

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL Y MEDIO**  
**AMBIENTE**



**Detección de árboles y variables dasométricas mediante el uso  
de RPAS en la concesión forestal de la UnTumbes.**

**TESIS**

Para optar el Título profesional de Ingeniera Forestal y Medio  
Ambiente

**Autora:**

**Br. Espinoza Suarez, Angeline Katerine**

**Tumbes, 2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL Y MEDIO**  
**AMBIENTE**



**Detección de árboles y variables dasométricas mediante el uso  
de RPAS en la concesión forestal de la UnTumbes.**

**Tesis Aprobada en forma y estilo por:**

Dr. Eber Leopoldo Herrera Palacios (Presidente)

Mg. Eder Hidalgo Sandoval (Secretario)

Dr. Miguel Ángel Puestas Chully (Accesitario)

Dr. Eber Gines Tafur (Vocal)

**Tumbes, 2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL Y MEDIO**  
**AMBIENTE**



**Detección de árboles y variables dasométricas mediante el uso  
de RPAS en la concesión forestal de la UnTumbes.**

**Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido  
y forma:**

Br. Angeline Katerine Espinoza Suarez (Autor)

Dr. Eber Gines Tafur (Asesor)

Mg. Antoni David Jiménez Dios (Coasesor)

**Tumbes, 2025**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

En Tumbes, a los 15 días del mes de enero del dos mil veinticinco, siendo las 11 horas y 30 minutos, en los ambientes de la Escuela de Ingeniería Forestal y del Medio Ambiente, se reunieron el jurado calificador de la Universidad Nacional de Tumbes designado con resolución N° 0111-2023/UNTUMBES-VRACAD-FAC-D, de fecha 15 de agosto del 2023 Dr. Eber Leopoldo Herrera Palacio (Presidente), Mg. Eder Hidalgo Sandoval (secretario), y al Dr. Miguel Antonio Puescas Chully (acesitario), se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de tesis titulada: "**Detección de árboles y variables dasométricas mediante el uso de RPAS en la concesión forestal de la Untumbes**" para optar el título de Ingeniero Forestal y del Medio Ambiente, presentado por la:


Bachiller: **Espinoza Suarez, Angeline Katerine**


Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación el jurado según el artículo N° 65 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara, **aprobado** a la Bach. **Espinoza Suarez, Angeline Katerine**, por **unanimidad**, con calificativo de MUY BUENO.

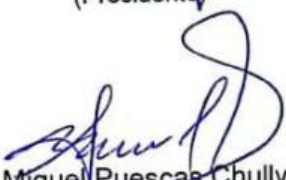
En consecuencia, queda **apta** para continuar con los trámites correspondientes para la obtención del título de Ingeniero Forestal y del Medio Ambiente, de conformidad con los estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el estatuto, Reglamento General de grados títulos y reglamento de tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las 12 horas y 55 minutos, del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del Público asistente.

Tumbes, 15 de enero de 2025

  
Dr. Eber Leopoldo Herrera Palacios  
DNI: 42450218  
ORCID N° 0000-0002-7255-9087  
(Presidenta)

  
Mg. Eder Esaud Hidalgo Sandoval  
DNI: 42311217  
ORCID N° 0000-0002-8568-3255  
(Secretario)

  
Dr. Miguel Puescas Chully  
DNI: 02660522  
ORCID N° 0000-0003-1979-9572  
(Accesitario)

C.c  
Jurado de Tesis (3)  
Asesor  
Interesado  
Coasesor (es)  
Archivo (Decanato)

# 3. INFORME DE TESIS\_ANGELINE ESPINOZA SUAREZ 2024\_v3.docx

*por* Angeline Katerine Espinoza Suárez



**Dr. Eber Gines Tafur**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-4438>

---

Fecha de entrega: 20-ene-2025 09:57a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2567676805

Nombre del archivo: 3\_INFORME\_DE\_TESIS\_ANGELINE\_ESPINOZA\_SUAREZ\_2024\_v3.docx (18.83M)

Total de palabras: 12077

Total de caracteres: 62953

### 3. INFORME DE TESIS\_ANGELINE ESPINOZA SUAREZ 2024\_v3.docx

#### INFORME DE ORIGINALIDAD



#### FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de Tumbes Trabajo del estudiante	5%
2	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	5%
3	colposdigital.colpos.mx:8080 Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	repositorio.catie.ac.cr Fuente de Internet	<1%
6	www.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1%



Dr. Eber Gines Tafur  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8366-4428>

9	<a href="http://ri.ues.edu.sv">ri.ues.edu.sv</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="http://dspace.ups.edu.ec">dspace.ups.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://repositorio.unc.edu.pe">repositorio.unc.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://alicia.concytec.gob.pe">alicia.concytec.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://dspace.unitru.edu.pe">dspace.unitru.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://www.scielo.org.mx">www.scielo.org.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://kimuk.conare.ac.cr">kimuk.conare.ac.cr</a> Fuente de Internet	<1 %



**Dr. Eber Gines Tafur**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-0366-6138>

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

***“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”***

**CERTIFICACIÓN**

**Dr. EBER GINES TAFUR**, profesor principal en la Escuela de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Tumbes, en el Departamento Académico de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente.

**CERTIFICA:**

Que el proyecto de tesis titulado “Detección de árboles y variables dasométricas mediante el uso de RPAS en la concesión forestal de la UnTumbes”, presentado por la estudiante de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, Angeline Katerine Espinoza Suarez, ha sido asesorado y revisado por mi persona, por lo tanto, queda autorizado para su presentación e inscripción a la Universidad Nacional de Tumbes para su revisión y aprobación correspondiente.

**Tumbes, 07 de enero del 2025**



---

**Dr. EBER GINES TAFUR**

## **DEDICATORIA**

Este estudio es consagrado a Dios y a mis padres, es un logro que refleja el laborioso ahincó que pusieron en mi para darme una educación. Todos los sacrificios, decisiones fueron fundamentales para mi éxito. La presente tesis es un ejemplo de amor y sacrificio, estoy muy orgullosa de enaltecerlos de esta manera, gracias por ser el faro en mi vida, iluminando mi camino hacia el entendimiento y sobre todo por infundir la importancia del esfuerzo en trabajo y la educación.

## **IN MEMORIAM**

En honor a mi abuelo Armando Espinoza, el origen de mi inspiración, y aunque ya no estés físicamente conmigo, tu espíritu y amor siguen guiándome en mi camino, y tal como te lo prometí, este logro va por ti abuelo.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, mi roca eterna, por haberme acompañado en toda mi carrera profesional, por ser mi fortaleza en el momento de debilidad y por darme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mis padres Carlos Espinoza y Gladys Suarez por su apoyo incondicional desde alentarme, hasta presionar en mis momentos de flaqueza, su fe en mí, han sido mi pilar en este logro.

A mis hermanos Jerson y Ariana por motivarme a seguir, espero ser un ejemplo para que ellos sepan que las metas se pueden cumplir

A mi mejor amiga Alessandra Armestar, por enseñarme a confiar en mí y en mis capacidades, ayudarme a comprender que los sueños se logran siempre que uno se la crea.

A mi asesor Eber Gines Tafur por su asesoramiento en este proyecto de tesis

A mi Coasesor Antoni Jiménez, por su apoyo, enseñanzas, comprensión y paciencia que contribuyeron para lograr culminar mi tesis.

Asimismo, agradecer a mis amigos y familia, Veriina Cabrera, Raisa Orejuela, Maritza Madrid, Steven Gómez, Alexander Pintado, Ariana Espinoza y Luis Reto que contribuyeron en la recopilación de datos para el desarrollo de mi tesis en campo.

Agradecer también a la empresa Geoconsulting Ingenieros SAC, al mando del Ing. Pastor Carhuatocto, Miguel Carhuatocto, Kevin Ramos y Alonso Lavalle por el apoyo, enseñanzas con los equipos y facilidades que me dieron para ejecutar el presente tesis.

## INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	18
II.	REVISION DE LITERATURA.....	20
2.1.	Bases teóricas-científicas.....	20
2.1.1.	Inventario forestal.....	20
2.1.2.	Aeronaves Piloteadas a Distancia ( <i>Remotely Piloted Aircraft-RPA</i> ) 21	
2.1.3.	Sistema de aeronave piloteada a distancia (RPAS).....	21
2.1.4.	Sensores remotos .....	21
2.1.5.	El Sensor LiDAR (Light Detection and Ranging), .....	22
2.1.6.	Diseño o Planes de vuelo .....	23
2.1.7.	Sistema de posicionamiento global (GNSS) .....	23
2.1.8.	Método de medición RTK (Real Time Kinematic) .....	23
2.1.9.	Modelo Digital de terreno (MDT).....	24
2.1.10.	Modelo Digital de Elevaciones (MDE) .....	24
2.1.11.	Modelo Digital de Superficie.....	24
2.2.	Antecedentes.....	24
III.	MATERIALES Y METODOS.....	29
3.1.	Tipo de investigación.....	29
3.2.	Zona de estudio.....	29
3.3.	Población y muestra .....	31
3.4.	Unidades de muestreo.....	32
3.5.	Equipos y materiales .....	33
3.5.1.	Software .....	33
3.5.2.	Equipos .....	33
3.5.3.	Materiales .....	34
3.6.	Parámetros de evaluación para inventario forestal .....	35
3.7.	Vuelo LiDAR .....	36
3.7.1.	Colocación de puntos de control.....	36
3.7.2.	Planeamiento de misiones de vuelo. ....	39
3.7.3.	Parámetros de vuelo .....	39
3.7.4.	Procesamiento de Fotografías áreas .....	41
3.8.	Delimitación de copas .....	45
3.8.1.	Segmentación mediante cuencas inversas (IWS).....	45

3.9. Cálculo de altura total .....	46
3.10. Obtención de diámetro de copa .....	47
3.11. Exactitud general .....	47
3.12. Correlación de variables .....	47
3.13. Análisis de error .....	48
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>49</b>
4.1. Detección de árboles .....	49
4.1.1. Segmentación mediante cuencas inversas.....	49
4.2. Ecuaciones alométricas para relacionar variables dasométricas y datos RPA.....	52
4.2.1. Segmentación mediante cuencas inversas (IWS).....	52
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>64</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>66</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>70</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Coordenadas de Vértices de los 04 cuadrantes. ....	32
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones técnicas del Matrice DJI ENTERPRISE 300 Series.....	34
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones técnicas de la Cámara Zenmuse L1- LiDAR .....	34
<b>Tabla 4.</b> Parámetros de evaluación. ....	35
<b>Tabla 5.</b> Datos del punto de control de orden “C” utilizado. ....	37
<b>Tabla 6.</b> Datos de los puntos georreferenciados en coordenadas geográficas. ...	38
<b>Tabla 7.</b> Datos de los puntos Georreferenciados en coordenadas Geodésicas U.T.M .....	38
<b>Tabla 8.</b> Parámetros del vuelo. ....	40
<b>Tabla 9.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre DAP (Campo) y DC (RPA), vuelo de 75 metros de altura .....	52
<b>Tabla 10.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, AT (campo) y DC (RPA), vuelo de 75 metros de altura .....	53
<b>Tabla 11.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DC (campo) y DC (RPA), vuelo de 75 metros de altura .....	54
<b>Tabla 12.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DAP (campo) y DC (RPA), vuelo de 100 metros de altura .....	55
<b>Tabla 13.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, AT (campo) y DC (RPA), vuelo de 100 metros de altura .....	56
<b>Tabla 14.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DC (campo) y DC (RPA), vuelo de 100 metros de altura .....	57
<b>Tabla 15.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DAP (campo) y DC (RPA), vuelo de 150 metros de altura .....	58
<b>Tabla 16.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, AT (campo) y DC (RPA), vuelo de 150 metros de altura .....	59
<b>Tabla 17.</b> Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DC (campo) y DC (RPA), vuelo de 150 metros de altura .....	60

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la Concesión forestal de la Universidad Nacional de Tumbes. ....	30
<b>Figura 2.</b> Selección de cuadrícula.....	32
<b>Figura 3.</b> División de parcela. ....	33
<b>Figura 4.</b> Lectura e instalación de equipos en el Punto de control TUM01219, tomado como partida.....	36
<b>Figura 5.</b> Lectura de Puntos para vuelo drone, dentro del proyecto. ....	37
<b>Figura 6.</b> Ubicación, marcado y lectura de los puntos. ....	39
<b>Figura 7.</b> Armado y colocación de GPS y equipos en el punto de vuelo. ....	40
<b>Figura 8.</b> Vuelo LiDAR en la zona de estudio. ....	40
<b>Figura 9.</b> Proceso para orientación de fotografías.....	41
<b>Figura 10.</b> Resultado de Orientación de Fotografías aéreas. ....	42
<b>Figura 11.</b> Nube de puntos densa. ....	42
<b>Figura 12.</b> Modelo Digital de Elevaciones (DEM) .....	43
<b>Figura 13.</b> Ortomosaico. ....	43
<b>Figura 14.</b> Generación de Modelo Digital de terreno (DTM) .....	44
<b>Figura 15.</b> Generación del Modelo de altura de Copas (CHM).....	45
<b>Figura 16.</b> Basin Generado en el programa Arcgis 10.8.....	46
<b>Figura 17.</b> Cálculo de altura total.....	46
<b>Figura 18.</b> Delimitación de copas mediante IWS. ....	51
<b>Figura 19.</b> Superposición de Copas. ....	51
<b>Figura 20.</b> Regresión lineal entre DAP (Campo) y DC (RPA) vuelo de 75 metros de altura .....	53
<b>Figura 21.</b> Regresión lineal entre AT (campo) y DC (RPA), Vuelo de 75 metros. .	54
<b>Figura 22.</b> Regresión lineal entre DC (campo) y DC (RPA), Vuelo de 75 metros.	55
<b>Figura 23.</b> Regresión lineal entre DAP (campo) y DC (RPA), Vuelo de 100 metros. ....	56
<b>Figura 24.</b> Regresión lineal entre AT (campo) y DC (RPA), Vuelo de 100 metros. ....	57
<b>Figura 25.</b> Regresión lineal entre DC (campo) y DC (RPA), Vuelo de 100 metros. ....	58
<b>Figura 26.</b> Regresión lineal entre DAP (campo) y DC (RPA), Vuelo de 150 metros. ....	59
<b>Figura 27.</b> Regresión lineal entre AT (campo) y DC (RPA), Vuelo de 150 metros. ....	60
<b>Figura 28.</b> Regresión lineal entre DC (campo) y DC (RPA), Vuelo de 150 metros. ....	61

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Informe de Calidad de los puntos colocados .....	70
<b>Anexo 2.</b> Permiso de ingreso a Concesión Forestal de la Universidad Nacional de Tumbes. ....	72
<b>Anexo 3.</b> Lectura del Punto de control de "ORDEN C" .....	73
<b>Anexo 4.</b> Marcado de puntos de control dentro de la Concesión Forestal. ....	73
<b>Anexo 5.</b> Lectura de Puntos de Control dentro de la Concesión Forestal .....	74
<b>Anexo 6.</b> Medición en campo del diámetro de copa .....	74
<b>Anexo 7.</b> Medición de (DAP) del árbol.....	75
<b>Anexo 8.</b> Medición de distancia para toma de altura con clinómetro.....	75
<b>Anexo 9.</b> Medición de altura de árboles con clinómetro .....	76
<b>Anexo 10.</b> Plaqueo de árboles inventariados .....	76
<b>Anexo 11.</b> Placa de inventario.....	77
<b>Anexo 12.</b> Toma de datos de inventario en ficha.....	77
<b>Anexo 13.</b> Ficha de inventario .....	78
<b>Anexo 14.</b> Armado de Trípode y la colocación del GPS para vuelo LIDAR.....	79
<b>Anexo 15.</b> Vuelo LIDAR, de la zona de estudio.....	79

## RESUMEN

La presente investigación “Detección de árboles y variables dasométricas mediante el uso de RPAS en la concesión forestal de la UnTumbes”, es muy importante porque tendremos data que nos servirá para saber si es posible comprobar nuestros objetivos los cuáles son detectar arboles mediante RPAS, comparándolos con los árboles inventariados de manera manual, correlacionar variables adquiridas a través de RPAS, el procedimiento implica elegir 6 hectáreas de las 127.23 hectáreas que cuenta la concesión forestal de la Universidad Nacional de Tumbes, estableciéndose cuadrículas de 245 m x 245 m, seleccionándose una cuadrícula la cual sirvió para realizar los planes de vuelos y llevar a cabo el inventario. Realizándose vuelos a 3 alturas distintas (75 m, 100 m y 150 m), en cuanto al inventario se tomaron en cuenta arboles con un DAP mayor a 5 cm, la data obtenida por RPAS fueron procesadas en Agisoft Metashape, se obtuvo el modelo digital de terreno (MDT), el modelo digital de elevación (MDE) y el ortomosaico, estos fueron usados para la detección de individuos forestales inventariados aplicando la segmentación de cuencas inversas (IWS). Seguidamente se correlacionaron las variables obtenidas durante el inventario forestal y las variables obtenidas mediante las fotografías aéreas a través del modelo de regresión lineal aplicada en el software R studio. Los datos indican que el modelo IWS obtuvo una exactitud global del 74%, 67% y 65 %, además de que la correlación de variables evidencia una elevada concordancia entre diámetros de las copas logrando medidas de precisión elevadas con errores mínimos en los datos estimados.

**Palabras claves:** Fotografías Aéreas, Inventarios forestales, Segmentación de cuencas inversas, Correlación, Aeronaves Piloteadas a Distancia.

## ABSTRACT

This research "Detection of trees and dasometric variables through the use of RPAS in the forestry concession of UnTumbes", is very important because we will have data that will help us to know if it is possible to verify our objectives which are to detect trees by means of RPAS, comparing them with the trees inventoried manually, correlate variables acquired through RPAS, the procedure involves choosing 6 hectares of the 127.23 hectares that make up the forestry concession of the National University of Tumbes, establishing grids of 245 m x 245 m, selecting a grid that served to make the flight plans and carry out the inventory. By carrying out flights at 3 different heights (75 m, 100 m and 150 m), as for the inventory, trees with a DBH greater than 5 cm were taken into account, the data obtained by RPAS were processed in Agisoft Metashape, the digital terrain model (DTM), the digital elevation model (DEM) and the orthomosaic were obtained, these were used for the detection of inventoried forest individuals applying the inverse watershed segmentation (IWS). Then, the variables obtained during the forest inventory and the variables obtained were correlated with the aerial photographs through the linear regression model applied in the R studio software. The data indicate that the IWS model obtained an overall accuracy of 74%, 67% and 65%, in addition to the fact that the correlation of variables shows a high agreement between crown diameters, achieving high precision measurements with minimal errors in the estimated data.

**Keywords:** Aerial Photographs, Forest Inventories, Inverse Watershed Segmentation, Correlation, Remotely Piloted Aircraft.

## I. INTRODUCCIÓN

Tener una buena gestión en zonas forestales actualmente viene siendo una necesidad, ya que así se pueden realizar tanto trabajos científicos como medioambientales y políticos. Un inventario forestal es un método establecido para apoyar con el monitoreo y la gestión, Masek Et al.(2015) Sin embargo, el trabajo de campo que se realiza en un inventario resulta ser muy laborioso y requiere de muchos puntos los cuales se necesita que exista un fino equilibrio entre tamaño de muestra, frecuencia de la observacion, disponibilidad presupuestal y las diferentes restricciones logisticas.

Sin embargo para realizar un inventario forestal en campo puede presentar algunos desafíos y limitaciones ya que requiere de recursos significativos en términos de tiempo, dinero y personal capacitado, además que el acceso al campo puede ser complicado (Mokros, y otros, 2021); el uso de RPAS ( Sistema Aéreos Piloteados a Distancia) o drones para la detección de árboles y la medición de copas es una técnica de teledetección que puede ser una alternativa eficiente en inventarios forestales. (Gallardo Salazar , Pompa Garcia, Aguirre Salado , Lopez Serrano, & Meléndez Soto , 2020).

Las plataformas de sistemas de aeronaves piloteadas a distancia (RPAS) son capaces de optimizar el proceso de adquisición de imágenes aéreas, mejorar la calidad de los productos generados en términos de resolución espacial y temporal (Coelho Eugenio, y otros, 2020). Estas plataformas RPAS se consolidado como una forma de realizar estos trabajos a bajo costo, optimizando recursos y obteniendo una alta flexibilidad de recopilación de datos (Zahawi, y otros, 2015).

La propuesta de esta investigación busca estimar las variables dasométricas y mediante uso de la fotogrametría obteniendo ecuaciones que correlacione datos de campo e imágenes aéreas, esto con el fin de buscar alternativas innovadoras que

ayuden con la obtención de datos dasométricos sin la necesidad de realizar inventarios forestales en campo que como se mencionó requieren de altos recursos económicos, de tiempo y de personal.

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. Bases teóricas-científicas.

#### 2.1.1. Inventario forestal

Un inventario forestal es un proceso en el que se evalúa y cuantifica uno o varios recursos forestales, considerando cada una de las condiciones en las que estos se desarrollan, si le damos un concepto más frecuente sería que es la estimación y calidad de los árboles presentes en una determinada zona. Estos proporcionan una fuente de información que será crucial para realizar una planificación forestal y una buena gestión sostenible. (Knoke, Kindu, Schneider , & Gobakken, 2021).

Para realizar un inventario se deben llevar distintas etapas y procesos; primero conocer la finalidad, como determinación de recursos maderables, para después de esto ir por la información más exacta como diámetro a la altura de pecho (DAP), altura de los árboles, altura de la base la copa , ritmo de crecimiento, área basal, especie, ubicación, biomasa, volumen y edad, también es muy importante definir el diseño de muestreo, así mismo fijar las técnicas e instrumentos que se utilizaran para realizar la medición, capacitar al personal sobre ello, después de todo proceder a ejecutar el levantamiento, para finalizar con la revisión y el procesamiento de datos para obtener el producto final (Kovac, y otros, 2020).

La forma más común de realizar un inventario es mediante la toma de medidas en campo de las principales variables, como lo son el DAP, altura, siendo está ultima muy importante ya que existen ecuaciones que al relacionarla con otras

variables principalmente la biomasa. (Ruiz Blandon, Hernández Álvarez, Rodríguez Macias, & Salcedo Pérez, 2020).

Sin embargo, existe la viabilidad de realizar mediciones mediante sensores remotos, lo cual genera muchas ventajas como la reducción de trabajo en campo, ya que ahorra recursos respecto al transporte, el vaciado en una base de datos, reducción en tiempo, etc. Además, que con el uso de estos datos remotos se estaría reduciendo las mediciones destructivas, es decir reducir la posibilidad de afectar el ambiente así el daño sea lo más mínimo posible. (Goodbody, Coops, & White, 2019).

### **2.1.2. Aeronaves Piloteadas a Distancia (*Remotely Piloted Aircraft- RPA*)**

Se refiere una aeronave conducida por un “Piloto Remoto”, con base en una “Estación remota” es decir un piloto remoto situado a distancia de la aeronave (ya sea en barco, tierra o en otra aeronave), que supervisa la aeronave constantemente y es directamente responsable de su operación segura durante todo el vuelo, estos vehículos tienen varios nombres, los más famosos se basan en el origen, la etimología y la finalidad, entre las más conocidas tenemos: DRONE: nombre de dominio militar “Dron” proviene de dron, abeja macho, en referencia al zumbido que emite su motor, idéntico a un zángano en vuelo. (NTC-001-2015, 2015).

### **2.1.3. Sistema de aeronave piloteada a distancia (RPAS)**

Agrupación de elementos de integración de la configuración de una aeronave piloteada remotamente y su estación piloto. Controles remotos relevantes, enlaces de comandado y controles necesarios y otros elementos que pueden ser requeridos en cualquier momento durante el vuelo (NTC-001-2015, 2015).

### **2.1.4. Sensores remotos**

Son sistemas o instrumentos utilizados para recopilar información rápida y procesable sobre objetos, áreas o fenómenos distantes, cuya información se puede procesar e interpretar para una mejor comprensión utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Estos sensores montados en

plataformas son los más utilizados en los últimos años. Capta la energía electromagnética reflejada o emitida por objeto de la superficie terrestre en las diferentes bandas del espectro electromagnético. Estas grabaciones van desde las longitudes de ondas cortas (gamma y radiografía) hasta las longitudes de ondas largas (microondas y emisiones). La longitud más corta es la ultravioleta, que resulta útil para los sensores ( (Veneros, y otros, 2020).

#### **2.1.5. El Sensor LiDAR (Light Detection and Ranging),**

sería una de las técnicas de percepción remota, el cual se basa en sensores laser, los cuales genera datos georreferenciados con mayor rapidez y precisión que los métodos empleados tradicionalmente como los levantamientos topográficos, esta técnica es muy usada en los inventarios forestales, llegando también a evaluar la calidad de madera, como también a realizar estudios ecológicos donde se basa en analizar los procesos de transpiración de las plantas y la diversidad de microhábitats. (Gutiérrez, 2021).

##### **2.1.5.1. Componentes**

Se compone de la siguiente manera:

- a) El vehículo;** transporta el láser LiDAR, este puede ser montado en aviones tripulados y no tripulados. El GPS y los sistemas son montados en un aparato especial en parte externa del vehículo que realiza el vuelo. (Wang, Yang, Xi, Nie, & Dong , 2024).
- b) Sensor laser,** aquí se encuentran la fuente laser, el detector laser, el mecanismo de digitación, sistema electrónico que cuantificaran los pulsos y retornos y la computadora que almacenara y procesara los datos en tiempo real. (Williams, Olsen, Roe, & Glennie , 2013).
- c) Propiedades espectrales,** la longitud de mayormente trabajada por los laser es de 1064 nanómetros (nm), encontrada en la banda del infrarrojo que está cerca al espectro electromagnético. En el caso del LiDAR topográfico solo trabaja en una longitud de onda, por otro lado, el LiDAR batimétrico, lo hace en dos longitudes de onda tanto en 1064 y 532 nm. La longitud de onda infrarroja es proyectada en

el agua de la superficie y el verde penetra el agua y es proyectada por los objetos que se encuentran el agua. (Williams, Olsen, Roe, & Glennie , 2013).

**d) Intensidad**, en estos sistemas cuentan con una intensidad o magnitud del pulso de retorno, a su vez pueden medir el tiempo de retorno de un pulso como también la fuerza de este, la intensidad puede variar de acuerdo a la altitud que se realice el vuelo, las condiciones atmosféricas, propiedades direccionales, los parámetros del láser y la reflectividad del objeto. (Williams, Olsen, Roe, & Glennie , 2013)

#### **2.1.6. Diseño o Planes de vuelo**

Implica determinar el área de evaluación y definir parámetros (altura de vuelo, escala, entre otros), abarca las coordenadas de llegada y de salida del área del área de evaluación, con los que se llevará a cabo le vuelo esto nos facilitará la obtención de fotografías georreferenciadas, a través de aplicaciones móviles como Pix4D, se realizan las polilíneas de la zona de evaluación, los vehículos no tripulados realizan el plan de vuelo de forma autónoma. (Buriticá Otálora & Caro Agudelo, 2020).

#### **2.1.7. Sistema de posicionamiento global (GNSS)**

Es la agrupación de tecnologías que componen el sistema de navegación por satélite, estos brindan el posicionamiento geoespacial tridimensional con cobertura global 24/7 de forma autónoma; en este sistema el receptor registra la señal decodificada, la toma y calcula la localización de este, sabiendo las posiciones de los satélites en el espacio se obtendrá la posición del receptor (x, y,z) solo se necesitará medir las distancias entre satélite y receptor. (Martinez Mancancela & Bermeo Cabrera, 2023).

#### **2.1.8. Método de medición RTK (Real Time Kinematic)**

Este es un instrumento que utiliza señales de satélite para saber la posición de un punto en el terreno con mayor precisión. Las mediciones con el receptor GNSS (Modo RTK) Serán más precisas dependiendo del

equipo que se utilice y la cantidad de satélites que se encuentren disponibles en el momento que se esté midiendo. (Jimenez Calero, Magaña Monge, & Soriano Melgar, 2019).

#### **2.1.9. Modelo Digital de terreno (MDT)**

Se denomina así al conjunto de capas (Ráster), que muestran distintas características de la superficie terrestre generadas de la capa de elevaciones denominada Modelo Digital de Elevaciones (MDE). En algunos casos incluyen dentro de los MDT a todas las variables cuantitativas regionalizada. (Ramos Poma, 2022).

#### **2.1.10. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)**

Es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, este va permitir caracterizar las formas de relieve y los elementos u objetos que se encuentren en el mismo; los valores se encuentran en un archivo (Ráster), el cual se genera utilizando algún equipo de cómputo o softwares especializados. Sus cualidades esenciales son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital. (Instituto Nacional de Estadística Y Geografía, 2015)

#### **2.1.11. Modelo Digital de Superficie**

Este representa las elevaciones sobre el nivel del mar de las superficies reflectantes, (Arboles, edificios, etc.) y características elevadas que se encuentren sobre la tierra. El sistema LiDAR, los reflejos de la luz viajan hacia al suelo. Y cuando este rebota con su objetivo regresa al sensor, es así como se da el rango (una distancia variable) a la tierra, a esta acción se le denomina LiDAR. (Ramos Poma, 2022)

### **2.2. Antecedentes**

Panagiotidis, Abdollahnejad, Surov, & Chiteculo, (2017) en su investigación estimaron la altura y diámetros de copa empleando el modelo digital de altura de dosel (CHM) y la segmentación de cuencas inversas (IWS), compararon sus datos recogidos en campo con los datos de teledetección, los resultados indican que las

relaciones entre datos de campo y teledetección son congruentes obteniendo RMSE%, que se sitúan el rango de 11,42 % a 12,62 % en términos de altura y en el rango de 14,29 % a 18,56 % en términos de diámetro de la copa.

Wu, Shen , Cao, Wangy , & Cao (2019) en su estudio aplicaron 3 métodos para estimar la cobertura dosel de un bosque en china; un método basado en la segmentación de árboles individuales (ITSM), otro método basado en el modelo de altura del dosel (CHMM) y un método estadístico (SMM) con métricas LIDAR. Cada árbol de la parcela se segmento utilizando algoritmos de cuenca hidrográfica, ajuste polinomial, segmentación de copa de árbol individual (ITCS) y segmentación de la nube de puntos (PCS), la cobertura del dosel lo calcularon utilizando la copa de árbol individual segmentada (ITSM), luego de ello utilizaron un método basado en CHM , que se basó en el umbral de altura de CHM, para estimar la cubierta del dosel, para la estimación de la cobertura de dosel utilizaron la regresión lineal múltiple (MLR) y la evaluaron mediante una validación cruzada de exclusión . los resultados obtenidos fueron comparados con los datos obtenidos en campo. Los resultados mostraron que de los 3 métodos el algoritmo PCS presento mayor precisión ( $F=0,83$ ), seguido del ITCS ( $F= 0,82$ ) y algoritmos de cuenca hidrográfica ( $F = 0,79$ ), sin embargo, los 3 métodos tuvieron la mayor precisión cuando la resolución CHM fue de 0,5 m, y el algoritmo PCS tuvo la mayor precisión cuando el umbral de distancia fue de 2 m. Además, el ITSM tuvo la mayor precisión en la estimación de la cobertura del dosel ( $R^2 = 0,92$ ,  $RMSE = 3,5\%$ ), seguido por el CHMM ( $R^2 = 0,94$ ,  $RMSE = 5,4\%$ ), y el SMM tuvo una precisión relativamente baja ( $R^2= 0,80$ ,  $RMSE= 5,9 \%$ ).

Sadhasivam, Dineshkumar, Abdul Rahaman, & Bhardwaj , (2020). En este estudio, DSM y DTM derivados de ortoimágenes VHR UAV se utilizaron para obtener el CHM, que sirve como un componente importante para detectar el diámetro de copa y la altura del árbol en el área de estudio después de lo cual se ha aplicado un filtro de máximos locales para suavizar la trama para detectar la parte superior de la copa a partir de la cual se estimaron las alturas de los árboles individuales. El diámetro de la copa del árbol se evaluó utilizando el método de Segmentación Inversa de Cuencas Hidrográficas (IWS). El resultado de este estudio muestra que los árboles presentes en el área forestal de Kalesar tienen una altura máxima de 46 m.

Miraki , Sohrabi , Fatehi, & MKneubuehlerc (2021) En su estudio se probaron tres algoritmos de segmentación controlados por marcadores, es decir, segmentación de cuencas hidrográficas inversas (IWS), máximos locales (LM) y crecimiento de regiones (RG) para una serie de CHM generados a partir de nubes de puntos derivadas de un algoritmo de estructura de movimiento, en un rango de resoluciones espaciales y un filtro gaussiano con sigma variable. Los resultados de la delineación se validaron utilizando datos de inventario de campo. Los falsos positivos superaron en número a los falsos negativos para los CHM de resolución final. La mayor precisión general se logró para una resolución espacial de 100 cm utilizando el algoritmo RG y el algoritmo IWS. Además, se evaluó el efecto de diferentes estructuras forestales, filtrado CHM y diferentes especies de árboles en la precisión de los algoritmos de delineación de árboles. En general, los algoritmos de delineación seleccionados influyeron en el éxito de ITCD de manera que el algoritmo RG generó resultados significativamente más precisos que los otros dos algoritmos. El algoritmo RG fue el enfoque más apropiado para la delineación de copas de árboles individuales.

Wannasiri, Nagai, Honda, Santitamnont, & Miphokasap, (2013), En este estudio utilizaron métodos de filtrado de ventana variable (VWF) y segmentación inversa de cuencas hidrográficas (IWS) comparando su rendimiento en la detección de árboles individuales y en la derivación de la posición del árbol, el diámetro de la copa y la altura del árbol utilizando el modelo de altura del dosel (CHM) derivado de LiDAR. Los resultados demostraron que cada método funcionó bien en bosques de manglares con un bajo porcentaje de condiciones de superposición de copas. El método VWF arrojó una precisión ligeramente mayor para las extracciones de parámetros de manglares a partir de datos LiDAR en comparación con el método IWS. Esto se debe a que el método VWF utiliza un tamaño de ventana de filtrado circular adaptativo basado en una relación alométricas. Como resultado del método VWF, las mediciones de posición de árboles individuales indicaron un valor de error de distancia promedio de 1,10 m. La detección de árboles individuales mostró un coeficiente de concordancia kappa (K) valor de 0,78. La estimación del diámetro de la copa produjo un valor de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,75, un valor de error cuadrático medio de la estimación (RMSE) de 1,65 m y un valor de error relativo (RE) de 19,7 %. La determinación de la altura de los árboles a partir de

LiDAR arrojó un valor  $R^2$  de 0,80, un valor RMSE de 1,42 m y un valor RE de 19,2 %. Demostrando así que la precisión de los parámetros biofísicos derivados de LiDAR en los bosques de manglares que utilizan los métodos VWF e IWS es menor que en los bosques de coníferas, boreales, pinos y caducifolios. La menor precisión de la estimación se debe principalmente a las diferencias en la densidad forestal, la estructura del dosel y la densidad de las nubes de puntos LiDAR.

Chen , Xiang, & Moriya (2020) En este estudio, utilizaron un algoritmo iterativo de red irregular triangulada (TIN) para separar los puntos del suelo y del dosel en datos LiDAR aéreos, y generamos modelos digitales de elevación (DEM) mediante interpolación ponderada de distancia inversa (IDW), interpolación de spline delgado y superficie de tendencia. interpolación, así como mediante el uso del algoritmo Kriging. La altura de la nube de puntos se asignó a un modelo de superficie digital (DSM) y se adquirió un modelo de altura del dosel (CHM). Luego, cuatro algoritmos (algoritmo máximo local basado en nubes de puntos, El algoritmo máximo local basado en CHM, el algoritmo de cuencas hidrográficas y el algoritmo de coincidencia de plantillas) se usaron comparativamente para extraer los parámetros estructurales de árboles individuales. Los resultados indicaron que los dos algoritmos máximos locales pueden detectar efectivamente la copa del árbol; el algoritmo de cuenca hidrográfica puede extraer con precisión la altura de un árbol individual y determinar el borde de la copa del árbol; y el algoritmo de coincidencia de plantillas funciona bien para extraer el ancho de copa exacto.

De Lima Neto, Biondi, Araki, & Bobrowski (2012), el proposito de su investigación fue medir las calles de Curitiba (PR) mediante fotografías aéreas, Con el fin de respaldar la forestación de estas calles, para ello usaron tres unidades de muestreo de arboles encontrados en la ciudad de Curitiba, la medición fue procesada mediante el sistema de informacion geografico (SIG), Las otofotos de cada unidad de muestreo se utilizaron para hacer comparaciones entre las areas de copa de los arboles con las areas de dosel obtenidad mediante un inventario realizado de manera convencional, donde en sus resultados no encontraron diferencia significativa entre ambos metodos, tanto el metodo de manera convencional y el metodo en SIG.

Pourreza, Moradi , Khosravi, Deljouei, & Vanderhoof (2022), en su estudio tuvo como objetivo probar la precisión de un sistema GNSS RTK montado en un UAV

con la intención de calcular la altura de copa y la altura en una plantación de *Cupressus arizonica* (Greene., ciprés de Arizona) en Irán, a estos árboles ornamentales se les realizó la medición dendrológicas en campo, se comparó con los vuelos a diferentes alturas tanto de 25,50,100 m, el modelo de altura de copas (CHM), derivado de modelo de superficie digital (DSM) se utilizó para estimar altura de árboles y el algoritmo de segmentación inversa de cuencas hidrográficas (IWS) para obtener el diámetro de copa, obteniendo como resultado que las medidas en altura de los árboles no fueron significativamente diferentes, excepto en el vuelo realizado a 100 metros de altura.

Jimenez Dios (2023), el propósito de su estudio fue calcular el contenido de carbono de la regeneración natural, a demás identificar a través de fotogrametría los individuos registrados en campo (inventario) y establecer correlación entre las variables dasométricas de campo con las variables dasométricas obtenidas mediante RPAS, utilizando tres métodos para la detección de árboles, fotointerpretación, segmentación de cuencas inversas (IWS) y i.segment índices espectrales de vegetación, resultando que la fotointerpretación es el modelo con mayor exactitud general dando como valor 68.21 %, seguido de i.segment donde se tomaron cinco parámetros teniendo los siguientes valores 43.08%, 35.38%, 57.95%, 36.41% y 45.64%, en el método (IWS) se logró una exactitud global con valor de 60.51%.

Nasiri, y otros (2021), realizaron una investigación que tuvo como objetivo buscar el potencial de las imágenes aéreas UAV económicas para poder estimar el diámetro de copa y la altura total de los árboles, ellos realizaron dos vuelos en diferentes estaciones y utilizaron las condiciones leaf-on y leaf-off, para formar el modelo superficial digital y un modelo digital de terreno, utilizaron el CHM para calcular altura y el algoritmo de segmentación de cuencas inversas para estimar diámetro de copa, los datos que obtuvieron los compararon con mediciones realizadas en campo teniendo resultados de 0.81 m (7.02 %) y 3.22 m (10.1%) de MAE. Además los resultados mostraron una alta relación entre los datos obtenidos en campo y los datos obtenidos por los vuelos con un  $R^2$  0.923 para diámetro de copa y  $R^2$  de 0.808 para altura total.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

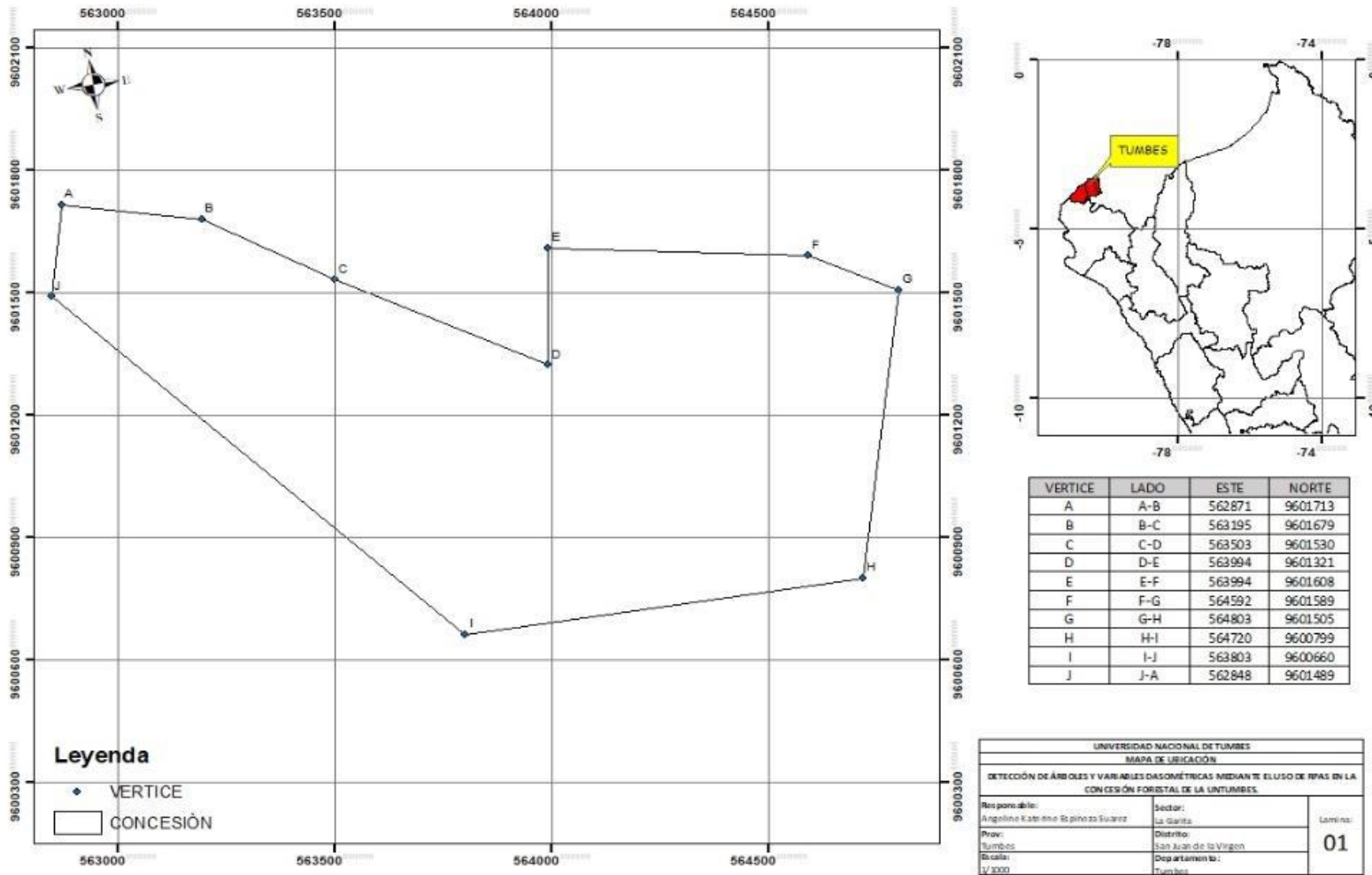
#### **3.1. Tipo de investigación**

En este estudio en función del objetivo que se busca, es de carácter aplicado y en términos de enfoque, es descriptiva, cuantitativa y correlacional. Esto se debe a que se llevó a cabo una cuantificación de árboles en la zona estudiada y se vincularon los datos dasométricos recogidos en campo con los datos obtenidos a través de vuelos RPAS.

#### **3.2. Zona de estudio**

Este estudio se enfocó en la Concesión Forestal de la Universidad Nacional de Tumbes, situado en el caserío de Garbanzal, Distrito de San Juan de la Virgen, Provincia y Departamento de Tumbes. Esta zona posee una superficie de 127,23 Ha y un área circundante de 5441,99 m.

Figura 1. Ubicación de la Concesión forestal de la Universidad Nacional de Tumbes.



### 3.3. Población y muestra

Se llevo a cabo un muestreo subjetivo, donde se recurrió al criterio profesional para elegir las unidades de muestra. De esta manera, se consiguieron muestras representativas en toda la población.

La población se ajusta a la superficie total de la concesión 127.23 Ha y se determinó el tamaño de la muestra a través de la fórmula sugerida por el Ministerio del Ambiente (2015).

$$N = a + b(S)$$

N: Superficie total de la muestra (Ha)

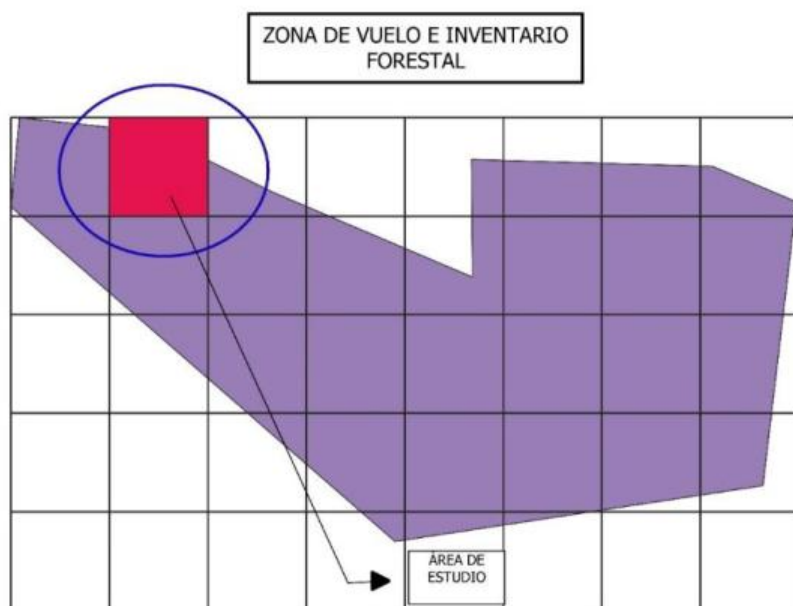
S: Superficie total a evaluar del área del proyecto (Ha)

a: 5

b: 0.001

Al aplicar la formula tenemos que 127.23 ha que abarca la concesión forestal, obteniendo un tamaño de la muestra de 5.12 ha, Redondeándolo a 6 ha aproximadamente, se instalaron cuadrículas de 245 m x 245 m en toda la zona de la concesión y seleccionando de manera aleatoria una cuadrícula para el diseño del plan de vuelo y la ejecución del inventario.

**Figura 2.** Selección de cuadrícula



Fuente: software Qgis

### 3.4. Unidades de muestreo

El muestro equivale a una superficie de 6 Ha, dividida en 4 cuadrantes de 1.5 hectáreas, donde se evaluaron arboles mayores a 5 cm de diámetro.

**Tabla 1.** Coordenadas de Vértices de los 04 cuadrantes.

Vértice	Este	Norte
1	563107.54	9601715.97
2	563229.48	9601716.00
3	563352.43	9601716.03
4	563107.46	9601594.04
5	563229.52	9601593.96
6	563352.46	9601593.00
7	563107.50	9601471.01
8	563229.44	9601471.04
9	563352.50	9601470.97

**Figura 3.** División de parcela.



Fuente: Google Earth Pro

### **3.5. Equipos y materiales**

#### **3.5.1. Software**

- Agisoft Metashape
- Q Gis 3.29
- Power point
- Microsoft Word
- Arcgis 10.8
- R studio
- Excel

#### **3.5.2. Equipos**

- Laptop, Marca Lenovo
- GPS Garmin 84 S
- GPS Diferencial
- Cámara fotográfica
- Bípode

- RPAS MATRICE DJI ENTERPRISE 300 SERIES

**Tabla 2.** Especificaciones técnicas del Matrice DJI ENTERPRISE 300 Series

<b>Aeronave</b>	<b>Especificaciones</b>
Autonomía	55 minutos
Alcance máximo	15 km
Frecuencias	2.4000~2.4835 GHz a 5.725~5.850 GHz.
Velocidad máxima	23 m/s (Modo S)
Carga máxima	2.7 Kg.
Módulos compatibles	Zenmuse XT2/XT S/Z30/H20/H20T
Cámara FPV	960p

Fuente: DJI ENTERPRISE

- Cámara Zenmuse L1 - Lidar + RGB Surveying Solution.

**Tabla 3.** Especificaciones técnicas de la Cámara Zenmuse L1- LiDAR

<b>Cámara</b>	<b>Especificaciones</b>
Sensor	CMOS 1 pulgada
Obturador	Mecánico
Píxeles	20.8 Megapíxeles
Máxima cobertura	2 km en un solo vuelo con Matrice 300 RTK
Precisión vertical	5 Cm
Precisión horizontal	10 Cm
Tasa de puntos	240.000 pts./s
Admite 3 devoluciones	
Rango de detección	450 metros
Nivel de protección	IP54
Vista en vivo de nube de puntos	

Fuente: DJI

### 3.5.3. Materiales

- Fichas de evaluación
- Cinta diamétrica
- Tablero
- Fichas
- Clinómetro marca SUUNTO
- Cintas métricas de 50 m
- Mochila

- Machete
- Wincha metálica de 5 m
- Martillo
- Clavos de galvanizados de 1 pulg
- Pilas
- Cal
- Libreta de campo (diario de observaciones)

### 3.6. Parámetros de evaluación para inventario forestal

Los parámetros de evaluación, se realizaron a todos los árboles mayores a 5 cm de DAP, en el que se realizaron mediciones de los parámetros mencionados en la Tabla 04.

**Tabla 4.** *Parámetros de evaluación.*

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO
Altura (m)	Longitud vertical desde la plataforma (suelo) hasta el dosel del árbol.	-Wincha - Clinómetro
Diámetro a la altura de pecho- DAP (m)	Se midió por el lado en que se inclina el árbol, tomando el diámetro del tronco a 1.3 metros	-Cinta diamétrica
Diámetro de copa (m)	Se midió en dos direcciones, la dirección Norte-Sur y la dirección Este-Oeste y tomando como referencia la proyección de los extremos de la misma sobre el suelo, midiéndose con cinta métrica la distancia entre ambos extremos.	-Cinta métrica de 50 metros -Wincha de 5 metros

### 3.7. Vuelo LiDAR

#### 3.7.1. Colocación de puntos de control

Se colocaron 09 puntos, partiendo de un punto de control de “Orden C” horizontal y vertical denominado TUM01219, La documentación de los puntos se realizó utilizando el método estático en las tareas de campo y en el proceso de gabinete, lo que resulto en la obtención de las coordenadas de la red de puntos de control del proyecto.

**Figura 4.** Lectura e instalación de equipos en el Punto de control TUM01219, tomado como partida.



**Figura 5.** Lectura de Puntos para vuelo drone, dentro del proyecto.



Los procedimientos de campo se llevaron a cabo desde el punto de control TUM01219, que funcionó como base, para georreferenciar de manera estática los puntos situados, finalizando el tiempo de grabación, se trasladaron los archivos registrados y utilizando el software de post-procesamiento, se efectuó el proceso de las líneas base. De esta manera, se logró la ubicación final de los puntos geodésicos, asegurando así un correcto ajuste de orden “C” 1:1000,000.

**Tabla 5.** Datos del punto de control de orden “C” utilizado.

<b>Coordenadas Geográficas Sistema WGS1984-TUM01219</b>			
<b>Latitud Sur</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Altura Elip</b>	<b>Orden</b>
3° 35' 37.78109" S	80° 26' 01.80486" O	66.9623 m	C
<b>Coordenadas Geodésicas U.T.M. Sistema WGS 1984-TUM01219</b>			
<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Altura Ortom.</b>	<b>Orden</b>
562,877.9833 m	9,602,749.3158 m	58.6419 m	C

La localización de los puntos de control para la Georreferenciación de los GPS en la zona de investigación es la siguiente:

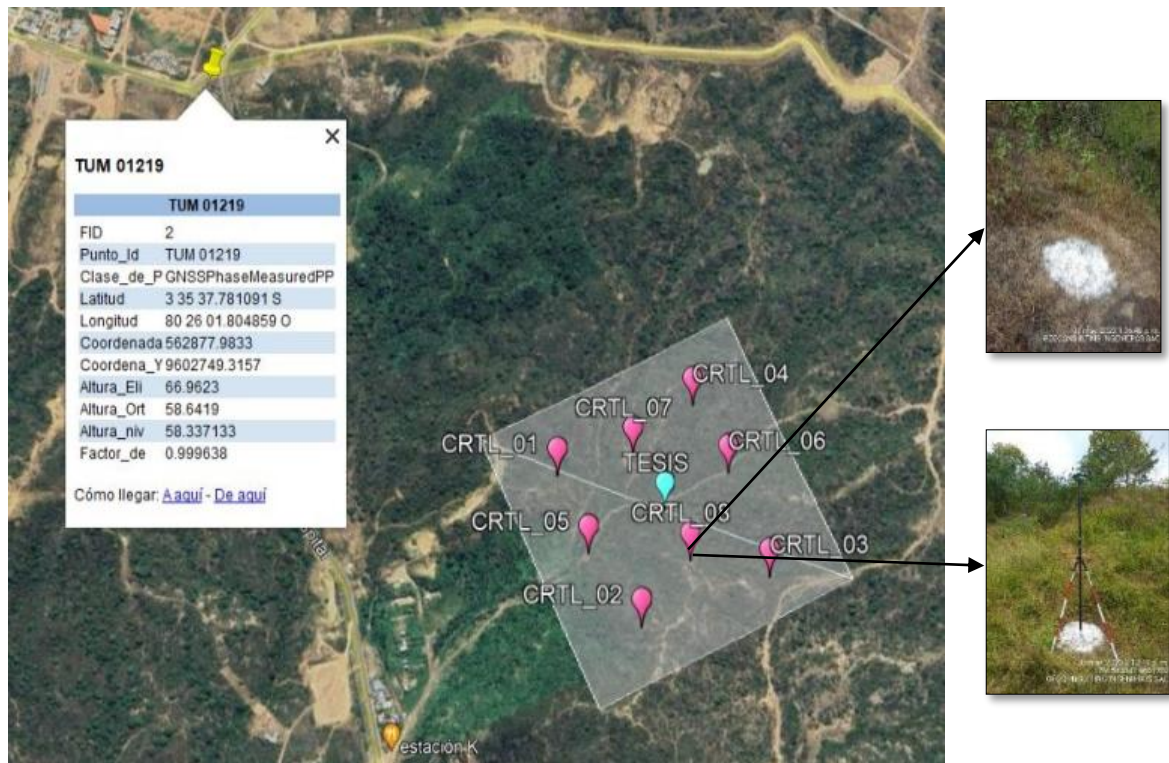
**Tabla 6.** Datos de los puntos georreferenciados en coordenadas geográficas.

<b>Coordenadas Geográficas Sistema WGS1984</b>			
<b>Punto</b>	<b>Latitud Sur</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Altura Elip</b>
Punto de control 05	3° 36' 12.33507" S	80° 25' 53.45837" O	37.7057 m
Punto de control 01	3° 36' 08.05036" S	80° 25' 53.64355" O	63.2818 m
Punto de control 02	3° 36' 18.33493" S	80° 25' 49.85666" O	72.9375 m
Punto de control 08	3° 36' 15.83680" S	80° 25' 47.56101" O	64.8872 m
Punto de control 03	3° 36' 19.04944" S	80° 25' 43.19702" O	58.4526 m
Punto de control 06	3° 36' 11.79052" S	80° 25' 42.73956" O	41.3930 m
Punto de control 04	3° 36' 07.19537" S	80° 25' 43.57751" O	58.8150 m
Punto de control 07	3° 36' 08.21457" S	80° 25' 47.70182" O	46.2028 m
Punto control medio	3° 36' 11.80190" S	80° 25' 47.07218" O	39.0726 m

**Tabla 7.** Datos de los puntos Georreferenciados en coordenadas Geodésicas U.T.M

<b>Coordenadas Geodésicas U.T.M. Sistema WGS 1984</b>			
<b>Punto</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Altura Ortom.</b>
Punto de control 05	563,134.8189 m	9,601,688.1583 m	29.2404 m
Punto de control 01	563,129.1879 m	9,601,819.7261 m	54.8322 m
Punto de control 02	563,245.8185 m	9,601,503.8600 m	64.4410 m
Punto de control 08	563,316.6882 m	9,601,580.5222 m	56.3935 m
Punto de control 03	563,451.2578 m	9,601,481.7919 m	49.9355 m
Punto de control 06	563,465.5104 m	9,601,704.6720 m	32.9007 m
Punto de control 04	563,439.7476 m	9,601,845.7847 m	50.3413 m
Punto de control 07	563,312.4906 m	9,601,814.5693 m	37.7366 m
Punto control medio	563,331.8465 m	9,601,704.4065 m	30.5919 m

**Figura 6.** Ubicación, marcado y lectura de los puntos.



Fuente: Google Earth Pro

### 3.7.2. Planeamiento de misiones de vuelo.

Las misiones fueron planeadas en una portátil Windows 10, con ayuda del programa Google Earth, creándose un polígono en formato .kml el cual cubrirá toda la extensión del área de interés, dicho polígono posteriormente fue importado al mando del Matrice 300-RTK para realizar los vuelos.

### 3.7.3. Parámetros de vuelo

La aplicación que se usó fue Pilot-DJI, donde el área de la parcela en evaluación ya diseñada en el archivo .kml importado, para ello se registró los parámetros descritos en la tabla 08, seguido de ello se procedió al armado del equipo y se realizó el vuelo en la zona de estudio, escogiendo el punto más alto de nuestros puntos para colocar nuestro GPS.

**Tabla 8.** *Parámetros del vuelo.*

<b>Parámetros</b>	<b>Descripción</b>
Altura (m)	Se realizaron 03 vuelos a 75, 100 y 150 metros sobre el nivel de terreno.
Overlap	Se uso el traslape del 80% para las tomas.
Velocidad	La velocidad promedio que se uso fue de 7 m/s.

**Figura 7.** *Armado y colocación de GPS y equipos en el punto de vuelo.*



**Figura 8.** *Vuelo LiDAR en la zona de estudio.*



### 3.7.4. Procesamiento de Fotografías aéreas

Se llevó a cabo utilizando el programa Agisoft Metashape, siguiendo el procedimiento que nos explica el manual para la evaluación de plantaciones forestales mediante el uso de Rpas en el ámbito del bosque Modelo Rio Huayabamba - Abiseo. (Tagle Casapía, y Otros 2021), acompañado del manual denominado Fotogrametria digital con sistemas aereos no tripulados para el analisis de sistemas agroforestales, (Rimolo Donadio , y otros, 2021)

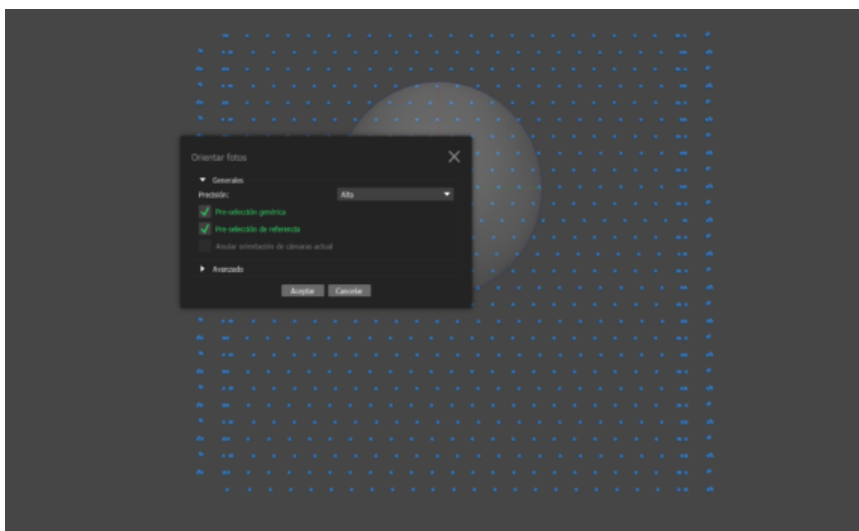
#### 3.7.4.1. Carga y procesamiento de fotografías aéreas

Se traslado todas las fotografías a un fichero, asegurando constantemente de que todas las fotografías estén completas y de buena calidad.

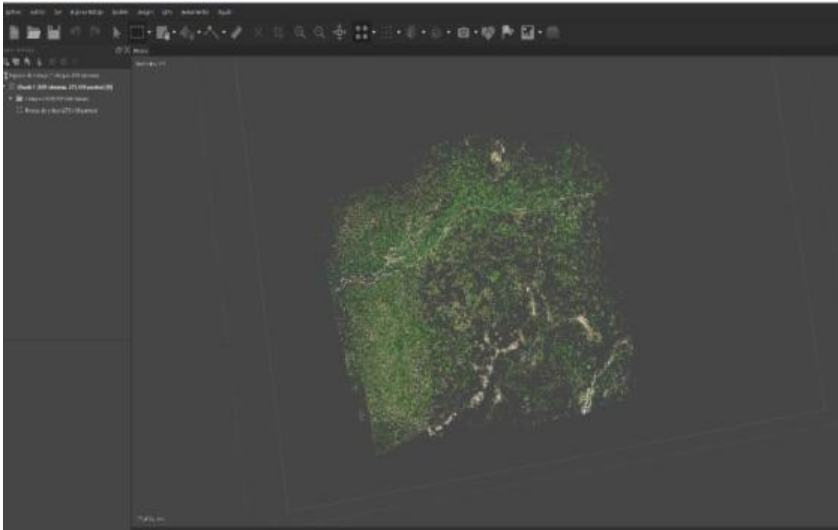
#### 3.7.4.2. Orientación de fotografías aéreas

Este procedimiento posibilita mediante algoritmos obtener puntos clave (*Keypoints*) y puntos de enlace (*Matching Points*), en las áreas del traslapé entre las mismas imágenes, esto hizo posible generar imágenes en un espacio tridimensional, con la capacidad de identificar su ubicación y dirección para crear un conjunto o muy disperso o muy rizado de puntos. (Rimolo Donadio , y otros, 2021).

**Figura 9.** Proceso para orientación de fotografías



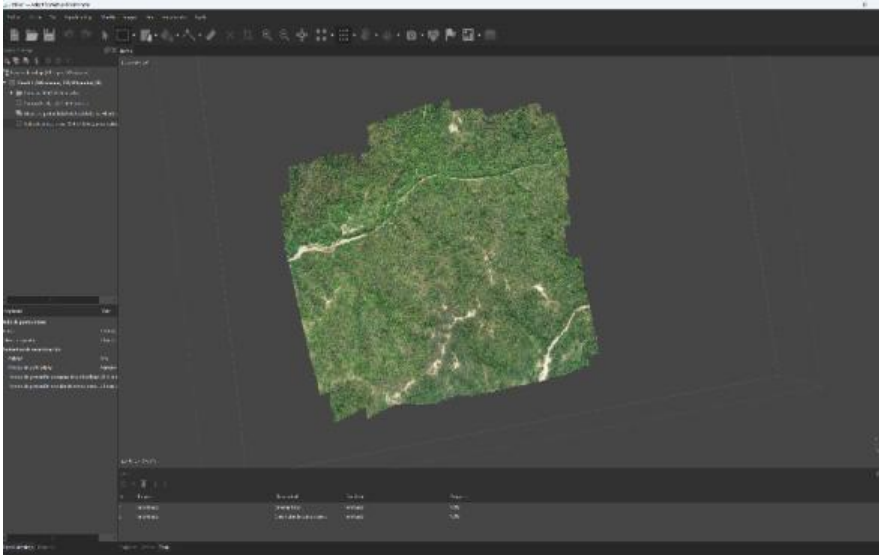
**Figura 10.** Resultado de Orientación de Fotografías aéreas.



### **3.7.4.3. Generación de nube de puntos densa**

Este proceso es el más intensivo ya que toma bastante tiempo, se optó por un filtrado moderado. Este nos proporciona resultados positivos en áreas donde la vegetación es abundante, el proceso fue el mismo para las 3 alturas.

**Figura 11.** Nube de puntos densa.

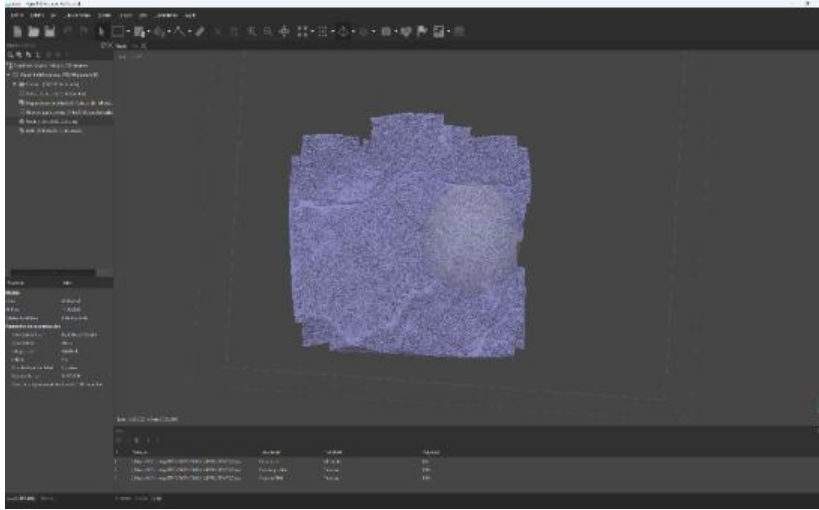


### **3.7.4.4. Ortomosaico y modelo digital de elevación.**

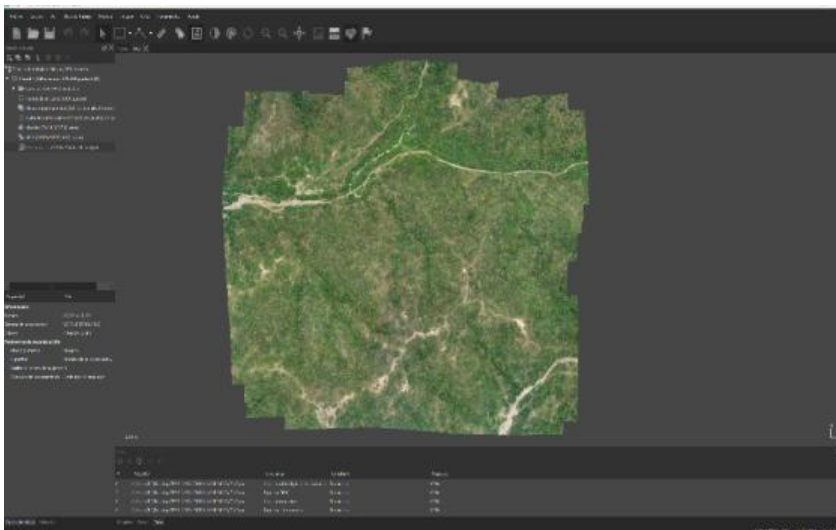
Para conseguir el modelo digital de elevaciones (DEM o MDE), se selecciona en la barra herramientas principal la pestaña de flujo de trabajo y posteriormente en la pestaña de la creación del DEM, para una resolución superior, la fuente de origen debe ser la nube de puntos densa, Este modelo puede ser exportado en varios formatos.

Para la obtención del ortomosaico se dirige al menú de flujo de trabajo y se selecciona la opción llamada crear ortomosaico.

**Figura 12. Modelo Digital de Elevaciones (DEM)**



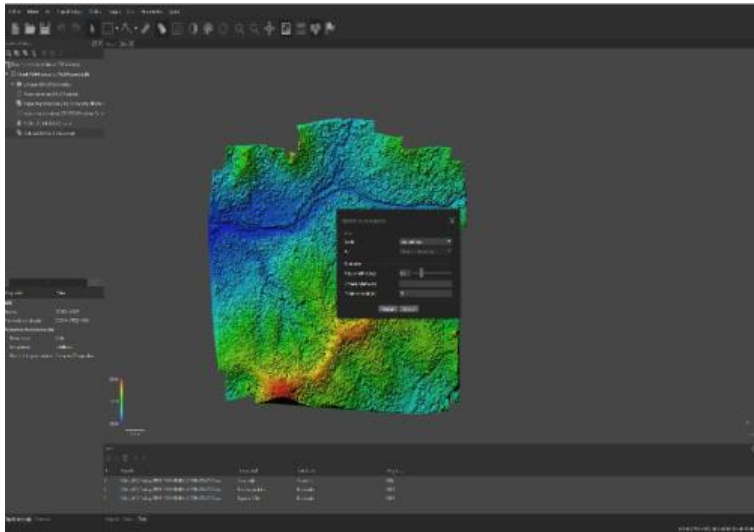
**Figura 13. Ortomosaico.**



#### **3.7.4.5. Modelo digital de terreno**

Se obtiene de manera similar a un DEM, pero en este caso solo se considera el nivel de suelo, sin considerar otras estructuras como la vegetación, para generarlo se seleccionó la función clasificar puntos del terreno, en este procedimiento, los puntos de la nube identificados como puntos de terreno a una categoría denominada Terreno, consecutivamente se ajustaron los parámetros.

**Figura 14.** Generación de Modelo Digital de terreno (DTM)



#### **3.7.4.6. Modelo de altura de copas (CHM)**

Después de haber sido producidos tanto el DEM como el DTM, ya es posible generar la altura de los árboles, este proceso es posible usando la calculadora ráster de un software GIS, en donde se debe sustraer al modelo de elevación de superficie (DEM), el relieve (DTM). (Tagle Casapía, Di Liberto Porles, Falen Horna, & Roque Calzada, 2021)

$$\text{CHM} = \text{DEM} - \text{DTM}$$

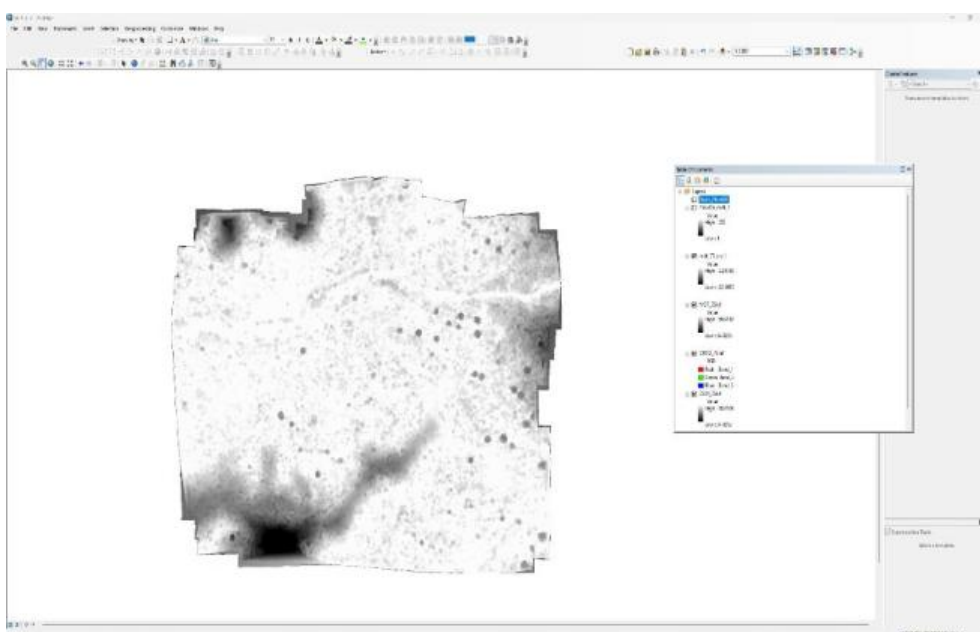
Donde:

CHM: Modelo de altura del dosel.

DEM: Modelo digital de elevación.

DTM: Modelo digital del terreno.

**Figura 15.** Generación del Modelo de altura de Copas (CHM)



Fuente: Software ArcGIS

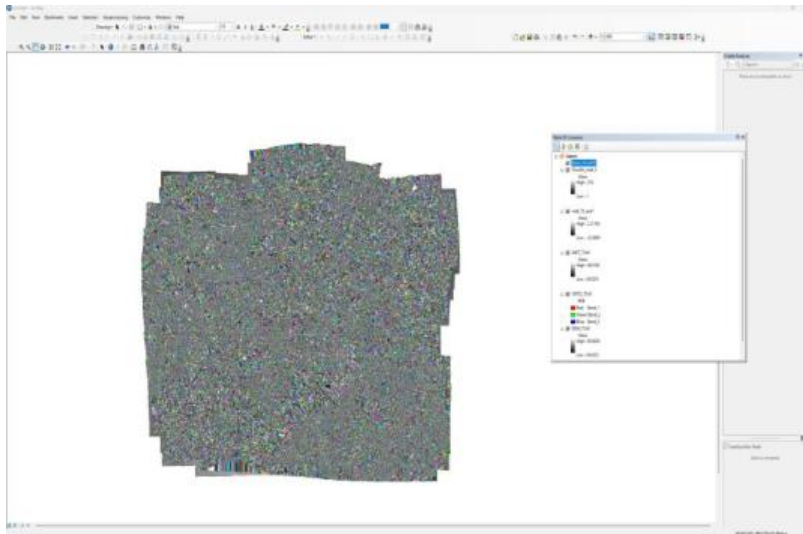
### **3.8. Delimitación de copas**

Para definir la copa de árboles, en esta investigación se utilizó el método de segmentación mediante cuencas inversas, lo que nos facilitará la exactitud de los datos recogidos en terreno.

#### **3.8.1. Segmentación mediante cuencas inversas (IWS)**

El algoritmo consiste en invertir el modelo digital del dosel, permaneciendo así los puntos identificados como ubicaciones de árboles siendo los más bajos, y se acoplará todos los píxeles en la que la pendiente confluya hacia ellos, de tal modo que así se construirá las “cuencas” que vendrían a ser las copas de los árboles, el proceso se realizó con la herramienta Basin del software Arcgis 10.8 se hizo lo mismo para las 03 alturas.

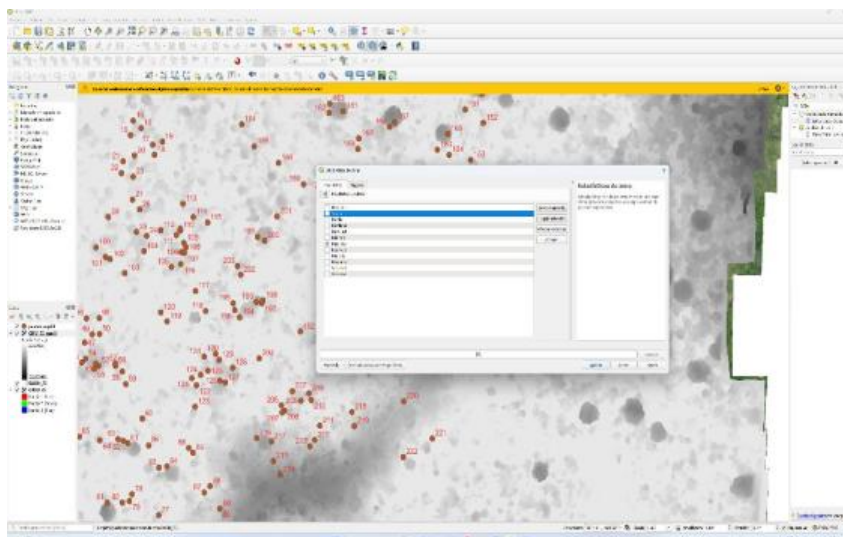
**Figura 16.** Basin Generado en el programa Arcgis 10.8.



### 3.9. Cálculo de altura total

En este proceso se empleó el vector de las copas de los árboles, para llevarlo a cabo, se utilizó la herramienta estadística de zona, este nos facilita el calcular los valores de los pixeles de un ráster superponiendo un vector, donde calcula para cada copa de árbol en forma de polígono, estadísticas sobre los pixeles superpuestos, para este caso se eligió el valor máximo del modelo CHM, este proceso se realizó para todas las alturas abordadas en el presente estudio.

**Figura 17.** Cálculo de altura total



### 3.10. Obtención de diámetro de copa

Luego de ya tener los árboles detectados, se procedió al cálculo del diámetro en el que se utilizó la fórmula siguiente:

$$D: (\sqrt{a/\pi})2$$

Donde:

D: diámetro de la copa

a: área de la copa de cada árbol individual.

### 3.11. Exactitud general

Nos otorga el área categorizada y se aplicara la siguiente ecuación:

$$Exactitud\ general : \sum_{i=1}^k \frac{ni_i}{n}$$

Donde:

“i”: Filas de la matriz.

“ii”: Unidades de muestreo que están clasificadas correctamente para cada clase k

n: Tamaño de la muestra.

### 3.12. Correlación de variables

Se estableció una correlación entre las variables obtenidos en campo y las variables adquiridas en gabinete a través del modelo lineal simple, aplicando la fórmula:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x + \varepsilon$$

Donde:

$\varepsilon$ : Error, Para cada valor de X. la correspondiente observación Y, consiste en el valor  $\beta_0 + \beta_1x$  mas una cantidad  $\varepsilon$ , que puede ser positiva o negativa, que da en cuenta que la relación de X e Y no es exactamente lineal, están expuestas a variaciones individuales.

### 3.13. Análisis de error

Para determinar la precisión del modelo de regresión lineal se obtuvo el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE), usando las siguientes formulas:

$$MAE : \frac{\sum_{n:1}^N |\hat{r}_n - r_n|}{N}$$

$$RMSE : \sqrt{\frac{\sum_{n:1}^N (\hat{r}_n - r_n)^2}{N}}$$

Donde:

$\hat{r}_n$ : Calificación de la predicción.

$r_n$ : Calificación real en el conjunto de datos de prueba

$N$ : Numero de pares de calificación entre los datos de prueba y los resultados de predicción

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Detección de árboles

#### 4.1.1. Segmentación mediante cuencas inversas

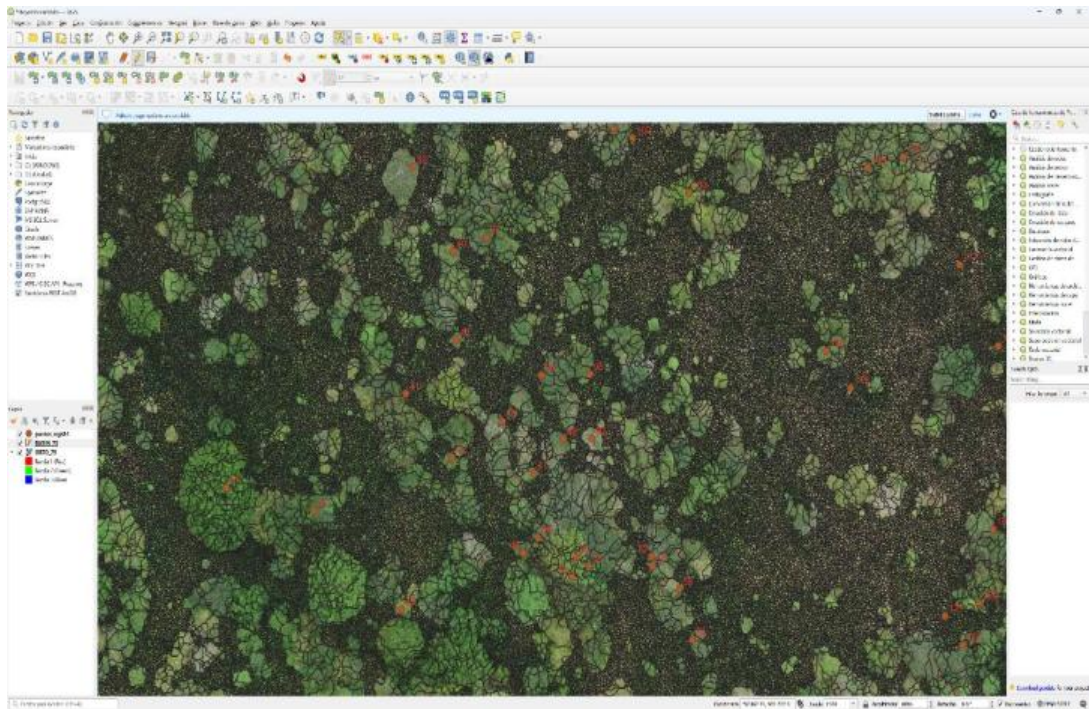
En el inventario de 226 árboles, se pudo identificar mediante la segmentación de cuencas inversas en distintas alturas: 75 metros (168 individuos), 100 metros (151 individuos) y 150 metros (146 individuos), logrando obtener una exactitud global del 74%, 67% y 65%, respectivamente. Los resultados de exactitud coinciden con estudios semejantes en el ecosistema bosque seco, tal como Jimenez (2023), en su estudio denominado “Contenido de carbono de la regeneración natural y detección de variables dasométricas mediante RPAS en tres comunidades campesinas de Piura, 2023” utilizando entre sus métodos de detección la segmentación de cuencas inversas, obtuvo una precisión aproximada de 60.51% a 100 m de altura.

Sin embargo, la detección de árboles se puede realizar mediante distintas metodologías y de eso va depender la exactitud de detección, por ejemplo, (De Lima Neto, Biondi, Araki, & Bobrowski, 2012) en su investigación empleo la fotointerpretación, esta técnica le facilitó la identificación de individuos forestales basándose en su textura, su color, en su forma y tonalidad con una precisión elevada, alcanzando un valor de 92.42%, otro de los autores es (Miraki, Sohrabi, Fatehi, & MKneubuehler, 2021), quien utilizó tres algoritmos de segmentación controlados mediante controladores, máximos locales (LM), crecimiento de regiones (RG) y segmentación de cuencas inversas (IWS), donde el enfoque que dio mejores resultados fue el algoritmo (RG9).

La detección de árboles se ve afectada por las diferentes alturas del vuelo, mientras mayor sea la altura de vuelo se anticipa una reducción en la cantidad de imágenes capturadas, lo que significa una disminución en la precisión de la identificación de árboles. Esto es lo que sostienen autores como (Pourreza, Moradi, Khosravi, Deljouei, & Vanderhoof, 2022), quien en su estudio realizó vuelos: 25 m, 50 m y 100 m los resultados que obtuvo señalaron que las medias de la altura de los árboles derivados a partir de las medidas de campo y la estimación de UAV no mostraron diferencias significativas, excepto por los valores medios calculados a una altitud de vuelo de 100 m sin embargo, el modelo obtuvo un RMSE de casi 10%, lo que indica un buen desempeño del modelo. En este estudio se utilizó el modelo (IWS), la resulto una buena alternativa para delimitar copas de árboles obteniendo una alta exactitud en cada uno de los vuelos teniendo los siguientes valores 74%, 67% y 65% en vuelos de 75 m, 100 m y 150 m de altura respectivamente, este método es muy utilizado para detectar copas obteniendo buenos resultados. Así lo afirman autores como (Nasiri, y otros, 2021), (Panagiotidis, Abdollahnejad, Surov, & Chiteculo, 2017) y (Jimenez Dios, 2023), quienes obtuvieron buenos resultados en sus estudios.

Muchos individuos no fueron detectados por LiDAR, lo que genera un inventario forestal deficiente, esto se debe a que existen árboles en donde las copas se encuentran superpuestas (Figura 19), además de árboles que se encuentran por debajo del dosel de otros árboles más grandes, existen autores que usaron estos métodos en plantaciones forestales o agroforestería, los cuales tienen un sistema de separación contando con un distanciamiento prudente entre ellos, como en el estudio de (Hentz, y otros, 2018), titulado Estimación de la uniformidad forestal en rodales de *Eucalyptus spp.* y *Pinus taeda L.* utilizando mediciones de campo y la estructura de nubes de puntos de movimiento obtenidas a partir de la recopilación de datos de vehículos aéreos no tripulados (UAV), aplicaron el método de segmentación de cuencas para detectar *Eucalyptus spp.* y *Pinus taeda L.*, entre sus resultados se tuvo un error máximo de 6%.

**Figura 18.** Delimitación de copas mediante IWS.



**Figura 19.** Superposición de Copas.



## 4.2. Ecuaciones alométricas para relacionar variables dasométricas y datos RPA.

Los modelos de regresión lineal se evaluaron mediante métricas de precisión tales como coeficiente de determinación “ $R^2$ ”, coeficiente de determinación ajustado “ $R^2$  ajustado” y coeficiente Pearson “ $r$ ”. La evaluación del error se analizó a través del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE).

Los modelos de regresión correlacionaron el diámetro de copa obtenido mediante fotogrametría en distintas alturas con variables dasométricas obtenidas en campo tales como: diámetro de copa, altura total y DAP.

### 4.2.1. Segmentación mediante cuencas inversas (IWS)

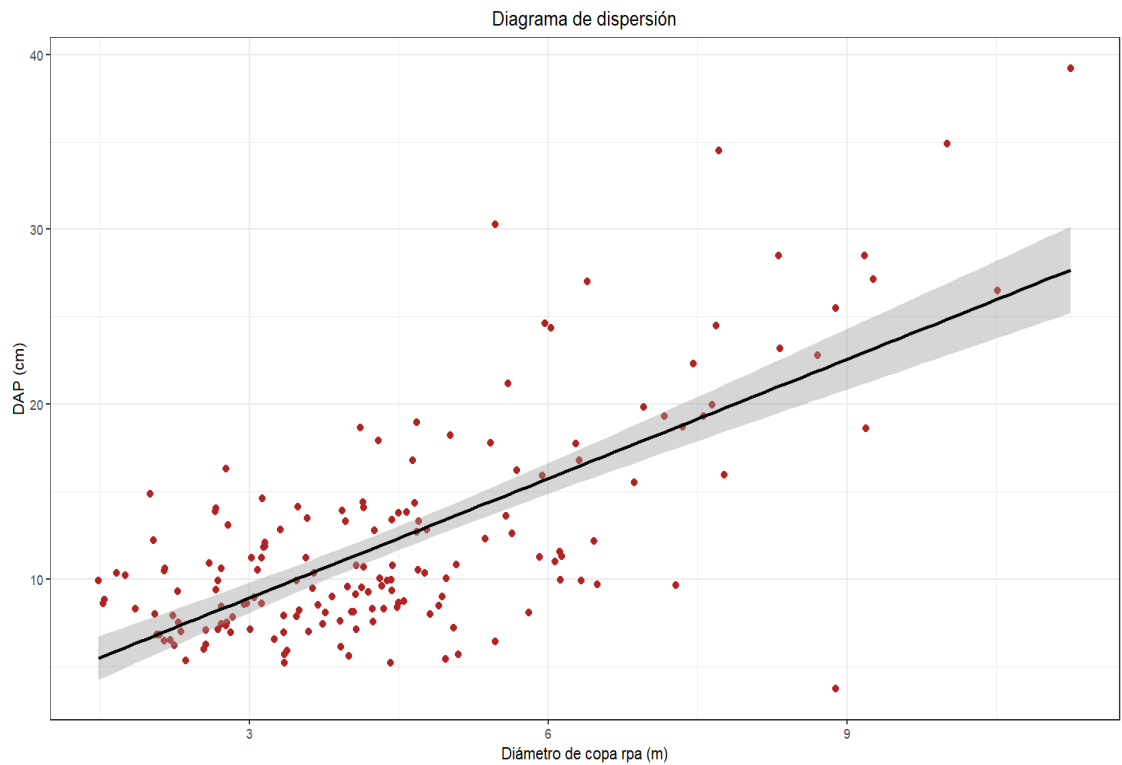
#### 4.2.1.1. Vuelo realizado a 75 metros de altura

El modelo **DAP=1.77971 + 0.21877\*DC RPA**, tiene una correlación entre las variables DAP Campo y DC RPA, de acuerdo a las métricas de correlación que se muestran en la tabla 9, este nivel de correlación es bajo, esto sugiere que el modelo no puede predecir con precisión los valores de DAP conseguidos en el inventario forestal, registrando errores de RMSE y MAE de 11.2478 cm y 9.4910 cm, lo que significa que el modelo estima valores predichos con altos grados de errores (Tabla 9 y Figura 20).

**Tabla 9.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre DAP (Campo) y DC (RPA) vuelo de 75 metros de altura

Ecuación	$R^2$	$R^2$ ajustado	Coeficiente de correlación Pearson r	MAE	RMSE
DAP=1.77971 + 0.21877*DC RPA	0.4978	0.4948	0.7055	9.4910 cm	11.2478 cm

**Figura 20.** Regresión lineal entre DAP (Campo) y DC (RPA) vuelo de 75 metros de altura

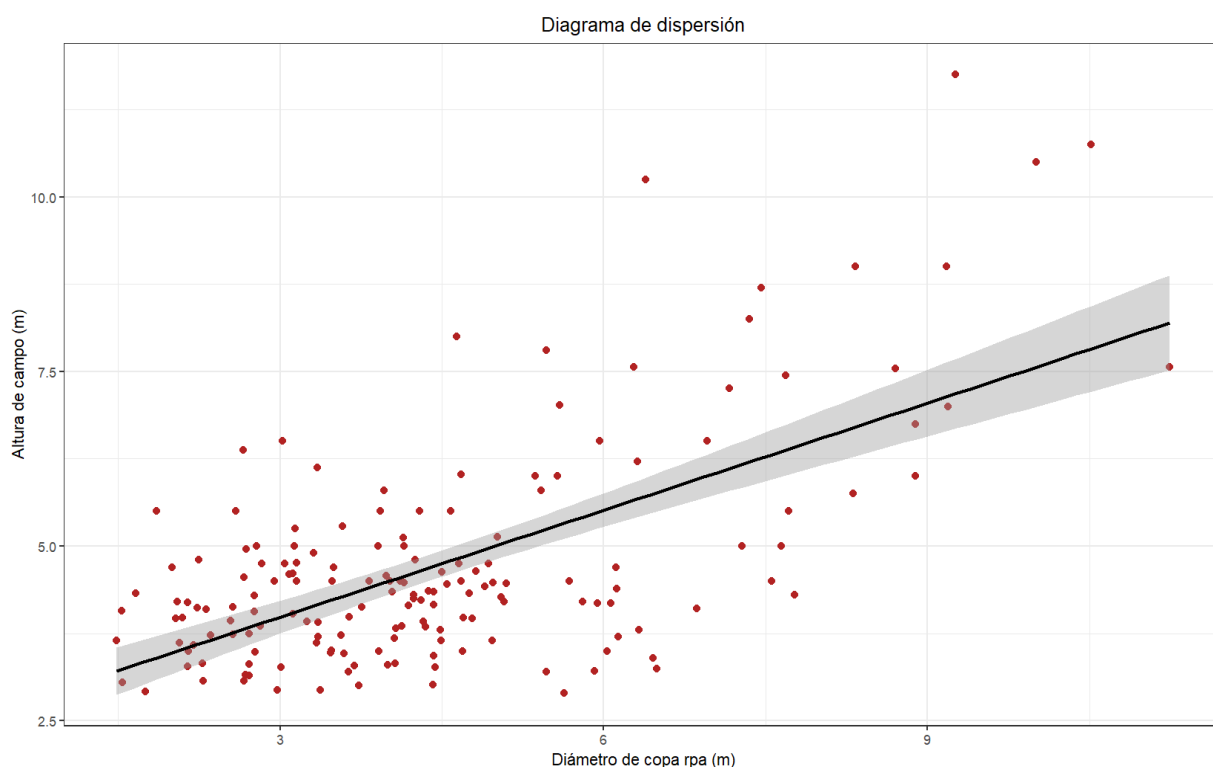


El modelo  $AT=0.77327 + 0.77921*DC\ RPA$ , correlaciona las variables AT Campo y DC RPA, muestra una relación notablemente baja, tal como se muestra en la tabla 10, y nos señala que el modelo no anticipa los valores de altura total logrados en campo, los valores de los errores RMSE y MAE son de 1.4253 m y 1.0975 m, lo que significa que el modelo estima valores predichos con elevados grados de errores (Tabla 10 y figura 21)

**Tabla 10.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, AT (campo) y DC (RPA), vuelo de 75 metros de altura

Ecuación	$R^2$	$R^2$ ajustado	Coeficiente de correlación		MAE	RMSE
			Pearson r			
AT=0.77327 + 0.77921*DC RPA	0.3980	0.3944	0.6309		1.0975 m	1.4253 m

**Figura 21.** Regresión lineal entre AT (campo) y DC (RPA), Vuelo de 75 metros.

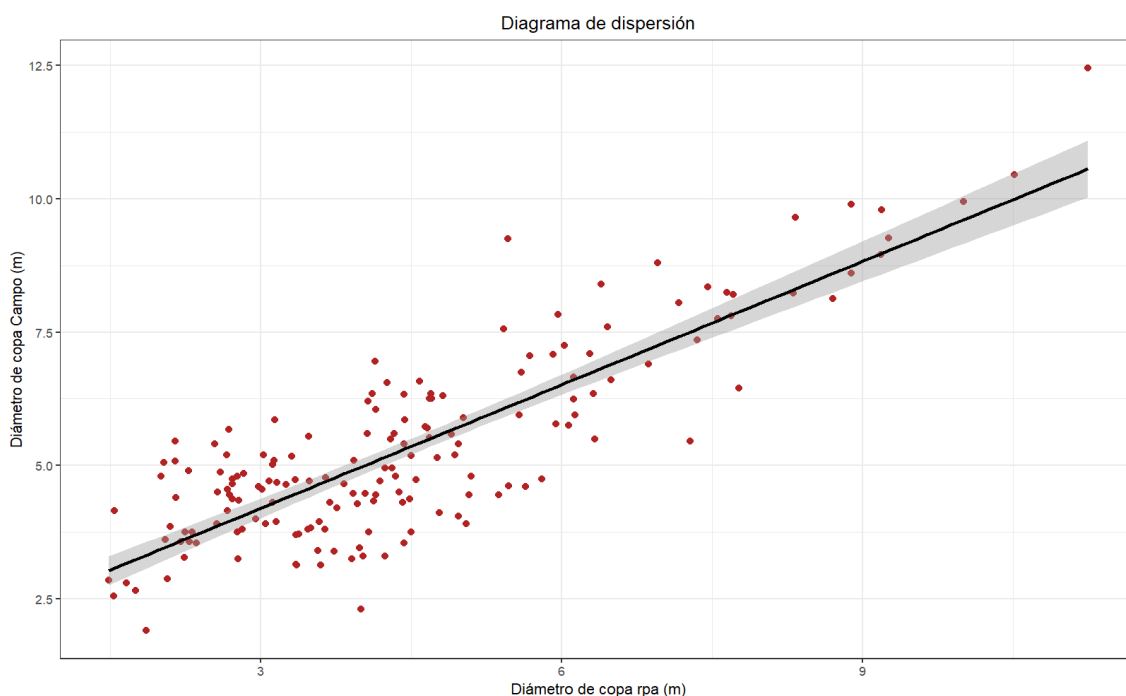


En la ecuación  $DC = -0.4294 + 0.9177 \cdot DC \text{ RPA}$ , que esta correlacionando las variables DC Campo y DC RPA. De acuerdo con las métricas de correlación que se muestran en la tabla 11, la relación entre las variables es significativamente alto y podemos ver que el modelo estima con precisión los valores de diámetro de copa en campo, los valores de error RMSE y MAE son de 1.9483 m y 1.6198 m, lo que indica que el modelo produce predicciones con un sesgo significativo en los valores (Tabla 11 y figura 22)

**Tabla 11.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DC (campo) y DC (RPA), vuelo de 75 metros de altura

Ecuación	R2	R2 ajustado	Coeficiente de correlación		MAE	RMSE
			Pearson r			
$DC = -0.4294 + 0.9177 \cdot DC \text{ RPA}$	0.7084	0.7066	0.8417		1.6198 m	1.9483 m

**Figura 22.** Regresión lineal entre DC (campo) y DC (RPA), Vuelo de 75 metros.



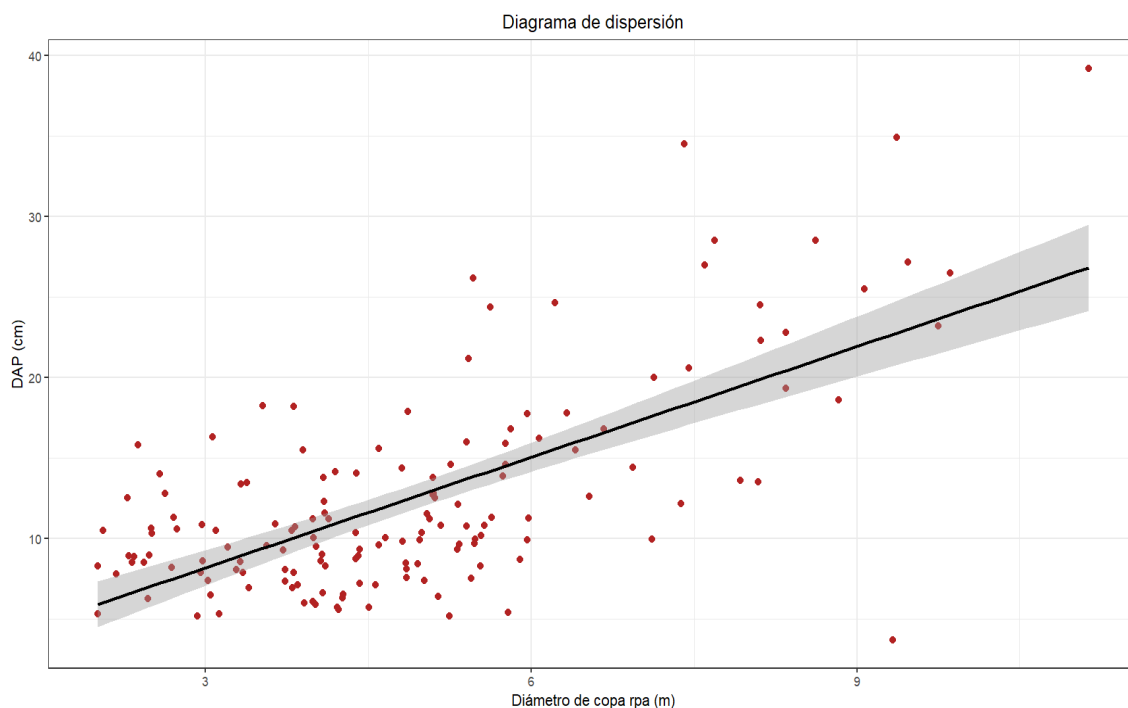
#### 4.2.1.2. Vuelo realizado a 100 metros de altura

El modelo  $DAP=2.43660 + 0.19597*DC\ RPA$ , correlaciona las variables DAP Campo y DC RPA, muestra una relación notablemente baja, tal como se muestra en la tabla 12, y nos señala que el modelo no anticipa los valores de DAP logrados en campo, los valores de los errores RMSE y MAE son de 11.0160 cm y 9.1208 cm respectivamente, lo que significa que el modelo estima valores predichos con elevados grados de errores. (Tabla 12 y figura 23)

**Tabla 12.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DAP (campo) y DC (RPA), vuelo de 100 metros de altura

Ecuación	R2	R2 ajustado	Coeficiente de correlación		MAE	RMSE
			Pearson r			
DAP=2.43660 + 0.19597*DC RPA	0.4489	0.4452	0.67		9.1208 cm	11.0160 cm

**Figura 23.** Regresión lineal entre DAP (campo) y DC (RPA), Vuelo de 100 metros.

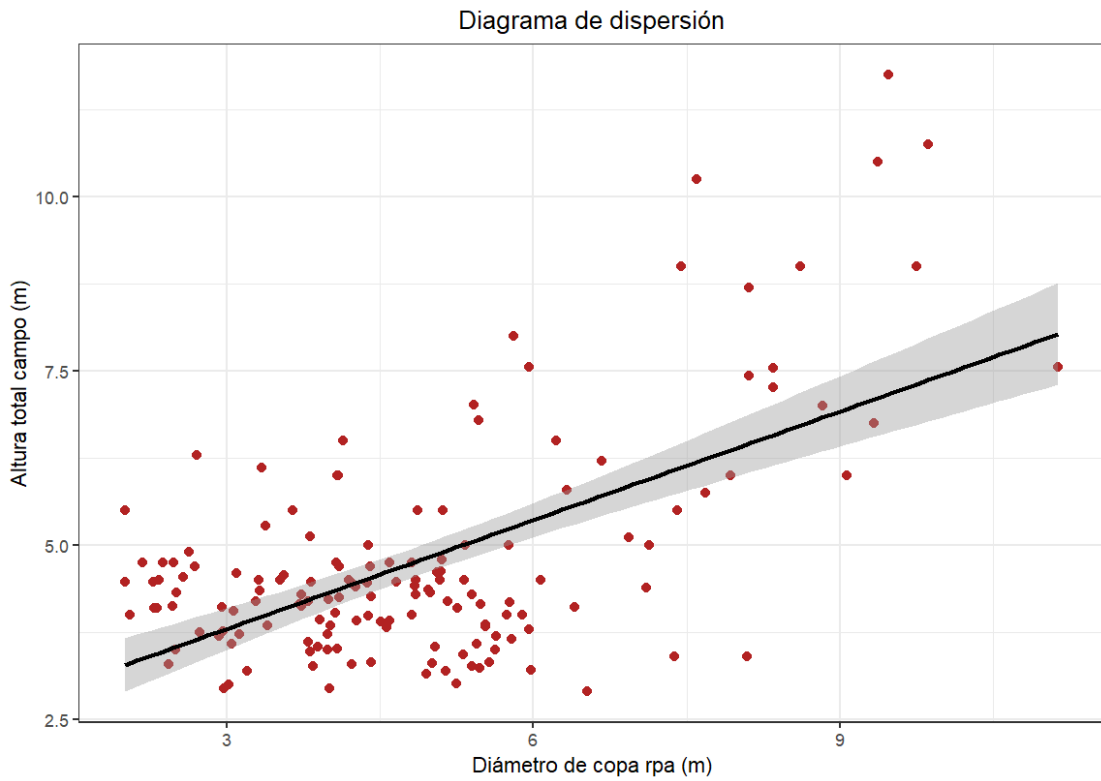


El modelo  $AT=1.5560 + 0.6963*DC\ RPA$ , corresponde a las variables AT Campo y DC RPA, muestra una relación notablemente baja, tal como se muestra en la tabla 13, y nos señala que el modelo no anticipa los valores de altura total logrados en campo, los valores de los errores RMSE y MAE son de 1.3511 m y 1.0220 m, lo que significa que el modelo estima valores predichos con elevados grados de errores (Tabla 13 y figura 24)

**Tabla 13.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, AT (campo) y DC (RPA), vuelo de 100 metros de altura

Ecuación	R2	R2 ajustado	Coefficiente de correlación Pearson r	MAE	RMSE
$AT=1.5560 + 0.6963*DC\ RPA$	0.3622	0.3579	0.601830541	1.0220 m	1.3511 m

**Figura 24.** Regresión lineal entre AT (campo) y DC (RPA), Vuelo de 100 metros.

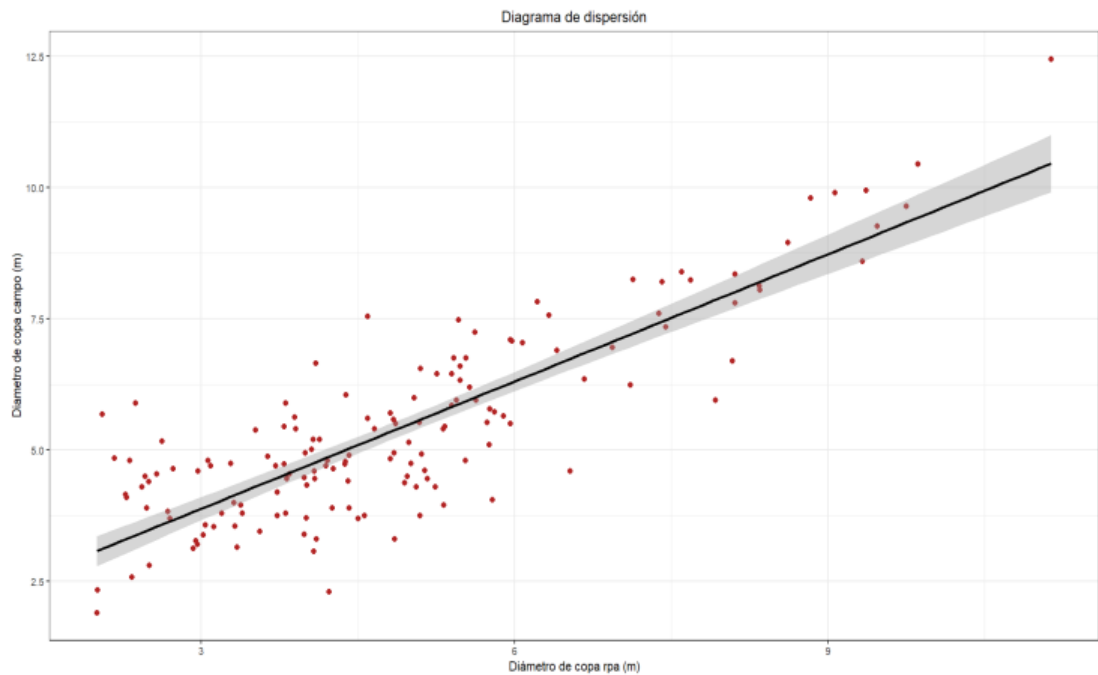


El modelo  $DC = 0.11927 + 0.88162 * DC \text{ RPA}$ , corresponde a las variables DC Campo y DC RPA. De acuerdo con las métricas de correlación que se muestran en la tabla 14, la relación entre las variables es significativamente alto y podemos ver que el modelo estima con precisión los valores de diámetro de copa en campo, los valores de error RMSE y MAE son de 1.5611 m y 1.2918 m, esto prueba que el modelo genera predicciones con valores bajos de errores. (Tabla 14 y figura 25)

**Tabla 14.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DC (campo) y DC (RPA), vuelo de 100 metros de altura

Ecuación	R2	R2 ajustado	Coefficiente de correlación Pearson r	MAE	RMSE
$DC = 0.11927 + 0.88162 * DC \text{ RPA}$	0.7125	0.7106	0.844097151	1.2918 m	1.5611 m

**Figura 25.** Regresión lineal entre DC (campo) y DC (RPA), Vuelo de 100 metros.



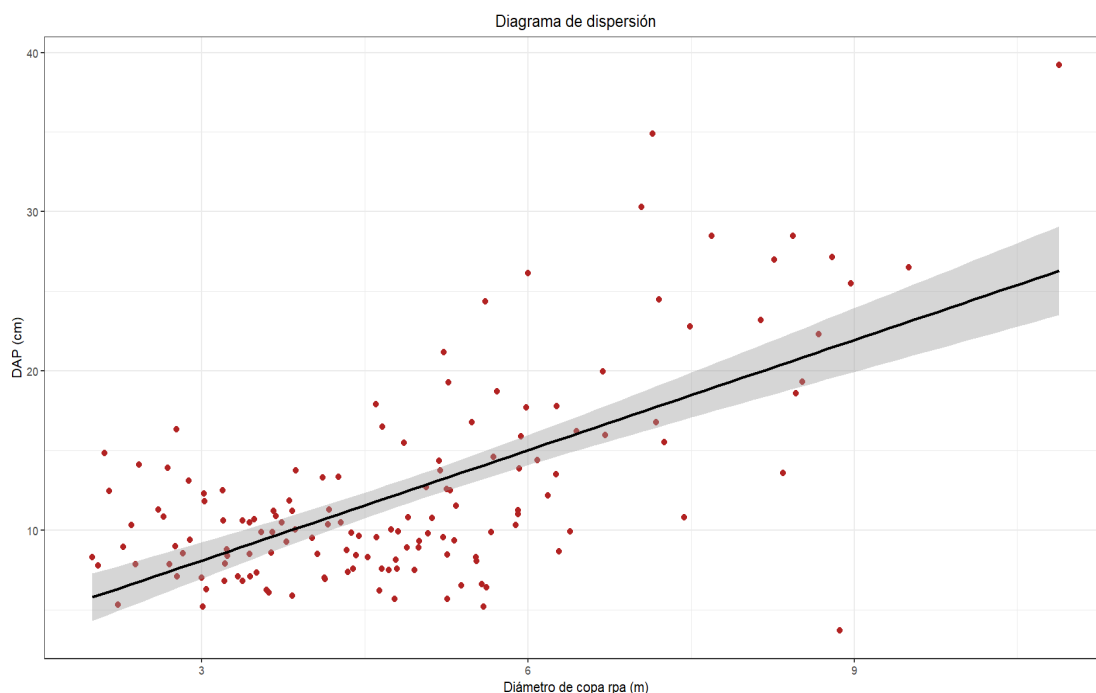
#### 4.2.1.3. Vuelo realizado a 150 metros de altura

El modelo  $DAP=2.57897 + 0.18370*DC\ RPA$ , correlaciona las variables DAP Campo y DC RPA, muestra una relación notablemente baja, tal como se muestra en la tabla 15, y nos señala que el modelo no anticipa los valores de DAP logrados en campo, los valores de los errores RMSE y MAE son de 10.7957 cm y 8.9197 cm, lo que significa que el modelo estima valores predichos con altos grados de errores. (Tabla 15 y figura 26)

**Tabla 15.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DAP (campo) y DC (RPA), vuelo de 150 metros de altura

Ecuación	R2	R2 ajustado	Coefficiente de correlación Pearson r	MAE	RMSE
$DAP=2.57897 + 0.18370*DCRPA$	0.4238	0.4198	0.650999232	8.9197 cm	10.7957 cm

**Figura 26.** Regresión lineal entre DAP (campo) y DC (RPA), Vuelo de 150 metros.

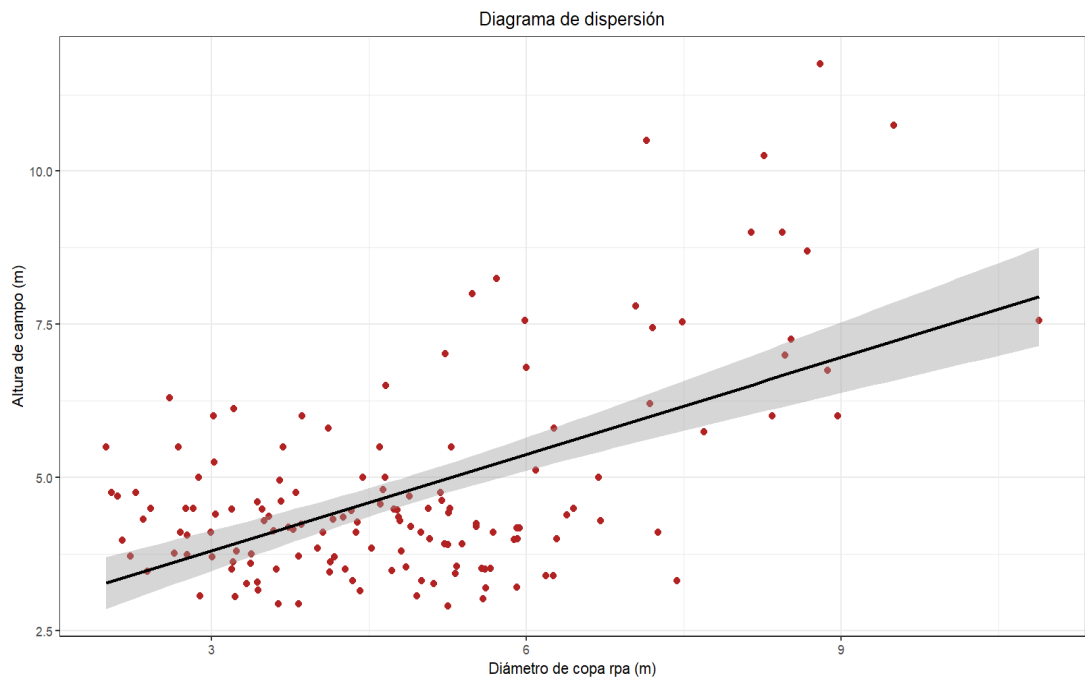


El modelo  $AT = 1.99509 + 0.59798 \cdot DC \text{ RPA}$ , correlaciona las variables AT Campo y DC RPA, muestra una relación notablemente baja, tal como se muestra en la tabla 16, y nos señala que el modelo no anticipa los valores de altura total logrados en campo, los valores de los errores RMSE y MAE son de 1.3908 m y 1.0740 m respectivamente, lo que significa que las predicciones del modelo tienen un alto margen de errores. (Tabla 16 y figura 27)

**Tabla 16.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, AT (campo) y DC (RPA), vuelo de 150 metros de altura

Ecuación	R2	R2 ajustado	Coeficiente de correlación		
			Pearson r	MAE	RMSE
$AT = 1.99509 + 0.59798 \cdot DCRPA$	0.3142	0.3094	0.560535458	1.0740 m	1.3908 m

**Figura 27.** Regresión lineal entre AT (campo) y DC (RPA), Vuelo de 150 metros.

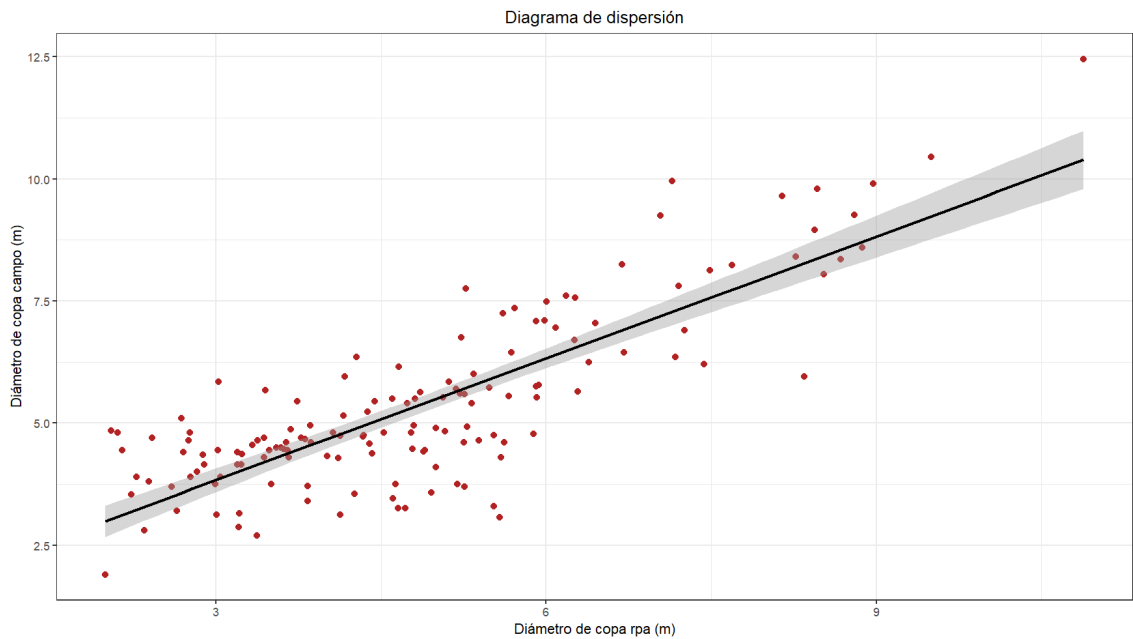


El modelo  $DC=0.48736 + 0.81274*DC\ RPA$ , que correlaciona las variables DC Campo y DC RPA, De acuerdo con las métricas de correlación que se muestran en la tabla 17, la relación entre las variables es significativamente alto y podemos ver que el modelo estima con precisión los valores de diámetro de copa en campo, los valores de error RMSE y MAE son de 2.1716 m y 1.8694 m respectivamente, lo que confirma la precisión del modelo en sus predicciones. (Tabla 17 y figura 28)

**Tabla 17.** Métricas de precisión del modelo de regresión lineal entre, DC (campo) y DC (RPA), vuelo de 150 metros de altura

Ecuación	R2	Coeficiente de correlación		MAE	RMSE
		R2 ajustado	Pearson r		
DC=0.48736 + 0.81274*DCRPA	0.6761	0.6739	0.822253002	1.8694 m	2.1716 m

**Figura 28.** Regresión lineal entre DC (campo) y DC (RPA), Vuelo de 150 metros.



Como se sabe en la última década, hemos sido testigos de un avance vertiginoso en el campo de la tecnología, la introducción de los RPAS son unos desarrollos más fascinantes y transformadores en esta era digital, estos también conocidos como drones, han evolucionado de simples dispositivos recreativos a herramientas sofisticadas con aplicaciones en la amplia gama de industrias, que van desde la agricultura hasta la defensa, fotografía y la logística.

En el sector agrícola y forestal son muy utilizados en inventarios forestales y mediciones de las diferentes características de los árboles, ya que permite obtener variables dasométricas extraídas desde las fotografías aéreas, por ejemplo, altura del árbol y diámetro de copa, estas variables se comparan con los datos de campo. Como se hizo posible en este estudio se realizaron a tres alturas de vuelo (75 m, 100 m y 150 m), utilizando la segmentación de cuencas inversas como modelo de detección.

Los modelo de detección de las variables dasométricas mediante el uso de vehículos aéreos tripulados a distancia es muy utilizado, a través de métodos semiautomatizados como el modelo de altura del dosel, estudios afirman la aplicabilidad del presente modelo en la correlación de variables dasométricas tal como (Panagiotidis, Abdollahnejad, Surovó, & Chiteculo,

2017), (Wu, Shen , Cao, Wangy , & Cao, 2019), (Sadhasivam, Dineshkumar, Abdul Rahaman, & Bhardwaj , 2020) y (Wannasiri, Nagai, Honda, Santitamont, & Miphokasap, 2013), (Chen , Xiang, & Moriya, 2020), quienes lograron determinar diferentes variables dasométricas con precisiones considerables.

En nuestro estudio realizamos un vuelo de 75 m de altura, las medidas que más se relacionaron fue diámetro de copa en campo con el diámetro de copa en RPA, la cual muestra la ecuación **DC= -0.4294 + 0.9177\*DC RPA**, la relación fue muy fuerte, con un valor ( $R^2$ ) de 0.7084. En el vuelo de 100 m de altura tenemos una ecuación de **DC= 0.11927 + 0.88162\*DC RPA**, obteniendo alta concordancia con los valores ( $R^2$ ) de 0.7125. En cuanto al vuelo de 150 m de altura encontramos correlación en las mismas variables con la ecuación **DC=0.48736 + 0.81274\*DC RPA**, con un nivel alto de concordancia en los valores ( $R^2$ ), de 0.6761, Nuestra investigación sugiere que se pueden obtener datos bastante precisos en cuanto al diámetro de copa utilizando el método de cuencas inversas, tanto en el vuelo hecho a 75 m y 100 m de altura, obteniendo valores casi similares, sin embargo, se obtuvo una pequeña variación al realizar un vuelo a 150 m, como lo confirma (Pourreza, Moradi , Khosravi, Deljouei, & Vanderhoof, 2022), quien en su estudio realizo vuelos de 25 m, 50 m y 100 m de altura, en sus resultados indico que las medias de la altura de los árboles obtenidas a partir de las evaluaciones de campo y la estimación de RPA no fueron significativamente diferentes, excepto por los valores medios calculados a una altitud de vuelo de 100 m, demuestra que la altura de sobrevuelo puede influir en la adquisición del diámetro de copa. (Jimenez Dios, 2023), menciona que existe una alta correlación entre las variables dasométricas de diámetros de copa, obtenidas en campo y mediante fotografías aéreas, con valores de coeficiente de determinación de casi 90 % con errores de MAE y RMSE de 0.7637 m y 0.9788 m, respectivamente.

Sin embargo la correlación de diámetro de copa con la altura total y DAP, presentan errores altos, estimando valores predichos que no cumplen con lo obtenido en campo, algunos autores señalan que existe una relación matemática entre diámetro de copa y DAP (Llanos, 2010) (Malleux, 1970)

pero en ecosistema bosque seco, no cumple dicha relación según nuestro resultado y obtenido por (Jimenez Dios, 2023), quien presenta una moderada relación entre las variables con valores significativos de error.

## V. CONCLUSIONES

1. La segmentación mediante cuencas inversas, es un método aceptable para detectar especies forestales mediante el uso de fotografías aéreas usando RPAS, realizando vuelos a distintas alturas tanto 75 metros, 100 metros y 150 metros, logrando obtener una exactitud global del 74%, 67% y 65%, respectivamente.
2. Las variables dasométricas es posible obtenerlas mediante el uso de RPAS, principalmente el diámetro de copa, ya que muestran una alta relación teniendo en cuenta las medidas de precisión obtenidas del modelo de regresión lineal, además de presentar errores bajos, las ecuaciones recomendadas para obtener dicha variable son:  $DC = -0.4294 + 0.9177 * DC_{RPA}$ ,  $DC = 0.11927 + 0.88162 * DC_{RPA}$  y  $DC = 0.48736 + 0.81274 * DC_{RPA}$ , teniendo en cuenta que el estudio se realizó a distintas alturas (75 m, 100 m y 150 m). El DAP y altura total presenta una baja relación y altos valores de error.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Realizar estudios que ajusten los resultados del presente investigación, utilizando diferentes alturas, otros algoritmos de segmentación, diferente software de procesamiento y modelos de regresión.
2. Promover la investigación en el análisis de datos que sean obtenidos por drones para predecir las necesidades de inventarios basados en crecimiento y condiciones climáticas, además del área de estudio.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Hentz, Â., Silva, C., Dalla Corte, A., Netto, S., Strager, M., & Klauberg, C. (2018). Estimating forest uniformity in *Eucalyptus* spp. and *Pinus taeda* L. stands using field measurements and structure from motion point clouds generated from unmanned aerial vehicle (UAV) data collection. *Forest Systems*, 27,17.
- Miraki , M., Sohrabi , H., Fatehi, P., & MKneubuehlerc, M. (2021). Individual tree crown delineation from high-resolution UAV images in broadleaf forest. *Ecological Informatics Volume 61*, 1574-9541.
- Štroner , M., Urban, R., Seidl, J., Reindl, T., & Brouček, J. (2021). Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs. *Remote Sens*, 13,1336.
- Buriticá Otálora, J., & Caro Agudelo, M. A. (2020). *Informe donde se presenta el proceso de elaboración del modelo tridimensional a partir de imágenes georreferenciadas del edificio principal de la Universidad Cooperativa de Colombia en la ciudad de Villavicencio-Meta*. Villavicencio-Meta.
- Chen , W., Xiang, H., & Moriya, K. (2020). Individual Tree Position Extraction and Structural Parameter Retrieval Based on Airborne LiDAR Data: Performance Evaluation and Comparison of Four Algorithms. *Remote Sensing*, 12(3), 571.
- Coelho Eugenio, F., Tagliapietra Schons, C., Lorenci Mallmann, C., Sabadi Schuh, M., Fernandes , P., & Badin, T. L. (2020). Remotely piloted aircraft systems and forests: a global state of the art and future challenges. *Canadian Journal of Forest Research*, 705-716.
- De Lima Neto, E. M., Biondi, D., Araki, H., & Bobrowski, R. (2012). Fotografias aéreas para mensuração da área de copa das árvores de ruas de Curitiba–PR. *Floresta*, 42(3):577.
- Gallardo Salazar , J. L., Pompa Garcia, M., Aguirre Salado , C. A., Lopez Serrano, P. M., & Meléndez Soto , A. (2020). Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(61), 27-50.
- Goodbody, T. R., Coops, N. C., & White, J. C. (2019). Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*, 5, 55-75.
- Gutiérrez, M. A. (2021). Estimación y análisis de parámetros indicativos de un Bosque de Alto Valor Ecológico (BAVE) de *Quercus pubescens* mediante datos LiDAR. 1-62.
- Instituto Nacional de Estadística Y Geografía. (18 de Junio de 2015). *Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/relieve/continental/doc/mde.pdf>

- Jimenez Calero, N. M., Magaña Monge, A. O., & Soriano Melgar, E. (2019). *Análisis Comparativo entre levantamientos topográficos con Estación Total como Método directo y el uso de drones y GPS como Métodos Indirectos*. El salvador.
- Jimenez Dios, A. D. (2023). *Contenido de carbono de la regeneración natural y detección de variables dasométricas mediante RPAS en tres comunidades campesinas de Piura, 2023*. Piura: Universidad Nacional de Tumbes .
- Knoke, T., Kindu, M., Schneider , T., & Gobakken, T. (2021). Inventory of forest attributes to support the integration of non-provisioning ecosystem services and biodiversity into forest planning—from collecting data to providing information. *Current Forestry Reports*, 7, 38-58.
- Kovac, M., Gasparini, P., Notarangelo, M., Rizzo, M., Cañellas, I., Fernández de Uña, L., & Alberdi, I. (2020). Towards a set of national forest inventory indicators to be used for assessing the conservation status of the habitats directive forest habitat types. *Journal for Nature Conservation*, 53, 125747.
- Llanos, M. (2010). *Determinación de biomasa aérea total del algarrobo Prosopis pallida (h&b.ex.willd.) h.b.k var. pallida ferreira en los bosques secos de la comunidad campesina José Ignacio Távora Pasapera del departamento de Piura*. Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/1654>
- Malleux, O. (1970). Estudio de la Relación D.A.P con el Diámetro de Copa en un Bosque Húmedo Sub Tropical. *Revista Forestal Del Perú*(4), 1-2. doi:<https://doi.org/10.21704/rfp.v4i1-2.1089>
- Martinez Mancancela, J. S., & Bermeo Cabrera, V. F. (2023). *Análisis Comparativo de Precisión y Eficiencia de tecnologías topográficas para levantamientos: Fotogrametría y Lidar aereotrasportado con dron y receptor GNSS (Modo RTK) Aplicado al parque el Paraíso de la Ciudad de Cuenca*. Cuenca: (Bachelor's thesis).
- Masek, J. G., Hayes, D. J., Hughes, M. J., Healey, S. P., & Turner, D. P. (2015). The role of remote sensing in process-scaling studies of managed forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 109-123.
- Misterio del Ambiente . (2015). *Guía de inventario de la flora y vegetación*. Lima.
- Mokros, M., Mikita, T., Singh, A., Tomastík , J., Chudá, J., Wezyk, P., . . . Liang, X. (2021). Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102512.
- Nasiri, V., Darvishsefa, A., Arefi, H., Pierrot-Deseilligny, M., Namiranian, M., & Le Bris, A. (2021). Unmanned aerial vehicles (UAV)-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: Hyrcanian mixed forest). *Forest Research*, 51,962-971.

- NTC-001-2015. (2015). *NTC-001-2015 - Requisitos para las Operaciones de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia. Informe y publicaciones, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Lima*. Obtenido de [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/390602/NTC\\_\\_RPAS\\_\\_texto\\_.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/390602/NTC__RPAS__texto_.pdf)
- 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.
- Pourreza, M., Moradi , F., Khosravi, M., Deljouei, A., & Vanderhoof, M. (2022). GCPs-Free Photogrammetry for Estimating Tree Height and Crown Diameter in Arizona Cypress Plantation Using UAV-Mounted GNSS RTK. *Forests*, 13(11) 1905; <https://doi.org/10.3390/f13111905>.
- Ramos Poma, A. (2022). *Levantamiento topográfico con tecnología Lidar para la generación del modelo digital del terreno, modelo digital de superficie, ortofoto y la elaboración de la cartografía de Valle Hermoso Ivirizu del Departamento de Cochabamba*. La Paz: (Doctoral dissertation).
- Rimolo Donadio , R., Arriola Valverde , S., Umaña Soto, J., Lopez Sampson, A., Seplvada, N., Villalobos Avelln , L., . . . Somarriba , E. (2021). *Fotogrametría digital con sistemas aereos no tripulados para el analisis de sistemas agroforestales*. Turrialba: Informe Tecnico, CATIE.
- Rodriguez Puerta , F., Gómez Garcia , E., Martín Garcia, S., Pérez Rodríguez , F., & Prada , E. (2021). Uav-based lidar scanning for individual tree detection and height measurement in young forest permanent trials. *Remote Sensing*, 14(1), 170.
- Ruiz Blandon, B. A., Hernández Álvarez, E., Rodríguez Macias, R., & Salcedo Pérez, E. (2020). Valoracin dasomtrica y producción de biomasa en Gmelina arborea Roxb. ex Sm. establecida en plantaciones puras y mixtas. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(59), 94-117.
- Sadhasivam, N., Dineshkumar, C., Abdul Rahaman, S., & Bhardwaj , A. (2020). Estimation of Forest Tree Heights and Crown Diameter Using High Resolution Images from UAV: A Case Study of Kalesar, Haryana. . *In Proceedings of UASG 2019: Unmanned Aerial System in Geomatics 1*, 253-263 Springer International Publishing.
- Tagle Casapía, X., Di Liberto Porles, S., Falen Horna, L., & Roque Calzada, E. (2021). *Manual para evaluación de plantaciones forestales mediante el uso de RPAs en el ámbito del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo*. Iquitos : Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N 2021-12042.
- Veneros, J., Garcia, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & Lopez Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, vol 38, 99-107.

- Wang, C., Yang, X., Xi, X., Nie, S., & Dong, P. (2024). *Introduction to LiDAR remote sensing*. CRC Press.
- Wannasiri, W., Nagai, M., Honda, K., Santitamnont, P., & Miphokasap, P. (2013). Extraction of mangrove biophysical parameters using airborne LiDAR. *Remote Sensing*, 5(4), 1787-1808.
- Williams, K., Olsen, M., Roe, G., & Glennie, C. (2013). Synthesis of transportation applications of mobile LiDAR. *Remote Sensing* 5(9), 4652-4692.
- Wu, X., Shen, X., Cao, L., Wang, G., & Cao, F. (2019). Assessment of Individual Tree Detection and Canopy Cover Estimation using Unmanned Aerial Vehicle based Light Detection and Ranging (UAV-LiDAR) Data in Planted Forests. *Remote Sensing*, 11(8), 908. MDPI AG. Retrieved from.
- Zahawi, R. A., Dandois, J. P., Holl, K. D., Nadwodny, D., Reid, J. L., & Ellis, E. C. (2015). Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Conservación Biológica Volumen 186*, 287-295.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1. Informe de Calidad de los puntos colocados

**Leica Geosystems AG**  
Heinrich Wild Strasse  
CH-9435 Heerbrugg  
St. Gallen, Switzerland

Phone: + 41 71 727 3131  
Fax: + 41 71 727 4674

- when it has to be right



## Informe de Calidad de Puntos

Informe creado: 31/05/2023 00:15:14

### Detalles del proyecto

General		Información del cliente		Sistema de Coordenadas Principal	
Nombre del proyecto:	TESIS ANGELINE	Nombre del cliente:	-	Nombre de Sistema de Coordenadas:	WGS84-UTM84-17S
Propietario:	-	Persona de contacto:	-	Tipo de Transformación:	Clásica 3D
Jefe de Topografía:	-	Número:	-	Distribución de Residuos:	Ninguno
Fecha de Creación:	30/05/2023 23:49:54	Email:	-	Elipsoide:	WGS84
Último Acceso:	30/05/2023 23:49:55	Skype:	-	Tipo de Proyección:	UTM
Software aplicación:	Infinity 3.4.0	Website:	-	Modelo de Geoide:	Peru_EGM08
				Modelo CSCS:	-

Ruta: C:\Users\Miguel\Desktop\TESIS ANGELINE\TESIS ANGELINE.iprj  
Tamaño: 37.5 MB  
Comentarios: -

### Resumen

#	Punto Id	Clase de Punto	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]	Altura Ortom. [m]	Altura Elips. [m]	Código	Inclinación (Tilt) [gon]	CQ 3D [m]	2D CQ [m]	1D CQ [m]	Fecha/Hora
1	PUNTO CONTROL (MEDIO)	Solucionado PP	563,331.8465	9,601,704.4065	30.5919	39.0726		-	0.0003	0.0001	0.0003	30/05/2023 14:25:50
2	PUNTO CONTROL 04	Solucionado PP	563,439.7476	9,601,845.7847	50.3413	58.8150		-	0.0003	0.0001	0.0002	30/05/2023 13:35:19
3	PUNTO DE CONTROL 01	Solucionado PP	563,129.1879	9,601,819.7261	54.8322	63.2818		-	0.0002	0.0001	0.0002	30/05/2023 11:06:33
4	PUNTO DE CONTROL 02	Solucionado PP	563,245.8185	9,601,503.8600	64.4410	72.9375		-	0.0002	0.0001	0.0002	30/05/2023 11:47:20
5	PUNTO DE CONTROL 03	Solucionado PP	563,451.2578	9,601,481.7919	49.9355	58.4526		-	0.0004	0.0002	0.0003	30/05/2023 12:34:17
6			563,134.8189	9,601,688.1583	29.2404	37.7057		-	0.0002	0.0001	0.0002	

	PUNTO DE CONTROL 05	Solucionado PP											30/05/2023 10:37:24
7	PUNTO DE CONTROL 06	Solucionado PP	563,465.5104	9,601,704.6720	32.9007	41.3930		-	0.0003	0.0001	0.0003		30/05/2023 13:04:39
8	PUNTO DE CONTROL 07	Solucionado PP	563,312.4906	9,601,814.5693	37.7366	46.2028		-	0.0003	0.0001	0.0002		30/05/2023 13:59:05
9	PUNTO DE CONTROL 08	Solucionado PP	563,316.6882	9,601,580.5222	56.3935	64.8872		-	0.0002	0.0001	0.0002		30/05/2023 12:11:16
10	TUM01219	Control	562,877.9833	9,602,749.3158	58.6419	66.9623		-	-	-	-		31/05/2023 00:01:02

**Anexo 2.** Permiso de ingreso a Concesión Forestal de la Universidad Nacional de Tumbes.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL  
Y MEDIO AMBIENTE



"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Tumbes, 03 de enero de 2024.

**CARTA N° 001 -2024/UNTUMBES-VRACAD-FCA-EIFMA-D**

Señorita.

**ANGELINE KATERINE ESPINOZA SUAREZ**

Bach. de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente Facultad de Ciencias Agrarias

Universidad Nacional de Tumbes

**Presente.** -

Asunto : REALIZAR PROYECTO DE TESIS

Referencia : Solicitud del Bach. ANGELINE KATERINE ESPINOZA SUAREZ

**De mi especial consideración:**

Me dirijo a usted para expresarle mi cordial saludo, y en relación al documento de la referencia, le comunico que su petición de realizar el proyecto de tesis denominado: **Detección de árboles y variables dasométricas mediante el uso de RPAS en la Concesión Forestal de la Untumbes**, en el Área de Concesión Forestal de la Universidad Nacional de Tumbes, ha sido aceptado, el mismo que se realizará en el presente año.

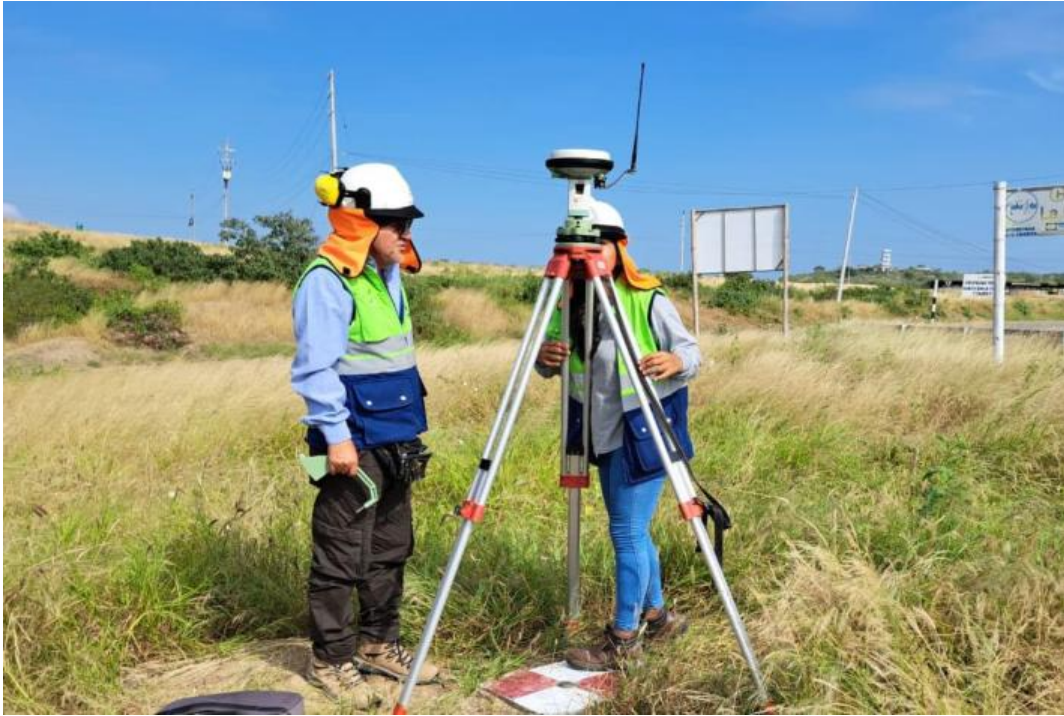
Por lo antes indicado deberá mantenerse en contacto al correo electrónico, [fca\\_forestalyma@untumbes.edu.pe](mailto:fca_forestalyma@untumbes.edu.pe) para coordinar y brindarle las facilidades necesarias.

Sin otro particular muy atentamente,

CC: Archivo  
MAPC/DIRECTOR  
A/AlmanC.

  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
  
**Dr. Miguel Antonio Puentes Chully**  
DIRECCIÓN DE ESC. ACADÉMICAS DE  
ING. FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE

**Anexo 3.** Lectura del Punto de control de "ORDEN C"



**Anexo 4.** Marcado de puntos de control dentro de la Concesión Forestal.



**Anexo 5.** Lectura de Puntos de Control dentro de la Concesión Forestal



**Anexo 6.** Medición en campo del diámetro de copa



**Anexo 7.** Medición de (DAP) del árbol



**Anexo 8.** Medición de distancia para toma de altura con clinómetro.



**Anexo 9.** Medición de altura de árboles con clinómetro



**Anexo 10.** Plaqueo de árboles inventariados



**Anexo 11.** Placa de inventario.



**Anexo 12.** Toma de datos de inventario en ficha.





**Anexo 14.** Armado de Trípode y la colocación del GPS para vuelo LIDAR.



**Anexo 15.** Vuelo LIDAR, de la zona de estudio

