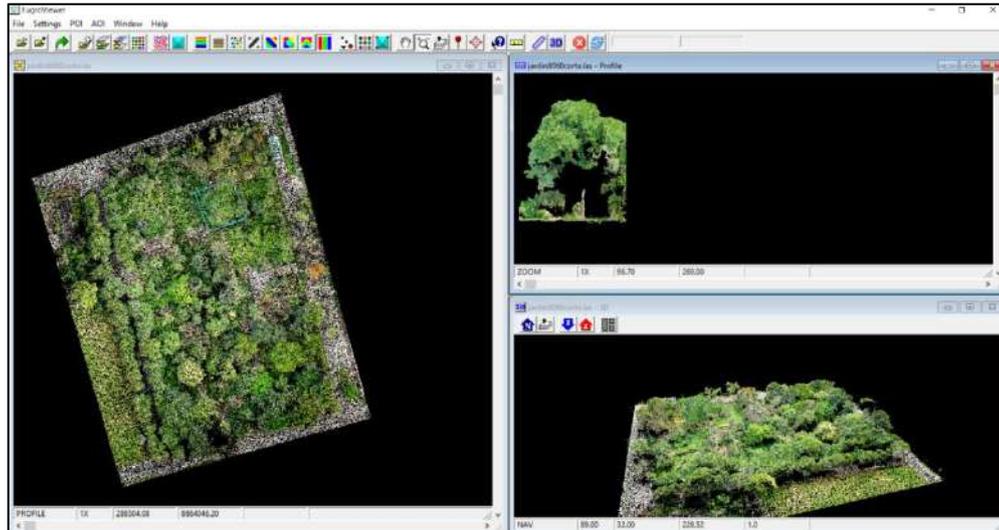


Figura 27: Interfaz del software Frugoviewer

2.8.2 Fusion

El software FUSION para datos *LAS* y *LAZ* ha sido desarrollado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) con el objetivo de ayudar a los investigadores a comprender, explorar y analizar datos de nube de puntos, proporciona un entorno de visualización 3D para el examen y valoración de los datos geospaciales. Combina imágenes, datos LIDAR, capas SIG, datos de campo y modelos de superficie (McGaughey, 2018).

El sistema de análisis y visualización consta de dos programas principales, FUSION LDV (visor de datos LIDAR), y una colección de programas de línea de comandos específicos de tareas. La interfaz principal, proporcionada por FUSION, consiste en una ventana de visualización gráfica y una ventana de control. Presenta todos los datos del proyecto usando una pantalla 2D típica de los sistemas de información geográfica. LDV proporciona el entorno de visualización 3D para el examen y la medición de subconjuntos de datos espacialmente explícitos. Los programas de línea de comandos proporcionan capacidades específicas de análisis y procesamiento de datos diseñadas para que FUSION sea adecuado para procesar grandes adquisiciones de archivos *.LAS* (McGaughey, 2018).

III. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

Este estudio se realizó en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicada en el distrito de La Molina, Lima; la cual cuenta con 193,13 ha(Universidad Nacional Agraria la Molina, 2019). Se eligió como área de evaluación a los árboles del jardín botánico Octavio Velarde Núñez cuya altura total sea mayor a 10 m (Figura 28).

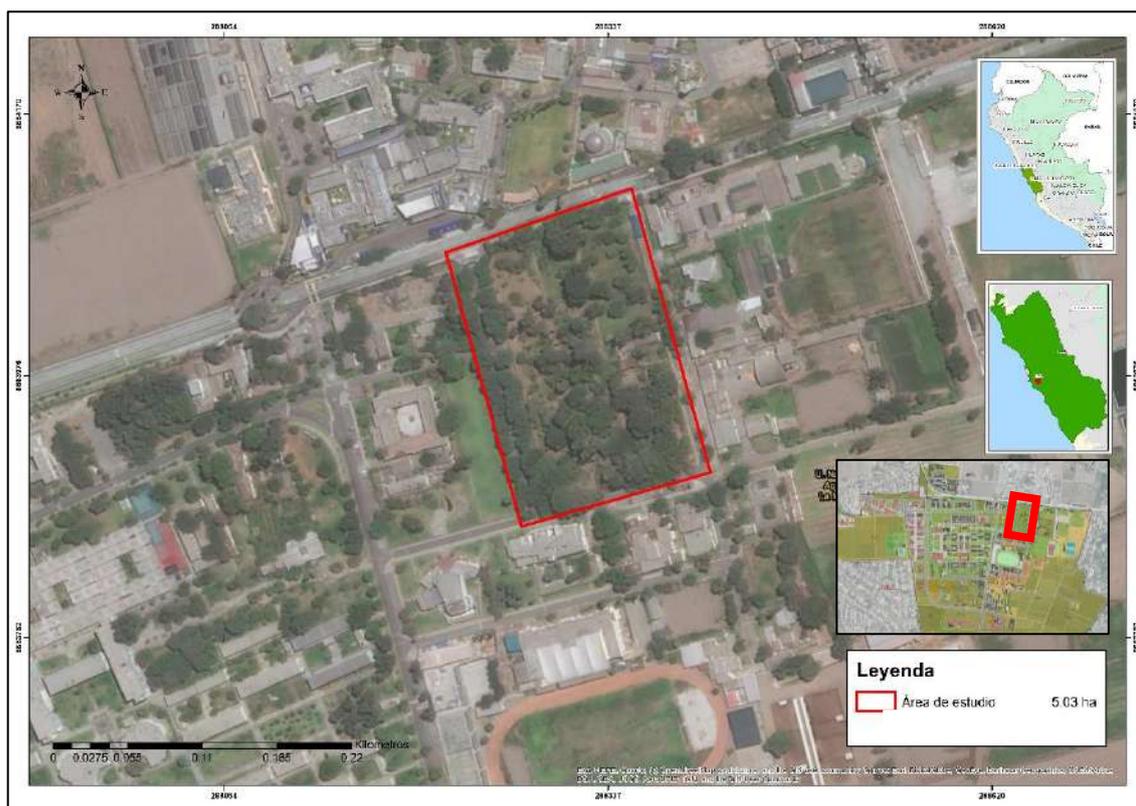


Figura 28: Ubicación del Jardín botánico Octavio Velarde Núñez

Con base en la Figura 28. El jardín botánico Octavio Velarde Núñez está ubicado dentro del Campus de la Universidad Nacional Agraria la Molina, entre la avenida La Molina y la avenida Vanderghen y alberga un gran número de árboles, de distintas especies y edades.

3.2 Materiales

3.2.1 Equipos

- Un RPAS Mavic 2 pro de la marca DJI con una cámara RGB
- Baterías recargables.
- Un computador Intel core i7 con tarjeta de video de 4 Gb y memoria ram de 12 Gb para el procesamiento de información.
- Un smartphone Samsung Galaxy s10.
- Un GPS Garmin 64s.
- Hipsómetro Vertex IV.

3.2.2 Softwares

- Pix4D capture 4.8.0
- Pix4Dmapper 4.4.12
- Fusion 3.8.
- FrugoViewer 3.3
- Rstudio 3.6.1
- Microsoft Word 2019
- Microsoft Excel 2019
- DJIgo4.
- Qgis 3.10

3.2.3 Materiales

- Libreta de campo.
- Útiles de escritorio.

3.3 Métodos

La secuencia metodológica utilizada abarca 5 subprocesos para la obtención de resultados y se resume en la **Figura 29**.

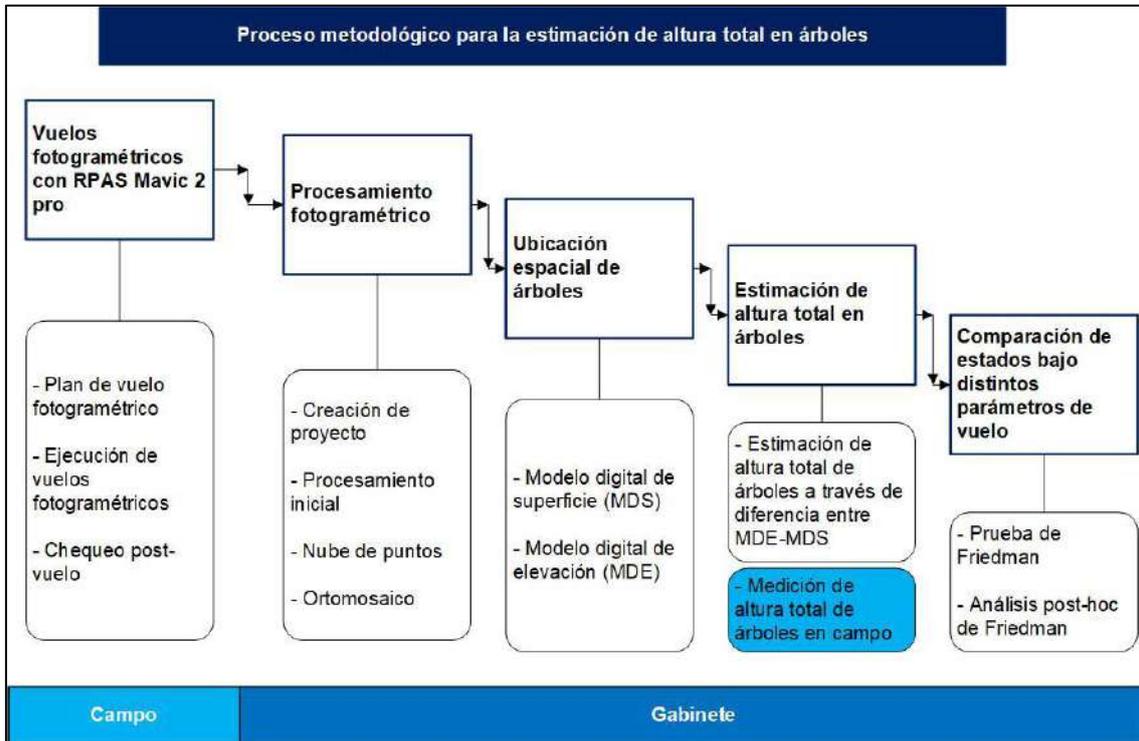


Figura 29: Proceso metodológico para la estimación de altura total en árboles a partir de vuelos fotogramétricos

3.3.1 Vuelos fotogramétricos con RPAS Mavic 2 pro

a. Plan del vuelo

Se programo los vuelos fotogramétricos en enero del 2020 desde las 10:00 h hasta las 15:00 horas. durante 3 días, horario donde se presenta mayor luminosidad solar. Se revisó la presencia de interferencia electromagnéticas en la zona y la velocidad de las ráfagas de viento, ya que, valores elevados de estos ocasionan la perdida de conexión entre la aeronave y la estación en tierra.

Se planifico el vuelo para el RPAS Mavic 2 pro en un smartphone Samsung Galaxy s10 con la aplicación Pix4Dcapture 4.8.0 (**Figura 30**).

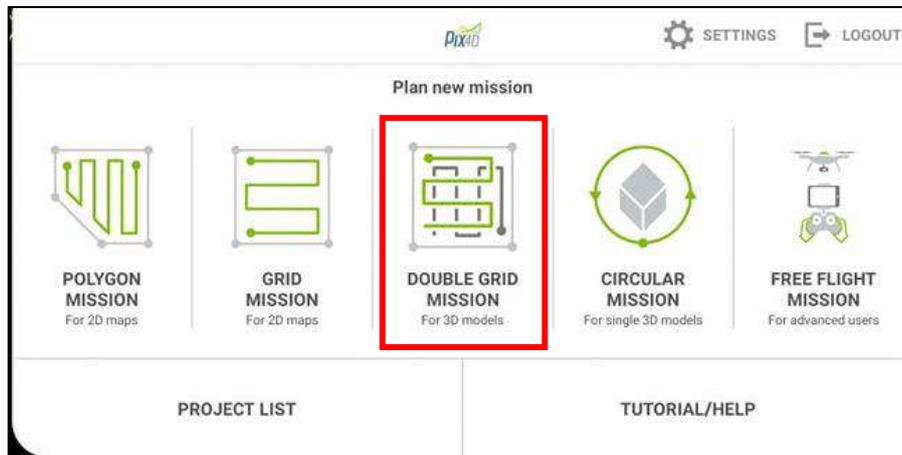


Figura 30: Interfaz de entrada de Pix4D capture 4.8.0

Se usó la opción de “misión de doble grilla”, la cual permite modificar los diferentes parámetros de vuelo, definir el área total a sobrevolar y conocer el tiempo estimado de vuelo de la aeronave. En la **Figura 31** se presentó el interfaz de edición de parámetros de vuelo en el aplicativo Pix4D capture 4.8.0.



Figura 31: Interfaz de edición de parámetros de vuelo de Pix4D capture 4.8.0

Se configuro los siguientes parámetros de vuelo:

i. Altura de vuelo

Los vuelos se realizaron a la altura de 80 metros y 100 metros sobre el nivel del suelo, la escala es homogénea debido a que es un terreno considerado plano.

ii. Angulo de la cámara

Los vuelos se realizaron con ángulo de la cámara de 45° y 70°.

iii. Traslape

Se realizaron vuelos con un traslape longitudinal de 80 % entre fotos, ya que este porcentaje de traslape asegura la reconstrucción tridimensional entre fotografías consecutivas (Otero et al., 2010).

iv. Velocidad del RPA

El RPA realizó los vuelos a una velocidad constante de 7 m/s, velocidad apropiada para obtener fotografías nítidas (Pix4D, 2017a).

v. Distancia de muestreo del suelo (GSD)

La distancia de muestreo del suelo (GSD) viene a ser el tamaño de pixel que tienen las fotografías, el GSD varía directamente al modificar el parámetro de altura de vuelo, es decir a mayor altura de vuelo el tamaño de pixel será mayor. El GSD varía de forma inversa al modificar el parámetro de ángulo de la cámara, es decir al reducir el ángulo de la cámara el tamaño del pixel en la fotografía es mayor. En la **Tabla 3** se detalla los parámetros de vuelo usados.

Tabla 3: Configuración de parámetros de vuelo fotogramétrico para el RPAS Mavic 2 pro en el Jardín botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

ZONA	ALTURA DE VUELO (m)	ÁNGULO DE CAMARA (°)	TRASLAPE (%)	VELOCIDAD (m/s)	GSD (cm/pix)	NOMBRE DE TRATAMIENTO
Jardín	80	45	80	7	2,65	C1
Jardín	80	70	80	7	1,99	C2
Jardín	100	45	80	7	3,31	C3
Jardín	100	70	80	7	2,49	C4

Fuente: Elaboración propia.

vi. Distancia focal

El campo de visión de la cámara del Mavic 2 pro es de 77° equivalente a una distancia focal normal a teleobjetivo.

En base a la variación de GSD generada por la configuración de parámetros de altura de vuelo y ángulo de cámara se definieron cuatro planes de vuelo (tratamientos) que fueron motivo de análisis en el presente estudio.

b. Ejecución de vuelos fotogramétricos

i. Chequeo pre vuelo

La importancia en la verificación del estado de la aeronave y sus componentes es trascendental para evitar accidentes aéreos. Para ello, se verificó el correcto ensamblado del RPAS Mavic 2 pro, baterías cargadas, configuración de la cámara en automático, distancia focal en teleobjetivo, el estado de las hélices y la conexión entre la aeronave, el control remoto y la aplicación.

ii. Ejecución del vuelo

Después de verificar el estado de la aeronave y sus componentes, se estableció la conexión entre la aeronave y la estación en tierra a través del aplicativo pix4Dcapture v4.8.0, se procedió a realizar el despegue y ejecutar 4 planes de vuelo fotogramétricos en total, cada uno fue programado en gabinete, y tuvieron una duración aproximada de 25 minutos en el aire. En este periodo de vuelo y mientras la aeronave se encuentra capturando fotografías desde el aire, se realizó el seguimiento visual y la verificación de conexión estable entre la aeronave y la estación en tierra (**Figura 32**).



Figura 32: Despegue del RPAS Mavic 2 pro

iii. Chequeo post vuelo

Al terminar el sobrevuelo del plan de vuelo programado, se revisó el estado de la aeronave al aterrizar, se verificó la captura y almacenamiento de fotografías en el aplicativo de pix4D capture 4.8.0 y en la memoria SD de la aeronave (**Figura 33**).

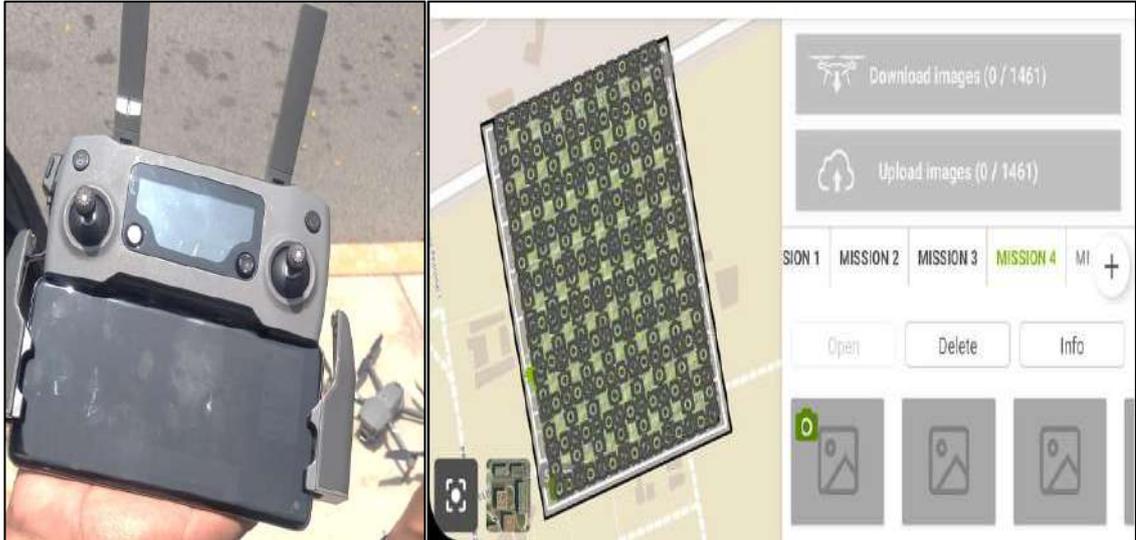


Figura 33: Chequeo post-vuelo del RPAS Mavic 2 pro

En la **Tabla 4** se muestra las características de los parámetros de los 4 planes de vuelo ejecutados.

Tabla 4: Tratamientos a utilizar en la identificación y estimación de altura total en árboles

NOMBRE DEL TRATAMIENTO	GSD (cm/pix)	ALTURA DE VUELO (m)	ANGULO DE LA CAMARA (°)	TRASLAPE (%)
RPAS C1	2,65	80	45	80
RPAS C2	1,99	80	70	80
RPAS C3	3,31	100	45	80
RPAS C4	2,49	100	70	80

Fuente: Elaboración propia.

Cada plan de vuelo ejecutado y mencionado en la **Tabla 4** será procesado en gabinete de forma independiente en el software Pix4D Mapper 4.4.12

3.3.2 Procesamiento fotogramétrico

a. Creación del proyecto

Con la base de datos fotográfica obtenida de los vuelos fotogramétricos, se realizó el proceso fotogramétrico de obtención de nube de puntos densa y ortofoto para cada plan de vuelo realizado (tratamiento) con el software Pix4D mapper 4.4.12.

Se creó el proyecto de procesamiento fotogramétrico en el software pix4D Mapper 4.4.12 en el cual se configuró las propiedades de la imagen, el sistema de referencia WGS84 y sistema de coordenadas UTM. Para finalizar se eligió la plantilla de procesamiento de “3D models” (Figura 34).

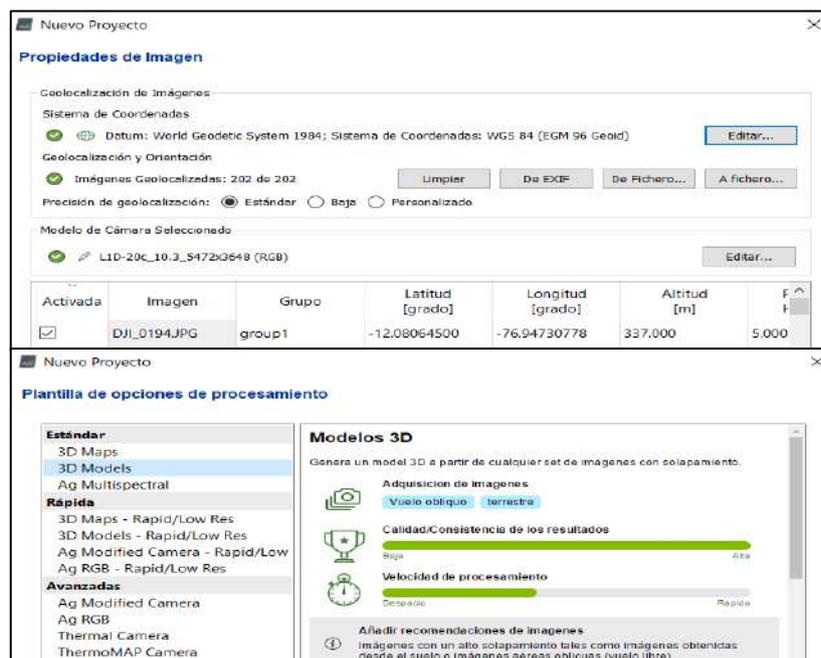


Figura 34: Configuración del proyecto en Pix4D Mapper

b. Procesamiento inicial

Este procesamiento se hizo con el software Pix4D Mapper 4.4.2, de acuerdo con Pix4D (2017b) en el procesamiento inicial para la evaluación de masas boscosas se recomienda la siguiente configuración: (Figura 35):

- Escala de imagen **completa**.
- Emparejamiento entre pares de imágenes en **modo rejilla o pasillo aéreo**.
- Emparejamiento **geoméricamente verificado**.
- Calibración **automática**.

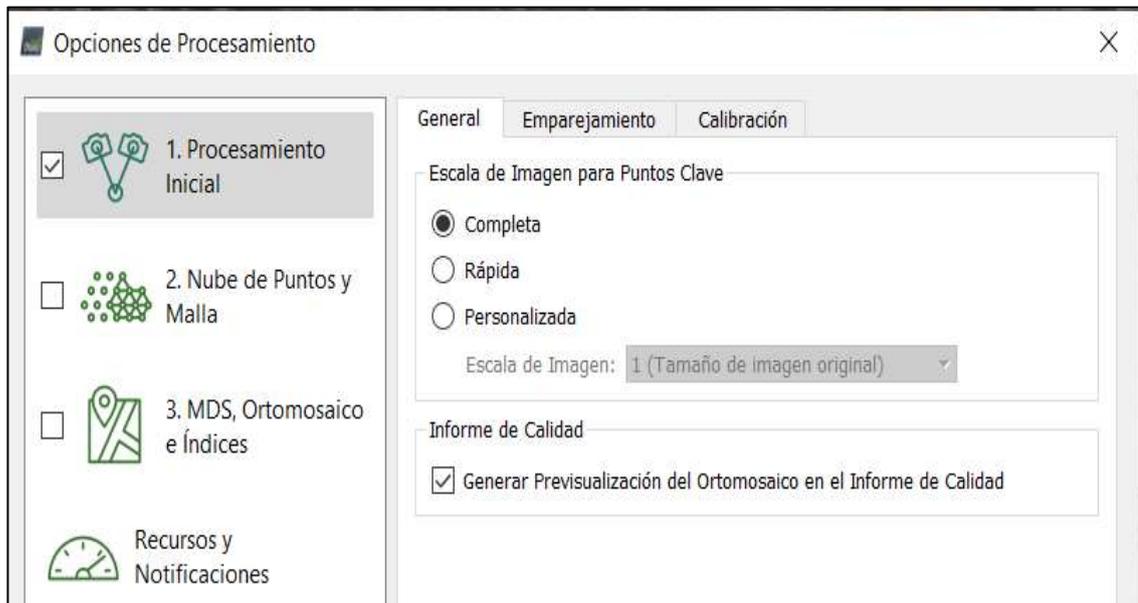


Figura 35: Ajustes generales del procesamiento inicial en Pix4D

c. Nube de puntos

Este procesamiento se hizo con el software Pix4D Mapper 4.4.2, de acuerdo con Pix4D (2017b) en la generación de nube de puntos para la evaluación de masas boscosas se recomienda la siguiente configuración: **(Figura 36)**:

- Densificación de la nube de puntos a la escala de la imagen de **forma óptima**.
- Exportar nube de puntos en **formato .LAS**.
- **Fusionar teselas**.
- Desactivar la opción de **mallado 3D**.

Point Cloud Densification details	
Processing Options	
Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
LOD	Generated: no
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	10h:07m:17s
Time for Point Cloud Classification	21m:45s
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA
Results	
Number of Processed Clusters	14
Number of Generated Tiles	8
Number of 3D Densified Points	152345336
Average Density (per m ³)	711.21

Figura 36: Informe de calidad de la nube de puntos en Pix4D

d. Ortomosaico

Este procesamiento se hizo con el software Pix4D Mapper 4.4.2, de acuerdo con Pix4D (2017b) en la generación del ortomosaico para la evaluación de masas boscosas se recomienda la siguiente configuración: **(Figura 37)**:

- Resolución del **ortomosaico automática**.
- Ortomosaico en **formato TIFF**.
- **Fusionar teselas**.

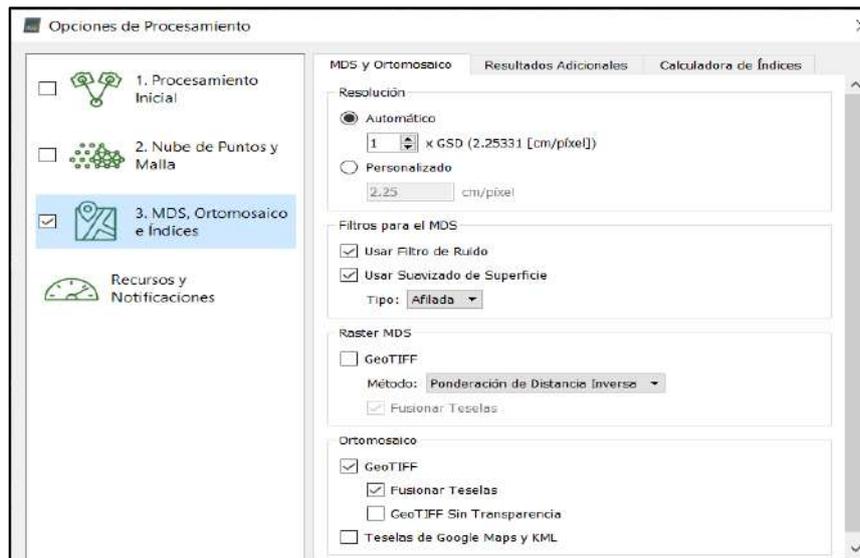


Figura 37: Ajustes de MDS y Ortomosaico del procesamiento en Pix4D

Se proceso los 4 tratamientos en base a la misma plantilla de configuración para el procesamiento fotogramétrico.

3.3.3 Ubicación espacial de árboles

i. Modelo digital de superficie (MDS)

Se uso el programa de línea de comandos de Fusion para la generar el modelo digital de superficie a partir de la nube de puntos densa en formato *LAS*. Para empezar, fue necesario normalizar los datos, con el comando “*GridSurfaceCreate*” (**Figura 38**), se generó el modelo de superficie cuadrículado utilizando colecciones de puntos aleatorios. Se almaceno en formato *DTM*, propio del software Fusion.

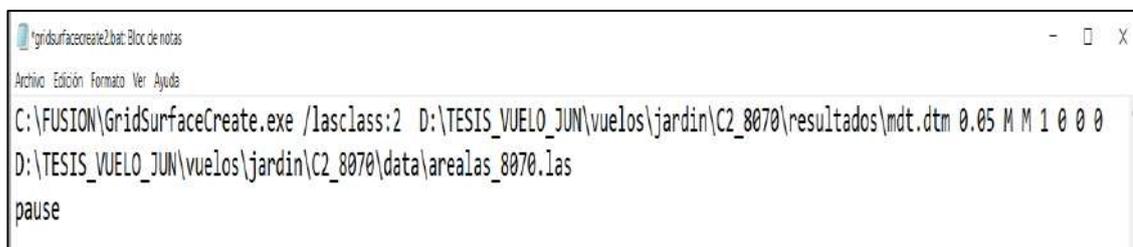
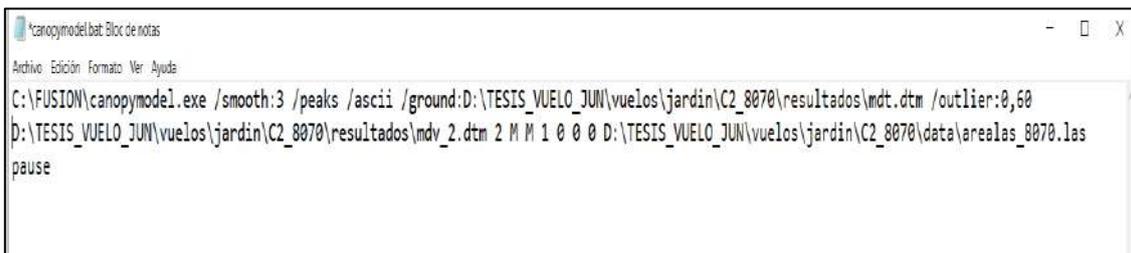


Figura 38: Línea de comando de “GridSurfaceCreate”

ii. Modelo digital de elevaciones (MDE)

Para generar el modelo digital de elevaciones se utilizó el comando “*CanopyModel*” (Figura 39), el cual crea un modelo de superficie de dosel utilizando la nube de puntos *LAS*. De manera predeterminada, el algoritmo utilizado por “*CanopyModel*” asigna la elevación del mayor rendimiento dentro de cada celda, restando las elevaciones del suelo de las elevaciones superiores para producir un modelo de altura del dosel. La salida de “*CanopyModel*” fue un archivo *DTM*.



```
C:\FUSION\canopymodel.exe /smooth:3 /peaks /ascii /ground:D:\TESIS_VUELO_JUN\vueLos\jardin\C2_8070\resultados\mdt.dtm /outlier:0,60
D:\TESIS_VUELO_JUN\vueLos\jardin\C2_8070\resultados\mdv_2.dtm 2 M M 1 0 0 0 D:\TESIS_VUELO_JUN\vueLos\jardin\C2_8070\data\arealAs_8070.las
pause
```

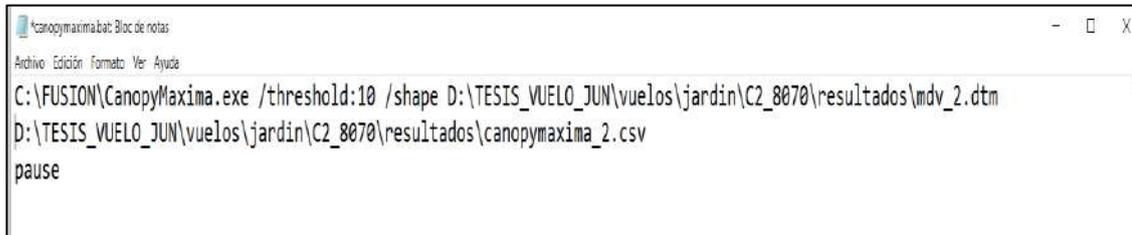
Figura 39: Línea de comando de “*CanopyModel*”

Para la identificación de árboles, la línea de comandos de Fusion se basó en la generación de modelos digitales de terreno (*GridSurfaceCreate*) y modelos digitales de superficie (*CanopyModel*); donde la diferencia de estos valores permitió ubicar espacialmente a los árboles dentro del área de estudio. En algunos casos, la línea de comandos de Fusion no identificó al árbol, por lo tanto, se consideró al árbol como “**No identificado**”, en otros casos el comando identifica uno o más puntos dentro de la copa de un árbol, en este caso se consideró al árbol como “**Identificado**”.

3.3.4 Estimación de altura total en árboles

a. Estimación de altura total de árboles en Fusion

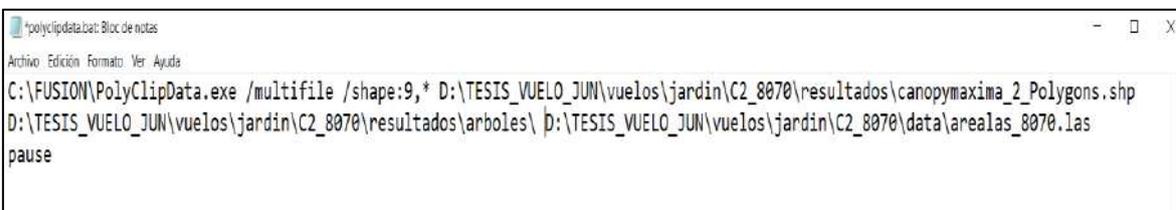
Para obtener la altura de los árboles identificados se utilizó el comando “*CanopyMaxima*” de Fusion (**Figura 40**). Este comando utilizó el modelo de altura de dosel, el cual es producto de la diferencia entre el MDE-MDS generado en el proceso anterior para identificar el máximo local, el resultado fue la identificación de los puntos más altos de cada árbol identificado en formato *shape*.



```
canopymaxima.bat: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
C:\FUSION\CanopyMaxima.exe /threshold:10 /shape D:\TESIS_VUELO_JUN\vuelos\jardin\C2_8070\resultados\mdv_2.dtm
D:\TESIS_VUELO_JUN\vuelos\jardin\C2_8070\resultados\canopymaxima_2.csv
pause
```

Figura 40: Línea de comando de “*CanopyMaxima*”

El comando “*CanopyMaxima*” genera de forma adicional polígonos en formato *shape* con la forma relativa del contorno de copa de cada individuo identificado. Se utilizó estos polígonos para generar la copa delineada de cada árbol con ayuda de la ortofoto. Para obtener un modelo de cada árbol de forma individual se usó del comando “*PolyClipData*”. Este comando utilizó los polígonos en formato *shape* que contienen la forma del contorno de la copa de cada árbol en forma individual y generó un archivo en formato *LAS* de la nube de puntos del árbol individualizado.



```
polyclipdata.bat: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
C:\FUSION\PolyClipData.exe /multifile /shape:9,* D:\TESIS_VUELO_JUN\vuelos\jardin\C2_8070\resultados\canopymaxima_2_Polygons.shp
D:\TESIS_VUELO_JUN\vuelos\jardin\C2_8070\resultados\arboles\ D:\TESIS_VUELO_JUN\vuelos\jardin\C2_8070\data\arealas_8070.las
pause
```

Figura 41: Línea de comando de “*PolyClipData*”

b. Medición de altura total de árboles en campo

i. Ubicación de los árboles en campo

Se identificó al árbol a evaluar, colocando el receptor GPS junto a este por unos segundos hasta su estabilización. Se marcó la ubicación en el receptor GPS y en una libreta de campo (**Figura 42**).



Figura 42: Toma de coordenadas de árboles con GPS Garmin 64s

ii. Medición de altura total de árboles

Para la medición de alturas con Vertex IV se siguió la siguiente secuencia:

- Se colocó el transporter en el árbol a evaluar.
- Se encendió el Vertex con el botón **ON**.
- En el menú se eligió la opción **HEIGHT**.
- El personal encargado se alejó una distancia considerable del árbol a evaluar, se recomendó que de preferencia sea visible el transporter y una distancia mayor a 10 m.
- Se realizó la medición de distancia horizontal observando por el lente del Vertex apuntar al transporter y mantener presionado el botón **ON** hasta escuchar la señal sonora.
- Se realizó la medición de altura total visualizando a través del lente la altura que se desea medir y presionar el botón **ON** hasta escuchar una señal sonora, visualizar la altura en la pantalla, puede realizar más de una medición.

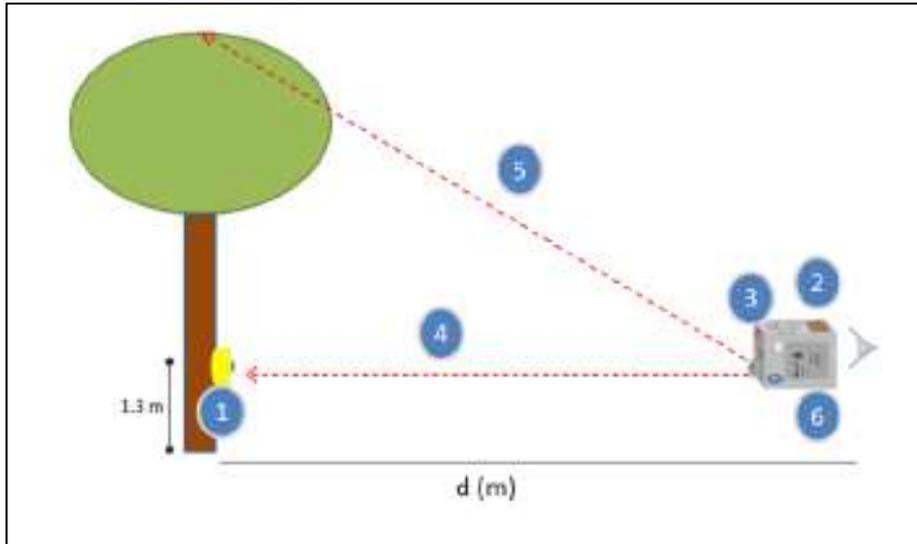


Figura 43: Medición de la altura de un árbol con vertex IV

Fuente: Zúñiga (2014). Manual práctico del uso del Vertex para inventarios forestales

En el Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen se procedió a colocar el transporter T3 en el fuste del árbol a 1,3 m del suelo, alejarse del árbol una distancia mayor a 10 metros, se realizó la medición de la distancia horizontal, sin necesidad que el transporter este en la misma línea que el vertex propiamente, posteriormente se midió la altura total del individuo.



Figura 44: Medición de altura de árboles con Vertex IV

3.3.5 Comparación de estados bajo distintos parámetros de vuelo

La comparación de estados bajo distintos parámetros de vuelo se realizó para evaluar la existencia de diferencias estadísticas significativas entre los cuatro planes de vuelo realizados en el presente estudio y la evaluación tradicional en campo, para ello, se realizó la prueba estadística de Friedman y post hoc de Friedman.

La prueba de Friedman es una prueba no paramétrica que se utilizó para evaluar la existencia, o no, de diferencias estadísticas significativas entre los resultados de estimación de altura total en arboles a partir de los planes de vuelo realizados y la medida de altura total en arboles a través de métodos tradicionales con hipsómetro vertex IV.

$$X_r^2 = \frac{12}{nJ(J+1)} \sum X_j^2 - 3n(J+1)$$

Donde:

X_r^2 = estadístico calculado del análisis de varianza por rangos de Friedman.

n = Número de elementos o bloques (número de hileras).

J = Número de variables relacionadas.

$\sum X_j^2$ = Sumatoria de rangos por columnas al cuadrado

La hipótesis nula que se contrastó es que las respuestas asociadas a cada uno de los 5 tratamientos (1 medición con Vertex IV y 4 tratamientos de vuelo distintas) tienen la misma distribución de probabilidad o distribuciones con la misma mediana, frente a la hipótesis alternativa donde por lo menos la distribución de una de las respuestas difiere de las demás.

La variable a evaluar fue la altura total de los árboles, los tratamientos fueron: 4 tratamientos del resultado de fotogrametría con RPAS bajo diferentes parámetros de vuelo y un

tratamiento de medición en campo de altura total de árboles con Vertex IV. Esta evaluación se realizó a un 95 % de confianza (nivel de significancia igual a 0.05). Se empleó la prueba post Hoc de Friedman para evaluar la relación entre la medición de altura total con tratamientos de fotogrametría y la medición en campo con Vertex IV individualmente.

Se contrastará la siguiente hipótesis:

$H_0: Me_{\text{vertex}} = Me_{\text{tratamiento1}} = Me_{\text{tratamiento2}} = Me_{\text{tratamiento3}} = Me_{\text{tratamiento4}}$

H_1 : Al menos una de las medianas es diferente.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Vuelos fotogramétricos con RPAS mavic 2 pro

El resultado obtenido de la planificación y ejecución del vuelo fotogramétrico de doble grilla se resume en un informe de vuelo (**Figura 45**), el cual detalla las características resaltantes del vuelo.

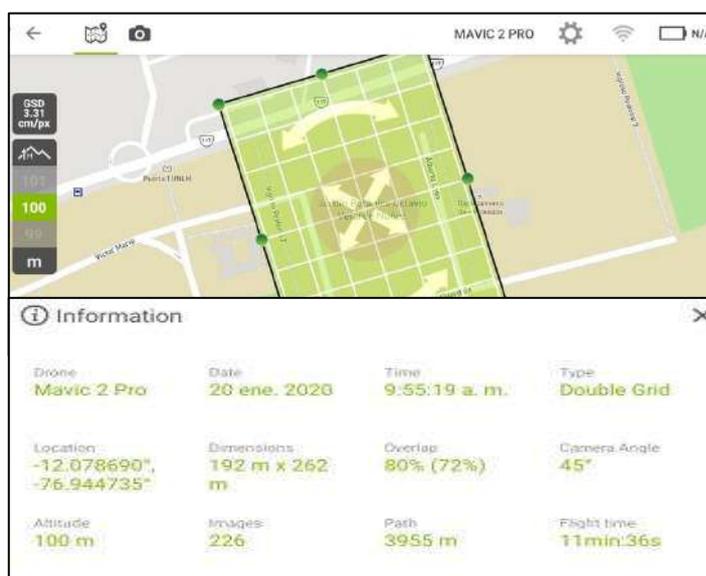


Figura 45: Información del vuelo fotogramétrico realizado con el RPAS Mavic 2 pro

En la **Tabla 5** se presenta el resumen de informe de vuelos fotogramétricos realizados. Se encontró que el GSD (*Ground Sample Distance*), el cual es usado para definir el tamaño de pixel, varía de forma directamente proporcional a la altura de vuelo e inversamente proporcional al ángulo de la cámara. Es decir, al incrementar la altura de vuelo y manteniendo constante el ángulo de la cámara, distancia focal y resolución de cámara, se incrementa el GSD.

Además, al aumentar el ángulo de la cámara a valores más cercanos a los 90° y manteniendo constantes los parámetros de altura de vuelo, distancia focal y resolución de la cámara, disminuye el GSD.

Tabla 5: Resumen de informe de vuelo fotogramétrico del RPAS Mavic 2 pro

Tratamiento	Altura de vuelo (m)	Ángulo de la cámara (°)	Distancia focal	Resolución de cámara	Tiempo de vuelo	Número de fotografías	Área (ha)	GSD (cm)
C1	80	45	teleobjetivo	20 Mp	14 m 31s	318	5,03	3,31
C2	80	70	teleobjetivo	20 Mp	14m 34s	318	5,03	2,24
C3	100	45	teleobjetivo	20 Mp	11m 36s	226	5,03	4,57
C4	100	70	teleobjetivo	20 Mp	10 m 59s	226	5,03	2,96

De acuerdo con Domingo, Ole, Næsset, Kachamba, & Gobakken (2019), la precisión de los modelos digitales de superficie generados a partir de vuelos fotogramétricos, se incrementa con el uso de cámaras RGB con resolución de imagen más fina (resolución de la cámara y la distancia focal). La cámara RGB utilizada en este estudio tiene las características de distancia focal equivalente a teleobjetivo (77°) y la resolución de cámara es de 20 megapíxeles, las cuales contribuyen a obtener mejores modelos de superficie.

Por otra parte, el tiempo que le tomo a la aeronave sobrevolar el área de estudio y obtener las fotografías, varía entre 11 y 14 minutos cubriendo el área de 5,03 ha y que, de acuerdo con Pix4D (2017), el tiempo de vuelo está influenciado por la extensión del área a evaluar, la altura de vuelo, la distancia focal y el traslape entre fotografías. Es decir, el tiempo de vuelo disminuye al incrementar la altura de vuelo.

En contraste, los parámetros ángulo de la cámara y resolución de cámara no tuvieron influencia directa en el tiempo de vuelo de la aeronave o en el número de fotografías adquiridas.

4.2 Procesamiento fotogramétrico

Como resultado de realizar el procesamiento fotogramétrico de las fotografías adquiridas con el RPAS Mavic 2 pro en el software Pix4D mapper 4.4.12 se generó informes de calidad de cada tratamiento (Anexo 4 al 7), la **Tabla 6** presenta los indicadores más resaltantes de cada informe de calidad.

Tabla 6: Indicadores de calidad del procesamiento fotogramétrico de 4 tratamientos de vuelo

Tratamiento	Optimización de cámara (%)	Pareo medio por fotografía	Densidad media de puntos (m3)	GSD (cm/pixel)	Tiempo de procesamiento (horas)	Área Final (ha)
C1 A=80m An=45°	1,71	19271	234,44	3,31	8	29,58
C2 A=80m An=70°	0,37	14891	697,62	2,24	9	17,22
C3 A=100m An=45°	1,89	21646	115,13	4,57	7.5	45,06
C4 A=100m An=70°	0,75	17898	309,27	2,96	7	21,19

Nota: A= Altura de vuelo; An= Ángulo de la cámara

Dentro de los indicadores de calidad del procesamiento fotogramétrico, la **optimización de la cámara** hace referencia a la diferencia relativa (porcentaje) entre los parámetros internos iniciales de la cámara frente a los optimizados. Pix4D (2017) recomienda que, cuando esta diferencia es mayor al 5% se realice el procesamiento inicial nuevamente utilizando opciones de “optimización de parámetros”.

En los 4 tratamientos de este estudio el porcentaje es inferior al 5%. Sin embargo, se encontró que a medida que disminuye el ángulo de cámara, el porcentaje de optimización se incrementa.

En la **Tabla 6** se aprecia que el tratamiento C3 tiene los valores más elevados del indicador **pareo medio por fotografía** y el tratamiento C2 los menores valores, indicando que el tratamiento C3 tiene el mayor número de coincidencias entre fotografías, lo cual contribuye a mejorar la reconstrucción tridimensional del modelo. Sin embargo, este indicador es relativo pues implica el promedio de todas las fotografías y no el análisis de emparejamiento de cada fotografía calibrada (Pix4D, 2017).

El indicador **densidad media de puntos** es importante al momento de definir el nivel de detalle que se desea en la reconstrucción tridimensional. Pix4D (2017) afirma la existencia de una relación inversa entre el GSD y este indicador, la cual se demuestra en los tratamientos realizados ya que, trabajar con GSD pequeños implicó generar una mayor cantidad de puntos como parte de la nube de puntos, lo cual se reflejó finalmente en un mayor número de horas de procesamiento fotogramétrico.

Se sobrevoló 5,03 ha correspondiente al Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen. Sin embargo, el área del ortomosaico fue mayor (**Tabla 6**). Otero et al. (2010) reconoce que, el empleo de vuelos fotogramétricos realizados con ángulo de cámara inclinada a horizontal es usado por cubrir áreas más extensas que la generada en el plan de vuelo. Sin embargo, los niveles de precisión y detalle disminuyen fuera del área de sobrevuelo directo del RPAS, lo cual se corroboró al realizar el procesamiento fotogramétrico.

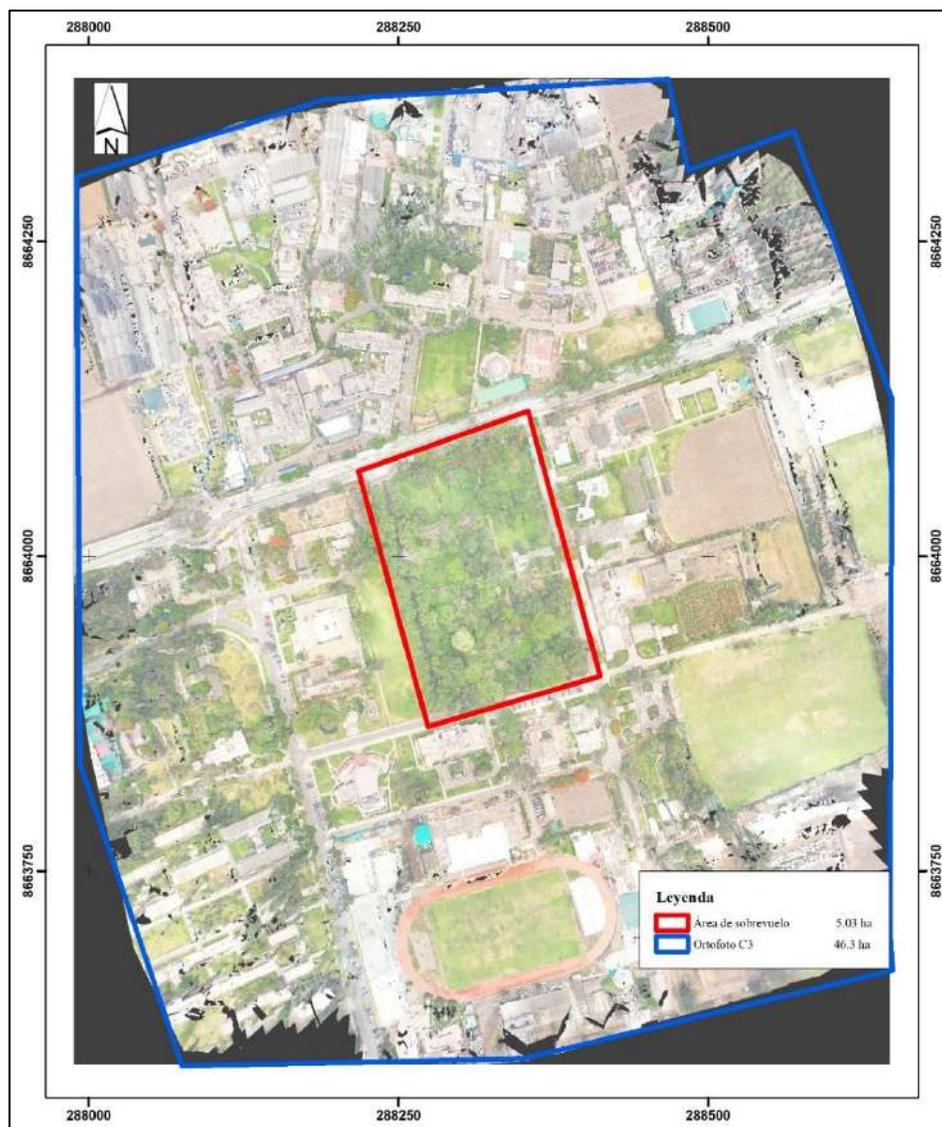


Figura 46: Ortomosaico del tratamiento C3

La **Figura 46** presenta el ortomosaico del tratamiento C3, cuya altura de vuelo fue de 100 metros y el ángulo de cámara de 45° , el polígono rojo representó el área sobrevolada por la aeronave y el área delimitada por el polígono azul representa un área mucho más extensa de aproximadamente 46 ha, la cual carece de traslape y por lo tanto de precisión, lo cual reafirma lo mencionado por Otero et al. (2010).

La **Figuras 47** representa a la reconstrucción tridimensional generada a partir de la nube de puntos densa en color natural (izquierda) y el modelo digital de superficie (derecha) del tratamiento C1, son resultado del procesamiento fotogramétrico en Pix4D mapper 4.4.12. En la **Figura 48** la nube de puntos densa del tratamiento C2, en la **Figura 49** la nube de

puntos del tratamiento C3 y en la **Figura 50** la nube de puntos del tratamiento C4 respectivamente. Estos modelos son importantes al evaluar la precisión en identificación y estimación de la altura total de los árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen. Por ello, al hablar de precisión del modelo, se distinguió entre la precisión relativa y la precisión absoluta.

La precisión relativa hace referencia a la comparación de las características dentro de una reconstrucción y la absoluta hace referencia a la precisión en relación con su posición real en el planeta (Pix4D, 2017). Este estudio se basó en la evaluación de la precisión relativa de los modelos generados a partir de la nube de puntos. Además, se realizó la normalización de datos ajustando los valores a un nivel de referencia, ya que de esta forma se identificó y estimo de manera más precisa los valores de altura total, corroborando lo propuesto por Wallace, Lucieer, Malenovský, Turner, & Vopěnka (2016).

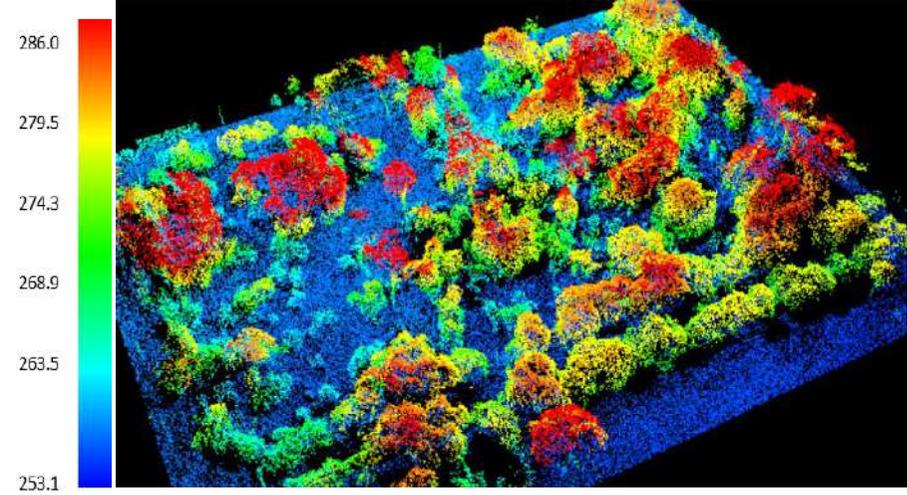


Figura 47: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C1 (Altura de vuelo 80 m - Ángulo de cámara:45°)

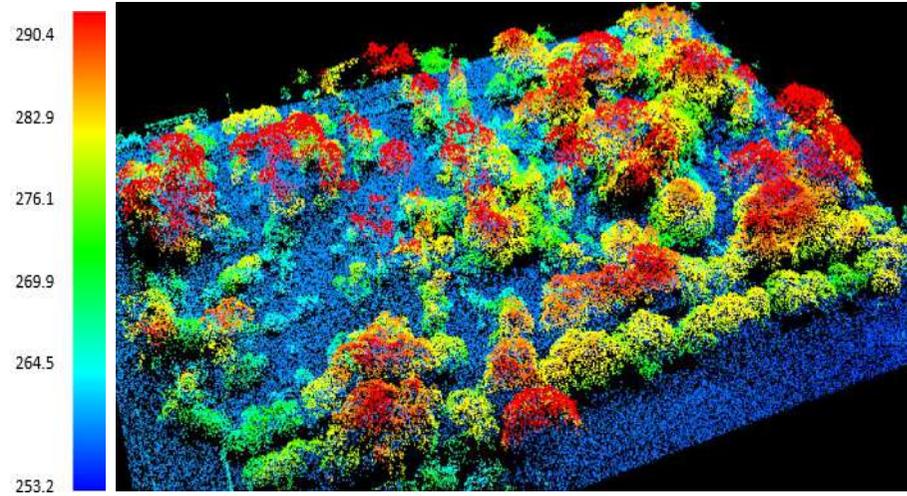
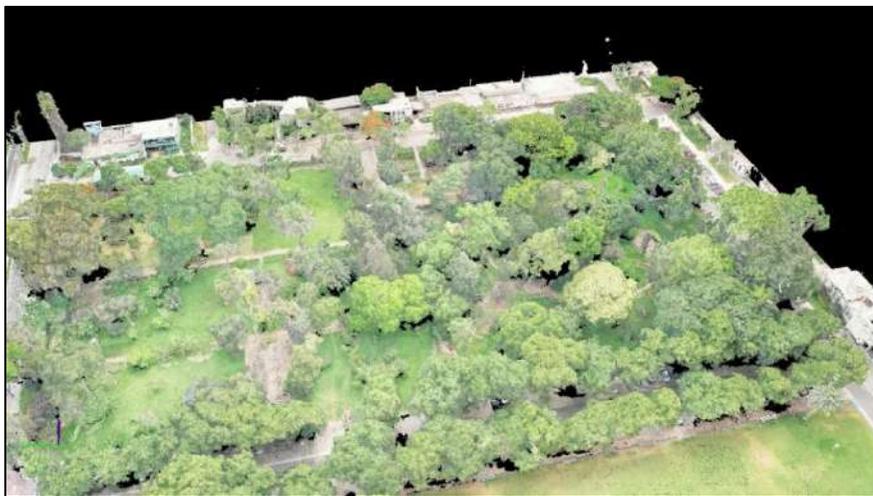


Figura 48: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C2 (Altura de vuelo 80 m - Ángulo de cámara:70°)

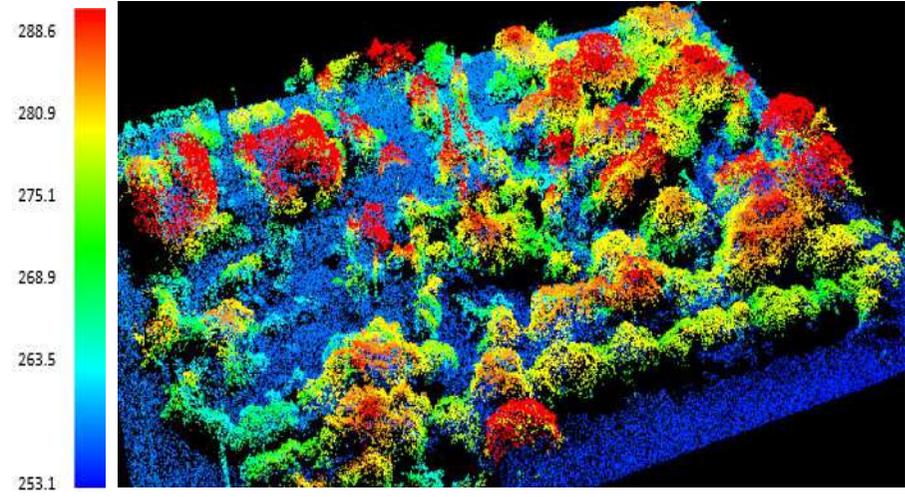


Figura 49: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C3 (Altura de vuelo 100 m - Ángulo de cámara:45°)

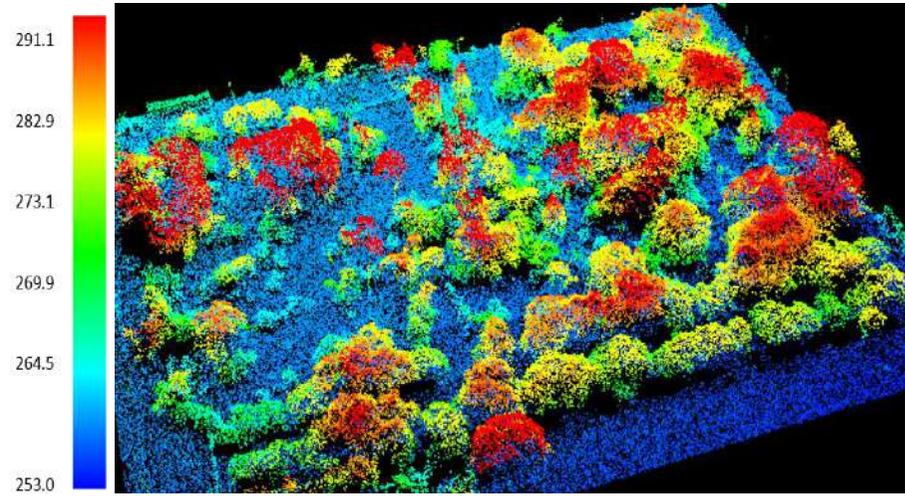


Figura 50: Reconstrucción tridimensional en color natural (izquierda) y MDS (derecha) del tratamiento C4 (Altura de vuelo 100 m - Ángulo de cámara:70°)

En este estudio se enfatiza la importancia de obtener modelos digitales de superficie (MDS) y modelo digital de terreno (MDT) de calidad, ya que, la información de altura de los árboles resulta de la diferencia matemática entre el MDS y el MDT. Para ello se hizo uso del software Pix4D mapper 4.4.12. para el procesamiento de fotografías y generación de nube de puntos densa y para el cálculo de la diferencia entre el MDS y MDT se utilizó el software Fusion.

En general, hay múltiples métodos similares para estimar la altura de árboles. Wallace et al. (2016) utilizaron la herramienta LasGround de Lastools, herramienta similar a la utilizada en este estudio, y a su vez similar al utilizado por Iizuka, Yonehara, Itoh, & Kosugi (2018), que obtuvieron el MDT a partir del procesamiento de fotografías en Agisoft Photoscan. Es así que, hoy en día existen diversas metodologías para obtener la información de altura en árboles y se reconoce que la precisión de estas metodologías es variada.

4.3 Ubicación espacial de los árboles

A partir de los modelos generados para cada tratamiento y haciendo uso de las líneas de comando Fusion “*Gridsurfacecreate*” y “*Canopymodel*” se ubicó espacialmente a los árboles de forma semiautomática, en la **Tabla 7** se muestra la cantidad de árboles localizados espacialmente por cada tratamiento.

En la medición en campo con vertex IV se localizó a 99 árboles, el porcentaje de ubicación a partir de la nube de puntos de procesamientos fotogramétricos fue exitosa en más del 75% de individuos, siendo el más resaltante el tratamiento C4 que obtuvo un 89 % de árboles localizados espacialmente dentro del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen.

Tabla 7: Porcentaje de ubicación de árboles por cada tratamiento de evaluación

Tratamiento	Numero de árboles ubicados	Porcentaje de ubicación
Medición con Vertex	99	100
C1 Altura de vuelo: 80 m Ángulo de cámara: 45°	76	76,8
C2 Altura de vuelo: 80 m Ángulo de cámara: 70°	83	83,8
C3 Altura de vuelo: 100 m Ángulo de cámara: 45°	77	77,8
C4 Altura de vuelo: 100 m Ángulo de cámara: 70°	88	88,9

Se observó que los tratamientos con ángulo de cámara de 45° localizan espacialmente menor número de árboles, por otro lado, los tratamientos con mayor altura de vuelo aportaron al incremento de árboles ubicados. Por lo tanto, los parámetros de altura de vuelo y ángulo de cámara influyen en la calidad de la nube de puntos generada y por ende, en el porcentaje de ubicación de árboles dentro del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen, corroborando lo propuesto por Domingo, Ole, Næsset, Kachamba, & Gobakken (2019).

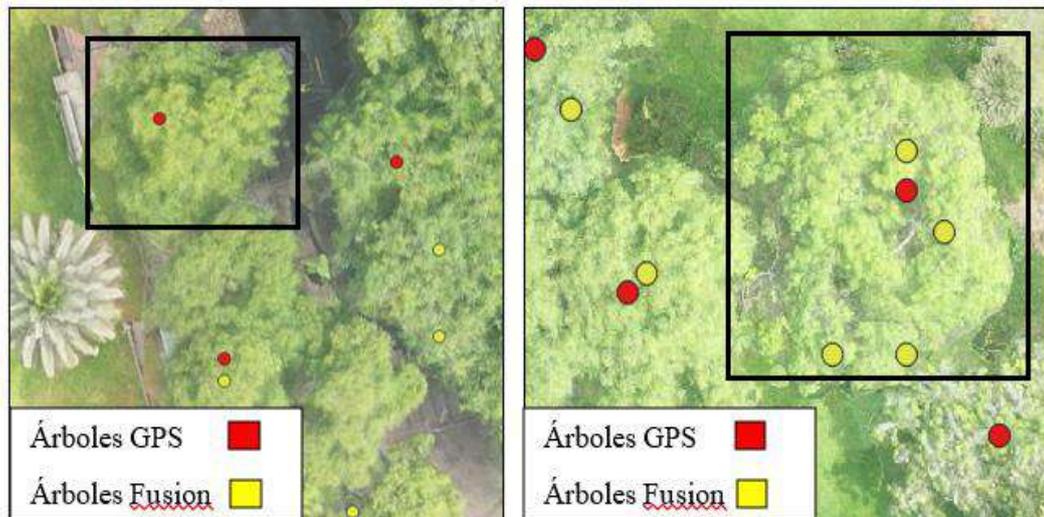


Figura 51: Localización de árboles del Jardín botánico de la UNALM

Ningún tratamiento logró ubicar espacialmente el total de árboles del área de estudio, para lo cual se planteó dos posibles razones: la primera es que, un árbol no es localizado si no existe la reconstrucción de nube de puntos de este, como efecto de deficiencias en el procesamiento fotogramétrico. Por ello, se verificó que el procesamiento fotogramétrico se realizó correctamente.

Por ende, teniendo la reconstrucción tridimensional de calidad y representativo del árbol, la segunda razón es que, las características propias de la ubicación, estructura y distribución de los árboles dentro del área de estudio genera que el algoritmo del software Fusion no logre diferenciar la cantidad de árboles existentes en una misma área.

Para evaluar si esta segunda razón es la responsable de la disminución en la ubicación espacial del total de árboles, se fraccionó el área de estudio en sub parcelas de 35 m x 35 m (**Figura 51**). Se seleccionaron 20 parcelas de un total de 28, con la finalidad de analizar si el incremento en número de árboles y la extensión de cobertura de copas (densidad) influyen en la localización de los árboles por parte del algoritmo del software Fusion.

Se seleccionó 5 sub-parcelas con las siguientes características:

- Más de 5 árboles/sub-parcela.
- cobertura de copa ocupe por lo menos el 60% de la parcela (densidad alta)

Adicionalmente otras 5 sub parcelas con las siguientes características:

- Menos de 5 árboles/sub-parcela.
- Cobertura de copas ocupe un área menor al 50% de la parcela (densidad baja)

Además, se seleccionó 10 sub-parcelas aleatorias.

Se detecto que 11 árboles no fueron ubicados por los tratamientos, en la **Figura 52** se muestra la posición espacial de estos árboles dentro del área de estudio. Asimismo, se demarco las 20 sub parcelas, siendo 10 sub-parcelas de 35 m x 35 cuya gradiente de color se dio en base a la densidad alta y/o baja de árboles y 10 sub-parcelas de 35 m x 35m al azar.

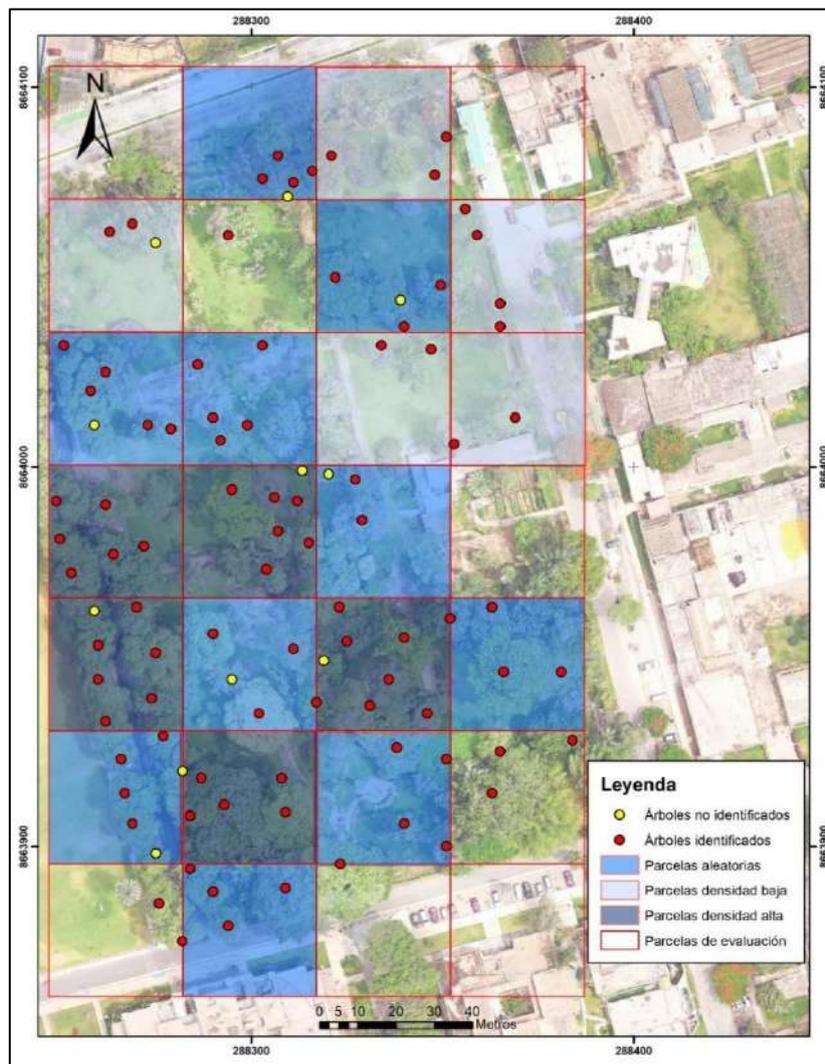


Figura 52: Ubicación espacial de árboles evaluados del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

Shin, Sankey, Moore, & Thode (2018) encontraron que, en sub-parcelas de 10m x10m la tasa de detección de individuos, a partir de vuelos fotogramétricos, disminuye a medida que se incrementó la densidad de árboles en parcela. En la **Tabla 8** se presentó la cantidad de árboles localizados por los tratamientos en sub-parcelas de densidad alta y baja de árboles. Se encontró que en 4 de las 5 sub-parcelas de densidad alta hay, por lo menos, un árbol que no fue detectado por el algoritmo, siendo la sub-parcela 4 la cual se localizó todos los árboles y que además presenta la menor densidad. En contraste, en 4 de las 5 las sub-parcelas de densidad baja se ubicó el total de árboles.

Tabla 8: Árboles ubicados en sub-parcelas de densidad alta y densidad baja

	Sub-Parcela	Árboles identificados	Árboles no identificados	Total de árboles	Densidad (%)
Densidad alta					
	1	5	1	6	80
	2	7	1	8	90
	3	6	1	7	75
	4	6	0	6	70
	5	6	1	7	80
Densidad baja					
	1	3	0	3	30
	2	4	0	4	30
	3	2	0	2	20
	4	2	0	2	30
	5	2	1	3	30

Por lo tanto, la cantidad de individuos dentro de una sub-parcela y la cobertura de sus copas (densidad) puede influir en la tasa de detección de árboles a partir de modelos fotogramétricos, corroborando lo encontrado por Shin, Sankey, Moore, & Thode (2018).

4.4 Estimación de altura total en árboles.

4.4.1 Estimación de altura total de árboles en Fusion

Para la estimación de altura total en los árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen se usó la nube de puntos densa y la ortofoto generada en Pix4D mapper 4.4.12, el software Qgis 3.10 y del componente Lidar Data Viewer del software Fusion.

En la **Figura 53**, la imagen izquierda es la ortofoto generada en el software PIX4Dmapper 4.4.12 y a la derecha el área de estudio en formato ASCII con la escala de alturas normalizada, esta forma de representar la altura resulta útil al evaluar la existencia y distribución de árboles, ya que se puede verificar las zonas de alta densidad de árboles (parte inferior) y zonas de densidades menores (parte superior). Además, la distribución de árboles dominantes en colores más claros, es decir, aquellos con mayor vigor dentro del área de estudio.

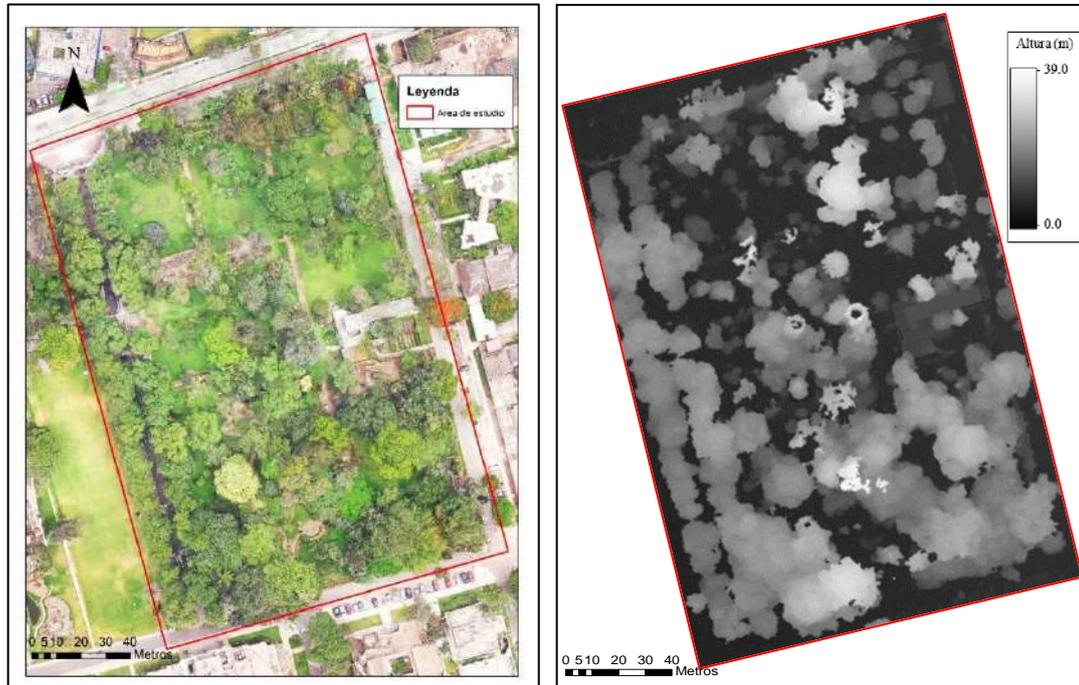


Figura 53: Ortofoto (Izquierda) e imagen Raster (Derecha) del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

Para obtener la altura de los árboles de manera semiautomática se usó el comando “*CanopyMaxima*”, el cual permite extraer la altura de los árboles localizados en procesos anteriores, de esta manera en la **Tabla 9** se presenta los estadísticos descriptivos de cada tratamiento en la estimación de altura total y de la medición con Vertex IV de árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen.

Tabla 9: Estadísticos descriptivos de la variable altura total en base a 5 tratamientos

	Vertex	RPAS			
		C1	C2	C3	C4
Árboles identificados	99	76	83	77	88
Altura mínima (m)	10,60	10,90	12,95	12,73	13,05
Altura máxima (m)	41,70	32,95	37,17	35,51	38,03
Media (m)	20,16	18,63	19,96	19,0	20,22
Mediana (m)	18,40	17,11	18,13	17,60	18,41

Los valores de altura encontrados con el comando “*CanopyMaxima*” se verificaron a través del Lidar Data Viewer, visualizador permite analizar arboles individuales, parcelas y perfiles (McGaughey, 2018). La **Figura 54** muestra el perfil de los árboles ubicados en zonas densas del área de estudio, esta herramienta resulto útil al momento de evaluar la distribución de alturas a lo largo de una zona de interés, teniendo una reconstrucción en la cual se pudo distinguir el perfil de altura en arboles por colores.

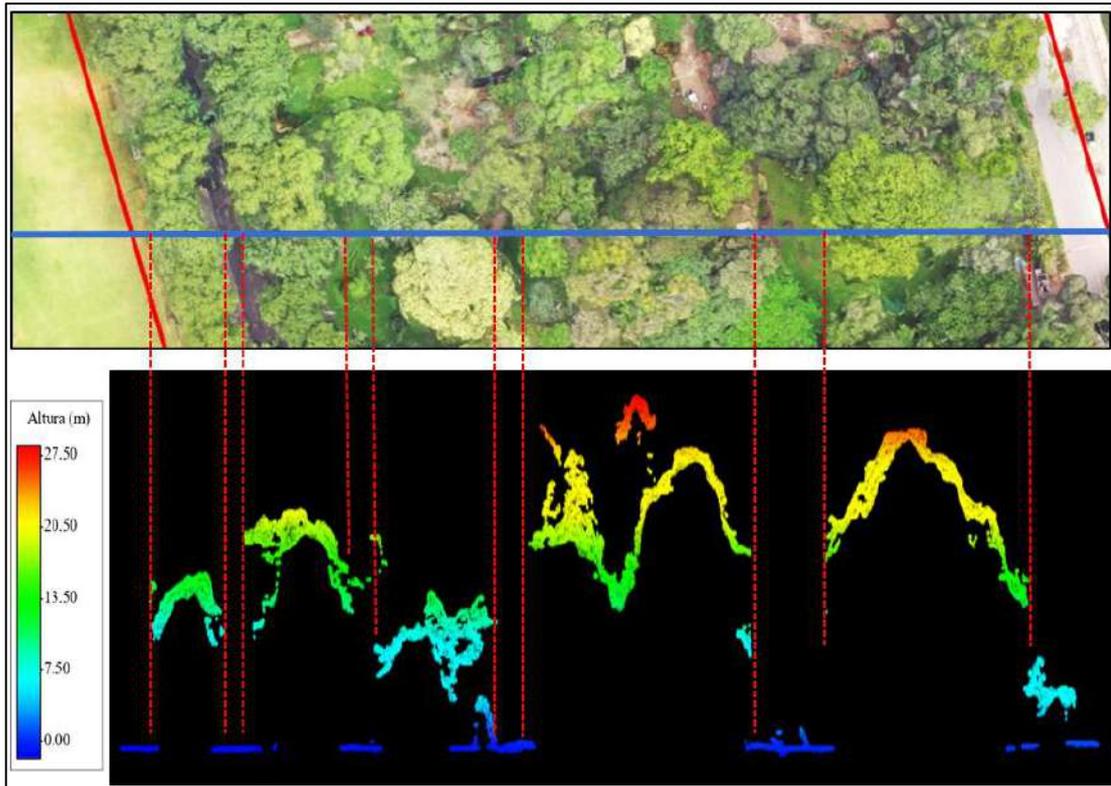


Figura 54: Perfil de altura total de árboles en el visualizador de datos lidar del software fusion

El comando “*CanopyMaxima*” tiene la función principal de localizar y extraer la altura total a los árboles del área de estudio. Además, permite obtener archivos en formato “shape” del contorno o delimitación de las copas de los árboles identificados (McGaughey, 2018). Con estos insumos se llegó a estimar la altura total en árboles y reconstruir modelos tridimensionales de cada uno, la **Figura 55** muestra el mapa de ubicación de los árboles pertenecientes al jardín botánico y la reconstrucción tridimensional de árboles individualizados.

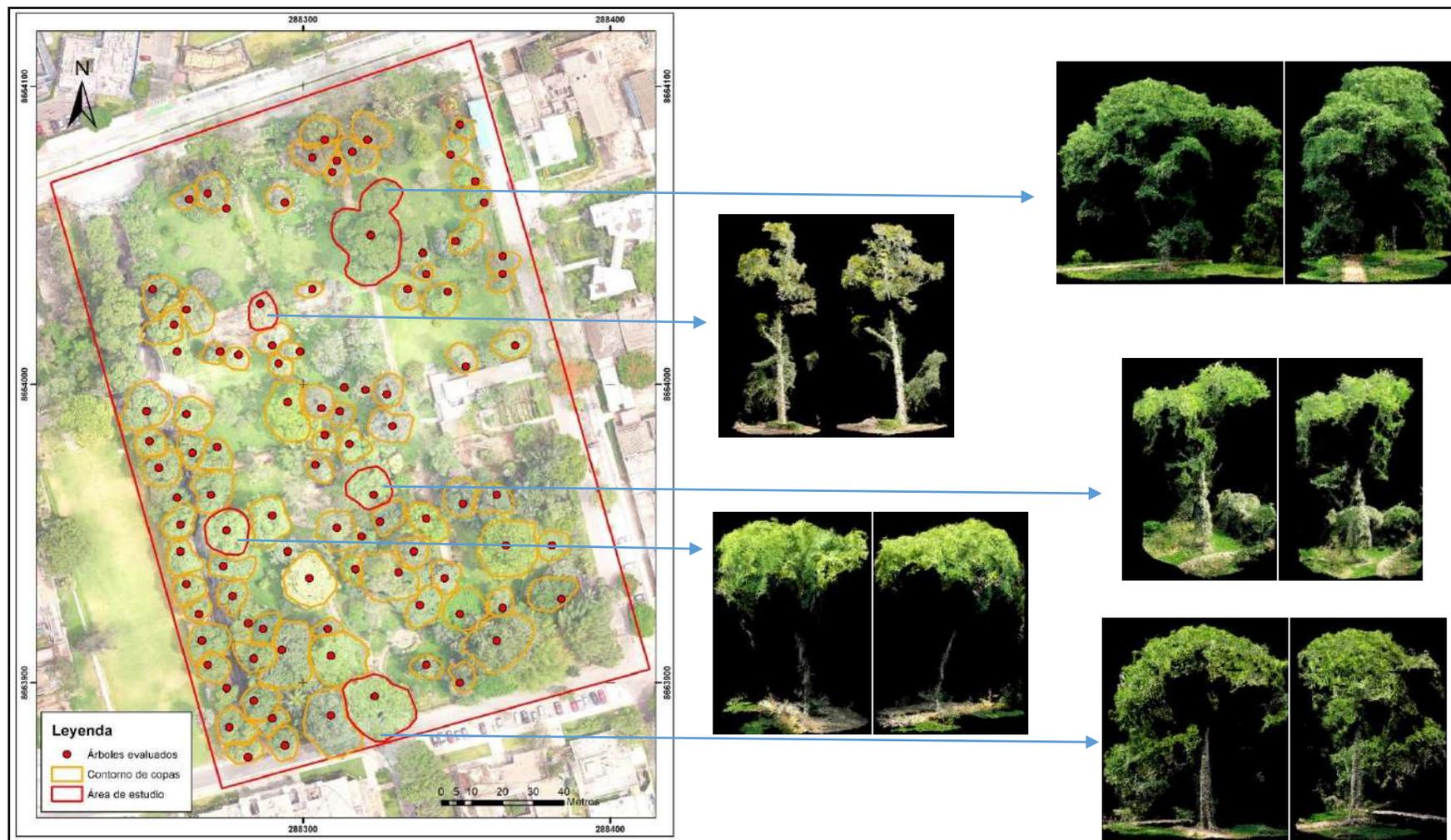


Figura 55: Modelos tridimensionales de árboles obtenidos del tratamiento C4

Según Wallace et al., (2016), la densidad de puntos generados a partir de vuelos fotogramétricos es mucho mayor a la generada por sensores lidar, sin embargo, esta no tiene la capacidad de penetrar en el dosel del bosque, generando modelos superficiales en los cuales es difícil la reconstrucción completa de árboles en comparación con la nube de puntos de sensores lidar que permite una reconstrucción muy cercana a la realidad. Sin embargo, este estudio demuestra la posibilidad de obtener modelos de altura total de árboles completos a partir de vuelos fotogramétricos con RPAS.

4.4.2 Medición de altura total de árboles en campo

Como resultado de la medición en campo se localizó espacialmente a 99 árboles pertenecientes al jardín botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen con ayuda de un GPS garmin 64s y se midió la altura de los mismos con un hipsómetro Vertex IV, en la **Tabla 10** se muestra la ubicación y altura de los árboles evaluados.

Tabla 10: Árboles evaluados en campo pertenecientes al Jardín botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

N° de árbol	Coordenada X	Coordenada Y	Altura total	N° de árbol	Coordenada X	Coordenada Y	Altura total
1	288363	8663963	21.9	51	288340	8663955	25
2	288312	8664065	20.9	52	288317	8663938	26.8
3	288303	8664076	28.3	53	288308	8663918	24
4	288307	8664082	30.8	54	288309	8663909	24.5
5	288311	8664075	35.5	55	288293	8663911	21
6	288316	8664078	35.2	56	288323	8663893	31.5
7	288321	8664082	40.5	57	288340	8663906	21
8	288348	8664077	13.1	58	288351	8663900	21.8
9	288356	8664068	15.8	59	288366	8663946	29.4
10	288359	8664061	14.2	60	288381	8663946	20.3
11	288353	8664047	15	61	288384	8663928	14.1
12	288365	8664043	21.5	62	288365	8663925	19.8

13	288369	8664013	26.8	63	288351	8663923	19.7
14	288353	8664006	25.1	64	288363	8663914	21.3
15	288347	8664031	13.1	65	288249	8663991	19.5
16	288340	8664037	13.5	66	288250	8663981	16.5
17	288339	8664044	19.6	67	288253	8663972	17.5
18	288334	8664032	28	68	288259	8663962	12.5
19	288322	8664050	34.6	69	288260	8663953	15.5
20	288303	8664032	24.9	70	288260	8663944	14.6
21	288286	8664027	33.6	71	288262	8663933	15.6
22	288294	8664061	13.5	72	288266	8663923	15
23	288269	8664064	18.2	73	288267	8663914	15
24	288275	8664059	11.6	74	288269	8663906	13.4
25	288262	8664025	17.1	75	288273	8663896	10.7
26	288273	8664011	14.7	76	288276	8663885	15.4
27	288279	8664010	15.9	77	288282	8663875	15.4
28	288292	8664007	15.8	78	288262	8663990	17.3
29	288290	8664013	15	79	288264	8663977	17
30	288295	8663994	21.1	80	288270	8663963	21
31	288272	8663979	18.8	81	288275	8663951	20.7
32	288327	8663999	41.7	82	288274	8663939	14.6
33	288323	8664000	24.7	83	288277	8663929	14.3
34	288314	8664002	10.7	84	288294	8663879	12.5
35	288312	8663991	14.2	85	288290	8663888	16.6
36	288306	8663992	35.5	86	288284	8663894	16.6
37	288307	8663983	13.6	87	288280	8663918	20
38	288315	8663980	17	88	288284	8663908	20.5
39	288304	8663973	21.6	89	288287	8663918	21
40	288323	8663963	24.2	90	288309	8663889	27.1
41	288290	8663956	18.4	91	288329	8663986	20.5
42	288295	8663944	10.6	92	288299	8664011	17.6
43	288302	8663935	19	93	288259	8664011	17.2
44	288311	8663952	31.6	94	288258	8664020	18.1
45	288319	8663949	11	95	288251	8664032	19.3

46	288325	8663954	15	96	288263	8664062	16.2
47	288336	8663944	27.3	97	288351	8664087	14.1
48	288331	8663937	39.2	98	288365	8664037	14.9
49	288346	8663935	15.8	99	288352	8663960	20.7
50	288338	8663926	16.8				

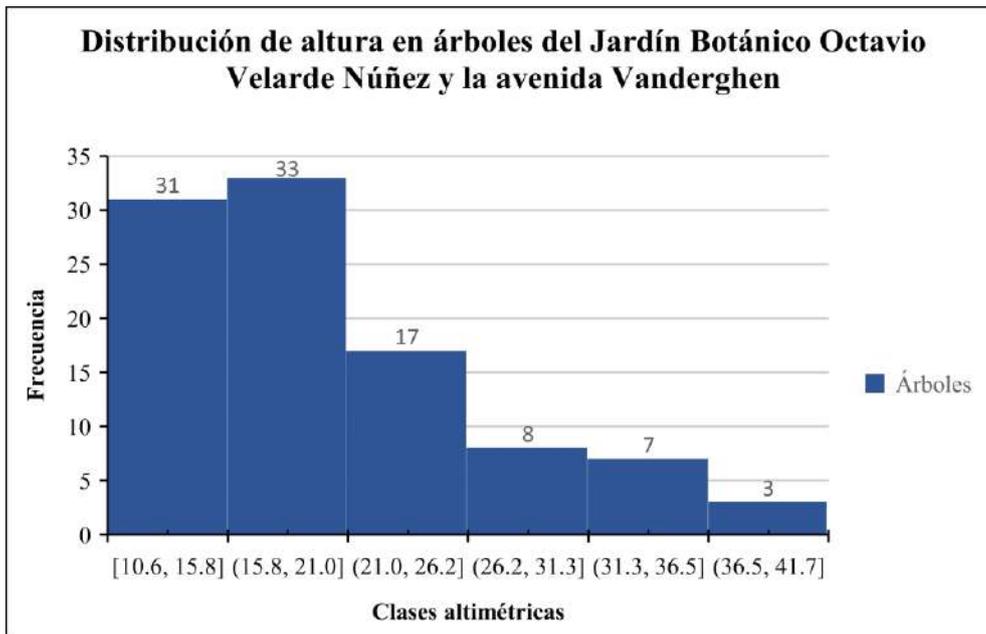


Figura 56: Distribución de altura en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez

En la **Figura 56** se presenta la distribución de altura en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen medidas con hipsómetro vertex IV. La altura mínima es de 10.6 metros, la altura máxima es de 41.7 metros y la media es de 20.16 metros. La distribución de altura de los árboles evaluados no sigue una distribución normal, por ello el análisis estadístico se realiza con pruebas no paramétricas.

4.5 Comparación de estados bajo distintos parámetros de vuelo

4.5.1 Análisis Exploratorio

Con el propósito de analizar la variabilidad de la altura en los árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen, la **Tabla 11** presenta los estadísticos descriptivos de la variable altura total en árboles, medida bajo cinco tratamientos: hipsómetro Vertex IV, C1, C2, C3 y C4. Se observó que los resultados de tratamientos derivados de vuelos fotogramétricos tuvieron un menor coeficiente de variabilidad que el tratamiento de medición en campo con hipsómetro Vertex IV.

Tabla 11: Estadísticos descriptivos de la altura en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

Tratamiento	altura mínima	Q1	Mediana	Q3	altura máxima	Media	CV	n
Vertex IV	10,6	15	18,4	24,00	41,7	20,16	34,76	99
C1	10,9	14,63	17,11	21,44	32,95	18,63	26,68	76
C2	12,95	14,96	18,13	23,27	37,17	19,96	30,47	83
C3	12,73	15,06	17,60	21,12	35,51	19,0	27,96	77
C4	13,05	15,22	18,41	24,38	38,03	20,22	31,50	88

En la **Figura 57** se aprecia el histograma de frecuencias de la variable altura total en árboles obtenido bajo cinco tratamientos. Se encontró que la variable altura total no sigue una distribución normal bajo ninguno de los tratamientos, lo cual fue corroborado con una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, prueba recomendada por tener un tamaño de muestra mayor a 50 (J. G. Garcia, Lopez, & Calvo, 2009). A un nivel de significancia de 0.05.

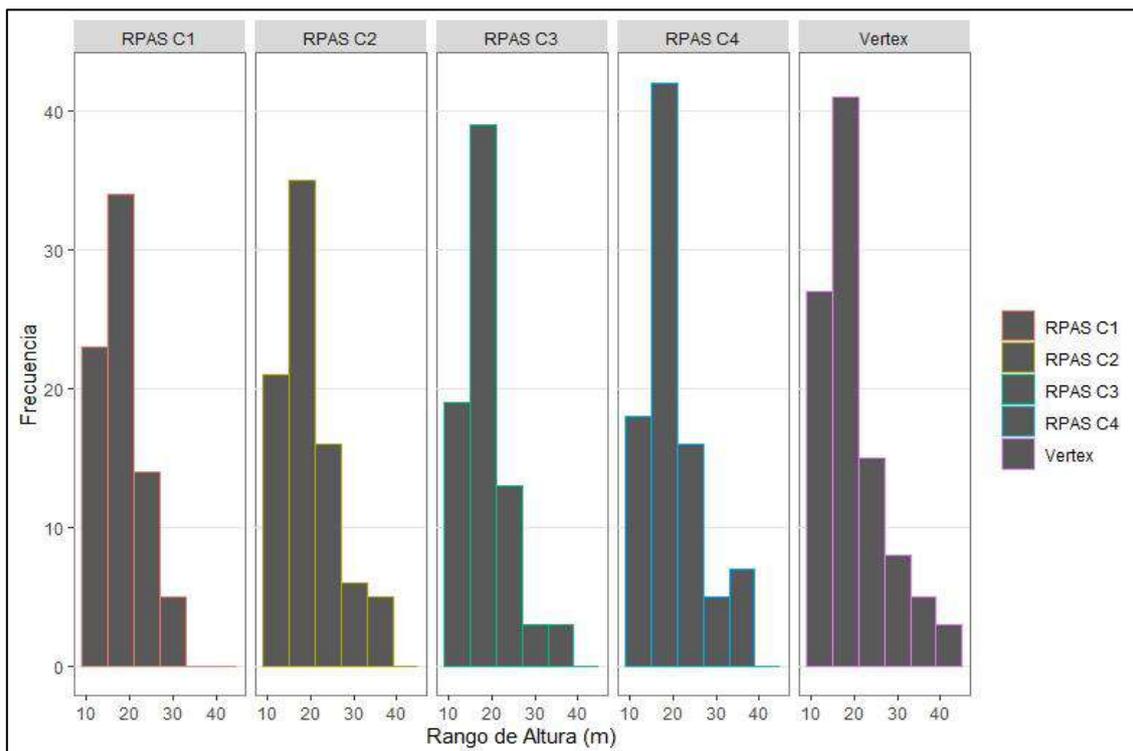


Figura 57: Histograma de frecuencias para los tratamientos de medición de altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

La **Figura 58** presenta el diagrama de cajas y bigotes de la variable altura total en árboles obtenido bajo cinco tratamientos, los tratamientos presentan valores de mediana muy cercanos (**Tabla 11**). Sin embargo, el rango Inter cuartil (Q1-Q3) presenta variabilidad entre tratamientos en la amplitud de bigotes y la cantidad de valores outliers, lo cual significaría una diferencia en la forma de dispersión de los tratamientos (Soporte de Minitab 18, 2020). Para verificar si la dispersión es estadísticamente significativa entre tratamientos se realizó la prueba de Friedman.

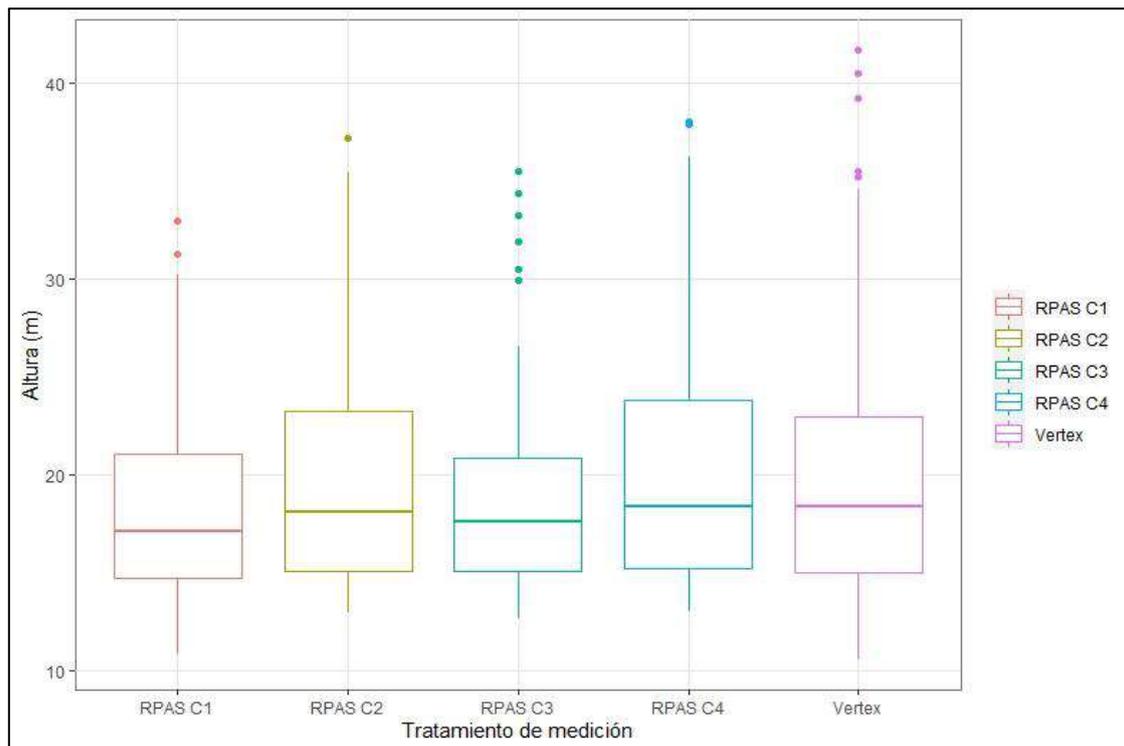


Figura 58: Diagrama de cajas para los tratamientos de medición de altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

4.5.2 Prueba de Friedman

Se utilizó la prueba de Friedman (1937), análoga a la prueba ANOVA de medidas repetidas para variables que no siguen una distribución normal.

Fueron 70 árboles que se localizaron por cada uno de los cuatro tratamientos de vuelos fotogramétricos y la medición en campo con vertex IV con el objetivo de probar la hipótesis:

$$H_0: Me_{\text{vertex}} = Me_{\text{tratamientoC1}} = Me_{\text{tratamientoC2}} = Me_{\text{tratamientoC3}} = Me_{\text{tratamientoC4}}$$

H_1 : Al menos uno de los tratamientos es diferente.

Nivel de significancia: 0,05

Tabla 12: Prueba de Friedman para cinco tratamientos de medición de altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

	Test de Friedman	
Tratamiento	Rangos	N
Vertex	270,0	70
RPAS C1	144,5	70
RPAS C2	199,5	70
RPAS C3	177,5	70
RPAS C4	258,5	70
p value Friedman	2,23821e-13	
p value chisq	3,996803e-15	

De acuerdo con los resultados de la **Tabla 12**, el p-valor de Friedman resulto ser menor a 0.05, por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula planteada, concluyendo que por lo menos uno de los tratamientos de medición de altura total en árboles es estadísticamente diferente. Para conocer que tratamiento o tratamientos son estadísticamente diferentes se realizó el análisis Post Hoc de Friedman (**Tabla 13**).

Tabla 13: Análisis Post Hoc de Friedman

Post Hoc Friedman Análisis		
Nivel de significancia: 0,05		
Tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes		
Tratamiento	Suma de rangos	Grupo
Vertex	270,0	a
C4	258,5	a
C2	199,5	b
C3	177,5	b
C1	144,5	c

De acuerdo con la **Tabla 13**, se demostró que no hay diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos Vertex IV y RPAS C4, siendo este tratamiento el que presenta los mejores resultados en la estimación de altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen. Asimismo, entre el tratamiento RPAS C2 y RPAS C3 no existen diferencias estadísticamente significativas. Los resultados más deficientes se encontraron con el tratamiento RPAS C1.

Se demostró que estadísticamente no hay diferencia en la medición de altura total en árboles en campo con hipsómetro Vertex IV frente a la estimación de la altura total en árboles a través de vuelos fotogramétricos con parámetros de altura de vuelo de 100 metros y ángulo de cámara de 70°.

De acuerdo con Ota, Ogawa, Mizoue, Fukumoto, & Yoshida (2017) y Bueno, Bourscheidt, Pezzopane, Bernardi, & Crestana (2019) se puede generar modelos tridimensionales a partir de vuelos fotogramétricos con RPAS que estimen propiedades y atributos como la altura total de los árboles con éxito. Además, los parámetros de configuración del vuelo fotogramétrico pueden alterar la precisión de estos modelos (Puliti et al., 2015). Las afirmaciones de estos autores son corroboradas con los resultados de este estudio, donde se pudo estimar con éxito la altura total de árboles a partir de modelos generados por vuelos fotogramétricos y donde las variaciones en los parámetros de altura de vuelo y ángulo de la cámara del RPAS Mavic 2 pro generaron diferencias significativas en las reconstrucciones tridimensionales y por ende en la precisión de estimación de la altura total de árboles.

En la **Figura 59** se representa a la altura total de árboles medido con hipsómetro Vertex IV en el eje Y versus la altura total de árboles estimada a partir de los tratamientos C1, C2, C3 y C4 en el eje X. Se evidenció que a medida que se incrementa el ángulo de cámara y la altura de vuelo, la dispersión de los valores se ajusta más a la línea de tendencia, demostrando que es posible mejorar los modelos para la estimación de altura total de árboles en base a la configuración apropiada de los parámetros de vuelo fotogramétrico, reafirmando lo planteado por Puliti, Ørka, Gobakken, & Næsset en 2015.

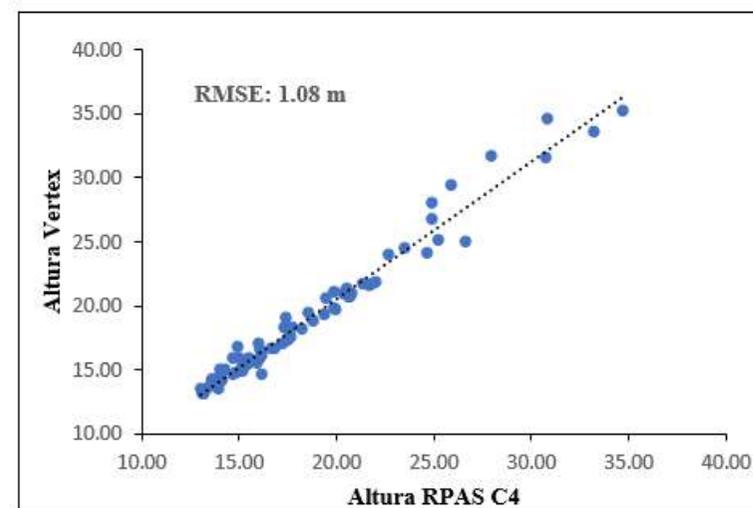
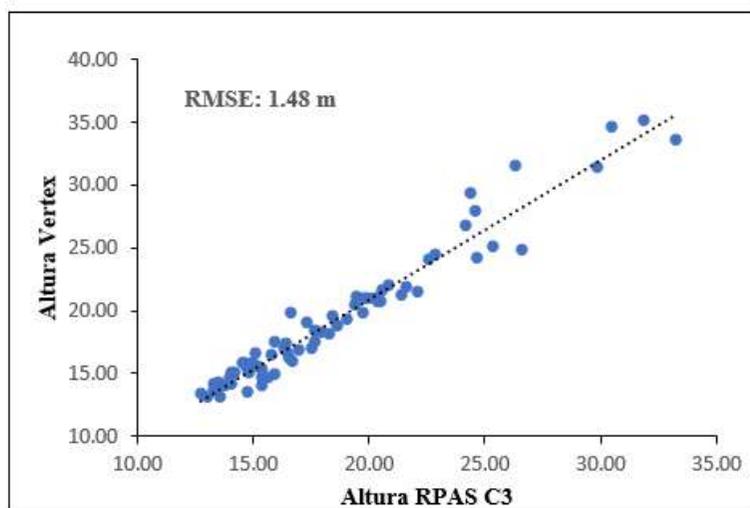
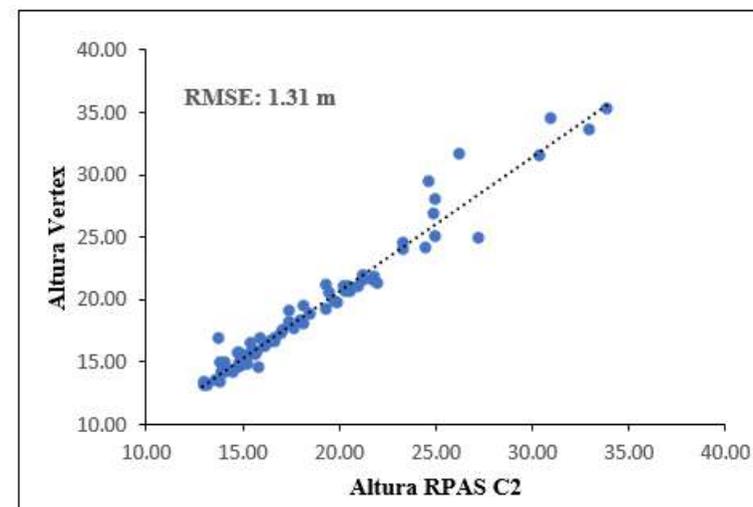
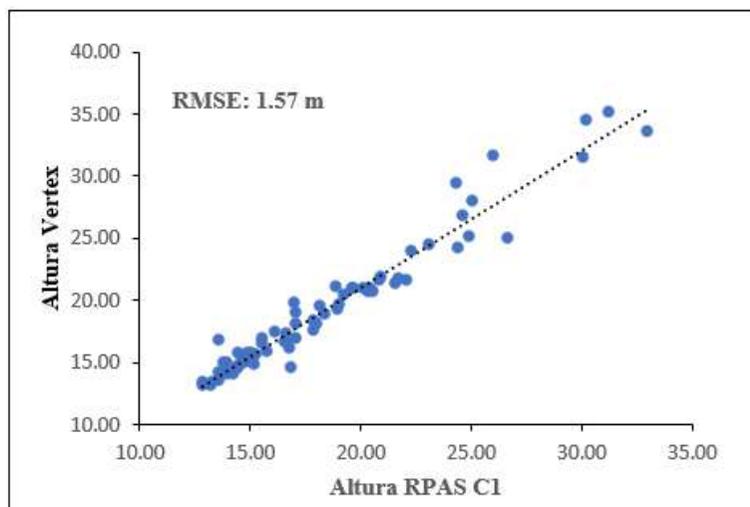


Figura 59: Altura total medida con Vertex IV versus Altura total estimada con los tratamientos C1, C2, C3 y C4 de árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen

En la **Figura 59** se aprecia que a medida que incrementa la altura en los árboles evaluados, también incrementa el error, visibilizándose con el aumento en la dispersión de los puntos frente a la línea de tendencia. Lisein, Pierrot-Deseilligny, Bonnet, & Lejeune (2013) realizaron vuelos fotogramétricos con un RPAS Gatewing X100 con la finalidad de generar modelos de altura de un bosque de coníferas con considerables variaciones de altura entre individuos en un área cercana a la villa de Felenne, Bélgica. Los resultados de su estudio mostraron modelos de estimación de altura total con un RMSE de 1.65 y 1.68 metros, concluyendo que, el incremento en el error se debe a la medición de rodales con gran variación de altura total entre individuos.

Los resultados de Lisein, Pierrot-Deseilligny, Bonnet, & Lejeune, se reafirmaron en este estudio, ya que al incrementar la variación de altura total de los árboles se incrementara el error estándar de su estimación a partir de modelos fotogramétricos (**Figura 59**).

Los modelos generados para estimar la altura total en árboles del Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez y la avenida Vanderghen con los tratamientos C1, C2, C3 y C4 presentan RMSE de 1.57 m, 1.31 m, 1.48 m y 1.08 m respectivamente.

Swinfield, Lindsell, Williams, & Harrison (2019) reconocieron que, al utilizar vuelos fotogramétricos con RPAS para generar reconstrucciones tridimensionales de estimación de altura en árboles en un bosque tropical transicional en Hutan Harapan perteneciente a la isla de Sumatra, los modelos generados tenían RMSE de 1.85 m hasta 2.25 m, demostrando que una de las principales fuentes en el incremento del error fue la variación en la topografía del terreno, la cual es difícil de reconocer con vuelos fotogramétricos convencionales.

En contraste, en este estudio el área de evaluación fue un terreno considerado plano, donde la cobertura arbórea no cubrió completamente el suelo y se obtuvo mejores resultados, por ello, se ratifica la hipótesis planteada por Swinfield, Lindsell, Williams, & Harrison.

Se reconoce que el uso de los puntos de control en tierra (GCP), modelos digitales del terreno de calidad y avances en el despliegue de sensores lidar y el lanzamiento de sensores satelitales para la investigación de la dinámica del ecosistema global (GEDI) (Swinfield et al., 2019), mejoran la calidad de los modelos y disminuyen el RMSE.

Sin embargo, este estudio demuestra que, sin hacer uso de puntos de control en tierra ni modelos digitales del terreno con sensores lidar, es posible generar modelos representativos del área de estudio con errores estándar de estimación de altura total de árboles menores a 2 metros haciendo uso de un RPAS Mavic 2 pro con la correcta configuración de parámetros de vuelo y trabajo de gabinete.

Mikita, Janata, & Surovò (2016) comprobaron que, existe un incremento en la eficiencia económica al realizar la estimación de atributos de los árboles a partir de vuelos fotogramétricos con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) en comparación con la medición en campo tradicional, lo que se expresa en reducción de costos de labores. Sin embargo, también hicieron énfasis en el incremento en costos de equipos como el RPA, sistemas de posicionamiento global de alta precisión, sensores lidar para generar modelos digitales del terreno y la compra de licencias de softwares para el procesamiento fotogramétrico. En contraste, el presente estudio verificó que existe disminución en el tiempo de labores en campo e incremento de información del rodal como reconstrucciones tridimensionales de cada árbol evaluado.

De acuerdo con Krause, Sanders, Mund, & Greve (2019), las mediciones indirectas de altura de árboles en el campo a través de instrumentos como hipsómetros o estimación visual, tienden a sobreestimar la altura de árboles. En comparación, la estimación de altura en árboles a partir de vuelos fotogramétricos tiende a subestimar la altura total de árboles. Este sesgo fue corroborado en este estudio; ya que, al evaluar individuos con mayor altura, la diferencia entre el valor obtenido de medición en campo y el obtenido a partir de vuelos fotogramétricos fue mayor, ya que la medición a partir de hipsómetro tiende a incrementar el error con el incremento en altura de árboles y la reconstrucción tridimensional de un árbol tiende a ser menos representativa cuando el individuo es más alto.

Hoy en día, se reconoce las dificultades para obtener datos óptimos con resoluciones espaciales y temporales finas durante periodos prolongados de tiempo y a costo razonable (Anderson & Gaston, 2013). Es así que, este estudio reafirma el uso de RPAS como una oportunidad para la obtención de atributos de árboles con resoluciones más finas y a menores costos. Asimismo, se reconoce la miniaturización de la tecnología drone, haciendo RPAS

más pequeños con cargas útiles más ligeras y portables para el usuario como el empleado en este estudio.

V. CONCLUSIONES

- La secuencia metodológica propuesta en la presente investigación permite generar modelos de estimación de altura total en árboles a partir del procesamiento de vuelos fotogramétricos con RPAS.
- La variabilidad en la configuración de los parámetros de altura de vuelo y ángulo de la cámara en vuelos fotogramétricos con RPAS produce diferencias significativas en la precisión de estimación de altura total de árboles.
- La configuración de parámetros de vuelo del RPAS Mavic 2 pro, propuesto para la estimación de altura total en árboles, en los tratamientos C1, C2 y C3 genera diferencias estadísticas significativas en comparación con el uso de hipsómetro Vertex IV en campo.
- La configuración de parámetros de vuelo del RPAS Mavic 2 pro, que estima con mayor precisión la altura total en árboles del jardín botánico Octavio Velarde Nuñez, y que no genera diferencias estadísticas significativas, es la propuesta en el tratamiento C4: altura de vuelo 100 metros, ángulo de cámara 70°, traslape 80% y velocidad de vuelo 7 m/s.
- Estimar la altura total en árboles a partir de vuelos fotogramétricos con RPAS, portables y económicamente rentables como el usado en esta investigación, ofrece reducir tiempo y costos de trabajo en campo, además, ofrece fuentes de información adicional como ortofotos y modelos tridimensionales del área evaluada.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar proyectos de vuelo fotogramétrico con RPAS para la estimación de altura en árboles haciendo uso de puntos de control en tierra, modelos digitales de terreno, modos de vuelo RTK y PPK.
- Se recomienda realizar el proyecto de vuelo fotogramétrico con RPAS utilizando la configuración “automática” de la cámara.
- Para generar modelos de reconstrucción tridimensional a partir de nube de puntos se recomienda ejecutar planes de vuelo de doble grilla.
- Se recomienda realizar análisis comparativos en entre los modelos generados de proyectos de vuelos fotogramétricos en los diferentes softwares de fotogrametría como pix4D, Photoscan, entre otros.
- Se recomienda probar la metodología utilizada en este trabajo de investigación en diferentes tipos de cobertura forestal como bosques naturales, bosques secundarios, rodales homogéneos y plantaciones forestales, poniendo en práctica la relación entre las copas, el diámetro a la altura del pecho, la altitud de árbol y el volumen de árboles en inventarios forestales.
- Se recomienda que, al momento de realizar la comparación de alturas obtenidas de un mismo individuo bajo diferentes instrumentos o metodologías, como la propuesta en esta investigación, se propongan rangos permisibles de tolerancia a la diferencia que pudiera existir entre los valores obtenidos en su medición.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138–146. <https://doi.org/10.1890/120150>
- Balenović, I., Jurjević, L., Milas, A. S., & Gašparović, M. (2019). Testing the Applicability of the Official Croatian DTM for Normalization of UAV-based DSMs and Plot-level Tree Height Estimations in Lowland Forests. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 40(1), 163–174.
- Barrena Arroyo, V., & Llerena Pinto, C. (1988). Influencia De Los Errores De Estimacion De La Altura En El Calculo Del Volumen. *Revista Forestal del Perú*, 15(1), 1–11. Recuperado de <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/131/129>
- Braulio Vite, C. I. (2005). “ *Principios Básicos De La Fotogrametría Actual* ”.
- Bueno, J. O. A., Bourscheidt, V., Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. C., & Crestana, S. (2019). Metodologia para estimar altura de árvores com base em imagens aéreas capturadas por drone. *SIAGRO - Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária - 2019*, pp. 1–5. Recuperado de <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1114445/metodologia-para-estimar-altura-de-arvores-com-base-em-imagens-aereas-capturadas-por-drone>.
- Cancino, J. (2007). *Dendrometría Básica* (Universidad de Concepción.). Recuperado de <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/407>
- Carretero Segarra, S. (2015). *Modelos digitales del terreno mediante fotogrametría aérea realizada con un vehículo aéreo no tripulado*. 1–60. Recuperado de http://oa.upm.es/37590/1/PFC_Soledad_Carretero_Segarra.pdf
- Centro de Geociencias Aplicadas. (2014). *Principios de fotogrametría I*.
- Chave, J. (2005). *Medición de la altura del árbol, para árboles tropicales - Manual de Campo*. Recuperado de

[http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/manuals/TreeHeight_spanish\[1\].pdf](http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/manuals/TreeHeight_spanish[1].pdf)

Claros Canales, A. S. (2019). *ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE FUSTES A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS CAPTADAS DESDE UN VANT EN EL DISTRITO DE CHANCHAMAYO, JUNÍN*. Universidad Nacional Agraria la Molina.

Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, *136*, 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>

Dirección General de Aeronautica Civil. (2015). *Norma Técnica Complementaria 001-2015*.

DJI. (2019). *Mavic 2 Pro / Zoom User manual v2.0*.

Domingo, D., Ole, H., Næsset, E., Kachamba, D., & Gobakken, T. (2019). Effects of UAV Image Resolution, Camera Type, and Image Overlap on Accuracy of Biomass Predictions in a Tropical Woodland. *Remote Sensing*, *11*(8). <https://doi.org/10.3390/rs11080948>

Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. (2015). *los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (Vol. 67).

García Alonso, M. (2008). Evaluación del uso de la tecnología LIDAR en la estimación del contenido de carbono forestal. En *Technology*.

García García, I. (2017). *Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones*. Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/23021/1/TFG-P-528.pdf>

García, J. G., Lopez, N. C., & Calvo, J. Z. (2009). *Estadística Básica*. Recuperado de https://webs.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/ESTADISTICA/libro_GCZ2009.pdf

García, L. (2017). *Drones, el cielo está al alcance de todos*. Recuperado de https://www.edubcn.cat/rcs_gene/treballs_recerca/2015-2016-03-1-TR.pdf

García, O. (1995). *Apuntes de Mensura Forestal I. Estática*. Universidad Austral de Chile.

Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports*, *5*(3), 155–168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>

Iizuka, K., Yonehara, T., Itoh, M., & Kosugi, Y. (2018). Estimating Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Digital surface models and orthophotos

- obtained with an unmanned aerial system for a Japanese Cypress (*Chamaecyparis obtusa*) Forest. *Remote Sensing*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/rs10010013>
- Imaña, J. (2011). *Mensura Dasométrica*.
- Jauregui, L. (s/f). *Fotogrametría Básica*.
- Krause, S., Sanders, T. G. M., Mund, J. P., & Greve, K. (2019). UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. *Remote Sensing*, 11(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs11070758>
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4(4), 922–944. <https://doi.org/10.3390/f4040922>
- López de la Sierra, A. (2014). *Planificación de vuelos fotogramétricos para u.a.v. sobre cliente qgis*. 1–32.
- Malleux, J. 1970. Estudio de la Relación D.A.P. con el Diámetro de Copa en un Bosque Húmedo Sub Tropical. Lima, PE. Revista Forestal del Perú 4 (1-2): 1-5. Malleux, J. 1982. Inventarios Forestales en Bosques Tropicales. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 414p.
- McGaughey, R. J. (2018). *FUSION / LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. Recuperado de http://forsys.cfr.washington.edu/Software/FUSION/FUSION_manual.pdf
- Mikita, T., Janata, P., & Surovò, P. (2016). Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. *Forests*, 7(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f7080165>
- Ministerio del Ambiente. (2015). Guía de inventario de la flora y vegetación. En *Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural* (Ministerio). Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/GUÑA-A-DE-FLORA-Y-VEGETACIÃ“N.compressed.pdf>
- Neira, R. A. (2005). *fotografía aerea*.
- Ojeda, W., & Terrazas, J. (1987). Revista Forestal del Perú v. 13(2):1-31. *Revista Forestal*

- Perú, 13(2), 1–31. Recuperado de http://redpeia.minam.gob.pe/admin/files/item/4d8140f161229_MODULO_III_Identificacion_de_especies_de_flora_silvestre_y_productos_derivados_comercializados_co.pdf
- OSINFOR. (2012). *PROTOCOLO PARA LA EVALUACIÓN DE INDIVIDUOS MADERABLES*.
- Ota, T., Ogawa, M., Mizoue, N., Fukumoto, K., & Yoshida, S. (2017). Forest Structure Estimation from a UAV-Based Photogrammetric Point Cloud in Managed Temperate Coniferous Forests. *Forests*, 8(9), 1–11. <https://doi.org/10.3390/f8090343>
- Otero, I., Ezquerro, A., Rodríguez, R., & Martín, L. (2010). *FOTOGRAMETRÍA I*.
- Pacheco, C., & Pozzobon, E. (2011). *Fotogrametría y Fotointerpretación*.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surov, P., & Chiteculo, V. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2392–2410. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>
- Pix4D. (2017a). *Pix4D mapper Guía de Inicio*. Recuperado de https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/Getting+Started+PDFs/traductions/Pix4Dmapper_Getting_Started_Master_4.0_ES_FINAL.pdf
- Pix4D. (2017b). *USER MANUAL Pix4Dmapper 4.1*. Recuperado de www.pix4d.com
- Pix4D. (2019). *What is accuracy in an aerial mapping project ?* (April), 1–4.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). Mensura Forestal. En *Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible*. San José, Costa Rica.
- Puliti, S., Ørka, H. O., Gobakken, T., & Næsset, E. (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 7(8), 9632–9654. <https://doi.org/10.3390/rs70809632>
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*.
- Ruiz, J. (2013). *Generación de mapas 3D a partir de imágenes aéreas*.
- Sánchez, J. A. (2014). Introducción a La Fotogrametría. En *Cátedra de Topografía* (p. 58).

<https://doi.org/10.13140/2.1.1072.6722>

Santamaria, J., & Sanz, T. (2011). *Fundamentos de fotogrametría*.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2017). *NUESTROS BOSQUES EN NÚMEROS. Primer reporte del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre*.
<https://doi.org/10.1007/s11042-014-2323-5>

Shin, P., Sankey, T., Moore, M. M., & Thode, A. E. (2018). Evaluating unmanned aerial vehicle images for estimating forest canopy fuels in a ponderosa pine stand. *Remote Sensing*, 10(8), 3–5. <https://doi.org/10.3390/rs10081266>

Soporte de Minitab 18. (2020, diciembre). Interpretar los resultados clave para Gráfica de caja - Minitab. Recuperado el 2 de diciembre de 2020, de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/graphs/how-to/boxplot/interpret-the-results/key-results/>

Swinfield, T., Lindsell, J., Williams, J., & Harrison, R. (2019). Accurate Measurement of Tropical Forest Canopy Heights and Aboveground Carbon Using Structure From Motion. *Remote Sensing*, 11(8), 16. <https://doi.org/10.3390/rs11080928>

Tabuchi Fukuhara, R. T. (2015). Diseño de un vehículo aéreo no tripulado de cuatro rotores para una carga útil de 1 kg. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6105>

Tacca Quelca, H. (2015). Comparación de resultados obtenidos de un levantamiento topográfico utilizando la fotogrametría con drones al método tradicional. *Universidad Nacional del Altiplano*, 1, 124.

Tagle, X. (2019). *TALLER SOBREVUELOS CON VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS (UAVs) PARA*.

Tomaščík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK method-An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sensing*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/RS11060721>

Universidad Nacional Agraria la Molina. (2019). *Plan Maestro rumbo al 2030*. 23.

Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning

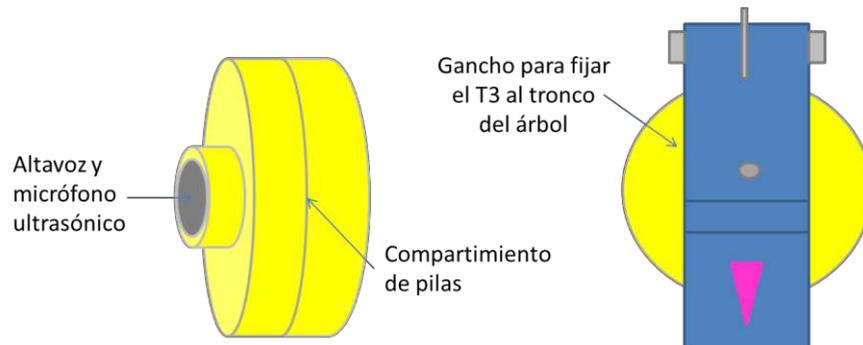
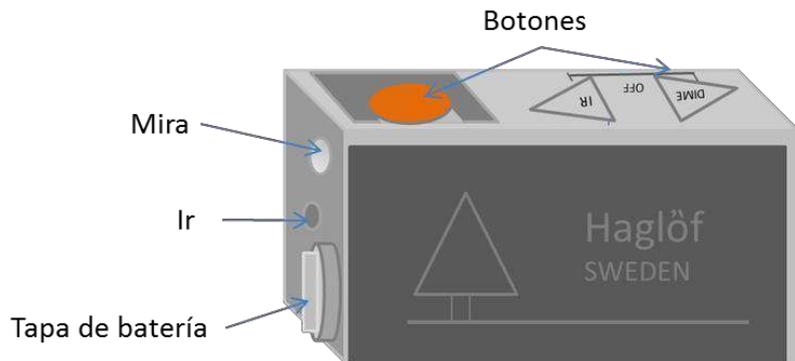
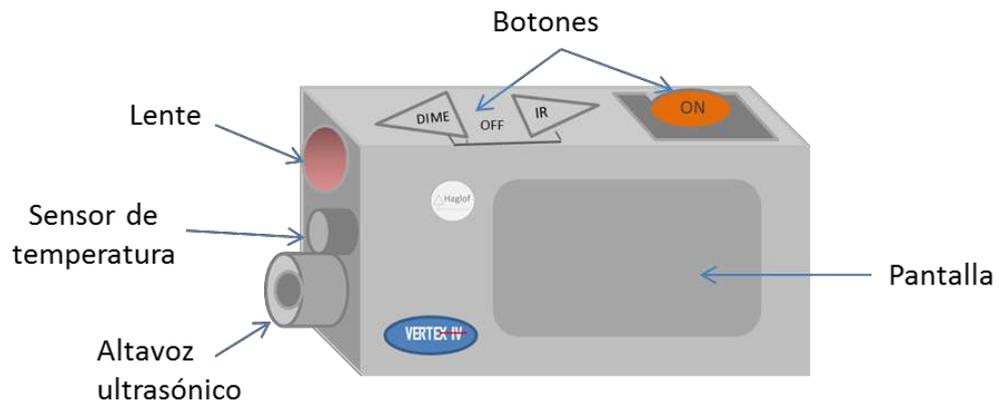
and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(3), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/f7030062>

Zelaya, C., Aguiar, R. G., Cruz, A. E., & Ricardo, N. (2016). *Aplicacion de fotogrametria aerea en levantamientos topograficos mediante el uso de vehiculos aereos no tripulados*. 319. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14218/1/50108282.pdf>

Zuñiga, C. (2014). *Manual Práctico del Uso del Vertex para inventarios forestales*.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES DEL HIPSOMETRO VERTEX



Vertex IV	
Peso:	Liviano
Batería:	1 x 1.5 AA alcalina
Tamaño	80x50x30 mm
temperatura	15 a 45 °C
Frecuencia ultrasónica	25 KHz
Altura	0 - 999 m
Angulo	55 .. 85 (degrees)
Resolución ángulo	0.1
Distancia con transponder 60°	30m o mayor
Distancia con transponder 360°	20 o mayor
Resolución de distancia	0.01 m
exactitud de distancia	1% o mayor
Bluetooth	Modelo -BT SPP Slave serial profile
Transponder T3	
Tamaño	Diámetro 70 mm
Peso	85 gr
Batería	1 x 1.5 AA alcalina
Corriente	100 mA

ANEXO 2: ESPECIFICACIONES DEL MAVIC 2 PRO

CÁMARA

Sensor	1" CMOS Píxeles efectivos: 20 millones
Objetivo	FOV: 77° Formato equivalente a 35 mm: 28 mm Apertura: f/2.8 - f/11 Distancia de enfoque: 1 m a ∞
Rango ISO	Vídeo: 100 - 6400 (automático) Foto: 100 - 3200 (auto) 100 - 12 800 (manual)
Velocidad de obturación	Obturador electrónico: 8 - 1/8000 s
Tamaño de fotografía	5472×3648
Modos de fotografía	Disparo único Disparo en ráfaga: 3/5 fotogramas Exposición automática en horquillado (AEB), 3/5 horquillas de exposición a 0.7 EV bias Intervalo: (JPEG): 2/3/5/7/10/15/20/30/60sRAW:5/7/10/15/20/30/60s

Resolución de vídeo	4K: 3840×2160 24/25/30p 2.7K: 2688×1512 24/25/30/48/50/60p FHD: 1920×1080 24/25/30/48/50/60/120p
Tasa de bits máx. de almacenamiento de	100 Mbps
Modo de color	Dlog-M (10 bits), permite vídeo en HDR (HLG 10 bits)
Sistemas de archivo compatibles	FAT32 (≤ 32 GB) exFAT (> 32 GB)
Formatos de fotografía	JPEG / DNG (RAW)
Formatos de vídeo	MP4 / MOV (MPEG-4 AVC/H.264, HEVC/H.265)

AERONAVE

Peso de despegue	907 g (Mavic 2 Pro)905 g (Mavic 2 Zoom)
Dimensiones	Plegado: 214×91×84 mm (largo × ancho × alto) Deplegado: 322×242×84 mm (largo × ancho × alto)
Distancia diagonal	354 mm
Velocidad máx. en ascenso	5 m/s (modo S) 4 m/s (modo P)
Velocidad máx. en descenso	3 m/s (modo S) 3 m/s (modo P)
Velocidad máxima (cerca del nivel del mar, sin viento)	72 km/h (modo S)
Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar	6000 m
Tiempo máx. de vuelo (sin viento)	31 minutos (a una velocidad constante de 25 km/h)
Tiempo máx. en vuelo estacionario (sin viento)	29 minutos
Distancia máx. de vuelo (sin viento)	18 km (a una velocidad constante de 50 km/h)

Resistencia al viento máx.	29 - 38 km/h
Ángulo de inclinación máx.	35° (Modo S, con control remoto) 25° (Modo P)
Velocidad angular máx.	200°/s
Rango de temperatura de funcionamiento	-10 °C - 40 °C
Frecuencia de funcionamiento	2.400 - 2.483 GHz 5.725 - 5.825 GHz
Transmisión de potencia (PIRE)	2.400 - 2.483 GHz: FCC: ≤26 dBm CE: ≤20 dBm 5.725 - 5.850 GHz: FCC: ≤26 dBm CE: ≤14 dBm
GNSS	GPS + GLONASS
Rango de precisión en vuelo estacionario	Vertical: ±0.1 m (con posicionamiento visual) ±0.5 m (con posicionamiento por GPS) Horizontal: ±0.3 m (con posicionamiento visual) ±1.5 m ((con posicionamiento por GPS)
Almacenamiento interno	8 GB

SISTEMA DE DETECCIÓN

Sistema de detección	Detección de obstáculos omnidireccional ¹
Frontal	Alcance de la medición con precisión: 0.5 - 20 m Alcance de detección: 20 - 40 m Velocidad de detección efectiva: ≤ 14 m/s Campo de visión (FOV): Horizontal: 40°, Vertical: 70°
Trasero	Alcance de la medición con precisión: 0.5 - 16 m Alcance de detección: 16 - 32 m Velocidad de detección efectiva: ≤12 m/s Campo de visión (FOV): Horizontal: 60°, Vertical: 77°

Superior	Alcance de la medición con precisión: 0.1 a 8 m
Inferior	Alcance de la medición con precisión: 0.5 a 11 m Rango de detección: 11 a 22 m
Lateral	Alcance de la medición con precisión: 0.5 a 10 m Velocidad de detección efectiva: ≤ 8 m/s FOV: Horizontal: 80°; Vertical: 65°
Entorno operativo	Frontal, trasera y lateral: Superficie con un patrón definido y una iluminación adecuada (lux > 15) Superior: Detecta superficies reflectantes difusas (>20%) (paredes, árboles, personas...) Inferior: Superficie con un patrón definido y una iluminación adecuada (lux > 15) Detecta superficies reflectantes difusas (>20%) (paredes, árboles, personas...)

CARGADOR

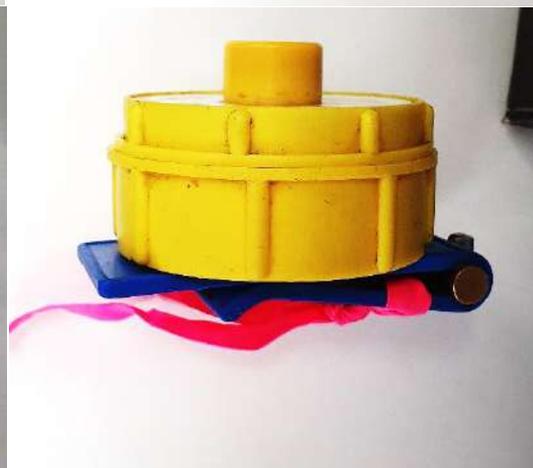
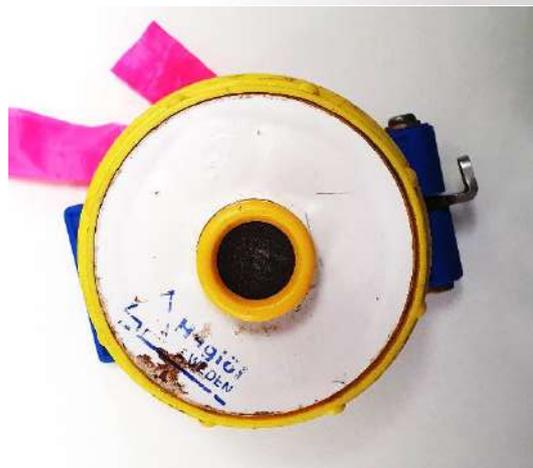
Entrada	100-240 V, 50/60 Hz, 1.8A
Salida	Principal: 17.6 V = 3.41 A or 17.0 V = 3.53 A USB: 5 V = 2 A
Voltaje	17.6 \pm 0.1 V
Potencia nominal	60 W

APLICACIÓN

Sistema de transmisión de vídeo	OcuSync 2.0
Nombre	DJI GO 4
Calidad de la retransmisión en directo	Control remoto: 720p a 30 fps / 1080p a 30 fps DJI Goggles: 720p a 30 fps / 1080p a 30 fps DJI Goggles RE: 720 a 30 fps / 1080p a 30 fps

Latencia (dependiendo de las condiciones del entorno y del dispositivo móvil)	120 - 130 ms
Bitrate máx. de video en directo	40 Mbps
Sistema operativo requerido	iOS 9.0 o posterior, Android 5.0 o posterior

ANEXO 3: ENTRENAMIENTO EN EL USO DE INSTRUMENTOS DE MEDICION EN CAMPO





ANEXO 4: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAMETRICO DEL TRATAMIENTO RPAS C1



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

Calibration Details

1

Number of Calibrated Images	317 out of 317
Number of Geolocated Images	317 out of 317

2 Initial Image Positions

2

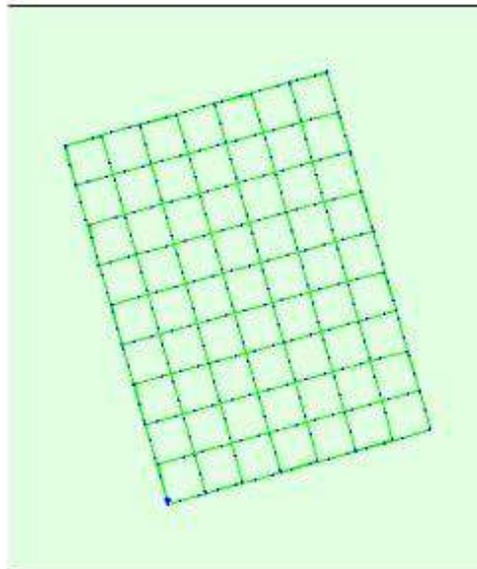


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

3 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

3

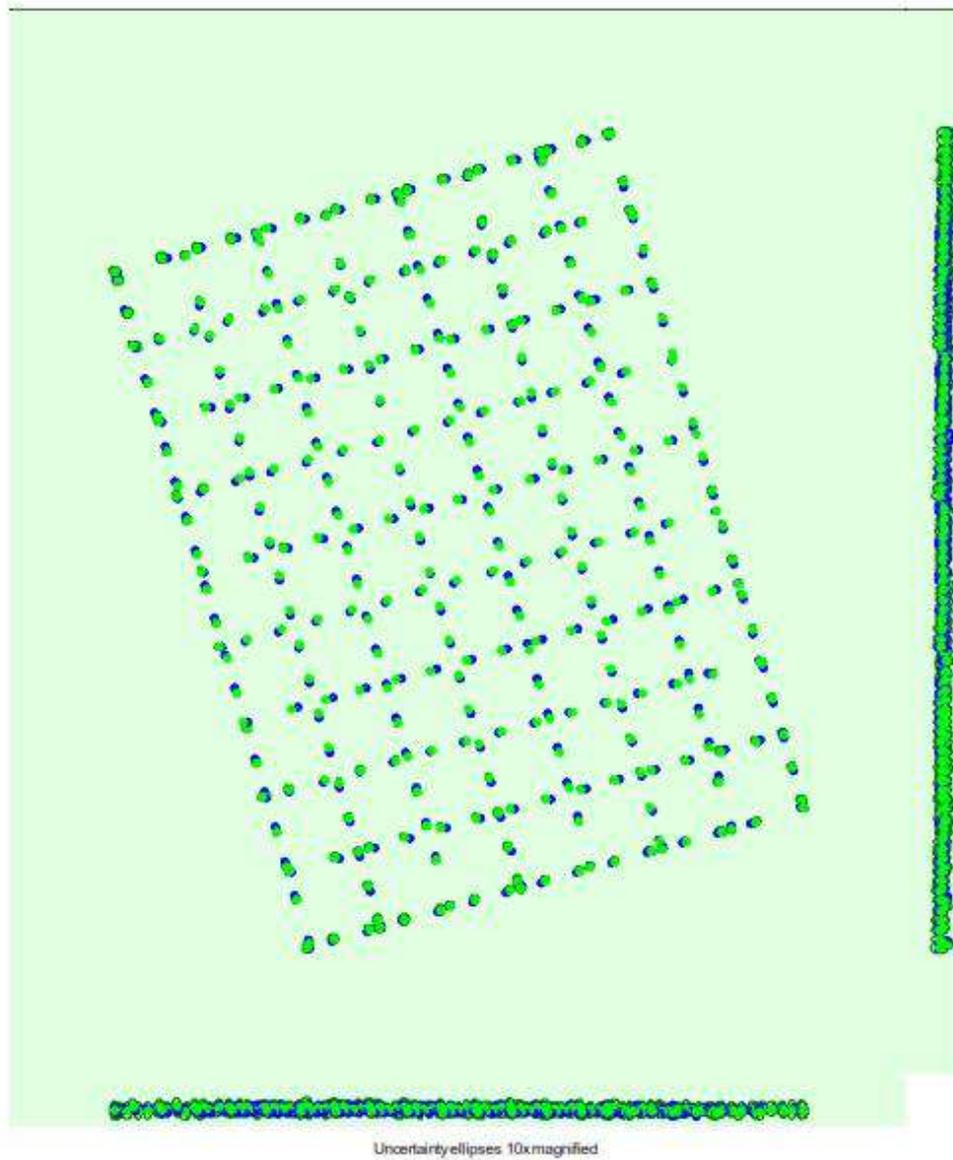


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses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

① Absolute camera position and orientation uncertainties

①

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.138	0.139	0.248	0.087	0.081	0.092
Sigma	0.020	0.022	0.026	0.007	0.005	0.016

② Overlap

②

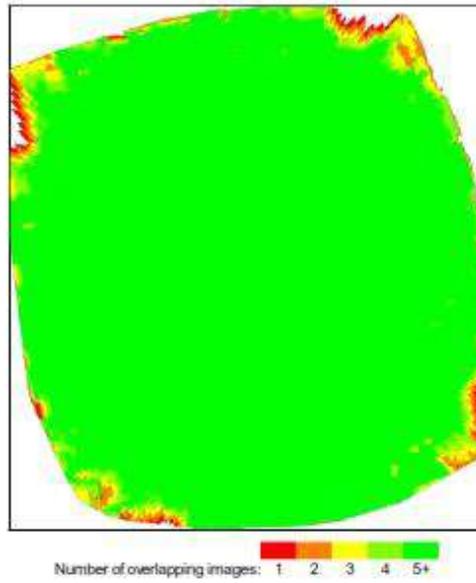


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint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

Bundle Block Adjustment Details

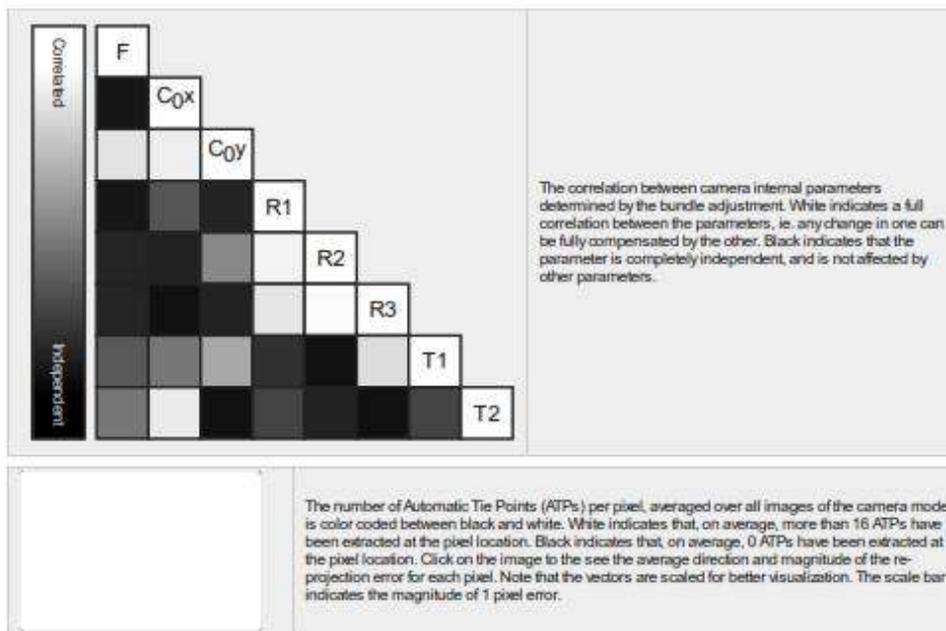
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	6215615
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	2356173
Mean Reprojection Error [pixels]	0.177

Internal Camera Parameters

L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]

EXIF ID: L1D-20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4377.600 [pixel] 10.260 [mm]	2736.000 [pixel] 6.412 [mm]	1824.000 [pixel] 4.275 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	4302.513 [pixel] 10.084 [mm]	2741.576 [pixel] 6.426 [mm]	1825.054 [pixel] 4.277 [mm]	-0.014	0.009	-0.013	0.001	-0.001
Uncertainties (Sigma)	0.256 [pixel] 0.001 [mm]	0.136 [pixel] 0.000 [mm]	0.339 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

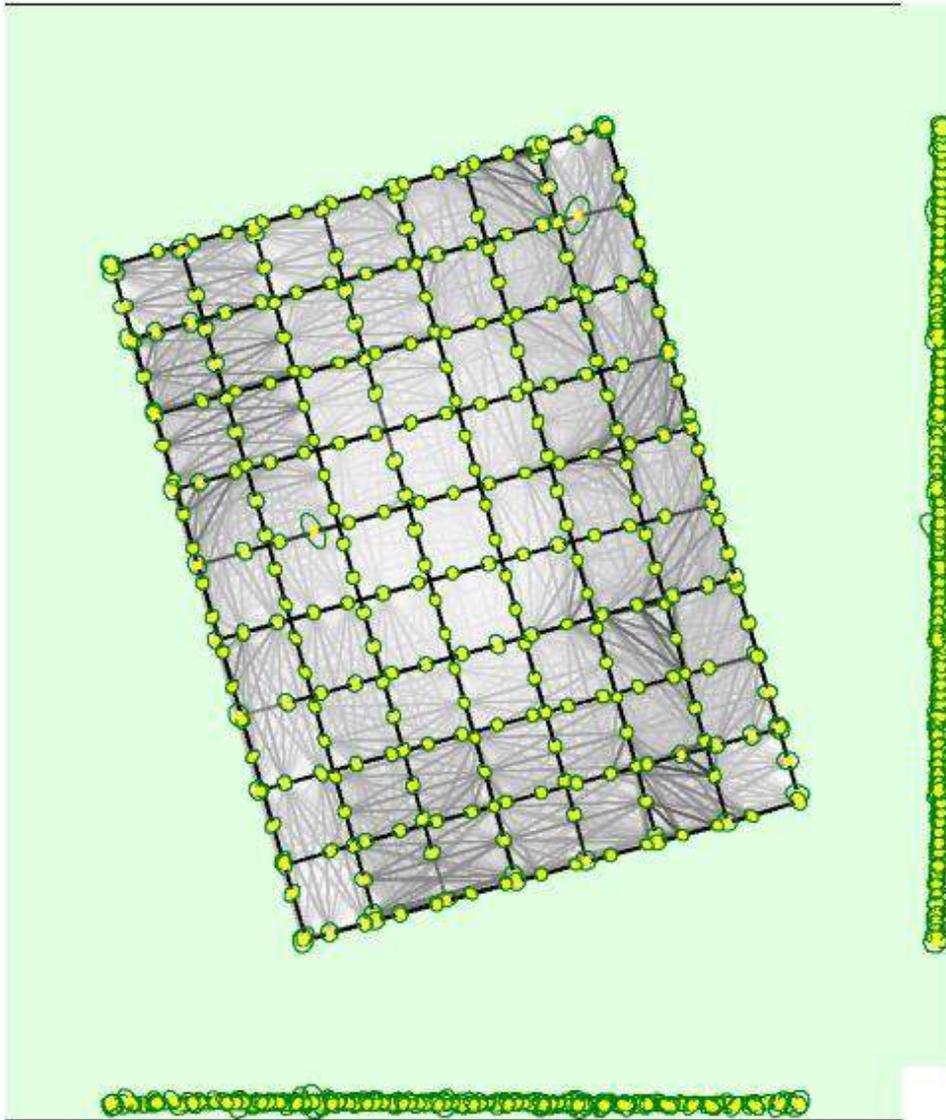
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	61045	19271
Mn	44685	3963
Max	79908	37117
Mean	62060	19608

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1619700
In 3 Images	395377
In 4 Images	160297
In 5 Images	79490
In 6 Images	43651
In 7 Images	23994
In 8 Images	13864
In 9 Images	7926
In 10 Images	4695
In 11 Images	2743
In 12 Images	1667
In 13 Images	916
In 14 Images	571
In 15 Images	373
In 16 Images	266
In 17 Images	187
In 18 Images	137
In 19 Images	91
In 20 Images	63
In 21 Images	57
In 22 Images	29
In 23 Images	25

In 24 Images	19
In 25 Images	11
In 26 Images	6
In 27 Images	7
In 28 Images	4
In 29 Images	2
In 30 Images	1
In 31 Images	2
In 32 Images	2
In 36 Images	1

2D Keypoint Matches



25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

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

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.005	0.005	0.006	0.004	0.003	0.004
Sigma	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	57.10	52.37	45.74
0.00	3.00	42.90	47.63	54.26
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.004101	0.001305	0.008904
Sigma [m]		1.038703	1.119429	0.895176
RMS Error [m]		1.038711	1.119430	0.895221

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

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

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

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.089
Phi	1.022
Kappa	3.333

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

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz RAM 12GB GPU: Intel(R) UHD Graphics 630 (Driver: 25.20.100.6577), NVIDIA GeForce GTX 1050 (Driver: 26.21.14.3086)
Operating System	Windows 10 Home Single Language, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 18S (EGM96 Geoid)

Processing Options

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

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
LOD	Generated: no
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	04h:33m:32s
Time for Point Cloud Classification	24m:57s
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA

Results

Number of Processed Clusters	10
Number of Generated Tiles	8
Number of 3D Densified Points	127271755
Average Density (per m ³)	234.44

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (3.31 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: yes Google Maps Tiles and KML: yes
Time for DSM Generation	00s
Time for Orthomosaic Generation	03h:02m:37s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

ANEXO 5: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAMETRICO DEL TRATAMIENTO RPAS C2

Quality Report

Generated with Pix4Dentprise version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

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

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

Summary

Project	jardin 8070
Processed	2020-08-11 11:08:33
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x9648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.24 cm / 0.88 in
Area Covered	0.172 km ² / 17.2204 ha / 0.07 sq. mi. / 42.5746 acres
Time for Initial Processing (without report)	42m07s

Quality Check

❗ Images	median of 56972 keypoints per image	✔
❗ Dataset	374 out of 374 images calibrated (100%), all images enabled	✔
❗ Camera Optimization	0.37% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
❗ Matching	median of 14891.6 matches per calibrated image	✔
❗ Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Preview

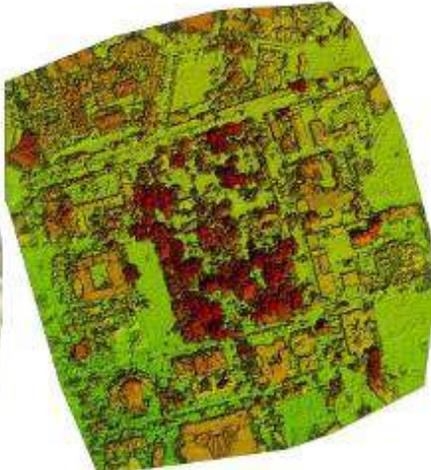



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

1

Number of Calibrated Images	374 out of 374
Number of Geolocated Images	374 out of 374

2 Initial Image Positions

2

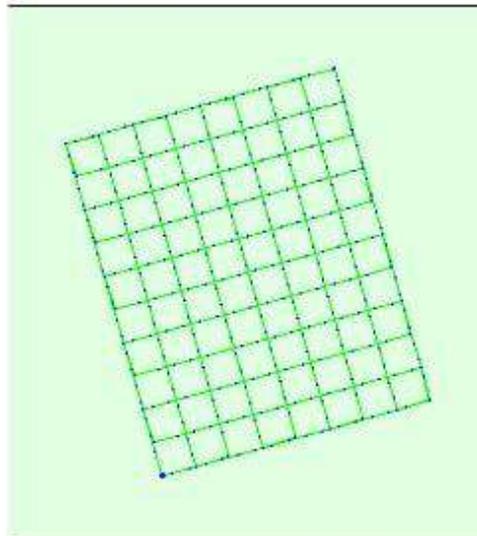
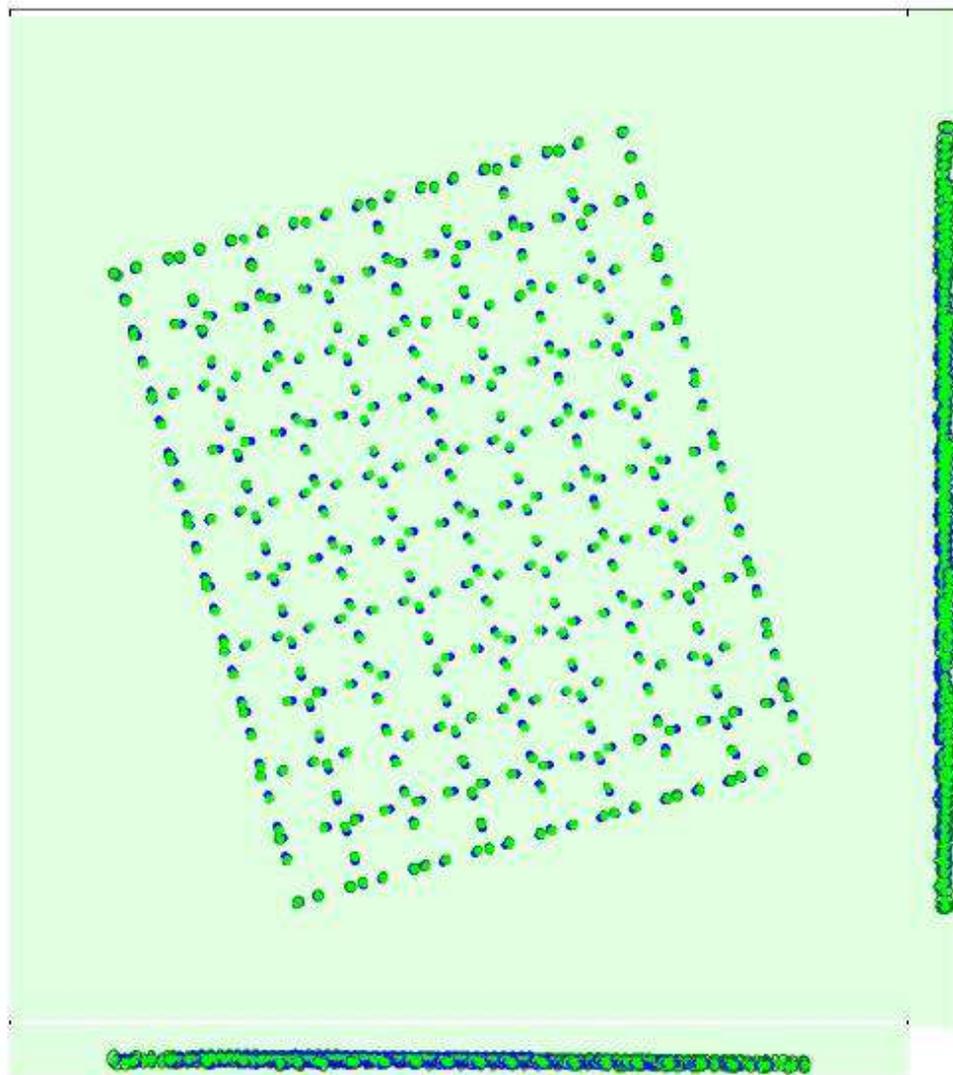


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

3 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

3



Uncertainty ellipses 10x magnified

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

1 Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.152	0.153	0.267	0.080	0.062	0.070
Sigma	0.023	0.024	0.025	0.002	0.002	0.006

2 Overlap

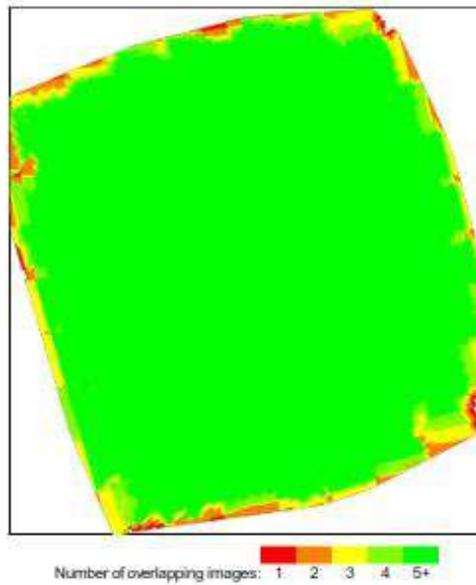


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint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

Bundle Block Adjustment Details

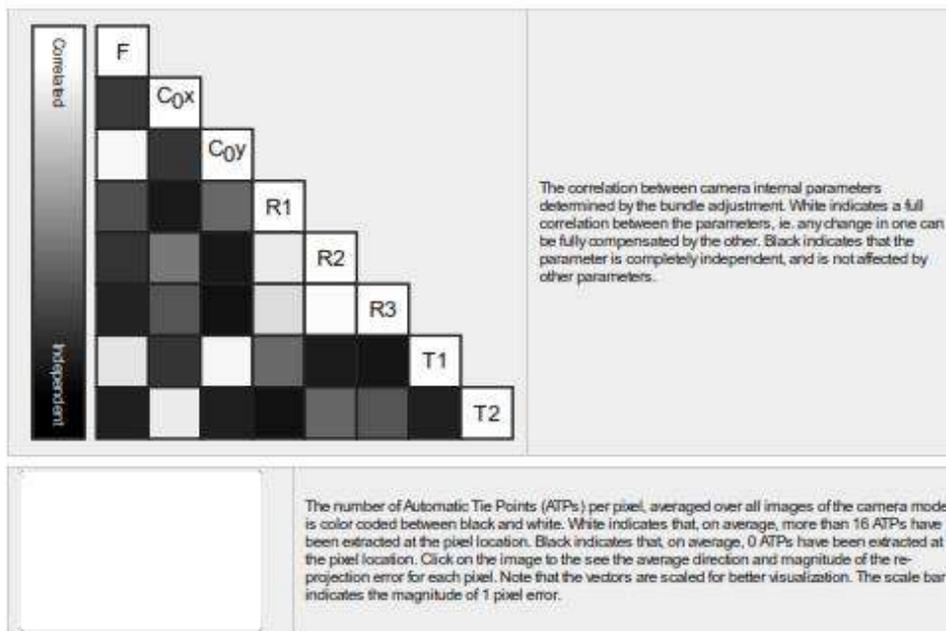
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	5984110
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	2256875
Mean Reprojection Error [pixels]	0.198

Internal Camera Parameters

L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]

EXIF ID: L1D-20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4377.600 [pixel] 10.260 [mm]	2736.000 [pixel] 6.412 [mm]	1824.000 [pixel] 4.275 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	4361.350 [pixel] 10.222 [mm]	2740.253 [pixel] 6.422 [mm]	1773.251 [pixel] 4.156 [mm]	-0.013	0.011	-0.016	0.001	-0.001
Uncertainties (Sigma)	0.430 [pixel] 0.001 [mm]	0.106 [pixel] 0.000 [mm]	0.453 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

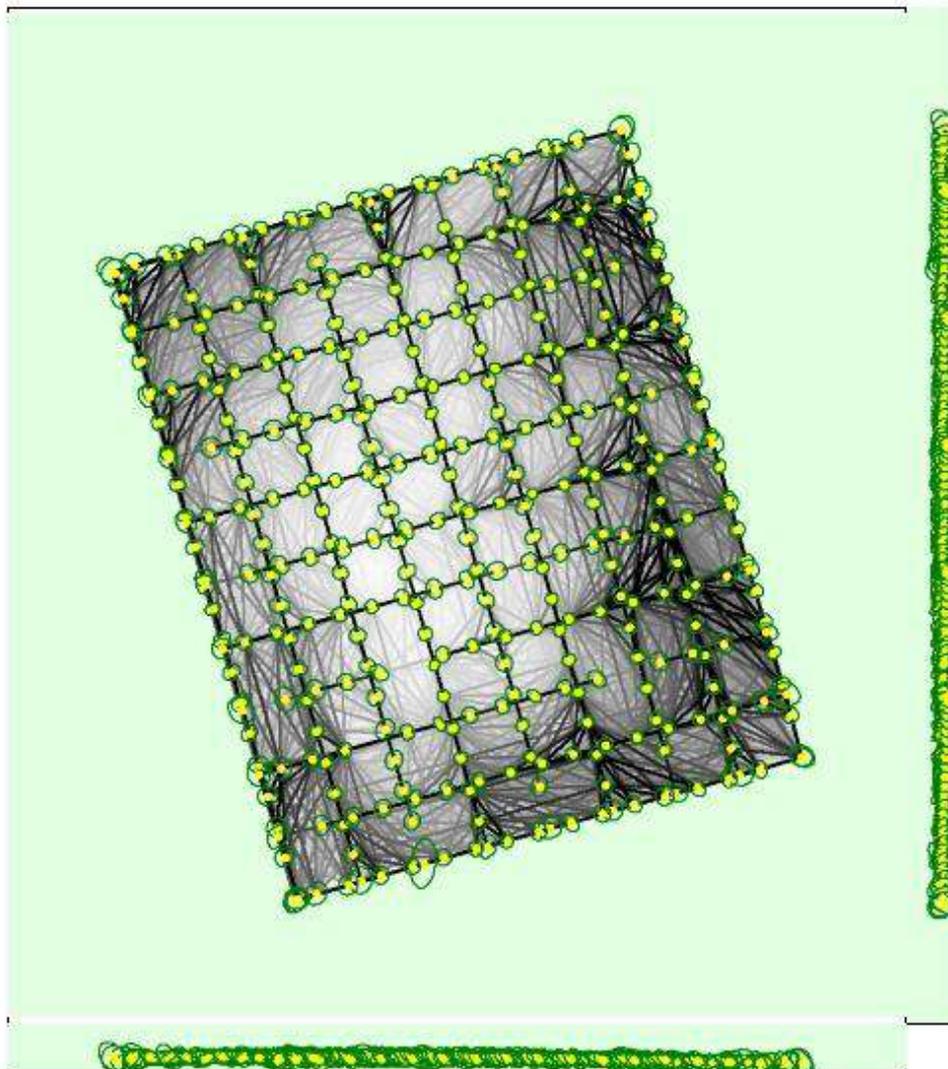
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	56972	14892
Min	36200	3401
Max	79627	28283
Mean	59158	15947

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1593630
In 3 Images	356470
In 4 Images	138058
In 5 Images	66841
In 6 Images	37293
In 7 Images	22511
In 8 Images	13601
In 9 Images	8744
In 10 Images	5717
In 11 Images	3890
In 12 Images	2742
In 13 Images	2005
In 14 Images	1444
In 15 Images	1025
In 16 Images	764
In 17 Images	570
In 18 Images	422
In 19 Images	323
In 20 Images	269
In 21 Images	218
In 22 Images	150
In 23 Images	107

In 24 Images	88
In 25 Images	70
In 26 Images	38
In 27 Images	28
In 28 Images	23
In 29 Images	14
In 30 Images	11
In 31 Images	3
In 32 Images	1
In 33 Images	4
In 35 Images	1

2D Keypoint Matches



Uncertainty ellipses 500x magnified

Number of matches

25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

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

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.007	0.007	0.006	0.007	0.006	0.004
Sigma	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	54.28	50.00	51.07
0.00	3.00	45.72	50.00	48.93
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.000000	0.000000	-0.000003
Sigma [m]		1.082434	1.163937	0.839258
RMS Error [m]		1.082434	1.163937	0.839258

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

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

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

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.141
Phi	0.616
Kappa	2.384

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

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz RAM: 12GB GPU: Intel(R) UHD Graphics 630 (Driver: 25.20.100.6577), NVIDIA GeForce GTX 1050 (Driver: 26.21.14.3086)
Operating System	Windows 10 Home Single Language, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 18S (EGM96 Geoid)

Processing Options

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

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
LOD	Generated: no
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	04h:54m:35s
Time for Point Cloud Classification	18m:32s
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA

Results

Number of Processed Clusters	14
Number of Generated Tiles	8
Number of 3D Densified Points	157007185
Average Density (per m ³)	697.62

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (2.24 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: yes Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	00s
Time for Orthomosaic Generation	03h:38m:15s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

ANEXO 6: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAMETRICO DEL TRATAMIENTO RPAS C3

Quality Report

Generated with Pix4Dentriprise version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

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

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

Summary ⓘ

Project	jardin10045
Processed	2020-06-13 10:45:39
Camera Model Name(s)	L10-20c_10.3_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.57 cm / 1.80 in
Area Covered	0.451 km ² / 45.0638 ha / 0.17 sq. mi. / 111.4127 acres
Time for Initial Processing (without report)	30m:39s

Quality Check ⓘ

ⓘ Images	median of 57468 keypoints per image	✔
ⓘ Dataset	226 out of 226 images calibrated (100%), all images enabled	✔
ⓘ Camera Optimization	1.69% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
ⓘ Matching	median of 21646.8 matches per calibrated image	✔
ⓘ Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

ⓘ Preview ⓘ

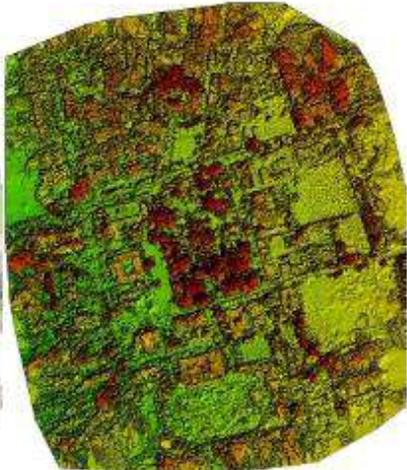



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

1

Number of Calibrated Images	226 out of 226
Number of Geolocated Images	226 out of 226

2 Initial Image Positions

2

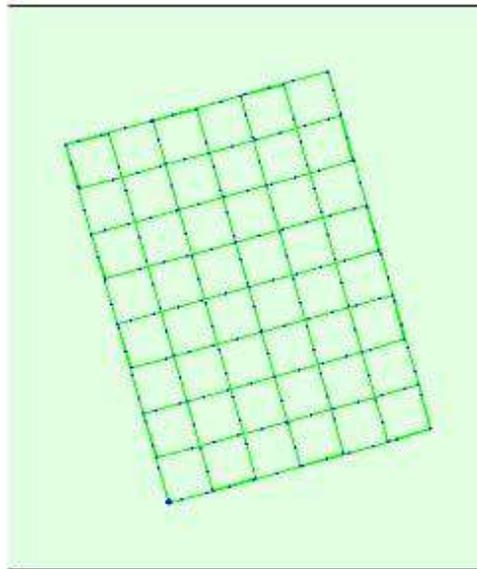


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

3 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

3

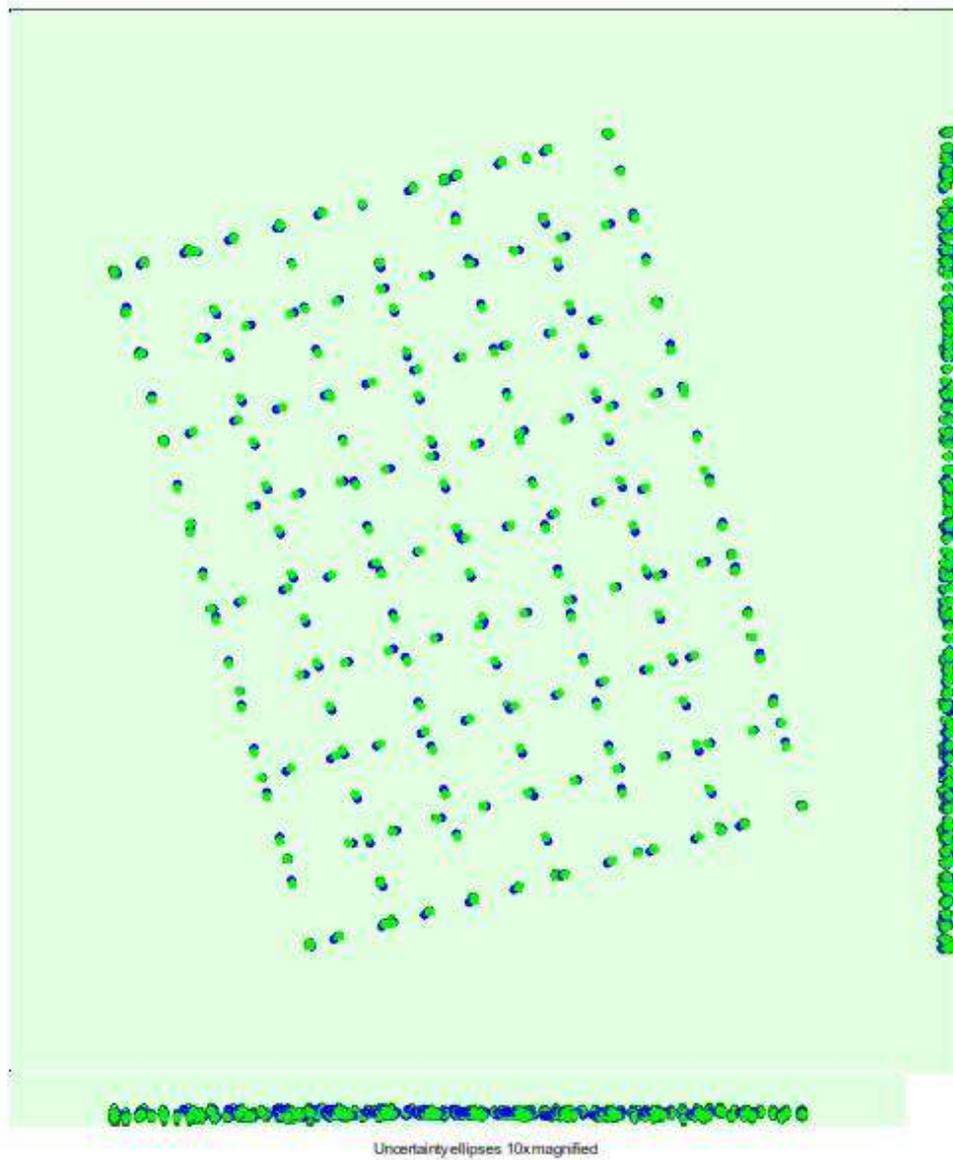


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses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

① Absolute camera position and orientation uncertainties

①

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.124	0.126	0.223	0.077	0.072	0.062
Sigma	0.018	0.020	0.023	0.006	0.005	0.014

② Overlap

②

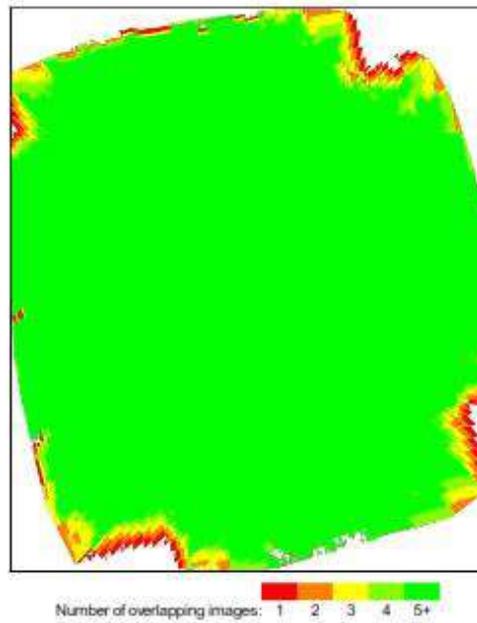


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint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

Bundle Block Adjustment Details

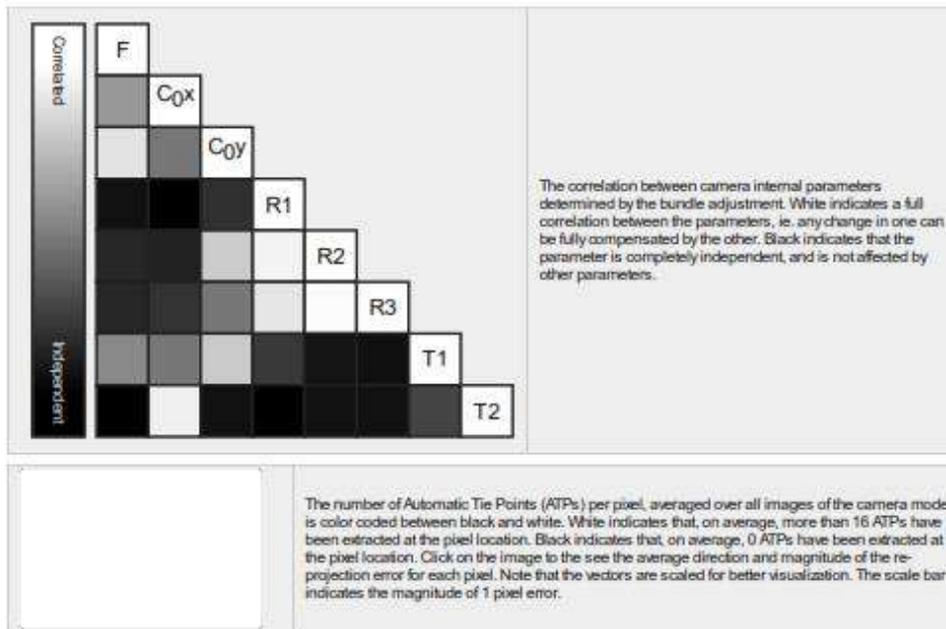
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	5017603
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1843534
Mean Reprojection Error [pixels]	0.186

Internal Camera Parameters

L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]

EXIF ID: L1D20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4377.600 [pixel] 10.260 [mm]	2736.000 [pixel] 6.412 [mm]	1824.000 [pixel] 4.275 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	4294.519 [pixel] 10.065 [mm]	2741.920 [pixel] 6.426 [mm]	1834.001 [pixel] 4.296 [mm]	-0.015	0.013	-0.017	0.001	-0.001
Uncertainties (Sigma)	0.185 [pixel] 0.000 [mm]	0.134 [pixel] 0.000 [mm]	0.289 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	57468	21647
Min	42793	7094
Max	72231	38730
Mean	58124	22202

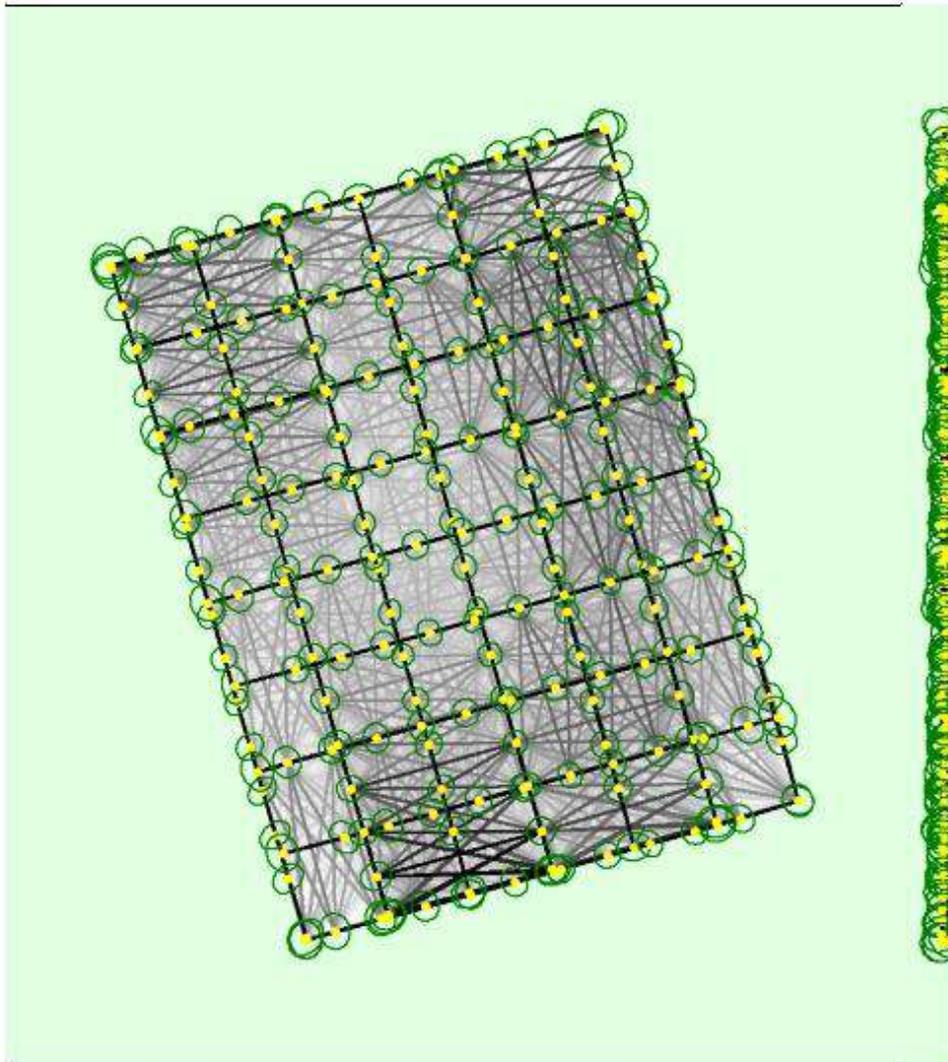
3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1227512
In 3 Images	319446
In 4 Images	133967
In 5 Images	68471
In 6 Images	37767
In 7 Images	21445
In 8 Images	12674
In 9 Images	7679
In 10 Images	4899
In 11 Images	3073
In 12 Images	1849
In 13 Images	1210
In 14 Images	890
In 15 Images	603
In 16 Images	487
In 17 Images	342
In 18 Images	239
In 19 Images	165
In 20 Images	122
In 21 Images	110
In 22 Images	80
In 23 Images	53

In 24 Images	46
In 25 Images	36
In 26 Images	32
In 27 Images	22
In 28 Images	23
In 29 Images	13
In 30 Images	10
In 31 Images	8
In 32 Images	9
In 33 Images	2
In 34 Images	2
In 35 Images	4
In 36 Images	3
In 41 Images	1

2D Keypoint Matches

1



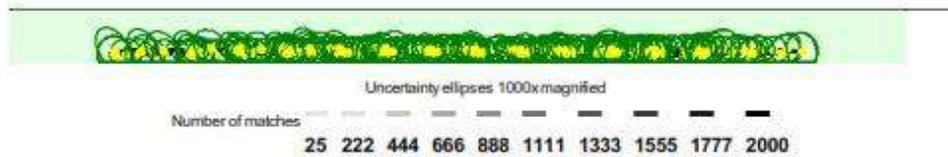


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty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

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.005	0.005	0.005	0.003	0.003	0.003
Sigma	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	51.33	50.44	48.67
0.00	3.00	48.67	49.56	51.33
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.000000	0.000000	-0.000001
Sigma [m]		1.078800	1.123628	0.541642
RMS Error [m]		1.078800	1.123628	0.541642

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

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

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

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]

Omega	1.512
Phi	1.371
Kappa	1.832

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

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz RAM 12GB GPU: Intel(R) UHD Graphics 630 (Driver: 25.20.100.6577), NVIDIA GeForce GTX 1050 (Driver: 26.21.14.3086)
Operating System	Windows 10 Home Single Language, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 18S (EGM96 Geoid)

Processing Options

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

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
LOD	Generated: no
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	05h:11m:49s
Time for Point Cloud Classification	27m:42s
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA

Results

Number of Processed Clusters	6
Number of Generated Tiles	4
Number of 3D Densified Points	96326708
Average Density (per m ³)	115.13

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (4.57 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: yes Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	00s
Time for Orthomosaic Generation	01h:42m:47s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

ANEXO 7: REPORTE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAMETRICO DEL TRATAMIENTO RPAS C4

Quality Report

Generated with Pix4Dentprise version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

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

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

Summary

Project	jardin10070
Processed	2020-08-12 14:25:23
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x9648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.98 cm / 1.17 in
Area Covered	0.212 km ² / 21.1910 ha / 0.08 sq. mi. / 52.3913 acres
Time for Initial Processing (without report)	21m:36s

Quality Check

❗ Images	median of 58959 keypoints per image	✔️
❗ Dataset	226 out of 226 images calibrated (100%), all images enabled	✔️
❗ Camera Optimization	0.75% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔️
❗ Matching	median of 17898.6 matches per calibrated image	✔️
❗ Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠️

Preview

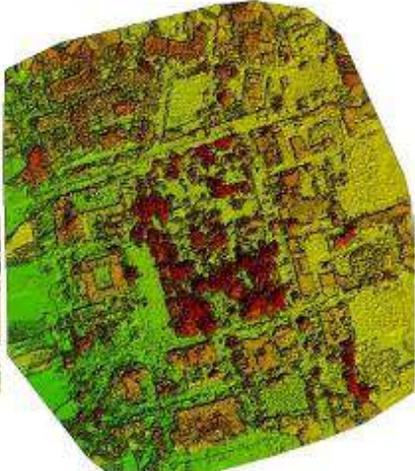



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

1

Number of Calibrated Images	226 out of 226
Number of Geolocated Images	226 out of 226

2 Initial Image Positions

2

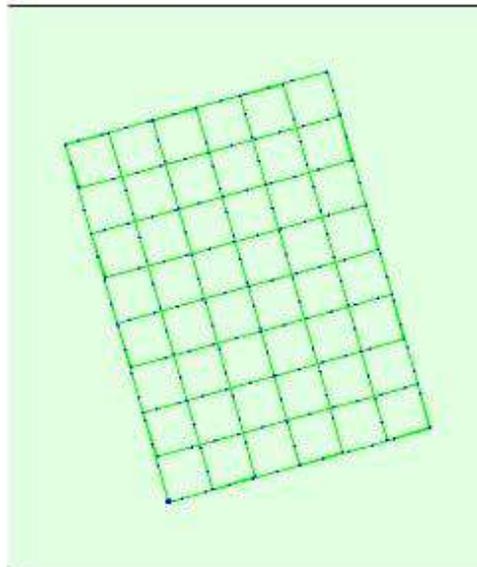


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

3 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

3

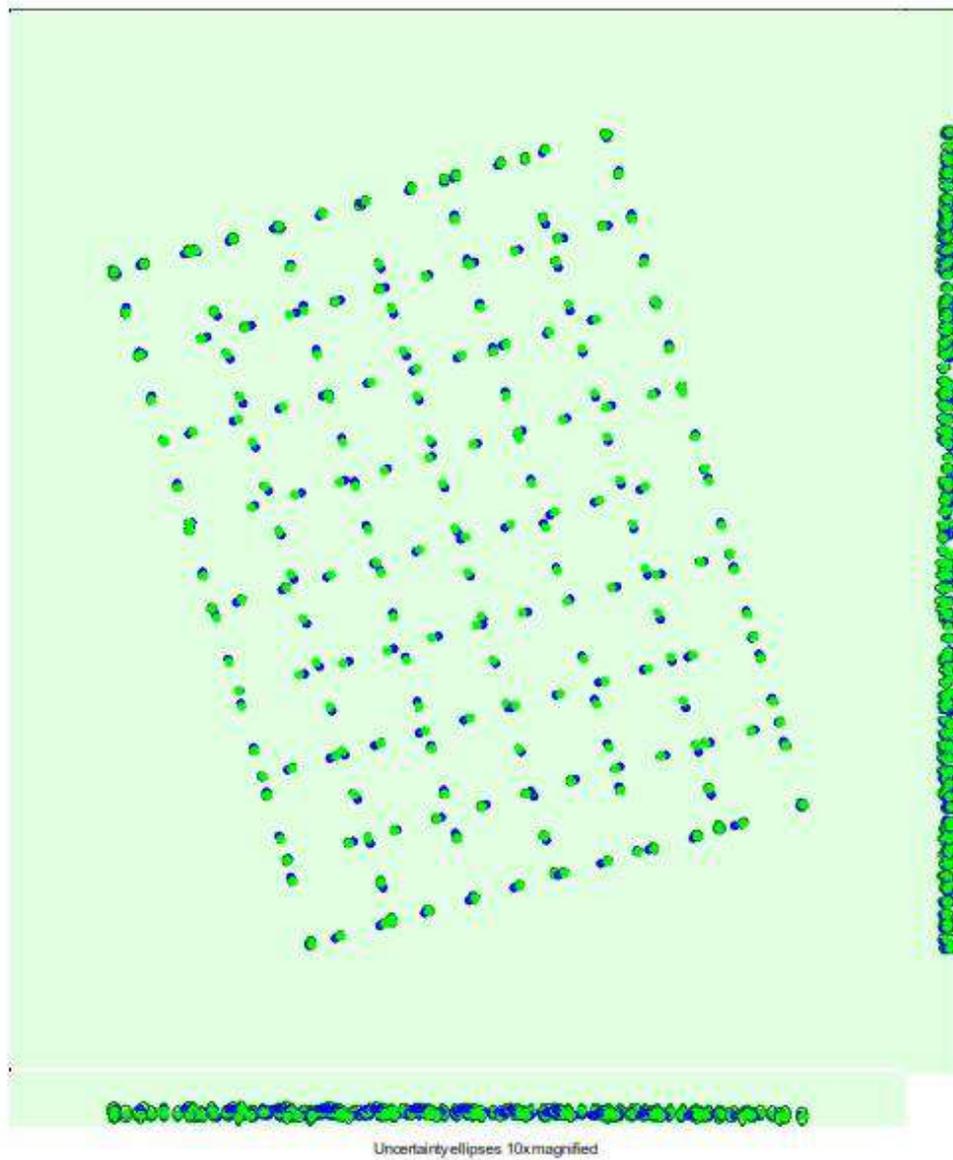


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses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

① Absolute camera position and orientation uncertainties

①

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.143	0.145	0.250	0.077	0.078	0.069
Sigma	0.021	0.023	0.022	0.002	0.002	0.006

② Overlap

②

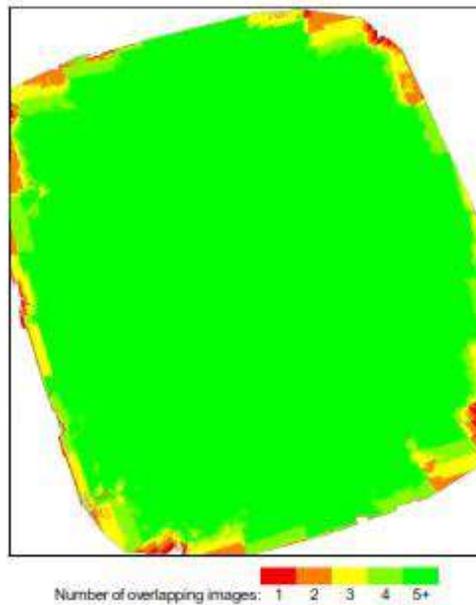


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint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

Bundle Block Adjustment Details

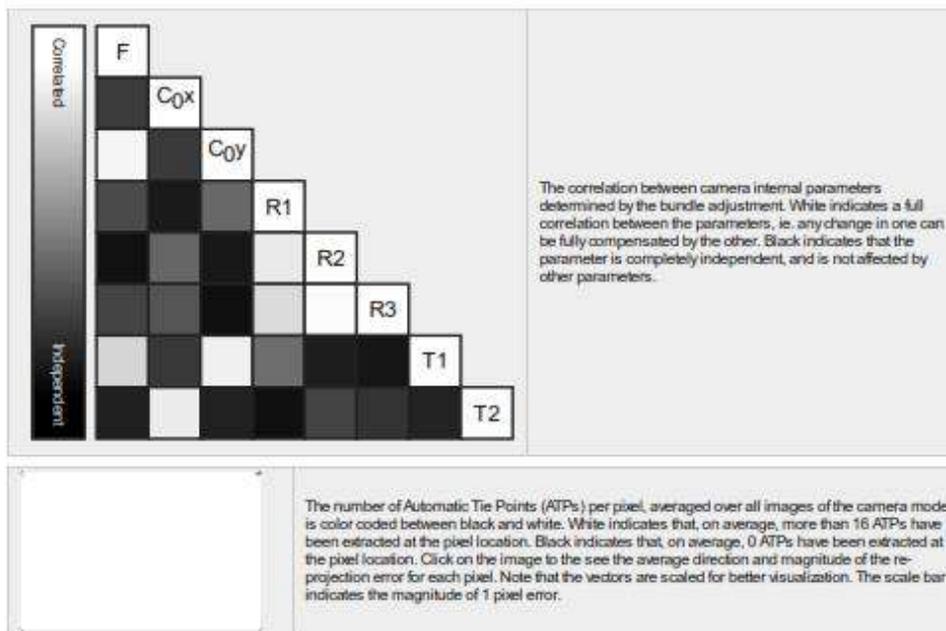
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	4179373
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1564952
Mean Reprojection Error [pixels]	0.208

Internal Camera Parameters

L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]

EXIF ID: L1D20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4377.600 [pixel] 10.260 [mm]	2736.000 [pixel] 6.412 [mm]	1824.000 [pixel] 4.275 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	4344.686 [pixel] 10.183 [mm]	2741.127 [pixel] 6.425 [mm]	1782.664 [pixel] 4.176 [mm]	-0.014	0.014	-0.019	0.001	-0.001
Uncertainties (Sigma)	0.449 [pixel] 0.001 [mm]	0.114 [pixel] 0.000 [mm]	0.476 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

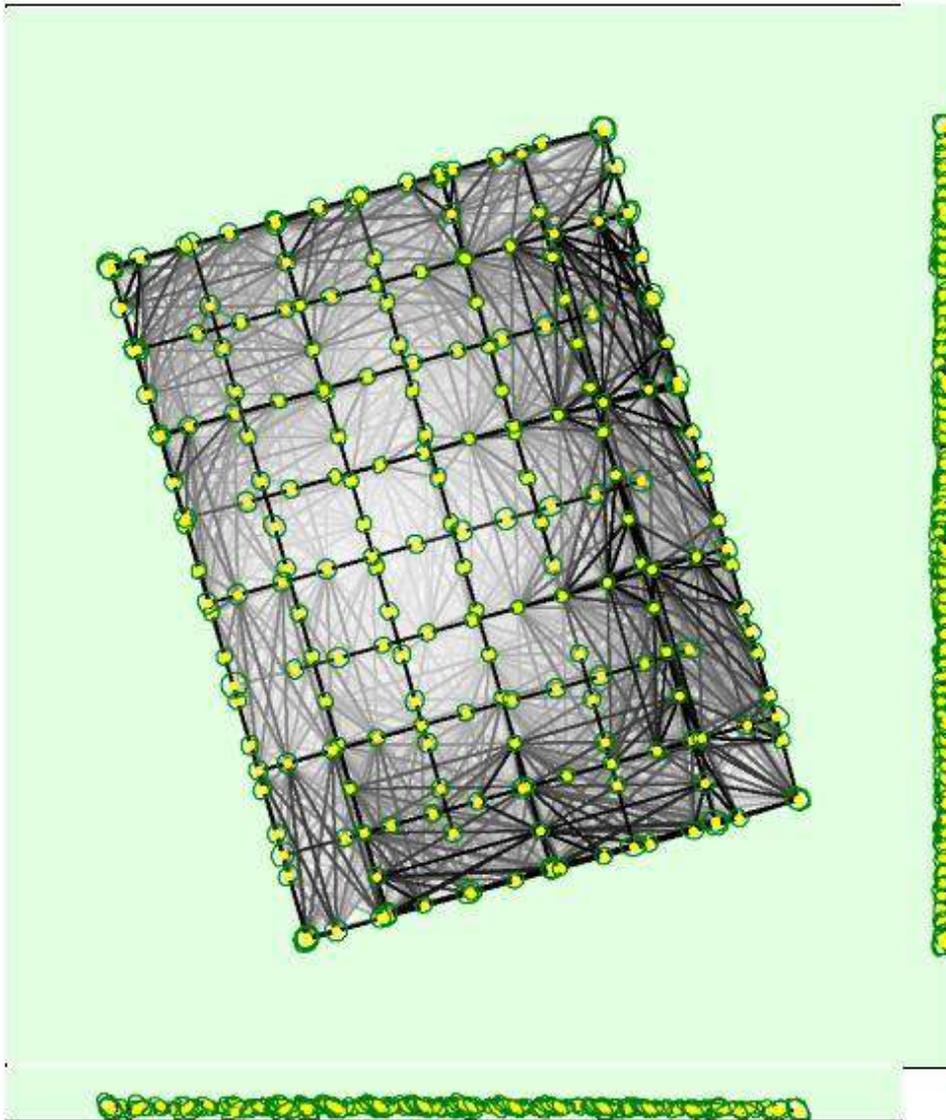
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	58959	17899
Min	40179	4972
Max	79723	39318
Mean	60380	18493

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1082315
In 3 Images	254332
In 4 Images	102579
In 5 Images	51468
In 6 Images	28225
In 7 Images	16671
In 8 Images	10004
In 9 Images	6283
In 10 Images	4035
In 11 Images	2813
In 12 Images	1829
In 13 Images	1263
In 14 Images	855
In 15 Images	657
In 16 Images	459
In 17 Images	335
In 18 Images	256
In 19 Images	153
In 20 Images	129
In 21 Images	90
In 22 Images	58
In 23 Images	35

In 24 Images	31
In 25 Images	21
In 26 Images	15
In 27 Images	12
In 28 Images	7
In 29 Images	4
In 30 Images	2
In 31 Images	2
In 32 Images	7
In 33 Images	4
In 34 Images	3

2D Keypoint Matches



Uncertainty ellipses 500x magnified



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

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.007	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003
Sigma	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	53.98	51.77	63.27
0.00	3.00	46.02	48.23	36.73
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.073789	-0.026247	-0.140004
Sigma [m]		1.184976	1.120766	0.536842
RMS Error [m]		1.187272	1.121073	0.554798

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

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

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

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.493
Phi	1.455
Kappa	1.595

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

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz RAM 12GB GPU: Intel(R) UHD Graphics 630 (Driver: 25.20.100.6577), NVIDIA GeForce GTX 1050 (Driver: 26.21.14.3086)
Operating System	Windows 10 Home Single Language, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 18S (EGM96 Geoid)

Processing Options

Detected Template	 teiss*
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Geolocation Based Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
LOD	Generated: no
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	03h:41m:30s
Time for Point Cloud Classification	20m:15s
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA

Results

Number of Processed Clusters	6
Number of Generated Tiles	6
Number of 3D Densified Points	103213750
Average Density (per m ²)	309.27

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (2.96 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: yes Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	00s
Time for Orthomosaic Generation	02h24m28s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

ANEXO 8: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C1



ANEXO 9: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C2



ANEXO 10: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C3



ANEXO 11: ORTOMOSAICO TRATAMIENTO RPAS C4



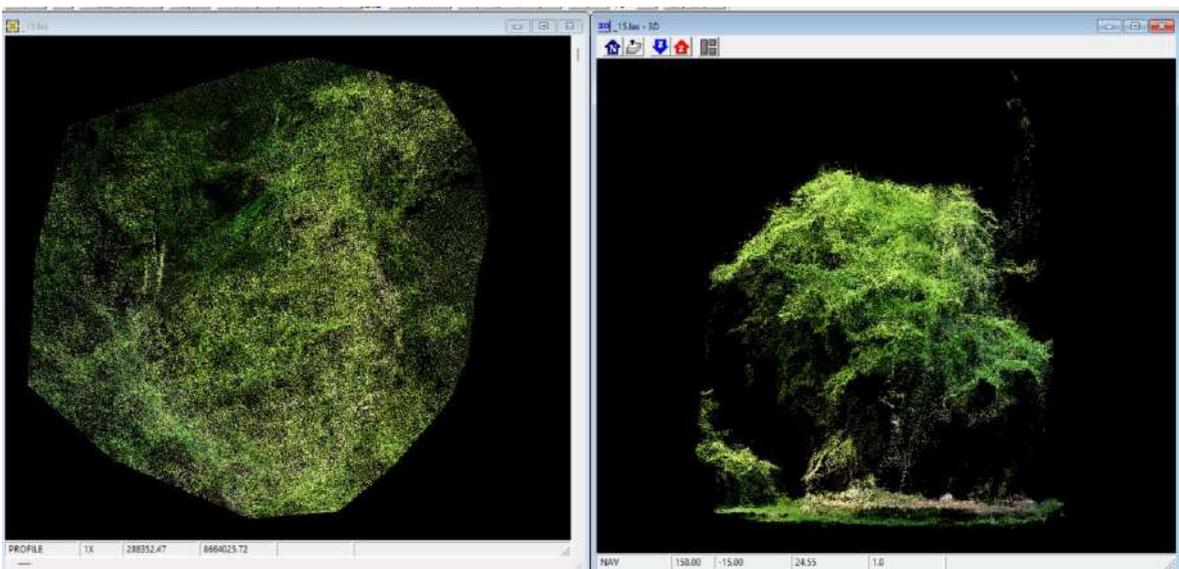
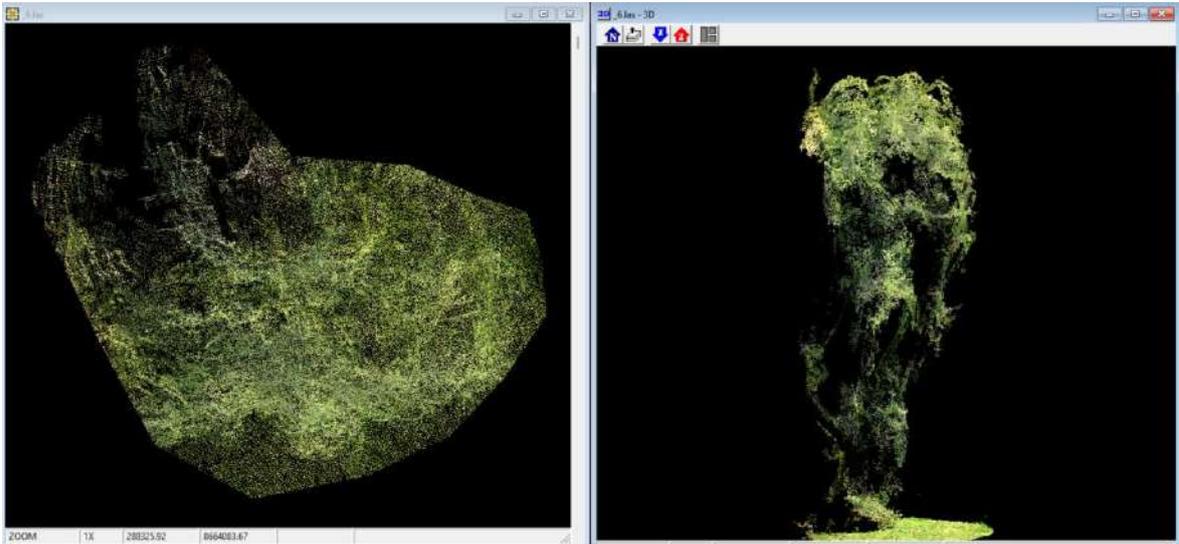
ANEXO 12: SISTEMATIZACIÓN DE DATOS OBTENIDOS

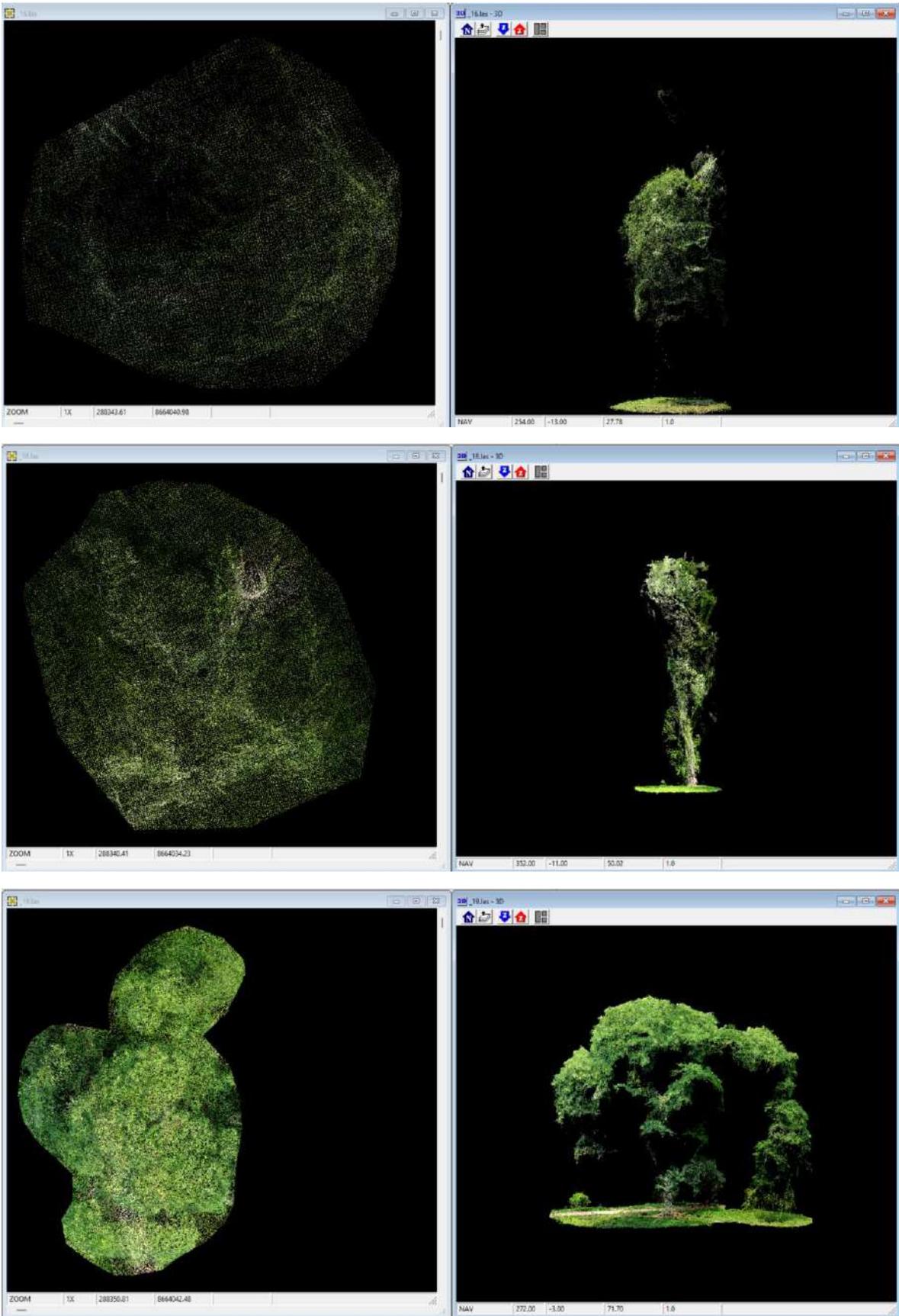
Identificador	Altura Vertex (m)	Altura RPAS (m)			
		C1	C2	C3	C4
1	21,9	20,93	21,24	20,84	21,96
2	20,9	0,00	0,00	0,00	0,00
3	28,3	0,00	0,00	0,00	27,14
4	30,8	27,53	28,02	0,00	28,14
5	35,5	0,00	35,13	0,00	35,67
6	35,2	31,3	33,87	31,89	34,72
7	40,5	0,00	37,17	0,00	37,86
8	13,1	13,21	13,03	13,04	13,17
9	15,8	14,45	14,77	14,62	14,62
10	14,2	13,96	13,93	13,3	13,62
11	15,00	13,8	13,85	14,09	14,32
12	21,5	22,04	21,75	22,1	21,7
13	26,8	24,63	24,86	24,24	24,89
14	25,1	24,91	24,95	25,4	25,26
15	13,1	12,86	13,16	13,62	13,13
16	13,5	0,00	0,00	0,00	13,22
17	19,6	0,00	0,00	0,00	0,00
18	28,00	25,04	25,04	24,58	24,86
19	34,6	30,25	30,9	30,5	30,82
20	24,9	26,72	27,15	26,59	26,65
21	33,6	32,95	32,95	33,27	33,21
22	13,5	12,82	12,95	14,76	13,05
23	18,2	17,09	17,36	18,01	17,34
24	11,6	0,00	0,00	0,00	0,00
25	17,1	0,00	16,78	18,33	16,61
26	14,7	14,46	14,93	14,03	14,9
27	15,9	15,78	15,7	16,72	16,07
28	15,8	15,05	15,45	15,00	15,56
29	15,00	0,00	16,05	0,00	16,16
30	21,1	18,92	19,3	19,48	19,84
31	18,8	18,37	18,5	18,67	18,77
32	41,7	0,00	35,45	34,39	38,03
33	24,7	0,00	0,00	0,00	0,00
34	10,7	0,00	0,00	0,00	0,00
35	14,2	13,54	13,91	14,07	14,13
36	35,5	25,15	29,04	0,00	33,14
37	13,6	13,55	13,53	13,31	13,48
38	17,00	15,53	15,86	16,37	15,96
39	21,6	20,85	21,23	20,6	21,36
40	24,2	24,44	24,52	24,68	24,67
41	18,4	17,85	17,96	17,67	17,77

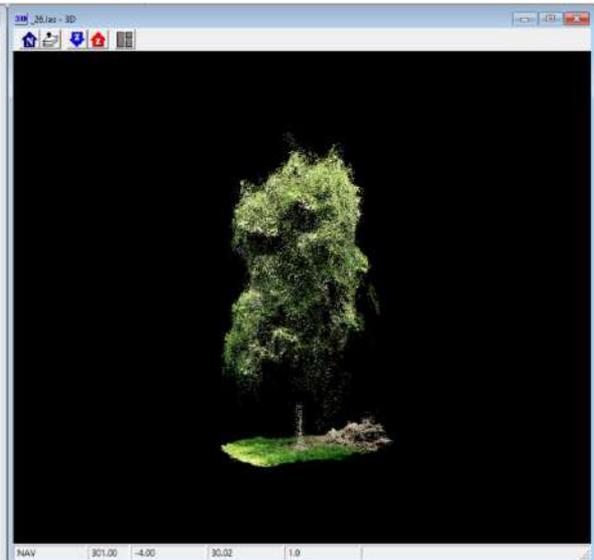
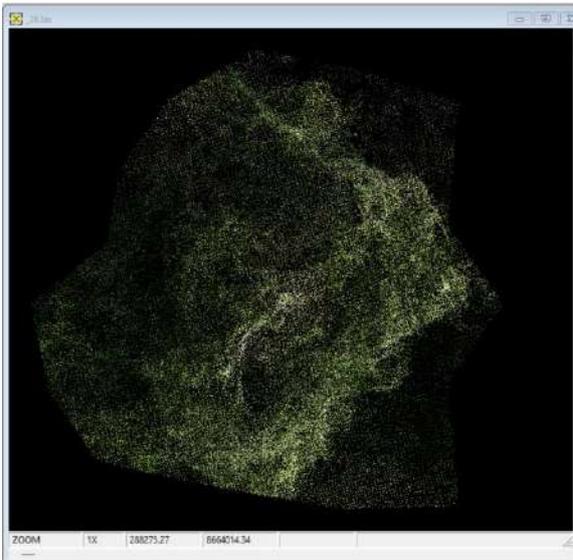
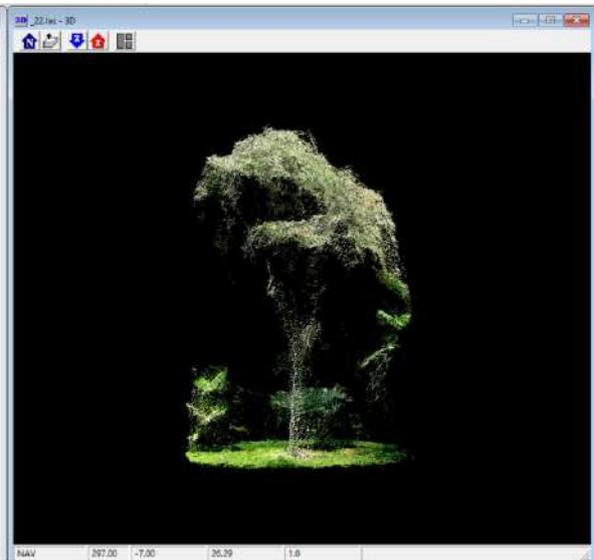
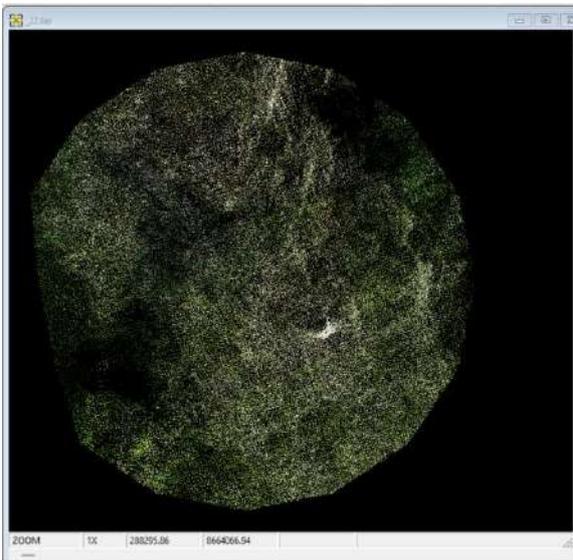
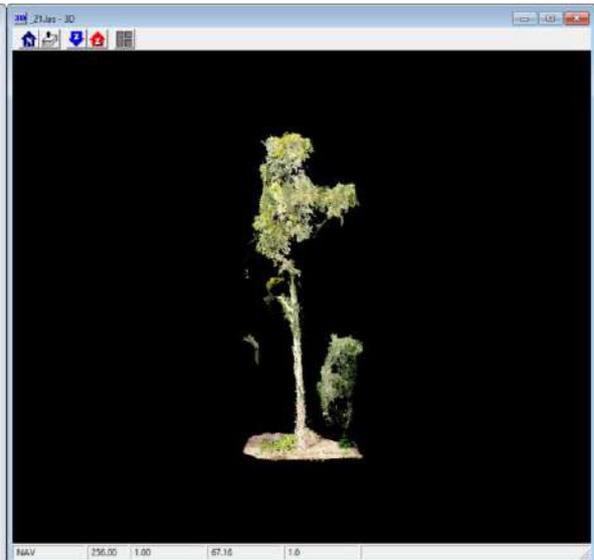
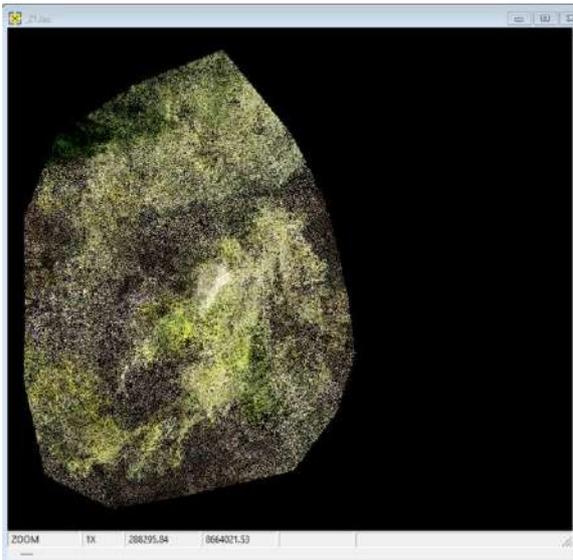
42	10,6	0,00	0,00	0,00	0,00
43	19,00	17,12	17,35	17,37	17,4
44	31,6	26,02	26,23	26,36	27,89
45	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00
46	15,00	0,00	0,00	17,6	15,01
47	27,3	0,00	0,00	22,87	26,45
48	39,2	0,00	33,27	35,51	36,21
49	15,8	14,93	14,82	14,56	15,01
50	16,8	13,54	13,82	16,99	14,93
51	25,00	0,00	25,09	0,00	24,91
52	26,8	0,00	26,11	0,00	26,14
53	24,00	22,3	23,27	22,6	22,63
54	24,5	23,1	23,26	22,88	23,51
55	21,00	20,09	20,45	20,23	20,56
56	31,5	30,13	30,37	29,92	30,74
57	21,00	20,44	20,98	20,35	20,79
58	21,8	21,72	21,77	21,69	21,81
59	29,4	24,34	24,63	24,43	25,96
60	20,3	0,00	20,57	0,00	19,92
61	14,1	14,27	14,53	15,37	13,62
62	19,8	17,05	19,79	16,64	19,92
63	19,7	19,02	19,94	19,81	19,98
64	21,3	21,61	21,91	21,4	20,52
65	19,5	18,12	18,16	18,41	18,60
66	16,5	15,56	15,46	15,79	16,04
67	17,5	16,14	17,07	15,91	17,60
68	12,5	0,00	0,00	14,91	0,00
69	15,5	14,59	15,64	15,32	15,89
70	14,6	14,45	14,78	15,44	14,66
71	15,6	15,29	14,83	15,18	15,72
72	15,00	14,75	14,86	14,87	15,08
73	15,00	13,93	14,05	14,24	14,08
74	13,4	13,3	13,84	12,73	13,9
75	10,7	10,9	0,00	12,73	0,00
76	15,4	14,95	15,18	14,83	15,23
77	15,4	14,98	14,96	15,41	15,44
78	17,3	16,6	17,00	16,45	17,45
79	17,00	17,06	16,63	17,54	17,27
80	21,00	19,65	20,35	19,96	20,35
81	20,7	20,56	20,33	20,54	20,56
82	14,6	16,91	15,79	15,71	16,11
83	14,3	14,43	14,16	13,54	13,95
84	12,5	12,89	14,44	0,00	13,39
85	16,6	16,58	16,42	15,11	16,67
86	16,6	16,61	16,66	16,48	16,83
87	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00

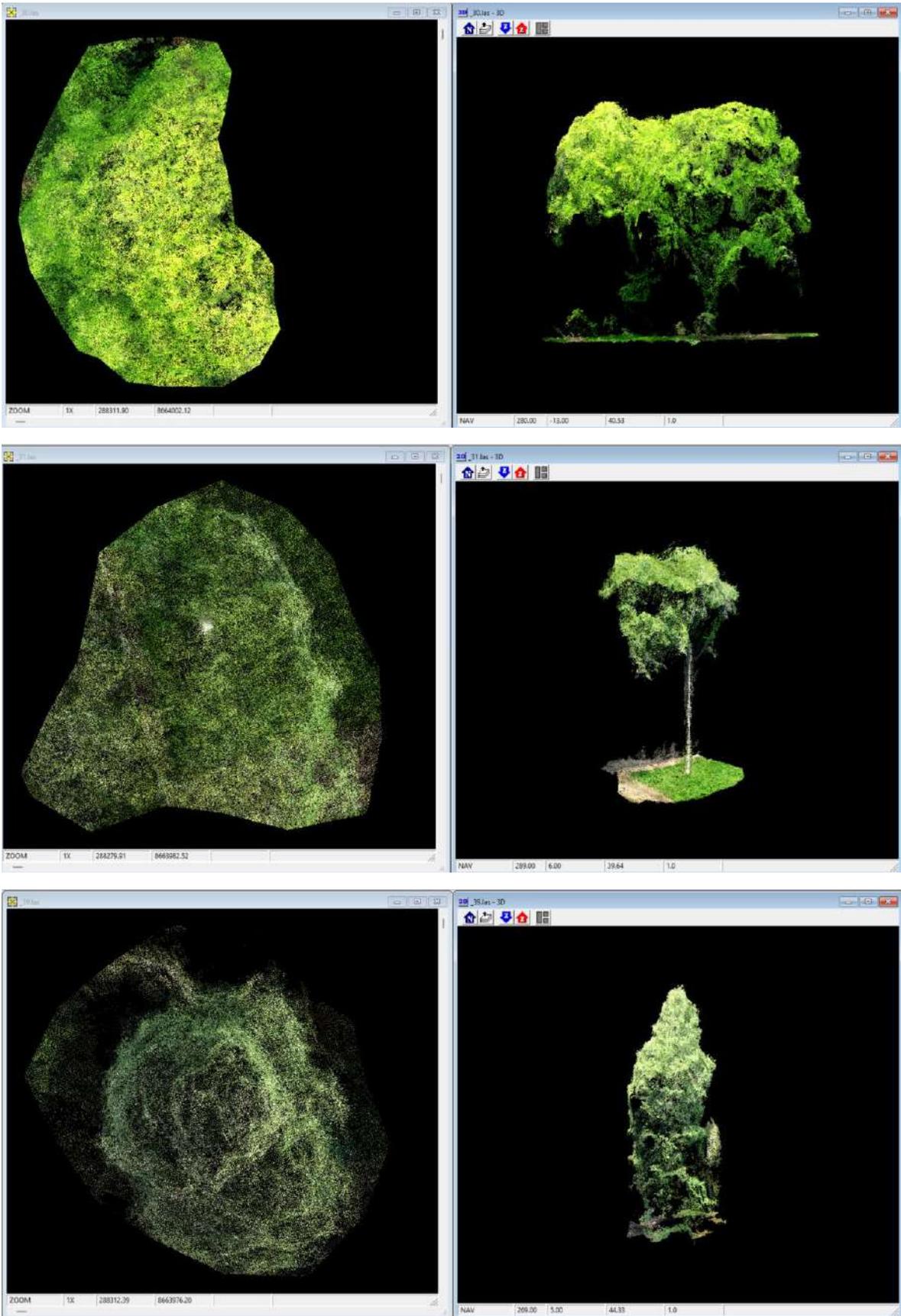
88	20,5	19,26	19,47	19,42	19,51
89	21,00	19,68	20,25	19,87	20,36
90	27,1	26,45	26,54	0,00	26,69
91	20,5	17,6	0,00	0,00	20,32
92	17,6	17,89	17,65	17,71	17,52
93	17,2	0,00	0,00	0,00	0,00
94	18,1	18,01	18,13	18,31	18,22
95	19,3	19,01	19,32	19,04	19,39
96	16,2	16,78	16,2	16,53	16,24
97	14,1	13,94	14,09	13,84	14,15
98	14,9	15,17	15,22	15,96	15,21
99	20,7	20,37	20,57	20,36	20,75

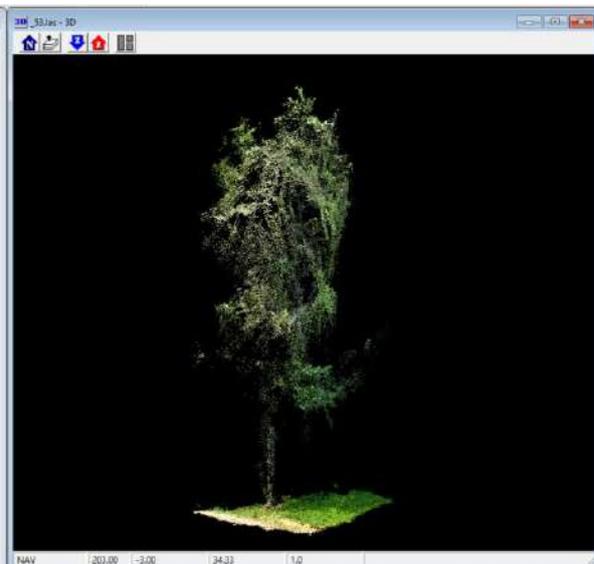
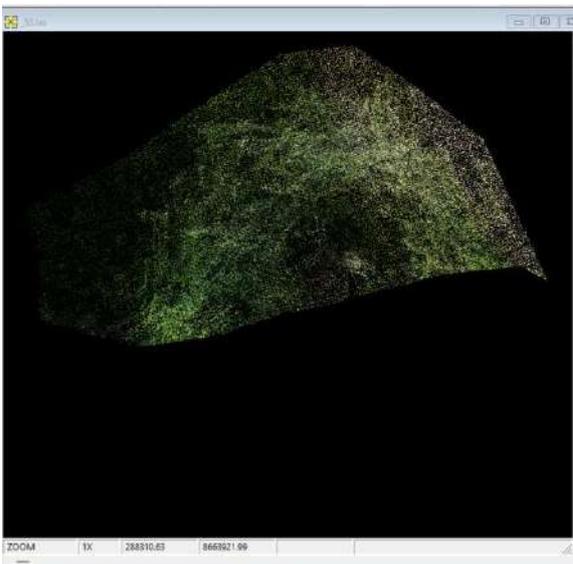
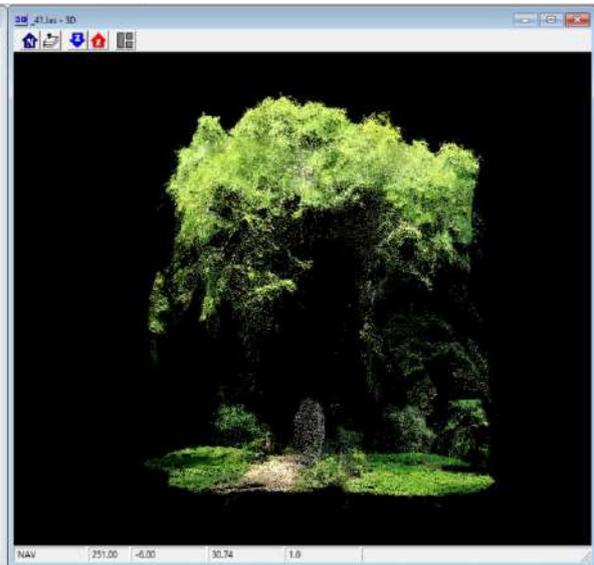
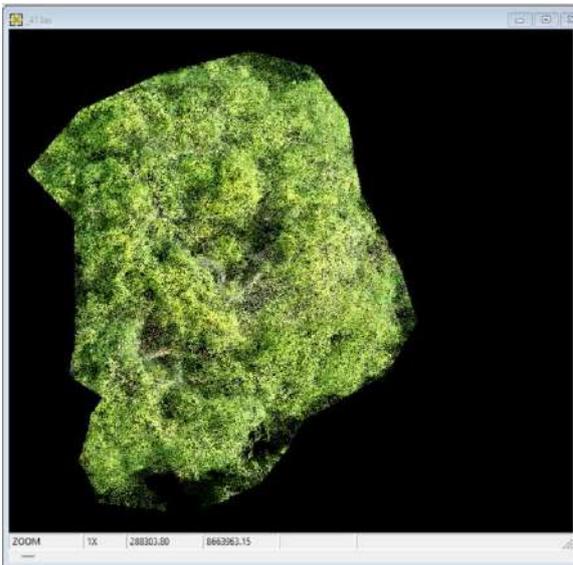
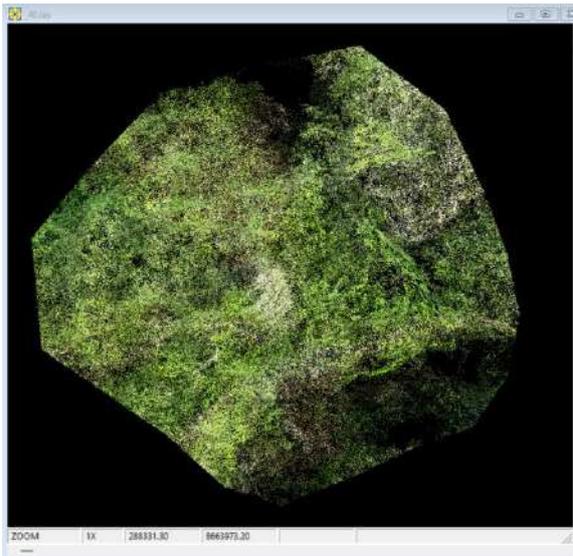
ANEXO 13: ARBOLES INDIVIDUALIZADOS

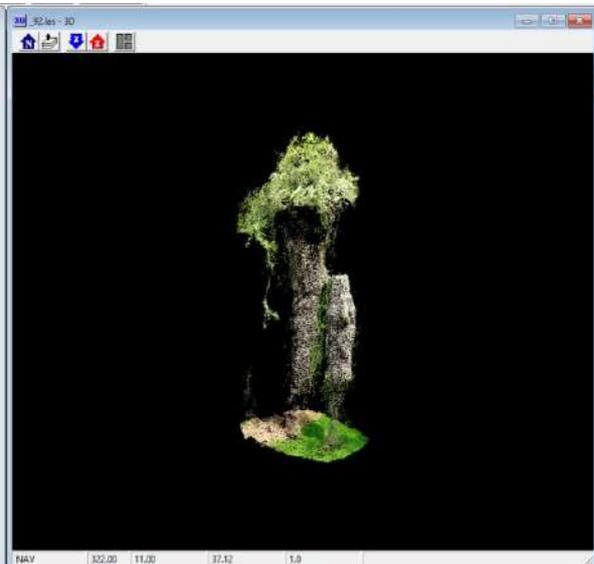
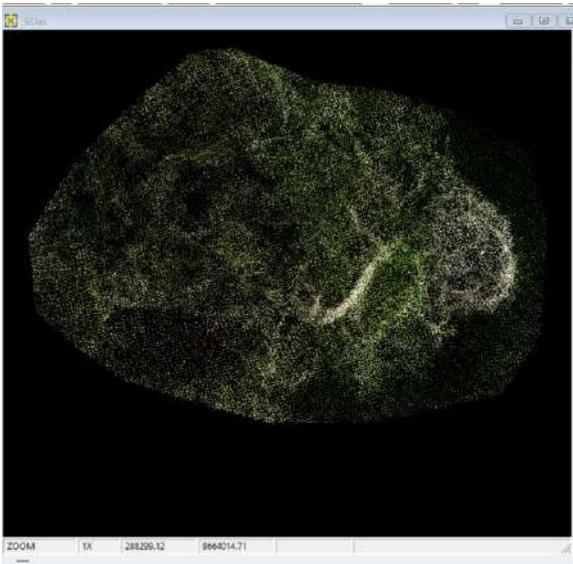
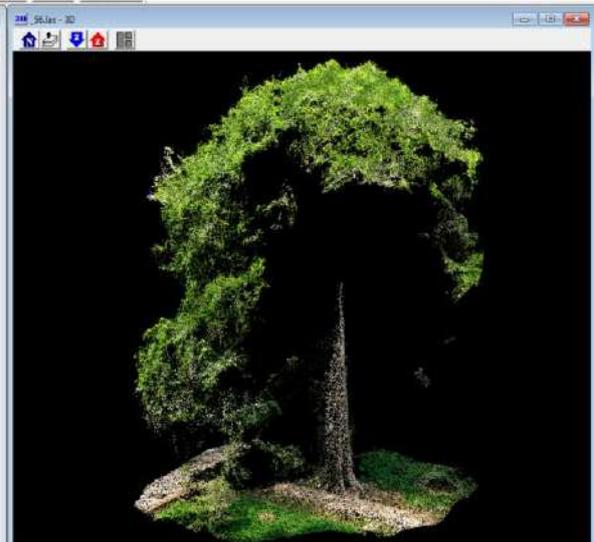
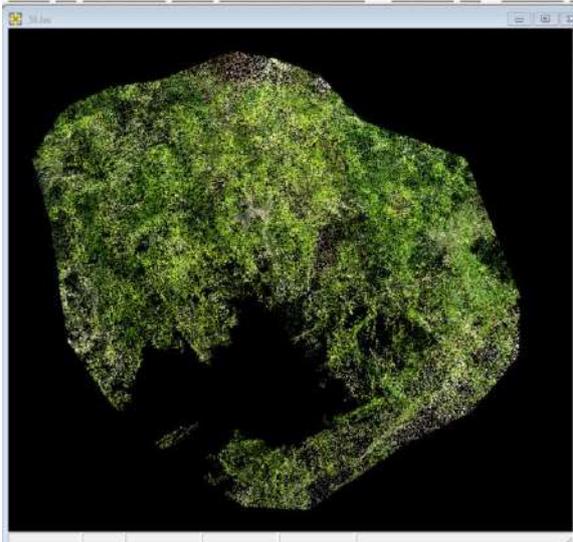












ANEXO 14: PRUEBA DE FRIEDMAN Y POST HOC FRIEDMAN

Tratamientos: Vertex, RPAS C1, C2, C3 y C4

N°	Suma de rangos	N
1	270,0	70
2	144,5	70
3	199,5	70
4	177,5	70
5	258,5	70

Prueba de Friedman

Ajustado por empates

Critical Value	65,28755
P.Value Chisq	2.23821e-13
F Value	20.98081
P.Value F	4.107825e-15

Análisis Post Hoc de Friedman

Alpha	0.05
DF Error	276
t-Student	1.968596
LSD	32.46043

Estadísticos

Chisq	Df	p.chisq	F	DFerror	p.F	t.value	LSD
65.28755	4	2.23821e-13	20.98081	276	4.107825e-15	1.968596	32.46043

Parámetros

test	name.t	ntr	alpha
Friedman	TRATAMI	5	0.05

Medias

	ALTU	rankSum	std	r	Min	Max	Q25	Q50	Q75
1	19.35714	270.0	5.423876	70	13.10	35.20	15.4000	17.850	21.2500
2	18.50786	144.5	4.778781	70	12.82	32.95	14.7950	17.075	20.7775
3	18.75486	199.5	4.927435	70	12.95	33.87	14.8775	17.355	21.1675
4	18.66500	177.5	4.746139	70	12.73	33.27	15.1275	17.455	20.5850
5	18.91314	258.5	4.990893	70	13.05	34.72	15.1125	17.490	20.7800

Grupos

Suma de rangos de los grupos

1	270.0	a
5	258.5	a
3	199.5	b
4	177.5	b
2	144.5	c