



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA FORESTAL

**COMPARACIÓN DE ALTURAS TOTALES Y AREAS DE COPA
EN ARBOLES DE *Pinus radiata* D. DON MEDIANTE DRONES, EN
UNA PLANTACION UBICADA EN LA PARROQUIA PALMIRA**

Trabajo de Titulación

Tipo: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO FORESTAL

AUTOR:

JASSON LUIS PAULLAN BORJA

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA FORESTAL

**COMPARACIÓN DE ALTURAS TOTALES Y AREAS DE COPA
EN ARBOLES DE *Pinus radiata* D. DON MEDIANTE DRONES, EN
UNA PLANTACION UBICADA EN LA PARROQUIA PALMIRA**

Trabajo de Titulación

Tipo: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO FORESTAL

AUTOR: JASSON LUIS PAULLAN BORJA

DIRECTORA: ING. NORMA XIMENA LARA VÁSCONEZ

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, **Jasson Luis Paullan Borja**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Jasson Luis Paullan Borja, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 06 de junio de 2024



Jasson Luis Paullan Borja

C.I: 060485913-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA FORESTAL

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo: Proyecto de investigación, **COMPARACIÓN DE ALTURAS TOTALES Y AREAS DE COPA EN ARBOLES DE *Pinus radiata* D. DON MEDIANTE DRONES, EN UNA PLANTACION UBICADA EN LA PARROQUIA PALMIRA**, realizado por el señor: **JASSON LUIS PAULLAN BORJA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

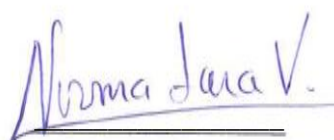
FECHA

Ing. Eduardo Patricio Salazar Castañeda
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



2024-06-06

Ing. Norma Ximena Lara Vásquez
DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



2024-06-06

Ing. Hernán Eriberto Chamorro Sevilla
ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



2024-06-06

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mi familia por darme las fuerzas y el sustento para culminar mi etapa universitaria y a mis amigos que me han acompañado en todo momento, también agradezco a mis tutores de tesis y mis profesores que me han enseñado a nunca rendirme.

Jasson

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a Dios, a mi familia y amigos que han sido parte del resultado y esfuerzo de mi trabajo.

Jasson

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1	Planteamiento del problema.....	3
1.2	Objetivos	3
1.2.1	<i>Objetivo general</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
1.3	Justificación	3
1.4	Hipótesis.....	4
1.4.1	<i>Hipótesis nula</i>	4
1.4.2	<i>Hipótesis alternativa</i>	4

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	5
2.1	Descripción de la especie	5
2.1.1	<i>Concepto de plantaciones forestales</i>	5
2.1.2	<i>Importancia económica</i>	5
2.1.3	<i>Principales especies plantadas</i>	6
2.2	<i>Pinus radiata</i> D. Don	6
2.2.1	<i>Requerimientos edafoclimáticos</i>	7
2.2.2	<i>Usos y aprovechamiento</i>	7
2.3	Inventario forestal.....	8
2.3.1	<i>Concepto e importancia</i>	8
2.3.2	<i>Tipos de inventarios</i>	9
2.4	Variables dasométricas.....	10
2.4.1	<i>Altura de los arboles</i>	10

2.4.2	<i>Densidad o abundancia</i>	10
2.4.3	<i>Diámetro de copa</i>	10
2.5	Sistemas de información geográfica (SIG)	11
2.5.1	<i>ArcGIS</i>	11
2.6	Segmentación de imágenes	12
2.7	Fotogrametría	12
2.7.1	<i>Tipos de mapas fotogramétricos</i>	12
2.7.2	<i>Modelo digital de superficie (MDS)</i>	12
2.7.3	<i>Modelo digital de terreno (MDT)</i>	13
2.8	Drones para fotogrametría	13
2.8.1	<i>Drones multirrotor</i>	13
2.8.2	<i>Planeación de vuelo</i>	14
2.9	Procesamiento de imágenes digitales	15
2.9.1	<i>Pix4DMapper</i>	15

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	17
3.1	Enfoque de la investigación	17
3.2	Caracterización del lugar	17
3.2.1	<i>Localización de la plantación en estudio</i>	17
3.2.2	<i>Ubicación geográfica</i>	18
3.3	Materiales y métodos	18
3.3.1	<i>Materiales y equipos de campo</i>	18
3.3.2	<i>Materiales y equipos de oficina e informáticos</i>	18
3.4	Metodología	18
3.4.1	<i>Delimitación y georreferenciación</i>	18
3.4.2	<i>Intensidad de muestreo</i>	19
3.4.3	<i>Determinación de unidades de muestreo sistemático dentro del rodal aplicando una intensidad de muestreo del 4%</i>	19
3.4.4	<i>Estimación de alturas totales con clinómetro digital, y el diámetro de copa con la cinta métrica de N-S y E-O.</i>	19
3.4.5	<i>El área de copa</i>	20
3.4.6	<i>Planificación del vuelo de Dron</i>	20
3.4.7	<i>Obtención de fotografías</i>	20
3.4.8	<i>Procesamiento de datos y obtención de productos fotogramétricos.</i>	21

3.4.9	<i>Cálculo de alturas mediante el software.....</i>	21
3.4.10	<i>Cálculo de áreas de copa mediante el software.....</i>	21
3.4.11	<i>Analizar estadísticamente la diferencia de estimaciones entre la manera tradicional y los datos obtenidos mediante dron.....</i>	21
3.4.12	<i>Evaluación de normalidad para las estimaciones de alturas y áreas de copa</i>	22
3.4.13	<i>Prueba Wilcoxon para dos muestras en las variables (alturas totales y área de copa)</i>	22
3.4.14	<i>Correlación entre las variables altura y área de copa</i>	22
3.4.15	<i>Calcular el costo por jornal/tiempo para la ejecución de parcelas de muestreo sistemático para las variables altura total y área de copa.....</i>	22
3.4.16	<i>Calcular el costo por operador / tiempo para la ejecución de los modelos digitales para las variables altura total y área de copa.....</i>	23
3.4.17	<i>Establecimiento de costos totales del inventario por método de las variables en estudio.....</i>	23

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	24
4.1	Estimar las alturas totales y áreas de copa de árboles de <i>Pinus radiata</i> D. Don mediante la manera tradicional.....	24
4.1.1	<i>Determinación de unidades de muestreo aleatorio dentro del rodal aplicando una intensidad de muestreo del 4%.....</i>	24
4.1.2	<i>Estimación de alturas totales con clinómetro digital haglof, y el diámetro de copa con la cinta métrica de N-S y E-O.....</i>	25
4.2	Calcular alturas totales y áreas de copa de árboles de <i>Pinus radiata</i> D. Don usando imágenes capturadas con un vehículo aéreo no tripulado.....	26
4.2.1	<i>Procesamiento de datos y obtención de productos fotogramétricos en el software Pix4D.....</i>	26
4.2.2	<i>Cálculo de alturas.....</i>	28
4.2.3	<i>Cálculo de áreas de copa.....</i>	29
4.3	Analizar estadísticamente la diferencia de estimaciones entre la manera tradicional y los datos obtenidos mediante dron.....	31
4.3.1	<i>Diferencia agregada (DA) y desviación media (DM) en las variables altura y áreas de copa.....</i>	31
4.3.2	<i>Evaluación de normalidad para las estimaciones de alturas y áreas de copa</i>	32

4.3.3	<i>Prueba Wilkonson para dos muestras en las variables (alturas totales y área de copa)</i>	33
4.3.4	<i>Coefficiente de correlación entre las variables en estudio.....</i>	34
4.4	Comparar los costos del inventario por método tradicional y por el método de vehículos aéreos no tripulados de las variables en estudio.	35
4.4.1	<i>Calcular el costo por jornal/tiempo para la ejecución de parcelas de muestreo sistemático para las variables altura total y área de copa.....</i>	35
4.4.2	<i>Calcular el costo por operador / tiempo para la ejecución de los modelos digitales para las variables altura total y área de copa.....</i>	36
4.4.3	<i>Establecimiento de costos totales del inventario por método de las variables en estudio.....</i>	36
4.5	Discusión	37
	CONCLUSIONES.....	40
	RECOMENDACIONES.....	42
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1:	Ubicación geográfica de la plantación en estudio	18
Tabla 4-1:	Altura total promedio <i>Pinus radiata</i>	25
Tabla 4-2:	Diámetro de copa promedio <i>Pinus radiata</i>	25
Tabla 4-3:	Cálculo de alturas modelo de la fotogrametría.....	29
Tabla 4-4:	Áreas de copa modelo de <i>Pinus radiata</i>	31
Tabla 4-5:	Diferencia agregada y desviación media para las variables altura y áreas de copa.	32
Tabla 4-6:	Prueba de normalidad para las variables alturas.....	32
Tabla 4-7:	Prueba de normalidad para las variables áreas de copa.....	33
Tabla 4-8:	Prueba de Wilcoxon para 2 muestras independientes en las variables alturas. .	33
Tabla 4-9:	Prueba de Wilcoxon para 2 muestras independientes en las variables áreas de copa.	34
Tabla 4-10:	Costos de inventarios por el método tradicional.	36
Tabla 4-11:	Costos de inventarios por el método de vehículos aéreos no tripulados.	36

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1:	Mapa de ubicación de la plantación de <i>Pinus radiata</i> D. Don Galte Jatun Loma, Palmira.	17
Ilustración 4-1:	Unidades de muestreo en la plantación de <i>Pinus radiata</i> D. Don	24
Ilustración 4-2:	Ortomosaico de la plantación de <i>Pinus radiata</i> D. Don	26
Ilustración 4-3:	Modelo Digital de Superficie en la plantación de <i>Pinus radiata</i> . D. Don.	27
Ilustración 4-4:	Modelo Digital de Superficie en la plantación de <i>Pinus radiata</i> D. Don..	27
Ilustración 4-5:	NDVI de la plantación de <i>Pinus radiata</i> D. Don en Palmira.....	28
Ilustración 4-6:	Trazo de polígonos de la plantación de <i>Pinus radiata</i> D. Don.	29
Ilustración 4-7:	Reclasificación de las áreas de copas de la plantación de <i>Pinus radita</i> D. Don	30
Ilustración 4-8:	Polígonos vectoriales de las áreas de copa de <i>Pinus radiata</i> D. Don.....	30
Ilustración 4-9:	Coeficiente de correlación de la variable altura entre los métodos tradicionales y drones.	34
Ilustración 4-10:	Coeficiente de correlación de la variable área de copa entre los métodos tradicionales y drones.	35
Ilustración 4-11:	Gastos por inventarios forestales entre el método tradicional y vehículos aéreos no tripulados.	37

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** Estimación de alturas con método tradicional
- ANEXO B:** Estimación de alturas y áreas de copa mediante vehículos aéreos no tripulados (dron)
- ANEXO D:** Vehículo aéreo no tripulado, para medir variables dasométricas.
- ANEXO C:** Medición de áreas de copa mediante método tradicional.

RESUMEN

El avance constante de la tecnología ha permitido su aplicación en el ámbito forestal, lo que posibilita la caracterización de la vegetación y la realización de inventarios y gestión forestal. El propósito de este estudio fue estimar variables dasométricas utilizando imágenes obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (dron), mediante un proceso fotogramétrico integrado en un sistema de información geográfica en la especie forestal de *Pinus radiata* D. Don. En una plantación de árboles en Palmira, Chimborazo, Ecuador, donde no se lleva a cabo un manejo forestal. Se tomó una muestra de 133 árboles seleccionados de un área total de 10.71ha donde se capturaron y procesaron las fotografías del dron, y se midieron altura (Ht) y área de copa (AC) de forma tradicional para validar la información digital. Los resultados de la comparación de ambos métodos a través de la prueba de Wilcoxon indican que la estimación de la altura y áreas de copa demostró diferencias significativas ($p < 0.01$). Además, en las correlaciones entre los dos métodos fue fuerte cercándose a 1. Teniendo que para las variables alturas un R2 de 0.91 y para la variable áreas de copa un R2 de 0.76. Por lo que, en los costos entre las dos metodologías tuvo una diferencia de 750\$, siendo que el método tradicional con un valor de 50\$ más efectivo por día que el uso de vehículos aéreos no tripulados.

Palabras clave: <TRADICIONAL>, <VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS>, <ALTURAS>, <ÁREAS DE COPA>, <ArcGIS (SOFTWARE)>

0906-DBRA-UPT-2024

03-07-2024



ABSTRACT

The constant advancement of technology has allowed its application in the forestry field, which makes it possible to characterize the vegetation and carry out inventories and forest management. This study aimed to estimate dasometric variables using images obtained with an uncrewed aerial vehicle (drone) through a photogrammetric process integrated into a geographic information system in the forest species of *Pinus radiata* D. Don. In a tree plantation in Palmira, Chimborazo, Ecuador, where no forest management is carried out. A sample of 133 selected trees was taken from a total area of 10.71 ha, where the drone photographs were captured and processed, and height (Ht) and crown area (AC) were measured in a traditional way to validate the digital information. Comparing both methods through the Wilcoxon test indicates that the estimation of height and crown areas demonstrated significant differences ($p < 0.01$). Furthermore, the correlations between the two methods were strong, approaching 1. For the height variables, an R^2 of 0.91, and for the canopy area variable, an R^2 of 0.76. Therefore, there was a difference of \$750 in the costs between the two methodologies, with the traditional method being \$50 more effective per day than uncrewed aerial vehicles.

Keywords: <TRADITIONAL>, <UNMANNED AERIAL VEHICLES>, <HEIGHTS>, <COP AREAS>, <ArcGIS (SOFTWARE)>

Riobamba, July 4th, 2024



PhD. Dennys Tenelanda López
ID number: 0603342189

INTRODUCCIÓN

Ecuador, a pesar de su tamaño relativamente pequeño, alberga una amplia diversidad de ecosistemas y especies forestales en su territorio. Entre estos ecosistemas se destacan los páramos, que han sido hogar de diversas comunidades, con lo que, estas comunidades han establecido una estrecha relación con estos ecosistemas únicos, obteniendo de ellos los recursos necesarios para su subsistencia (Flores et al., 2012 pág. 13).

Los páramos están situados en altitudes superiores a los 3000 metros sobre el nivel del mar. En Ecuador, estos representan aproximadamente el 6% de su territorio, lo que lo convierte en el país con mayor extensión de páramos en relación con su tamaño a nivel mundial. A pesar de compartir características biofísicas fundamentales, como altitudes elevadas y ubicación tropical, la flora y fauna de los páramos exhiben variaciones significativas (Flores et al., 2012 pág. 13).

Las plantaciones forestales de *Pinus radiata* D. Don han cobrado gran importancia en los páramos andinos debido a su rápido crecimiento y adaptabilidad a las condiciones de la región. Esta especie introducida ha sido ampliamente cultivada desde la década de 1960 en áreas como la Sierra ecuatoriana, con el objetivo de reforestar y promover el aprovechamiento maderero sostenible (Farley, 2007 págs. 755-771).

En la parroquia Palmira, se encuentra una plantación de *Pinus radiata* D. Don debido a las condiciones favorables de suelo y clima. Esta especie, utilizada en reforestación, destaca por su rápido crecimiento y adaptabilidad. Los suelos de Palmira, formados por capas de ceniza volcánica y piedra pómez, llegan a presentar variaciones en profundidad que favorecen el desarrollo de esta especie. A pesar de las variaciones climáticas, el elevado contenido orgánico de los suelos promueve el crecimiento de la vegetación (FAO, 1974).

En inventarios forestales de *Pinus radiata*, se evalúan típicamente el diámetro normal y la altura total para medir propiedades de árboles individuales. La altura es crucial para modelar masas forestales, pero su medición es costosa y complicada. Por ello, solo se mide una muestra de alturas, requiriendo ecuaciones para facilitar su estimación. Este proceso implica dificultades, por lo que nuevas tecnologías como drones podrían simplificar la toma de datos de altura de manera más eficiente y precisa en plantaciones forestales.

Varias investigaciones relacionadas al inventario tradicional (alturas y diámetros de copa) han utilizado metodologías convencionales que consisten en toma de datos y estimaciones (Noboa, 2019

pág. 15). Sin embargo, para la estimación de altura de especies forestales, el uso de nuevas tecnologías con sensores remotos como drones y softwares de procesamiento de imágenes aéreas (ej. ArcGIS Pro, QGIS y Pix4D). Esto permitiría comprobar si la nueva tecnología facilita el rendimiento en la toma de datos en plantaciones forestales, en comparación con los métodos tradicionales.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En el sector Palmira no se ha realizado una evaluación cuantitativa de los inventarios forestales, aspecto esencial para administrar y planificar adecuadamente las masas forestales. Cuando un inventario cualitativo es insuficiente, se requiere estimar variables dasométricas como alturas totales y áreas de copa de árboles en pie, variables complejas de medir. Las tecnologías actuales, como los drones, permiten estimar estas variables de manera precisa y cercana a su valor real. Por ello, es necesario evaluar su aplicación en esta zona para mejorar la gestión forestal.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo general*

Comparar las alturas totales y áreas de copa en arboles de *Pinus radiata* D. Don mediante el uso de drones, en una plantación ubicada en la parroquia Palmira, provincia de Chimborazo.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Estimar las alturas totales y áreas de copa de árboles de *Pinus radiata* D. Don mediante la manera tradicional.
- Calcular alturas totales y áreas de copa de árboles de *Pinus radiata* D. Don usando imágenes capturadas con un vehículo aéreo no tripulado.
- Analizar estadísticamente la diferencia de estimaciones entre la manera tradicional y los datos obtenidos mediante dron
- Comparar los costos del inventario por método tradicional y por el método de vehículos aéreos no tripulados de las variables en estudio.

1.3 Justificación

Con este tipo de investigación se busca mejorar la eficiencia y precisión en las diferentes estimaciones de las variables dasométricas especialmente en las alturas totales y áreas de copa en las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. Comparando las metodologías tradicionales y las

mediante interacción de tecnología de vehículos aéreos no tripulados (drones). Este enfoque prospectivo tiene el potencial de generar impactos sustanciales en el sector forestal, superando las limitaciones asociadas a las metodologías convencionales.

La introducción de drones se presenta como una herramienta ideal para recopilar datos en tiempo real de los inventarios forestales, para la toma de decisiones informadas. La interacción de esta tecnología en la evaluación de parámetros específicos, como la altura y diámetro de copa en la parroquia Palmira, provincia de Chimborazo, la cual define como un avance para los ingenieros forestales para facilitar la toma de datos siendo este una eficiencia para el futuro.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis nula

Las alturas y áreas de copa de árboles de *Pinus radiata* D. Don estimadas mediante drones no son diferentes a las registradas mediante métodos tradicionales en terreno.

1.4.2 Hipótesis alternativa

Las alturas y áreas de copa de árboles de *Pinus radiata* D. Don estimadas mediante drones son diferentes a las registradas mediante métodos tradicionales en terreno.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1 Descripción de la especie

2.1.1 *Concepto de plantaciones forestales*

Las plantaciones forestales están compuestas predominantemente por árboles que han sido establecidos de manera deliberada mediante plantación o siembra y que están siendo gestionados activamente para proveer servicios ambientales y mitigación climática. Excluyen áreas forestales naturales o seminaturales que fueron plantadas en el pasado pero que actualmente tienen poca o nula gestión silvícola (PROPOPLUS, 2020 pág. 3).

Además, Según la publicación de EFI "Plantaciones forestales en Europa: retos y oportunidades": la silvicultura sostenible de estas plantaciones implica mantener un balance entre aspectos ecológicos, económicos y socioculturales para entregar beneficios integrales como resguardar medios de vida locales, proteger la biodiversidad y ecosistemas forestales, mejorar la calidad de vida rural y mitigar efectos del cambio climático (PROPOPLUS, 2020 pág. 4).

Las plantaciones forestales han ganado importancia como parte fundamental para el mejoramiento de la tierra, proyectándose su aumento en los próximos años para la producción de madera industrial y la provisión de servicios ambientales como restauración de áreas degradadas, lucha contra la desertificación y captura de carbono. Se prevé que pronto superarán a los bosques naturales en producción maderera global, generando beneficios económicos, ecológicos y sociales significativos al satisfacer de manera sostenible la creciente demanda de productos forestales (Prado, 2016. pág. 9).

2.1.2 *Importancia económica*

Las plantaciones forestales constituyen modelos de negocio que desempeñan un papel crucial en la lucha contra la deforestación al proporcionar fuentes sostenibles de madera para la industria. No solo contribuyen a la conservación de los bosques, sino que también promueven la restauración de áreas degradadas y ayudan a mitigar los efectos adversos del cambio climático. Estas iniciativas no solo son económicamente viables, sino que también generan beneficios ambientales significativos para las comunidades locales y el planeta en su conjunto. (Prado, 2016. pág. 9).

Silvícolamente ayudan a disminuir la presión extractiva sobre bosques nativos al substituir demanda por madera comercial. Asociadas a sistemas agroforestales y silvopastoriles, mejoran rendimientos productivos y detienen avance de frontera agropecuaria. También favorecen secuestro de carbono atmosférico mediante fotosíntesis a tasas de 3 toneladas de CO₂ por cada metro cúbico de madera. (Prado, 2016. pág. 9).

Las plantaciones forestales ofrecen una cobertura vegetal permanente que actúa como barrera contra la erosión del suelo y promueve la infiltración del agua. En comparación con otras formas de cobertura, las plantaciones forestales demuestran un rendimiento superior en la protección del suelo contra la erosión. Además, las áreas de conservación asociadas y el sotobosque de estas plantaciones facilitan la recuperación de la biodiversidad y sirven como hábitats vitales para la vida silvestre. Estos aspectos resaltan el valor multifacético de las plantaciones forestales en la conservación del medio ambiente y la promoción de la biodiversidad (MLR, 2020. pág. 3-5).

2.1.3 Principales especies plantadas

En Ecuador, las especies más demandadas en las plantaciones forestales son el Eucalipto y el Pino. Estas especies son seleccionadas por su capacidad para crecer en diferentes condiciones climáticas y por su valor comercial en la industria maderera. Además, en Ecuador también se han establecido plantaciones de pino (*Pinus patula* y *P. radiata*) hasta los 4000 metros sobre el nivel del mar, con el objetivo de producir madera (Tituaña et al., 2019. pág. 100).

2.2 Pinus radiata D. Don

(Vinuesa, 2013. pág. 4) menciona que, el *Pinus radiata*, también conocido como pino insigne o pino de Monterrey, es un árbol de la familia Pinaceae que puede alcanzar una altura de 30 a 50 metros, con un porte regular, piramidal en la juventud y luego ensanchado, globoso o truncado. Su crecimiento es rápido en los primeros años, y su tronco es recto, con corteza pardo-rojiza gruesa que pronto se agrieta y arruga (Tituaña et al., 2019. pág. 100).

Es originario de la costa californiana, pero se ha difundido de forma artificial por el suroeste de Europa, Nueva Zelanda, Chile, El Cabo y el suroeste de Australia. En Ecuador, existen plantaciones de *Pinus radiata* hasta los 4000 metros sobre el nivel del mar, con el objetivo de producir madera. El *Pinus radiata* es una especie ampliamente utilizada en plantaciones forestales comerciales debido a su rápido crecimiento y a la calidad de su madera (Tituaña et al., 2019. pág. 100).

2.2.1 *Requerimientos edafoclimáticos*

Durán (2018, pág. 5), nos menciona que el *Pinus radiata*, también conocido como pino insigne o pino de Monterrey, tiene ciertos requerimientos edafoclimáticos para su desarrollo. A continuación, algunos detalles de estos requerimientos.

Precipitación anual: Igual o superior a 380 mm.

Temperatura mínima media del mes más frío: Entre 1,5 y 12°C.

Temperatura máxima media del mes más cálido: Entre 17 y 30°C.

Temperatura media anual: Entre 10 y 18°C.

Humedad relativa en verano: Igual o superior a 40%, entre diciembre y febrero.

Textura del suelo: Puede adaptarse a texturas que van desde muy livianas a pesadas.

Drenaje del suelo: Debe ser bueno a moderado.

Reacción del suelo: pH igual o inferior a 7,4.

Altitud: Hasta los 3.000 metros sobre el nivel del mar.

En Ecuador, el *Pinus radiata* ha sido exitosamente establecido en altitudes que varían entre los 1.800 y los 3.500 metros sobre el nivel del mar, con una precipitación que fluctúa entre 800 y 1.300 mm, y temperaturas que oscilan entre 11 y 17 °C. Estos criterios son cruciales al momento de elegir el sitio idóneo para la implantación de plantaciones de *Pinus radiata*, asegurando condiciones óptimas para su desarrollo y crecimiento exitoso en el país (Duran, 2018, pág. 5).

2.2.2 *Usos y aprovechamiento*

Los *Pinus radiata* son altamente apreciados desde una perspectiva económica gracias a su rápido crecimiento y al desarrollo rápido del tronco en un período corto de tiempo. Esta cualidad ha conducido a su explotación para la obtención de madera, que se utiliza en diversas aplicaciones como la carpintería y la ebanistería, lo que contribuye significativamente a la industria maderera y a la economía en general. (Riego & Diaz, 2007. pág. 2-10)

Asimismo, su gran tamaño los hace ideales como bosques de contención para proteger los cultivos de la erosión causada por el viento. Además de su función en la protección de cultivos, los pinos son ampliamente utilizados para establecer bosques destinados a la agricultura, ofreciendo un escudo protector contra los efectos climáticos adversos. Por último, la celulosa presente en la madera de *Pinus radiata* se utiliza en la fabricación de papel y cartón, contribuyendo aún más a su valor económico (Riego & Diaz, 2007. pág. 2-10).

2.3 Inventario forestal

2.3.1 Concepto e importancia

Según Tipanluisa (2014, pág. 7), realizar un inventario forestal es crucial para obtener datos necesarios en la toma de decisiones sobre el manejo forestal. En la gestión de bosques naturales y plantaciones, contar con información precisa es fundamental para una administración eficiente. El objetivo es lograr una producción sostenible de alta calidad en el menor tiempo y costo posible. La gestión forestal implica la toma de decisiones, la implementación de alternativas y la supervisión para garantizar resultados óptimos. Sin información confiable y oportuna, la toma de decisiones correctas es difícil de alcanzar.

La etapa de inventario constituye un paso preliminar esencial antes de emprender cualquier planificación. En este proceso, es fundamental establecer objetivos y anticipar las medidas necesarias para alcanzar dichos objetivos. Para llevar a cabo una planificación efectiva en áreas forestales, se requiere recopilar datos que brinden información sobre el estado de los recursos contemplados en la planificación. Este proceso de recopilación de datos se denomina inventario, y no se limita únicamente al cálculo de la existencia de madera y leña, sino que también implica considerar otros aspectos relevantes (Tipanluisa, 2014, pág. 7).

Se lleva a cabo un examen detallado de los aspectos económicos y humanos, el entorno natural, el entorno forestal y la infraestructura del bosque. La evaluación de los recursos forestales en nuestro país ha estado históricamente centrada principalmente en los recursos maderables, descuidando en gran medida los recursos no maderables, los elementos naturales asociados a los bosques, así como los beneficios ambientales y ecológicos. Investigar y abordar los aspectos de evaluación de estos otros recursos forestales representa un desafío significativo (Tipanluisa, 2014, pág. 7).

El inventario forestal es una herramienta esencial para obtener estimaciones detalladas de los recursos del bosque y otras características importantes, fundamentales para la gestión sostenible de los bosques. El inventario forestal nacional (IFN) no solo facilita un manejo integrado y sostenible de los recursos forestales, sino que también proporciona datos sobre la estructura, composición, fauna, productos maderables y no maderables, prácticas silviculturales y la relación de los bosques con las comunidades locales. Este proceso es crucial para la toma de decisiones informadas y la conservación efectiva de los ecosistemas forestales (Díaz et al., 2018, pág. 4)

Para diseñar la metodología del IFN, se han llevado a cabo una serie de reuniones técnicas que han arrojado resultados específicos, como la determinación de las categorías y subcategorías de bosque para la estratificación del mapa de cobertura forestal, así como la definición de la estructura de las parcelas de medición y los parámetros a ser relevados durante el inventario (Diaz et al., 2018. pág. 4)

2.3.2 Tipos de inventarios

Los inventarios forestales pueden ser clasificados según diversos criterios, donde la intensidad y detalle del inventario varían según los objetivos establecidos. Estos inventarios pueden ordenarse de acuerdo con su precisión y ámbito de aplicación, siendo el inventario general el menos detallado, pero de amplio alcance, seguido por el inventario detallado y, finalmente, el inventario de investigación, que ofrece el mayor nivel de precisión, pero se limita a áreas específicas y con objetivos particulares de estudio (Diaz et al., 2018. pág. 4)

2.3.2.1 Primer nivel

Inventarios estratégicos (de recursos naturales). Son inventarios destinados a presentar estadísticas sobre recursos forestales de regiones extensas. Con el objetivo de diseñar políticas forestales, en aquellos países donde existe política forestal. Estos inventarios pueden desplegarse en subniveles, desde provinciales a transnacionales (se incluyen aquí los inventarios forestales nacionales) en cualquier subnivel de planificación es necesario un diseño de inventario específico por lo que el inventario y la planificación debieran ir unidos (Diaz et al., 2018. pág. 6-7).

2.3.2.2 Segundo nivel

Inventarios tácticos (Ordenación y Valoración). Son inventarios encaminados a la ordenación de bosques y se pueden dar en dos subniveles:

- Inventarios comerciales
- Inventario de grupo de bosques
- Inventario de bosque
- Es deseable que los inventarios a escala bosque se adapten a los inventarios nacionales para que las políticas nacionales o estrategias empresariales puedan traducirse en planes operativos (Diaz et al., 2018. pág. 6-7).

2.3.2.3 *Tercer nivel*

Díaz (2018, pág. 6-7), nos menciona que el inventario operativo (diseño de investigación). Son inventarios fundamentalmente encaminados a la realización de:

- Aprovechamientos
- Investigación forestal (parcela de experimentación)
- Tasaciones
- Informes periciales

2.4 **Variables dasométricas**

2.4.1 *Altura de los arboles*

La medición de la altura de los árboles puede realizarse directamente utilizando varas graduadas en casos donde la estructura de los árboles lo permite, o mediante el uso de instrumentos de medición específicos. Este proceso es fundamental en los inventarios forestales para obtener datos precisos sobre la estructura y crecimiento de los árboles, lo que contribuye a una gestión forestal efectiva y sostenible (Díaz et al., 2018, pág. 6-7).

2.4.2 *Densidad o abundancia*

La densidad es un indicador clave que proporciona información sobre la abundancia de una especie o clase de plantas dentro de un área determinada. Se diferencia entre la abundancia absoluta, que se refiere al número de individuos por hectárea, y la abundancia relativa, que se define como la proporción porcentual de cada especie en el total de árboles presentes en el área estudiada. Estos datos son fundamentales para comprender la composición y la distribución de la vegetación en un ecosistema, lo que a su vez ayuda en la planificación y gestión efectiva de recursos forestales y naturales (Díaz et al., 2018, pág. 6-7).

2.4.3 *Diámetro de copa*

La proyección del diámetro sobre el plano horizontal se utiliza para definir el límite de la copa de un árbol. Esta medida se obtiene desde la línea vertical hasta el punto donde la corteza del árbol alcanza su máximo alcance en el suelo. Esta técnica de medición es crucial en los inventarios forestales para evaluar la expansión de la copa de los árboles y comprender su relación con el

espacio circundante, lo que contribuye a una gestión más eficaz de los recursos forestales y la biodiversidad (Wabo, 2023, pág. 2-4).

2.5 Sistemas de información geográfica (SIG)

En la realidad y según lo indicado por (Consultores Ambientales CEA, 2008), el Sistema de Información Geográfica (SIG) es un enfoque gráfico que se utiliza para estructurar, cartografiar y procesar, generalmente con la ayuda de software, la información relacionada con el entorno de una región, con el propósito de facilitar el análisis de las relaciones entre las variables bióticas, abióticas, sociales y económicas. (SIGSA, 2021, pág. 1-2)

El geoprocésamiento es reconocido como una tecnología esencial que administra datos geográficos, permitiendo la comprensión detallada de la configuración geométrica de objetos, su ubicación en el espacio geográfico y las características que les son inherentes. Esta herramienta es fundamental en disciplinas como la cartografía, la planificación urbana, la gestión ambiental y la agricultura de precisión, facilitando la toma de decisiones informadas basadas en análisis espaciales y modelado de fenómenos geográficos. (SIGSA, 2021, pág. 1-2)

Según Sarría (2006), nos menciona que es relevante destacar el empleo de la tecnología informática en la gestión de información. Este autor sostiene que un Sistema de Información (SI) implica la integración de datos en formato digital y herramientas computacionales (programas) para su análisis, con metas específicas en el ámbito de una organización (ya sea una empresa, una entidad administrativa, entre otras).

2.5.1 ArcGIS

El sistema ArcGIS presenta una estructura escalable que permite su integración tanto a nivel individual como en entornos de trabajo corporativos. Con componentes divididos en ArcView, ArcEditor y ArcInfo, cada uno con un nivel de funcionalidad progresivo, comparten un entorno de trabajo común. ArcInfo ofrece la mayor cantidad de funciones, seguido de ArcEditor y luego ArcView. Las tres modalidades de ArcGIS incluyen las aplicaciones principales ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, lo que facilita una variedad de tareas relacionadas con el análisis y la gestión de datos geográficos. (Vicuña et al., 2008, pág 21).

2.6 Segmentación de imágenes

Glasbey y Horgan (1995) definen la segmentación como la subdivisión de una imagen en áreas o clases que representan objetos o partes de objetos, asignando a cada píxel una etiqueta distintiva del objeto al que pertenece. Por lo general, la tarea de segmentar imágenes se vuelve compleja debido a la falta de información adecuada sobre los objetos a segmentar y/o la presencia de ruido en las imágenes (Montaner, 2006, pág. 21).

En las ciencias forestales, las imágenes tele-detectadas encuentran diversas aplicaciones, especialmente en la identificación directa de árboles mediante la delimitación de sus copas. Estas técnicas se engloban bajo el concepto de "segmentación", proporcionando un enfoque más eficiente para llevar a cabo evaluaciones y monitoreos de los sistemas forestales (Montaner, 2006, pág. 21).

2.7 Fotogrametría

La fotogrametría aérea ha evolucionado significativamente con la introducción de los vehículos aéreos no tripulados tipo RPAS, transformando la topografía y ofreciendo ventajas para proyectos complejos. Estos dispositivos permiten generar nubes de puntos densas, proporcionando una representación detallada del relieve en áreas extensas y optimizando los tiempos en el trabajo de campo y en la oficina. La fotogrametría aérea facilita la creación de modelos 3D y la obtención de volúmenes a partir de fotografías, siendo utilizada históricamente en la elaboración de mapas y levantamientos tridimensionales mediante modelos digitales del terreno (Parra, 2021, pág. 9).

2.7.1 Tipos de mapas fotogramétricos

Las imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados (RPAS) tienen el potencial de generar una variedad de mapas. Cuando se procesan adecuadamente, los datos derivados de estas imágenes pueden ser utilizados con precisión en fotogrametría. Los mapas en dos dimensiones siguen siendo los resultados más comunes obtenidos a partir de imágenes recolectadas por RPAS. La forma más simple de crear un mosaico aéreo con estas imágenes es mediante el uso de software fotográfico que combina varias superposiciones aéreas en una sola imagen. (Parra, 2021, pág. 9).

2.7.2 Modelo digital de superficie (MDS)

El modelo digital de superficie (MDS) o modelo digital de elevación (DEM) es una representación visual de la superficie terrestre que incluye características como edificios, vegetación y puentes.

Cada elemento tiene asignado un valor que indica su elevación con respecto al nivel medio del mar. Este tipo de datos geospaciales son fundamentales en diversos campos, como la cartografía, la planificación urbana y la gestión de recursos naturales (Parra, 2021, pág. 9).

2.7.3 *Modelo digital de terreno (MDT)*

El modelo digital del terreno (MDT) es un conjunto estructurado de datos numéricos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, según F.J. (1978). A diferencia de otros modelos, el MDT se centra exclusivamente en la topografía natural, ofreciendo una representación detallada y precisa del relieve del terreno. Este tipo de información es esencial en diversas aplicaciones, como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la ingeniería civil, donde la comprensión del terreno es fundamental para la toma de decisiones informadas y el diseño de proyectos. (Parra, 2021, pág. 10).

2.8 Drones para fotogrametría

La implementación de drones para estudios aéreos en diversas áreas geográficas supone un avance significativo en términos de calidad y cantidad de datos obtenidos en comparación con métodos tradicionales. Estos dispositivos, equipados con tecnología avanzada, son capaces de capturar imágenes en alta definición y recopilar datos más complejos de manera eficiente. Además, el uso de drones resulta más económico que los vuelos en aviones o el empleo de imágenes satelitales, lo que beneficia tanto a empresas como a individuos dedicados a estas tareas al mejorar la eficiencia y precisión en la obtención de información geográfica. (Hobby, 2023 pág. 1).

2.8.1 *Drones multirrotor*

Según Parra (2021, pág. 10-11), nos menciona que los drones son aeronaves que cuentan con más de dos hélices y se sustentan en el aire gracias a la fuerza generada por estas hélices, permitiéndoles despegar y aterrizar de manera vertical. Los drones multirrotoros se clasifican en función del número de hélices que poseen:

- **Tricóptero:** Equipado con 3 hélices ubicadas en los extremos del dron.
- **Cuadricóptero:** Dotado de 4 hélices, con dos girando en la misma dirección y las otras dos en sentido opuesto.
- **Hexacóptero:** Con 6 hélices, su funcionamiento es similar al de los drones de cuatro hélices.

- **Octocóptero:** Equipado con 8 hélices, lo que le confiere mayor potencia y estabilidad.

2.8.2 *Planeación de vuelo*

Álvarez, (2001, pág. 1), nos indica que sobrevolar una zona, a una altura debe determinarse en base a la escala deseada y la distancia principal de la cámara. Capturar imágenes que abarquen una zona específica, siendo necesario que cada fotograma comparta una región común con los contiguos, conocida como "zona de recubrimiento".

La finalidad de la misión de vuelo fotogramétrico se centra en los siguientes objetivos:

- Realizar un sobrevuelo de la zona a una altitud que debe calcularse considerando la escala deseada y la distancia principal de la cámara.
- Abarcar una zona específica con las imágenes capturadas, asegurando que cada fotograma tenga una región común con las imágenes adyacentes, denominada "zona de recubrimiento"

Para llevar a cabo la planificación del vuelo, es necesario tomar decisiones iniciales, como determinar si se realizará bajo el control autónomo del GPS integrado en el dron o si se colocarán en tierra puntos de control georreferenciados mediante posicionamientos GPS. Luego, se deben identificar posibles obstáculos en el terreno, como líneas eléctricas, vegetación alta, zonas sensibles, etc. Finalmente, se debe utilizar una imagen satelital existente para trazar la ruta de vuelo que seguirá el dron (Álvarez, 2001, pág. 1).

En el proceso de planificación del vuelo, la elección entre el control autónomo a través del GPS integrado en el dron o la utilización de puntos de control georreferenciados en tierra con posicionamientos GPS debe ser considerada. Además, es esencial identificar posibles obstáculos en el terreno, como líneas eléctricas, vegetación alta y áreas sensibles. Posteriormente, se requiere utilizar una imagen satelital existente para trazar la ruta de vuelo del dron (Álvarez, 2001, pág. 1).

La planificación de un vuelo requiere considerar una serie de decisiones cruciales, como la escala del mapa, el formato de los fotogramas, la proyección del mapa y el elipsoide de referencia, entre otros aspectos. Estos elementos son fundamentales para organizar el plan de vuelo, ya que influyen directamente en las condiciones y la calidad de la captura de datos durante el vuelo. Es importante abordar estos aspectos con cuidado para garantizar resultados precisos y efectivos en la recopilación de información geográfica (Parra, 2021, pág. 14).

2.9 Procesamiento de imágenes digitales

El procesamiento de imágenes digitales abarca un conjunto de técnicas destinadas a mejorar su calidad y simplificar la búsqueda de datos para proyectos diversos. En el contexto de los vuelos de drones, se emplean programas específicos como 3Dsurvey y Pix4Dmapper para renderizar, procesar y generar resultados como nubes de puntos densas, modelado tridimensional de objetos, ortofotos del área capturada y mapas de índices para análisis multiespectrales. Estas herramientas son fundamentales para obtener información detallada y precisa a partir de las imágenes capturadas durante los vuelos (Parra, 2021, pág. 16)

2.9.1 Pix4DMapper

Pix4Dmapper es una aplicación diseñada por la empresa Pix4D con la finalidad de llevar a cabo mapeo profesional mediante el uso de drones. Este software se dedica al procesamiento de imágenes de diversas modalidades, como RGB, multiespectrales y térmicas. Su función principal es generar Ortomosaico en formato bidimensional (2D) y tridimensional (3D), así como crear modelos espaciales digitales y nubes de puntos (Parra, 2021, pág. 17).

2.9.1.1 Correlación de imágenes

La correlación de imágenes, también llamada correspondencia de imágenes es un proceso fundamental donde se establece la relación entre elementos presentes en dos o más fotografías, siendo necesario que estas imágenes tengan una superposición. Este procedimiento es esencial en áreas como la fotogrametría y la visión por computadora, permitiendo identificar y asociar puntos comunes entre diferentes imágenes para generar modelos tridimensionales o para realizar análisis comparativos en diversas aplicaciones. (Parra, 2021, pág. 17).

2.9.1.2 Ortomosaico

Los Sistema de Aeronaves tripuladas (RPAS), que por control remoto vuelan a altitudes bajas, lo que implica que la cámara de estos dispositivos tiene un campo de visión limitado. Para abarcar una extensión considerable, la cámara debe capturar cientos de fotografías, por lo que, con el fin de proporcionar una vista unificada, estas imágenes deben ser alineadas y fusionadas en una única imagen. Este proceso de combinación de imágenes se conoce como mosaico, y la imagen resultante recibe el nombre de mosaico. Es fundamental que este mosaico esté corregido

geométricamente para permitir su alineación con un sistema de coordenadas geoespaciales. Este procedimiento de corrección se denomina Ortomosaico. (Ortega, 2018, pág. 18).

2.9.1.3 Tamaño de píxel en el terreno (GSD)

El tamaño de píxel en el terreno (GSD) es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos sobre el terreno. A mayor valor del tamaño de píxel en el terreno (GSD) de la imagen, menor es la resolución espacial de la imagen y menos visibles son los detalles. El tamaño de píxel en el terreno (GSD) se relaciona con la altura del vuelo: a mayor altitud del vuelo, mayor es el valor del GSD (Pix4D, 2024 pág. 1).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque de la investigación

Esta investigación se llevó a cabo de manera multimodal, lo que implica que se adoptó un enfoque tanto cualitativo como cuantitativo. El aspecto cuantitativo se incorpora para expresar numéricamente la información recopilada sobre la altura y diámetro de la copa. Por otro lado, las variables cualitativas aportan información valiosa sobre el potencial de cada plantación y la capacidad para alcanzar los objetivos establecidos. En este sentido, se describieron en detalle cada una de las variables a evaluar, como los modelos digitales, los vuelos de dron y las imágenes multiespectrales.

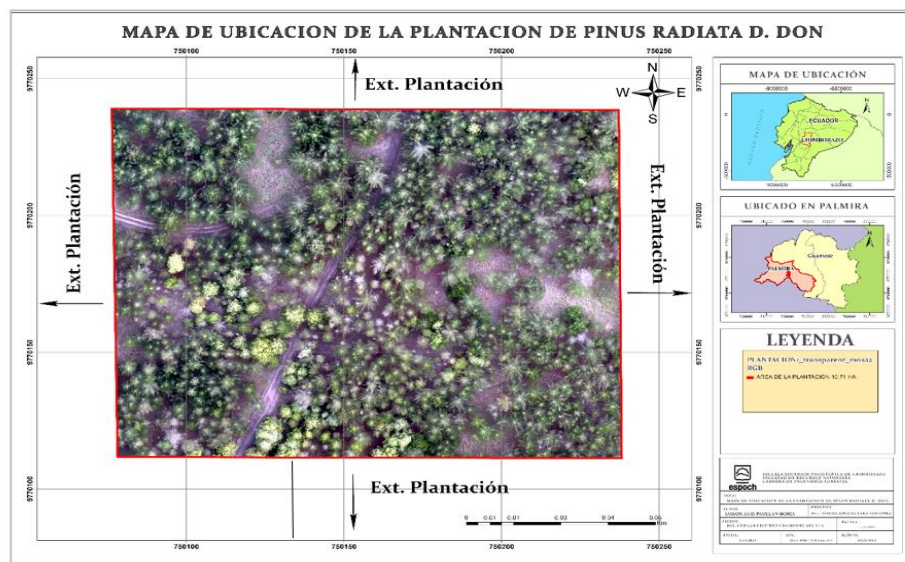


Ilustración 3-1: Mapa de ubicación de la plantación de *Pinus radiata* D. Don Galte Jatun Loma, Palmira.

Realizado por: Paullan L, 2024

3.2 Caracterización del lugar

3.2.1 Localización de la plantación en estudio

El sitio se encuentra localizado en el cantón Guamote a 16 Km al occidente de la ciudad de Riobamba, la cual se ubica en la parroquia Palmira en la provincia de Chimborazo.

3.2.2 Ubicación geográfica

La plantación de investigación está localizada en las coordenadas geográficas detalladas en la tabla 3-1.

Tabla 3-1: Ubicación geográfica de la plantación en estudio

Plantación	Altura (m.s.n.m)	Coordenadas	
		X	Y
Jatun Loma	3200	750153	9770271

Realizado por: Paullan L, 2024.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Materiales y equipos de campo

Cuaderno de apuntes, lápiz, cinta métrica, pintura líquida, clinómetro (SUUNTO), distanciómetro, GPS, cámara fotográfica, dron (Mavic 3 Multispectral).

3.3.2 Materiales y equipos de oficina e informáticos

Computadora, herramientas software, calculadora, hojas de registro.

3.4 Metodología

Para cumplir con el primer objetivo, se llevó a cabo una visita al lugar de estudio, durante la cual se llevaron a cabo las siguientes acciones.

3.4.1 Delimitación y georreferenciación

Se realizó un recorrido en la plantación de *Pinus radiata* en el predio de la comunidad Galite Jatunloma en Palmira, durante el reconocimiento se observó las alturas, el acceso hacia la plantación y el tipo de terreno, se estableció las siguientes actividades para la ejecución de parcelas.

En primera instancia, se llevó a cabo la georreferenciación de la plantación, utilizando coordenadas geográficas UTM WG 84, zona 17 Sur, junto con su cuantificación y etiquetado correspondiente. Los datos obtenidos fueron procesados mediante una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el procesamiento de las imágenes, se empleó un dron, que

sobrevoló la plantación en un tiempo de vuelo de 2 horas. La captura de imágenes aéreas fijas se realizó utilizando la cámara CMOS de 48 MP.

3.4.2 *Intensidad de muestreo*

La intensidad de muestreo se realizó a una plantación de 10.71 ha con una intensidad de muestro al 4%, siendo este muestreo el punto de inicio para la ejecución de parcelas circulares en la plantación. Con lo que, 10.71ha es el 100%, solo el 4% es para ejecutar el muestreo sistemático en la plantación de Palmira.

3.4.3 *Determinación de unidades de muestreo sistemático dentro del rodal aplicando una intensidad de muestreo del 4%*

Se realizó el inventario forestal mediante un diseño de muestreo sistemático, donde se fijaron 4 parcelas circulares de 500 m² en el terreno de Palmira. Utilizando una cuerda, se procedió a medir el radio de 12.62 metros para las 4 parcelas designadas. Como se muestra en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Número de árboles registrados por parcela en la plantación

Plantación	Nº Parcelas	Nº Árboles
Jatun Loma	1	22
	2	43
	3	40
	4	27

Realizado por: Paullan L, 2024.

3.4.4 *Estimación de alturas totales con clinómetro digital, y el diámetro de copa con la cinta métrica de N-S y E-O.*

En la plantación de Jatunloma, se llevaron a cabo estimaciones precisas de la altura de cada árbol ubicado dentro de la parcela circular. Estas mediciones se realizaron utilizando el clinómetro digital Haglof como herramienta principal. Con este dispositivo, se trazó con exactitud una línea visual desde una distancia predefinida hasta el ápice de la copa y la base del árbol, proporcionando así medidas fiables de la altura de cada ejemplar.

Para garantizar la precisión de las mediciones, se estableció una distancia estándar de 15 metros, entre cada árbol, manteniendo fijo el clinómetro digital desde la base del árbol hacia la parte más alta que corresponde a la copa del árbol, este proceso se realizó a todos los individuos de la plantación de *Pinus radiata*.

Para la estimación del diámetro de copa, se utilizó como herramienta la cinta métrica para la medición de sus dos direcciones, que estas van a hacer de Norte-Sur y la dirección Este-Oeste, estas se tomaron teniendo en cuenta como referencia la proyección de los extremos de la copa sobre el suelo y una vez que se verifico las direcciones para medir la distancia entre ambos extremos, se tomó la cinta métrica y se realizó la toma de la variable diámetro de copa.

3.4.5 El área de copa

Con base en los datos recolectados de las parcelas de los árboles, se calculó un promedio de las dimensiones extremas de las direcciones previamente mencionadas para determinar el área de copa. Este cálculo se llevó a cabo utilizando la siguiente fórmula $Ac = \frac{\pi}{4} (Dc^2)$ correspondiente a cada individuo, así obtuve de esta manera las áreas de copa respectivas.

3.4.6 Planificación del vuelo de Dron

El vuelo se realizó a una altitud de 200 metros, utilizando un patrón de vuelo 3D en forma de cuadrícula a lo largo de la dirección norte-sur. Luego, el dron realizo un cambio en la dirección y así se conformó la cuadrícula, abarcando tanto de este a oeste como de norte a sur. La herramienta principal utilizada para la captura de fotografías fue la aplicación DJI Assistant 2.

Durante el vuelo del dron que sobrevolaba la plantación de 10.71 ha, mantuvo una duración en el aire de casi 2 horas. Durante este periodo, se implementó un patrón de vuelo en forma de malla cuadriculada. La planificación del vuelo aseguro un trasplante del 70 % tanto vertical como horizontal entre las fotografías.

3.4.7 Obtención de fotografías.

El dron capturo cada imagen en un periodo de 2 segundos, que contaba con características notables, como una cámara 4/3 CMOS de 20 MP en fotografías y un infrarrojo cercano. Con un espectro que abarcaba el rojo (R), borde rojo (RE) y verde (G), logamos la captura de imágenes RGB.

Para garantizar una precisa interpretación en la fotogrametría, implemente puntos de control estratégicos para diferenciar los árboles al inicio de la parcela. Con lo cual, marque un total de 4 puntos de control, considerando las irregularidades del terreno. Esta operación culminó en la captura de alrededor de 386 fotografías destinadas al análisis.

3.4.8 Procesamiento de datos y obtención de productos fotogramétricos.

El procesamiento de las 386 fotos en el software comenzó con la identificación de puntos comunes entre cada imagen, este proceso se llevó a cabo en un periodo de un día completo. Mediante, la información de geolocalización, se creó una nube de puntos tridimensionales uniendo coordenadas en los pares de cada imagen. Generando un modelo digital de elevaciones. Y a la vez combinando las imágenes orto-rectificadas para producir un mosaico de ortofoto. Además, se generaron otros productos derivados como modelos digitales de superficies, terreno y NDVI.

3.4.9 Cálculo de alturas mediante el software.

Con los Modelos Digitales de Superficie y de Terreno de la plantación forestal, se calculó las alturas de los árboles en ArcGIS Pro. Inicialmente, se agregó ambas capas ráster al proyecto SIG, comprobando de que compartieran el mismo sistema de coordenadas. Luego, mediante la calculadora ráster, se restó los valores del MDT de los del MDS, generando así un nuevo ráster con las alturas sobre el suelo para cada parcela estudiada.

3.4.10 Cálculo de áreas de copa mediante el software.

Para calcular las áreas de copa en ArcGIS, se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), permitiendo la delimitación entre vegetación y suelo. Luego, se dibujaron manualmente 133 polígonos para cada individuo de la plantación.

Con el NDVI, se procesó una reclasificación en dos categorías, siendo la primera categoría de suelo desnudo y como segunda categoría las partes más altas de los árboles, esto se realizó en las 4 parcelas de la plantación, generando en si un ráster de reclasificación de los árboles de *Pinus radiata*. Con la reclasificación, se procesaron en un ráster a polígono, en las 4 parcelas para producir los polígonos en las áreas de copa de la plantación. Se calculo en la tabla de atributos las dimensiones de los 133 individuos para la diferencia entre el método tradicional y el método con drones.

3.4.11 Analizar estadísticamente la diferencia de estimaciones entre la manera tradicional y los datos obtenidos mediante dron

Los datos de las alturas y áreas de copa obtenidos en mediante el método 2 (drones) fueron procesados en la hoja de cálculo Excel y comparados con las estimaciones realizadas en el método

1 (tradicional), ambos aplicando la fórmula de diferencia agregada $\left(\frac{\Sigma VR - \Sigma VE}{VE}\right) \times 100\%$, y con la fórmula de desviación media $\left(\frac{\Sigma(VR-VE)}{n}\right) \times 100\%$. Para la diferencia agregada se tomó el valor real del método 2 los datos del método 1 como valor estimado. Con el cálculo estadístico, se generó el porcentaje de diferencia entre los dos métodos.

3.4.12 Evaluación de normalidad para las estimaciones de alturas y áreas de copa

En el software de infostat, se llevó a cabo el cálculo estadístico para las dos variables, se generó en una tabla, en la que se, traspaso los datos en dos categorías, siendo la primera categoría el método 1 y como segunda categoría el método 2, estas se llevaron a una prueba de normalidad de kolmogorov para más de 50 datos, con lo cual, se generó un p-valor de dos colas para la significancia de normalidad entre las dos metodologías.

3.4.13 Prueba Wilcoxon para dos muestras en las variables (alturas totales y área de copa)

Para generar la prueba de Wilcoxon, se identificó la normalidad en las dos variables para ver su significancia. Luego, se procesó una prueba no paramétrica de independencia para las dos metodologías, obteniendo un p-valor, para la comprobación de si existen diferencias entre el método 1 y el método 2. Además, esta prueba produjo unas medias de resumen con las cuales se resaltó el error de muestreo y el error relativo, con lo que se identifica el porcentaje de aprovechamiento y de la biomasa en la plantación de *Pinus radiata*.

3.4.14 Correlación entre las variables altura y área de copa

Para la correlación entre los dos métodos tanto en la variable altura y área de copa, se procesó en el programa de Infostat, en la parte de gráficos, donde colocamos un diagrama de dispersión, siendo que en la matriz 1 se colocó el método 1 y en la matriz 2 el método 2, con lo cual, se generó nuestro diagrama de dispersión y también nuestro R-cuadrado. Que resalta la correlación entre las dos metodologías.

3.4.15 Calcular el costo por jornal/tiempo para la ejecución de parcelas de muestreo sistemático para las variables altura total y área de copa.

Para el cálculo de jornal/tiempo se priorizo los gastos que son dispensables para la ejecución de las estimaciones de los inventarios forestales, con lo que, se identificó el valor de transporte y

alimentación, así también se realizó la toma del tiempo de cada una de las actividades mencionadas. Generando en si las estimaciones de las variables dasométricas en los inventarios forestales, por día de trabajo.

3.4.16 Calcular el costo por operador / tiempo para la ejecución de los modelos digitales para las variables altura total y área de copa.

Para el cálculo de costo operador/tiempo, se estimó el tiempo realizado por el dron en sobrevolar la plantación para en si generar las fotografías para la obtención de las variables que conforman los inventarios forestales, también se calculó el tiempo estimado en procesar las imágenes para el cálculo de las variables dasométricas y la ejecución en el software. Estos periodos se estimó el gasto por día de trabajo para diferenciar entre la toma de dato mediante el método tradicional y el método realizado a través de drones.

3.4.17 Establecimiento de costos totales del inventario por método de las variables en estudio.

En el caso del método 1, se sumó los valores previamente calculados por concepto de transporte, alimentación y sueldo, así como el tiempo total de los técnicos involucrados en la toma de datos en todas las parcelas de muestreo definidas en la plantación forestal. Así se obtuvo el costo total de ejecución del inventario mediante mediciones manuales directas.

De forma equivalente, para el método 2 se priorizo los gastos correspondientes a equipos como vehículo aéreo no tripulado, licencias de softwares especializados, mano de obra calificada en generación de modelos digitales y procesamiento. Sumando estos elementos se generó el costo total para el inventario mediante sensores remotos.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Estimar las alturas totales y áreas de copa de árboles de *Pinus radiata* D. Don mediante la manera tradicional.

4.1.1 Determinación de unidades de muestreo aleatorio dentro del rodal aplicando una intensidad de muestreo del 4%

Datos:

Área total:	10.71 ha
Intensidad de muestreo:	4%
Equivalente a 1ha:	10000 m ²
Dimensión de cada parcela:	500 m ²

$$10.71 \text{ ha} \times 4\% = 0.4284$$

$$0.4284 \times 10000 \text{ m}^2 = 4284$$

$$4284 \times 0.4284 = 1835.2456$$

$$1835.2456 \times 500 \text{ m}^2 = 3.67$$

$$3.67 \approx 4 \text{ unidades de muestreos}$$

Como se muestra en la ilustración 4-1 se generó 3.67 unidades de muestreo que redondeando demostró que para las 10.71 ha, son necesarias 4 unidades de muestreo, con una intensidad de muestreo del 4 %, sabiendo que cada parcela tiene un radio de 500 m², con estos resultados, se realizó las estimaciones de las variables dasométricas del estudio (alturas totales y áreas de copa).

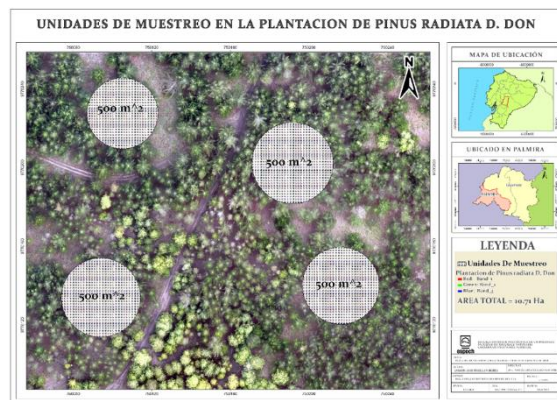


Ilustración 4-1 Unidades de muestreo en la plantación de *Pinus radiata* D. Don

Realizado por: Paullan L, 2024

4.1.2 Estimación de alturas totales con clinómetro digital haglof, y el diámetro de copa con la cinta métrica de N-S y E-O.

4.1.2.1 Variable Altura Total

La toma realizada en la región de Palmira reveló hallazgos significativos en relación con la altura total de los árboles en la plantación Jatun Loma. En la primera parcela, se obtuvo un promedio de altura de 16.31 metros, mientras que en la segunda parcela se obtuvo un promedio de 14.31 metros. La tercera parcela presentó un promedio de altura de 16.20 metros, mientras que en la cuarta parcela se registró un promedio de 13.83 metros. Estas diferencias en las alturas de cada una de las parcelas se deben a que en esta plantación no existió ninguna intervención de manejo silvicultural (Ver tabla 4-1).

Tabla 4-1: Altura total promedio *Pinus radiata*.

Parcela	Promedio Ht (m)
P1	16.31
P2	14.31
P3	16.20
P4	13.83

Realizado por: Paullan L, 2024.

4.1.2.2 Variable Diámetro de copa

El cálculo se realizó a partir de la recopilación de datos obtenidos en campo en cada una de las parcelas de la plantación. Se empleó una fórmula específica $Ac = \frac{\pi}{4} (Dc)^2$ para calcular las áreas de copa de los árboles. Como resultado, se determinó un promedio de área de copa de 15.45 m² para la primera parcela, 15.75 m² para la segunda parcela, 16.95 m² para la tercera parcela y 19.07 m² para la última parcela (Ver tabla 4-2).

Tabla 4-2: Diámetro de copa promedio *Pinus radiata*.

Parcela	N-S	E-O	PROMEDIO	AREA DE COPA
P1	4.40	4.46	4.44	15.45
P2	4.36	4.58	4.48	15.75
P3	4.60	4.68	4.65	16.95
P4	4.91	4.93	4.93	19.07

Realizado por: Paullan L, 2024.

4.2 Calcular alturas totales y áreas de copa de árboles de *Pinus radiata* D. Don usando imágenes capturadas con un vehículo aéreo no tripulado.

4.2.1 Procesamiento de datos y obtención de productos fotogramétricos en el software Pix4D.

4.2.1.1 Orto foto de la plantación de *Pinus radiata*.

Como se muestra en la ilustración 4-2, se generó un mosaico orto rectificado de 5 bandas (RGB, Red Edge, NIR) a una resolución espacial de 3.2 cm/píxel, cubriendo un total de la plantación de 10.71 ha de *Pinus radiata* D. Don.

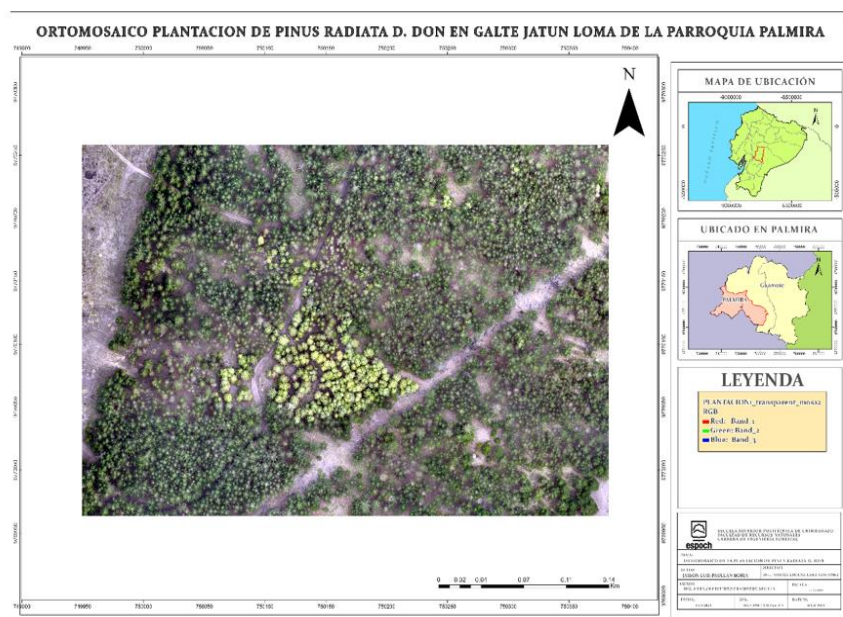


Ilustración 4-2 Ortomosaico de la plantación de *Pinus radiata* D. Don

Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.1.2 DTM (Modelo Digital de Terreno)

La ilustración 4-3, muestra un Modelo Digital de Terreno (MDT) con una resolución espacial de 10 cm/píxel. Este MDT proporciona una representación precisa de la topografía del terreno. Se verificó su precisión utilizando puntos de control.

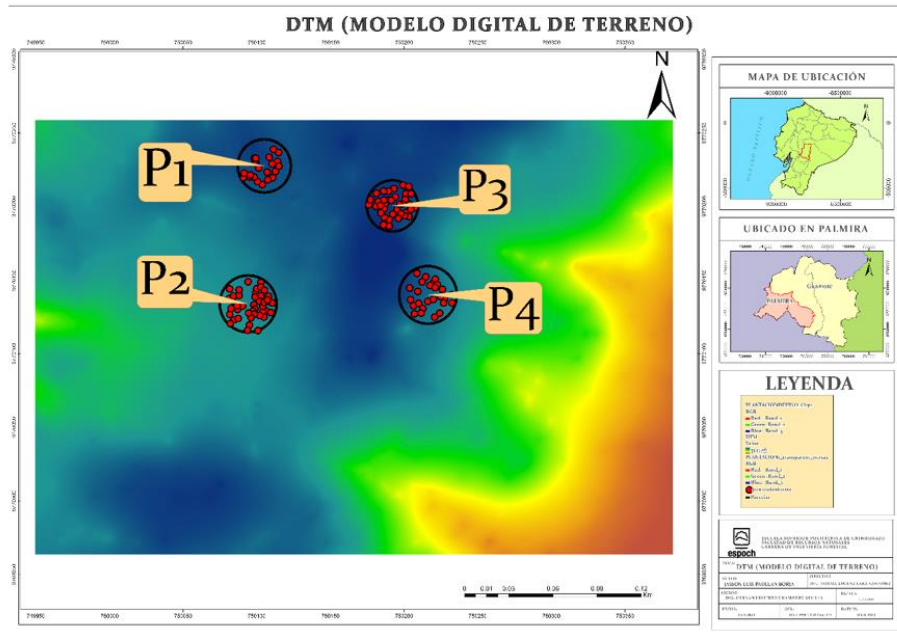


Ilustración 4-3 Modelo Digital de Superficie en la plantación de *Pinus radiata*. D. Don

Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.1.3 DSM (Modelo Digital de Superficie)

Como se muestra en la ilustración 4-4, el modelo digital de superficie (MDS), con una resolución de 3.2 cm/píxel, también conocido como tamaño de píxel sobre la superficie (GSD). Representando en si la superficie de la plantación y las características de la vegetación, así mismo como los puntos georreferenciados para cada uno de los árboles en las 4 parcelas, en las variables alturas.

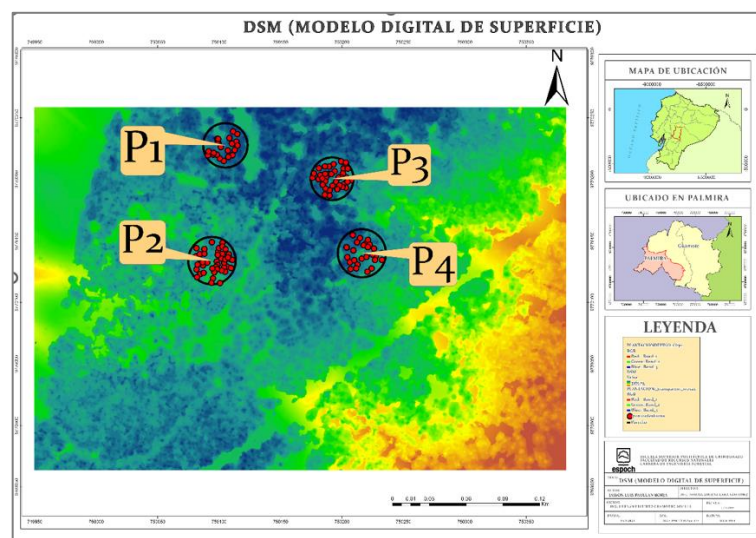


Ilustración 4-4 Modelo Digital de Superficie en la plantación de *Pinus radiata* D. Don

Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.1.4 NDVI (Índice de Vegetación Normalizada)

Como se representa en la ilustración 4-5, el NDVI de la plantación, que indica las áreas más verdes y las áreas donde no existe vegetación, destacando en si las copas de los árboles de *Pinus radiata* D. Don. Para generar las áreas de copa de la especie en estudio mediante softwares SIG.

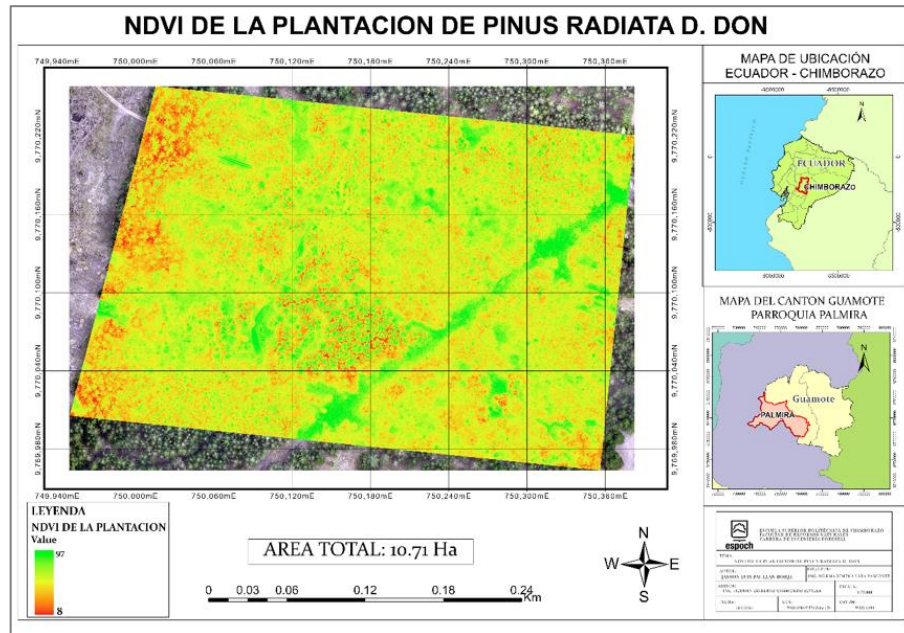


Ilustración 4-5 NDVI de la plantación de *Pinus radiata* D. Don en Palmira.

Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.2 Cálculo de alturas.

Como se muestra en la tabla 4-3, el cálculo de las alturas se obtuvo diferencias de altura entre el método tradicional y el método de drones cuyos resultados son: para la primera parcela se registró una altura promedio de 14.21 m, con una diferencia de 2.10 m con la tomada con el método tradicional. Para la segunda parcela fue de 13.29 m con una diferencia de 1.03 m, para la tercera parcela fue de 10.47 m con una diferencia de 5.73 m y para la cuarta parcela su altura promedio fue de 13.33 m con una diferencia de 0.50 m. Tales diferencias, entre los dos métodos resaltan por la característica de la topografía irregular del terreno, haciendo preciso la toma de datos con curvas de nivel.

Tabla 4-3: Cálculo de alturas modelo de la fotogrametría.

Plantación	Promedio Tradicional	Promedio DSM	Promedio DTM	AlturaMod	DF
P1	16.31	3353.852	3339.63882	14.21	2.10
P2	14.32	3347.78028	3334.49367	13.29	1.03
P3	16.20	3351.4156	3340.947	10.47	5.73
P4	13.8321429	3350.49032	3337.16011	13.3302143	0.50

Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.3 Cálculo de áreas de copa.

4.2.3.1 Trazo de polígonos

Como se muestra en la ilustración 4-6, en el trazo de polígonos se generó, en la primera parcela un total de 22 polígonos para las áreas de copa de *Pinus radiata* D. Don. Para la segunda parcela se generaron 43 polígonos, en la tercera parcela se generaron 40 polígonos y para la cuarta parcela se generaron 28 polígonos. Dándonos un total de 133 polígonos trazados en el ráster del NDVI, cabe recalcar que los trazos de los polígonos realizados manualmente servirán para validar los generados mediante el software.

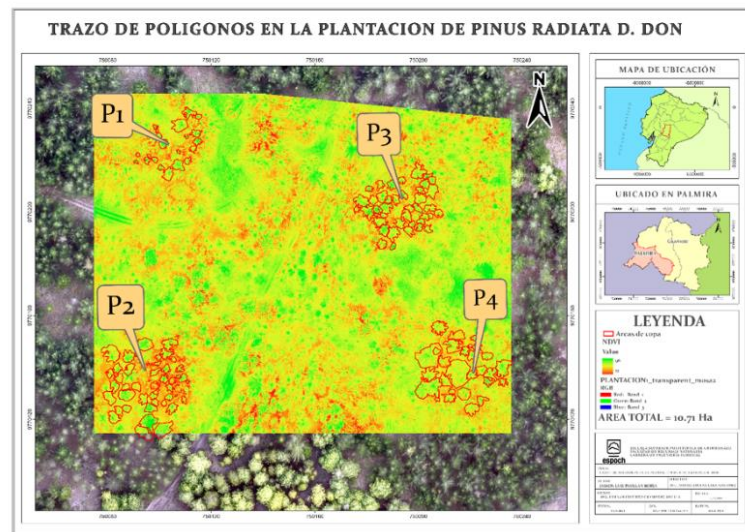


Ilustración 4-6 Trazo de polígonos de la plantación de *Pinus radiata* D. Don.

Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.3.2 Reclasificación de las áreas de copa a partir de una clasificación supervisada.

Como se muestra en la ilustración 4-7, se generó una reclasificación en dos categorías la primera de un color amarillo claro la parte más visible del ráster en la plantación de *Pinus radiata* D. Don. Y de color verde oscuro la parte más baja de la plantación, dando a conocer las áreas de copa en las 4 parcelas designadas siendo un total de 133 individuos seleccionados para las 10.71 ha. La

reclasificación muestra con mejor apariencia las copas de los árboles, para determinar su dimensión en cada una de las parcelas.

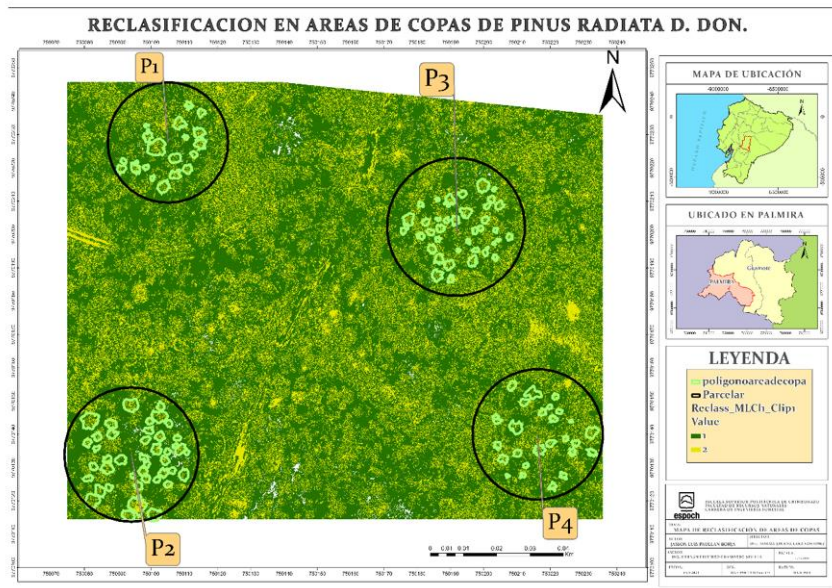


Ilustración 4-7 Reclasificación de las áreas de copas de la plantación de *Pinus radiata* D. Don
Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.3.3 Ráster a polígono en las áreas de copa de *Pinus radiata*.

Como se muestra en la ilustración 4-8, se generaron los polígonos en las 4 parcelas designadas marcando los 133 individuos solo de las partes más visibles, que serían las copas de los árboles de *Pinus radiata* D. Don. Siendo que para la parcela uno se procesaron 22 polígonos, para la segunda parcela se procesaron 43 polígonos, en la tercera parcela se procesaron 40 polígonos y para la cuarta parcela se procesaron 28 polígonos.

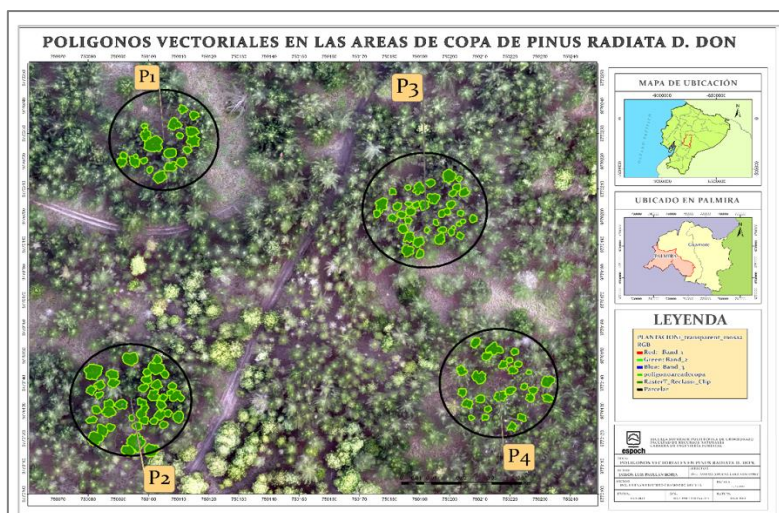


Ilustración 4-8 Polígonos vectoriales de las áreas de copa de *Pinus radiata* D. Don
Realizado por: Paullan L, 2024

4.2.3.4 Áreas copa.

Como se muestra en la tabla 4-4, las áreas de copa calculadas en el software, que mostro en la tabla de atributos, genero para la primera parcela un promedio de 5.80 m^2 con una diferencia del 9.65 m^2 con el método tradicional. Para la segunda parcela se obtuvo un promedio de 10.41 m^2 con una diferencia de 5.34 m^2 , en la tercera parcela se obtuvo un promedio de 9.8 m^2 con una diferencia de 7.15 m^2 y para la cuarta parcela se obtuvo un promedio de 17.73 m^2 con una diferencia de 1.34 m^2 .

Tabla 4-4: Áreas de copa modelo de *Pinus radiata*.

Plantación	Shape	Promedio Tradicional	Promedio de áreas de copa modelo	DF
P1	Polygon	15.45	5.8	9.65
P2	Polygon	15.75	10.41	5.34
P3	Polygon	16.95	9.8	7.15
P4	Polygon	19.07	17.73	1.34

Realizado por: Paullan L, 2024

4.3 Analizar estadísticamente la diferencia de estimaciones entre la manera tradicional y los datos obtenidos mediante dron.

4.3.1 Diferencia agregada (DA) y desviación media (DM) en las variables altura y áreas de copa.

Como se muestra en la tabla 4-5, se obtuvo una diferencia agregada en las variables altura y áreas de copa, obteniendo para la variable altura con el método 2 (drones) con un DA de 33.58% de diferencia con el método 1 (tradicional), mientras que su DM se obtuvo un valor de 0.28% más preciso con el método 2 (drones) que los realizados por el método 1 (tradicional) en una población de 133 árboles. En la variable áreas de copa por el método 2 (drones) se obtuvo un DA de 16.96 % de diferencia con el método 1 (tradicional), mientras que su DM presento un valor de 0.12 % más preciso con el método 2 (drones) que los estimados con el método 1 (tradicional). Las diferencias obtenidas en los cálculos se dan por la topografía del terreno al ser irregular varían en las estimaciones del método 1 (tradicional) con las tomadas con el método 2 (drones).

Tabla 4-5 Diferencia agregada y desviación media para las variables altura y áreas de copa.

ALTURA			
Valor real (dron)	Valor estimado (tradicional)	DA	DM
1563.02 m	2353.29 m	33.58%	0.28%
AREAS DE COPA			
Valor real	Valor estimado	DA	DM
1668.91	2009.89	16.96%	0.12%

Realizado por: Paullan L, 2024

4.3.2 Evaluación de normalidad para las estimaciones de alturas y áreas de copa

4.3.2.1 Prueba de Normalidad en la variable altura.

En la tabla 4-6, se muestra la prueba de normalidad de Kolmogorov, los datos no siguen una distribución típica para las variables alturas de *Pinus radiata*, dando un valor p menor que 0.10 en las dos colas. También, al comparar las medias de los métodos de observación, se notó una diferencia significativa obteniendo una media para el método 1 (tradicional) con un valor de 15.11 m y para el método 2 (drones) una media de 12.55 m. Además, se obtuvo una desviación estándar que para el método 1 se obtuvo un valor de 3.38 m y para el método 2 un valor de 2.83 m.

Tabla 4-6 Prueba de normalidad para las variables alturas.

Kolmogorov - Smirnov										
Clasificación	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n (1)	n (2)	Media (1)	Media (2)	DE (1)	DE (2)	p (2 colas)
Métodos	Alturas	1	2	133	133	15.11	12.55	3.38	2.83	< 0.01

Realizado por: Paullan L, 2024

4.3.2.2 Normalidad de áreas de copa

En la tabla 4-7, nos muestra que la prueba de normalidad de Kolmogorov, los datos no siguen una distribución típica para la variable áreas de copa de *Pinus radiata*, dando un valor p menor que 0,10. en las dos colas. También, al comparar las medias de los métodos de observación, se notó una diferencia significativa obteniendo una media para el método 1 con un valor de 17.69 m² y para el método 2 una media de 11.75 m². Además, se obtuvo una desviación estándar que para el método 1 se obtuvo un valor de 3.38 m² y para el método 2 un valor de 2.83 m².

Tabla 4-7 Prueba de normalidad para las variables áreas de copa.

Kolmogorov - Smirnov										
Clasificación	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n (1)	n(2)	Media (1)	Media (2)	DE (1)	DE (2)	p (2 colas)
Métodos	Áreas de copa	1	2	133	133	17.69	11.75	8.37	9.73	<0.01

Realizado por: Paullan L, 2024

4.3.3 Prueba Wilkonson para dos muestras en las variables (alturas totales y área de copa)

4.3.3.1 Prueba no paramétrica para la variable altura.

En la prueba no paramétrica de Wilcoxon realizada en el software, para la variable altura arrojó que los datos de las alturas de árboles de *Pinus radiata* D. Don estimadas mediante el método 2 son diferentes a las registradas mediante el método 1. Ya que su p valor es menor que 0.10. Además, se obtuvo un error relativo diferente siendo que el del método 2 sea mayor con 3.90% y el método 1 con 3.77%, verificando en sí que los datos tomados con el método 2 tengan mayor probabilidad de estimar los datos dasométricas para el cálculo de volúmenes para aprovechamiento de la plantación (Ver tabla 4-8).

Tabla 4-8 Prueba de Wilcoxon para 2 muestras independientes en las variables alturas.

Wilcoxon- 2 muestras independientes									
Clasificación	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n (1)	n(2)	Mediana (1)	Mediana (2)	W	p (2 colas)
Métodos	Alturas	1	2	133	133	15.7	12.77	22144	<0.0001
Grados de libertad	Error estándar (1)	Error estándar (2)	CV (1)	CV (2)	Error de muestro (1)	Error de muestreo (2)	Error relativo (1)	Error relativo (2)	
1.978	0.29	0.25	22.4	22.5	0.57	0.49	3.77	3.90	

Realizado por: Paullan L, 2024

4.3.3.2 Prueba no paramétrica para la variable áreas de copa.

Como se muestra en la tabla 4-9, la prueba no paramétrica de Wilcoxon realizada en el software, para la variable área de copa, arrojó que los datos de las áreas de copa de los árboles de *Pinus radiata* D. Don estimadas mediante el método 2 son diferentes a las registradas mediante el método 1. Ya que su p valor es menor que 0.10, Además, se obtuvo un error relativo diferente siendo que el del método 2 sea mayor con 14.12 % y el del método 1 con 8.14 %, verificando en sí que los datos tomados con el método 2 tengan mayor probabilidad de estimar los datos dasométricas para el cálculo de biomasa de la plantación.

Tabla 4-9 Prueba de Wilcoxon para 2 muestras independientes en las variables áreas de copa.

Wilcoxon- 2 muestras independientes									
Clasificación	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n (1)	n(2)	Mediana (1)	Mediana (2)	W	p (2 colas)
Métodos	Alturas	1	2	133	133	15.7	12.77	22144	<0.0001
Grados de libertad	Error estándar (1)	Error estándar (2)	CV (1)	CV (2)	Error de muestro (1)	Error de muestreo (2)	Error relativo (1)	Error relativo (2)	
1.978	0.73	0.84	47.3	82.8	1.44	1.66	8.14	14.12	

Realizado por: Paullan L, 2024

4.3.4 Coeficiente de correlación entre las variables en estudio.

4.3.4.1 Variable altura

El análisis del coeficiente de correlación en la variable altura, representado en la ilustración 4-9, revela un R-cuadrado de 0.91. Este valor sugiere que aproximadamente el 91% de la variabilidad en la variable dependiente, en este caso, el método 1, puede ser explicada por la variable independiente, que es el método 2, tal como se muestra en el modelo de regresión en la ilustración.

Este alto valor de R-cuadrado indica una fuerte correlación entre los dos métodos, ya que está cercano a 1, lo que significa que existe una alta coherencia entre el método 1 y el método 2 en términos de medición de la altura.

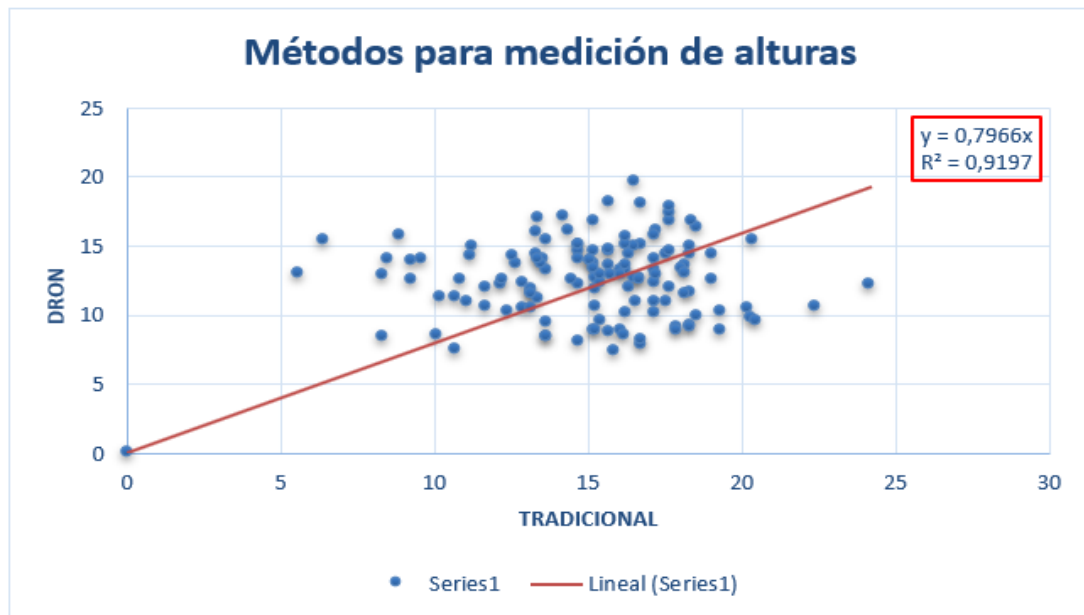


Ilustración 4-9: Coeficiente de correlación de la variable altura entre los métodos tradicionales y drones.

Realizado por: Paullan L, 2024

4.3.4.2 Variable área de copa

El análisis del coeficiente de correlación en la variable áreas de copa, representado en la ilustración 4-10, revela un R-cuadrado de 0.76. Este valor sugiere que aproximadamente el 76% de la variabilidad en la variable dependiente, en este caso, el método tradicional, puede ser explicada por la variable independiente, que es el método llevado a cabo con vehículos aéreos no tripulados, tal como se muestra en el modelo de regresión en la ilustración.

Este alto valor de R-cuadrado indica una fuerte correlación entre los dos métodos, siendo que, está cercano a 1, lo que significa que existe una alta coherencia entre el método tradicional y el método con vehículos aéreos no tripulados en términos de medición de áreas de copa.

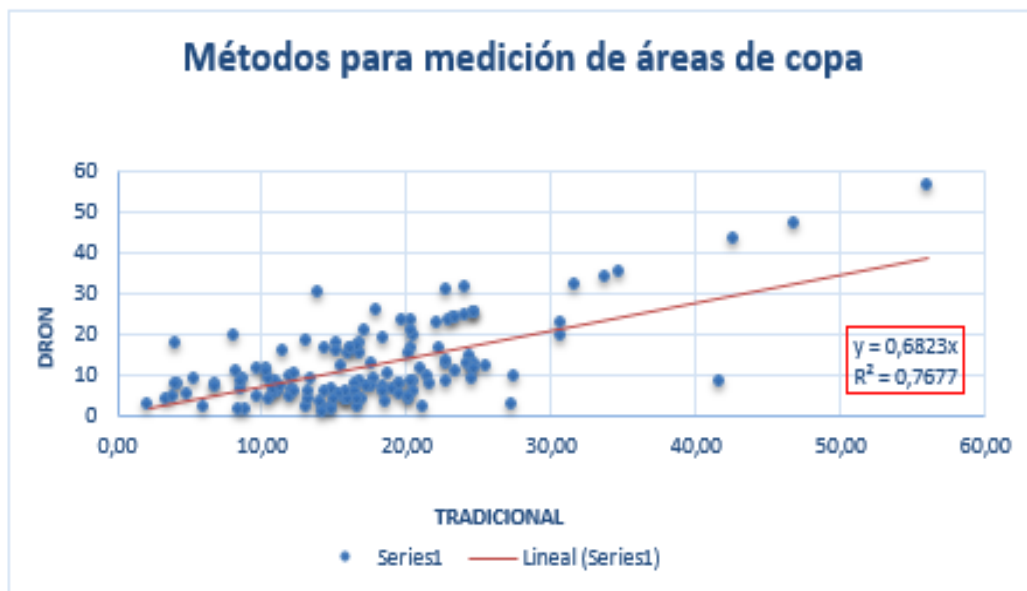


Ilustración 4-10: Coeficiente de correlación de la variable área de copa entre los métodos tradicionales y drones.

Realizado por: Paullan L, 2024

4.4 Comparar los costos del inventario por método tradicional y por el método de vehículos aéreos no tripulados de las variables en estudio.

4.4.1 Calcular el costo por jornal/tiempo para la ejecución de parcelas de muestreo sistemático para las variables altura total y área de copa.

En la tabla 4-10, se puede observar que en los costos por el método 1 para determinar los datos de las variables altura y áreas de copa, se obtuvo un total de 50\$ por día, siendo que para el

transporte se necesita un total de 10\$ con respecto a pasajes o gasolina, también para la alimentación que refleja un valor de 10\$ por día. Además, respectivamente con el sueldo obtuvimos un costo de 30\$ por día desglosando del sueldo de un técnico especializado en la obtención de inventarios forestales.

Tabla 4-10 Costos de inventarios por el método tradicional.

Tradicional	Coto/día
Transporte	10\$
Alimentación	10\$
Sueldo	30\$
Total	50\$

Realizado por: Paullan L, 2024

4.4.2 *Calcular el costo por operador / tiempo para la ejecución de los modelos digitales para las variables altura total y área de copa*

En la tabla 4-12, se detallan los costos relacionados con el método 2, para recopilar información sobre la altura y las áreas de copa. El análisis revela un total de \$800 por día.

De esta suma, \$600 se asignan a la gestión del plan de vuelo del dron, abarcando los costos del operador para planificar y ejecutar los vuelos de manera eficiente. Los \$200 restantes se destinan a los cálculos de las variables en el software correspondiente, cubriendo los costos de procesamiento y análisis de los datos obtenidos durante los vuelos.

Tabla 4-11 Costos de inventarios por el método de vehículos aéreos no tripulados.

Operador	Paga / día
Plan de vuelo	600\$
Cálculo de la variable altura por los softwares	100\$
Cálculo de la variable áreas de copa por los softwares	100\$
Total	800\$

Realizado por: Paullan L, 2024

4.4.3 *Establecimiento de costos totales del inventario por método de las variables en estudio.*

En la ilustración 4-11, se puede visualizar una diferencia significativa con respecto a la obtención de datos de los inventarios forestales en la plantación del estudio, con lo cual, el método 1 se obtuvo un valor total de 50\$ por día, mientras que el método 2 es de 800\$, cabe mencionar que estos costos son estimaciones realizadas en una plantación de *Pinus radiata*, con un área de 10,71 ha.



Ilustración 4-11: Gastos por inventarios forestales entre el método tradicional y vehículos aéreos no tripulados.

Realizado por: Paullan L., 2024

4.5 Discusión

La determinación del tamaño y número de parcelas es crucial en inventarios forestales (Zurita et al., 2022 pág 2) ellos obtuvieron un muestreo sistemático del 2% para los rodales de 2.65ha y 7.43ha, Mientras que en este estudio se calculó una intensidad de muestreo del 4% para un rodal de 10.71ha. Siendo que esta plantación es más densa debido a la especie.

En cuanto a alturas, (Zurita et al., 2022 pág 4) reportan promedios de 34.10m y 36.53m para cada rodal, notablemente mayores a los 16.31m, 14.31m, 16.20m y 13.83m encontrados en este estudio. Estas diferencias entre los proyectos pueden deberse a las distintas especies y condiciones edáficas entre *Pinus oaxacana* de (Zurita et al., 2022) y *Pinus radiata* D. Don.

Los promedios de área de copa que obtuvo (Zurita et al., 2022 pág 4) fueron de $38.6 m^2$ y $52.18 m^2$ que contrastan con el rango de $15.45 m^2$ a $19.07 m^2$ que se obtuvo en este estudio. Las variaciones corresponden a las diferentes especies y edades de los rodales analizados.

En relación con las alturas, el estudio de (Zurita et al., 2022 pág 4) obtuvo promedios de 34.9 m y 34.97 m a través del método 2, lo cual presenta una alta similitud con los valores calculados mediante el método 1. En contraste, en el presente estudio el promedio de alturas estimado por el método 2 fue de 12.11 m, el cual se diferencia en aproximadamente 3 metros de la altura promedio registrada en campo con un valor de 15.11 m. Esta variabilidad entre las mediciones por el método 2 y el método 1 puede atribuirse principalmente a irregularidades complejas en la topografía y

micro-relieve del terreno en la zona de estudio, lo que dificulta una estimación más precisa de las alturas por medio de imágenes aéreas. (Zurita et al., 2022 pág 4)

En lo que respecta al cálculo de las áreas de copa, el estudio de (Zurita et al., 2022 pág 4) obtuvo un promedio de área de copa de 46.10 m^2 utilizando las imágenes de los vehículos aéreos no tripulados. Este valor supera en alrededor de 8 m^2 con las mediciones directas en campo. Por el contrario, en la presente investigación el área de copa estimada por el método 2 fue de 12.77 m^2 , la cual difiere en 2.93 m^2 de la obtenida a partir de las mediciones dasométricas tradicionales en campo. Por lo tanto, se puede constatar que generalmente los valores de áreas de copa derivados mediante el método 2 tienden a ser menores que aquellos estimados directamente en campo con equipos tradicionales de medición (Zurita et al., 2022 pág 4).

Los resultados del estudio concuerdan con lo reportado por (Puliti et al., 2015 pág 5), que también encontraron una tendencia del método 2 a precisar mejor las alturas totales que con el método 1 de los árboles en un inventario forestal, con una Diferencia Agregada (DA) promedio de 19.51% respecto a las mediciones de campo. Asimismo, con una Desviación Media (DM) de 0.28% es comparable a la obtenida por (Puliti et al., 2015 pág 5), de 0.31%.

En cuanto a las áreas de copa, en el estudio se obtuvo un DA de 16.96% que también se relaciona con los obtenidos por (Tejada et al., 2014 pág. 282) quienes reportan una DA de 18.31% para esta variable. De igual manera, el DM que se obtuvo con un valor del 0.12% para el área de copa indica una alta precisión y es coherente con los valores reportados por (Zarco-Tejada et al., 2014).

La estadística descriptiva para normalidad (Zurita et al., 2022 pág 4) menciona que en la prueba de normalidad para las variables alturas entre el método 1 y método 2, tuvo una distribución normal con un p-valor mayor a 0.05. mientras que en este estudio la prueba de normalidad efectúa un p-valor de 0.01 siendo menor al 0.05 con lo cual no tenía una distribución normal. Pero en el área de copa (Zurita et al., 2022 pág 4) obtiene un p-valor menor al 0.05, con lo cual no tiene una distribución normal, confirmando con los resultados en mi estudio que también obtuve que la distribución normal no cumplía con el p-valor.

Con lo cual (Zurita et al., 2022 pág 4) para la variable alturas realizó una prueba paramétrica de t-student mientras que en esta investigación se realizó una prueba no paramétrica para las dos variables en estudio siendo que para (Zurita et al., 2022 pág 4) obtuvo un p-valor positivo que menciona de que no hay diferencias significativas en los valores de alturas entre el método 1 y 2, mientras que en este estudio se obtuvo un p-valor menor añadiendo que si hay diferencias

significativas en las variables altura. Siendo que, en las variables áreas de copa contribuye con (Zurita et al., 2022 pág 4) que obtuvo un p-valor menor al 0.5 entre el método 1 y 2, al igual de lo que se obtuvo en este estudio. Mencionando que si hay diferencias significativas en la variable área de copa.

En los coeficientes de correlación (Zurita et al., 2022 pág 5) obtuvo una fuerte correlación en el método independiente (2) con el método dependiente (1) con un R2 de 0.90 para la variable altura, siendo que, en este estudio fue superior arrojando un valor de R2 de 0.91 teniendo una alta correlación entre las dos metodologías. (Zurita et al., 2022 pág 5) también nos menciona que en las variables áreas de copa resalta con un R2 de 0.83 siendo superior a las calculadas en este estudio con un R2 de 0.76 dando una correlación más fuerte que en las variables alturas. (Zurita et al., 2022 pág 5) nos menciona que la diferencia encontrada se debe a las condiciones de sitio y el crecimiento de cada arbolado, añadiendo a esto que cada rodal tiene diferentes microclimas.

CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado, se concluye que el método 2 resultó efectivo para caracterizar las variables dasométricas de interés en la plantación forestal estudiada. Mediante un adecuado procedimiento de muestreo aleatorio estratificado con una intensidad del 4%.

La medición rigurosa de alturas totales por medio de clinómetro digital en cada parcela evidenció diferencias en la altura de los árboles dependiendo de su topografía, con promedios que oscilaron entre 13.83 m y 16.31 m. Asimismo, el cálculo de las áreas de copa a partir de mediciones de diámetro N-S y E-O, reveló valores entre 15.45 m² y 19.07 m².

Este estudio ha destacado la efectividad del empleo de vehículos aéreos no tripulados, para la evaluación de alturas y áreas de copa de árboles de *Pinus radiata* D. Don. Con el procesamiento de datos en los softwares, pudimos obtener productos fotogramétricos precisos, incluyendo ortofotos, modelos digitales de terreno y superficie, y el índice de vegetación normalizada (NDVI). No obstante, se identificaron diferencias en las mediciones entre el método 1 y 2, principalmente atribuidas a la complejidad topográfica del terreno y a que no existió un manejo silvicultural en la plantación.

El análisis estadístico realizado evidenció diferencias significativas entre las estimaciones de variables dasométricas entre el método 2 y el método 1. En altura total se halló una Diferencia Agregada de 33.58% y una Desviación Media de 0.28%, indicando una mejor precisión con el método 2. Para la variable área de copa, arrojaron una Diferencia Agregada de 16.96% y Desviación Media de 0.12%, revelando también una diferencia entre las dos metodologías siendo que las estimadas mediante drones sea más precisa que las realizadas en campo.

Las pruebas de normalidad y la prueba de Wilcoxon confirmaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos métodos para las dos variables ($p < 0.01$). No obstante, los altos coeficientes de correlación (R^2 altura = 0.91 y R^2 área copa = 0.76) denotan consistencia y coherencia entre las mediciones con drones y las tomadas en campo. Aunque se verificaron diferencias entre el método 2 y 1 los vehículos aéreos no tripulados demostraron ser una herramienta útil y precisa para el inventario forestal.

Se demostró que el uso de drones para medir los árboles tiene un costo más elevado que el método tradicional. Por lo que, enviar a un técnico a una plantación a tomar datos de altura y áreas de copa de los árboles cuesta alrededor de 50 dólares por día (considerando transporte, comida y

salario), al contrario que la toma de datos con el método 2 y procesamientos de los mismos en los softwares cuesta alrededor de los 800 dólares diarios.

Esta gran diferencia de 750 dólares por día se debe principalmente a que usar drones es más costoso. Por lo que, hay que planificar bien los vuelos, después procesar todas las fotos e imágenes que toma el dron, y finalmente extraer los datos dasométricos con programas especiales.

RECOMENDACIONES

Es fundamental comprender la topografía del área de estudio para mejorar la precisión de las mediciones con vehículos aéreos no tripulados en comparación con métodos tradicionales. Se recomienda aumentar los puntos de control en campo y ajustar los planes de vuelo para capturar las variaciones del relieve. Estas medidas permitirán determinar umbrales de heterogeneidad topográfica del terreno para la toma de datos en terrenos complejos.

Se recomienda la implementación de un nuevo algoritmo denominado Índice de Toma de Copas de Drones (ITCD), el cual está diseñado para mejorar la precisión en la delimitación de las copas de los árboles en áreas forestales. Este algoritmo se propone como una solución para reducir las discrepancias observadas entre las mediciones realizadas mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT) y los métodos tradicionales de campo.

El ITCD se espera que tenga una eficacia superior a la de los métodos empleados en el estudio actual, lo que llevaría a resultados más precisos. Al reducir la diferencia entre los datos obtenidos en el campo y los recopilados por los drones, se mejorarán los procesos de inventario forestal. Esto, a su vez, contribuirá a una gestión forestal más precisa y eficaz.

Se recomienda realizar el análisis estadístico en un software libre (R-studio), para una mejor interpretación de los resultados generados en el programa.

BIBLIOGRAFÍA

1. **CABRERA, J., LAMELAS, M.T., MONTEALEGRE, A.L. Y DE LA RIVA, J. 2014.** *Estimación de Variables dasométricas a partir de datos LiDAR PNOA en masas regulares de Pinus halepensis Mill.* s.l. : XVI Congreso Nacional de Tecnología de la, 2014.
2. **DIAZ, ET AL. 2018.** *Inventario Forestal.* Chota-Peru : Universidad Nacional Autónoma de Chota, 2018.
3. **DURAN. 2018.** *Factores de sitio y productividad de Pinus radiata a escala predial en la región del Biobío, Chile.* Chile : Universidad Austral de Chile, 2018.
4. **FAO. PASCA, T.M. 1974.** 18, USA : La explosión informativa y AGRIS forestal, 19 de julio de 1974, Vol. 26. 105.
5. **FARLEY, KATHLEEN A. 2007.** Grasslands to Tree Plantations. *Forest Transition in the Andes of Ecuador.* San Diego : Annals of the Association of American Geographers, 2007.
6. **FLORES, SASKIA, URSULA GROTEN, SASKYA LUGO Y PATRICIO MENA VÁSQUEZ. 2012.** Gente, vida y agua en los cerros. [aut. libro] Ursula Groten, Saskya Lugo y Patricio Mena Vásquez Saskia Flores. *Una sistematización del Proyecto Páramo Andino en el Ecuador.* Quito : EcoCiencia, 2012.
7. **HOBBY. 2023.** Drones Agricultores. *Drones Agricultores.* [En línea] 20 de diciembre de 2023. [Citado el: 20 de Diciembre de 2023.] <https://www.hobbytuxtla.com/drones-agricultores/mavic-3-multispectral/>.
8. **MLR. 2020.** MLR. *MLR.* [En línea] Diciembre de 01 de 2020. [Citado el: 05 de diciembre de 2023.] <https://mlr.com.ni/los-multiples-beneficios-ambientales/?lang=en%29>.
9. **MONTANER, D. 2006.** *Segmentación automática de copas de árboles en plantaciones de Pinus radiata (d. don) usando fotografías aéreas digitales.* Santiago-Chile : Universidad de Chile, 2006.

10. **NOBOA, S. 2019.** Estimación de altura de frailejones (*Espeletia pycnophylla*) en el volcán Chiles mediante UAV. *Estimación de altura de frailejones (Espeletia pycnophylla) en el volcán Chiles mediante UAV*. [En línea] 2019. [Citado el: 3 de Diciembre de 2023.] file:///C:/TESIS/TESIS_NOBOA.pdf.
11. **Ortega, Á. 2018.** *Algoritmo para la generación de ortomosaicos a partir de imágenes aéreas tomadas por drones en la agricultura*. Santiago, Chile : s.n., 2018.
12. **PARRA, Y. 2021.** *Procesamiento de imágenes digitales obtenidas con rps para análisis multiespectral de la parcela de monitoreo permanente localizada en el parque natural chicaque*. Bogota : Universidad Distrital Francisco Jose De Caldas , 2021.
13. **PRADO, J. 2016.** *Plantaciones Forestales Más Allá De Los Arboles* . Chile : Colegio de Ingenieros Forestales de Chile, 2016.
14. **PROPOPLUS. 2020.** PROPOPLUS. *PROPOPLUS*. [En línea] 28 de Agosto de 2020. [Citado el: 05 de diciembre de 2023.] <https://propopulus.eu/en/benefits-of-plantation-forests/>.
15. **PULITI, S. ET AL. 2015.** *Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. Remote Sensing*. Noruega : Norwegian University of Life Sciences, 2015.
16. **RIESGO Y DIAZ. 2007.** *Características físicas de la madera de pino procedente de raleos en el noroeste de España*. España : Maderas, Ciencias y Tecnología, 2007.
17. **SALVADOR, ET AL. 2019.** *Forest monitoring by means of Permanent Plots for Forestry Research in Chihuahua, México*. Chihuahua : Revista mexicana de ciencias forestales, 2019.
18. **TEJADA ET AL. 2014.** *Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV)*. Cordova : Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), 2014.
19. **TIPANLUISA. 2014.** *“Inventario forestal para la identificación de especies maderables del bosque de la estación experimental central de la amazonía INIAP, cantón Joya de los Sacha, provincia de Orellana, periodo 2014*. Latacunga : Universidad Técnica de Cotopaxi, 2014.

20. **TITUAÑA Y NICOLALDE. 2019.** *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología.* 98, Sucumbios : ISSN, 2019, Vol. 8. 1390-5600.
21. **VICUÑA, E. Y NARANJO, O. 2008.** *Deteccion y Georreferenciacion de Llamadas de Emergencia para El Benemerito Cuerpode Bomberos de Azogues.* Cuenca : Universidad del Azuay, 2008.
22. **VINUEZA. 2013.** Ecuadorforestal. *Ecuadorforestal.* [En línea] 06 de Marzo de 2013. [Citado el: 05 de diciembre de 2023.] <https://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-13-pino-pinus-radiata/#:~:text=%C3%81rbol%20que%20alcanza%20hasta%2060m%20de%20altura%20y,c%3%B3nica%2C%20monop%20dica.%20Hojas%20aciculares%20en%20fasc%20%20ADculos%20d.>
23. **WABO, E. 2023.** Medición de diámetros. *Medición de diámetros.* [En línea] Curso de Biometría Forestal, 19 de Diciembre de 2023. [Citado el: 19 de Diciembre de 2023.] <file:///C:/TESIS/WABO%20Diametros.pdf>.
24. **ZURITA, ET AL. 2022.** *Estimación de variables dasométricas en rodales bajo manejo forestal con vehículos aéreos no tripulados.* Oaxaca-Mexico : FIGEMPA, 2022.



ANEXOS

ANEXO A Estimación de alturas con método tradicional



ANEXO B Estimación de alturas y áreas de copa mediante vehículos aéreos no tripulados



ANEXO D Medición de áreas de copa mediante método tradicional.



ANEXO C Vehículo aéreo no tripulado, para medir variables dasométricas.





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 06/06/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Jasson Luis Paullan Borja
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Recursos Naturales
Carrera: Ingeniería Forestal
Título a optar: Ingeniera Forestal
 Ing. Norma Ximena Lara Vásquez Directora del Trabajo de Titulación
 Ing. Hernán Eriberto Chamorro Sevilla Asesor del Trabajo de Titulación

