



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i4.4145>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

Comparison of total heights and crown areas in a plantation of pinus radiata d. Don located in the Palmira parish, province of Chimborazo

Comparaçãõ de alturas totais e áreas de copa em plantio de pinus radiata d. Don localizado na freguesia de Palmira, província de Chimborazo

Jasson Luis Paullan-Borja ^I
jasson.paulla@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0003-5654-6571>

Hernán Eriberto Chamorro-Sevilla ^{II}
hernan.chamorro@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8531-7116>

Norma Ximena Lara-Vásquez ^{III}
norma.lara@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8381-0401>

Fabián Marcelo Remache-Reinoso ^{IV}
marcelo.remache@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-7320-1025>

Correspondencia: jasson.paulla@esPOCH.edu.ec

***Recibido:** 21 de octubre de 2024 ***Aceptado:** 19 de noviembre de 2024 * **Publicado:** 07 de diciembre de 2024

- I. Ingeniero Forestal, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Instituto de Investigación, Ecuador.
- II. Máster en Sistemas de Información Geográfica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Instituto de Investigaciones, Ecuador.
- III. Magíster en Ciencia, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Recursos Naturales, Ecuador.
- IV. Ingeniero Forestal, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Instituto de Investigación, Ecuador.

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 para la especie *Pinus radiata* D. Don. En una plantación ubicado en la parroquia Palmira, provincia de Chimborazo, donde no se lleva a cabo un manejo forestal. Se tomó una muestra de 133 árboles seleccionados de un área total de 10.71 ha donde se capturaron y procesaron las fotografías aéreas, 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 claves: variables dasométricas; manejo forestal; dron.

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. The purpose of this study was to estimate dasometric variables using images obtained with an unmanned aerial vehicle (drone), through a photogrammetric process integrated into a geographic information system for the species *Pinus radiata* D. Don. In a plantation located in the Palmira parish, province of Chimborazo, where forest management is not carried out. A sample of 133 trees selected from a total area of 10.71 ha was taken where aerial photographs were captured and processed, height (Ht) and crown area (AC) were measured in a traditional way to validate the digital information. The results of the comparison of both methods through the Wilcoxon test indicate 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 R2 of 0.91 and for the canopy area variable, an R2 of 0.76. Therefore, in the costs between the two methodologies there

was a difference of \$750, with the traditional method being \$50 more effective per day than the use of unmanned aerial vehicles.

Keywords: dasometric variables; forest management; drone.

Resumo

O constante avanço da tecnologia tem permitido sua aplicação na área florestal, o que permite caracterizar a vegetação e realizar inventários e manejo florestal. O objetivo deste estudo foi estimar variáveis dasométricas a partir de imagens obtidas com veículo aéreo não tripulado (drone), por meio de processo fotogramétrico integrado a um sistema de informações geográficas para a espécie Pinus radiata D. Don. Numa plantação localizada na freguesia de Palmira, província de Chimborazo, onde não se realiza a gestão florestal. Foi retirada uma amostra de 133 árvores selecionadas de uma área total de 10,71 ha onde foram capturadas e processadas fotografias aéreas, medidas de altura (Ht) e área da copa (AC) de forma tradicional para validar as informações digitais. Os resultados da comparação dos dois métodos através do teste de Wilcoxon indicam que a estimativa da altura e da área da copa apresentou diferenças significativas ($p < 0,01$). Além disso, as correlações entre os dois métodos foram fortes, aproximando-se de 1. Para as variáveis altura, R^2 de 0,91 e para a variável área de copa, R^2 de 0,76. Portanto, nos custos entre as duas metodologias houve uma diferença de US\$ 750, sendo o método tradicional US\$ 50 mais eficaz por dia do que o uso de veículos aéreos não tripulados.

Palavras-chave: variáveis dasométricas; manejo florestal; drone.

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).

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

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de *Pinus radiata* D. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

características biofísicas fundamentales, como altitudes elevadas y ubicación tropical, la flora y fauna de los páramos exhiben variaciones significativas (Flores et al., 2007).

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).

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 (Díaz et al., 2018).

Metodología

a. Área de Estudio

La parroquia Palmira se ubica en los Andes Ecuatorianos, en la provincia de Chimborazo, cantón Guamote. Sus coordenadas geográficas con: Latitud 1° 73' 30", Longitud 78° 46' 49" y Altitud de 2560-4200 msnm. (Instituto Geográfico Militar, 2015). Limita al norte con la parroquia Cebadas y la Matriz (Guamote), al sur la parroquia Tixán, al este la parroquia Cebadas y al Oeste el cantón Guamote y Pallatanga, tiene una extensión de 27.451,29.

De acuerdo a su clima corresponde a un invierno frío en los meses de octubre a mayo, verano cálido seco y ventoso de junio a septiembre. La mayoría del área contiene pendientes pronunciadas en ciertos casos sobrepasan el 50% y en cuanto a comunidades sus pendientes superan el 10%.

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia
 palmira, provincia de Chimborazo

Latitud	750612
Longitud	9770161
Temperatura	9-13 C
Altitud	2560-4200 msnm
Precipitación	681,35 mm
Velocidad del viento	13,46 m/s
Humedad relativa	96,8%
Clima	Invierno húmedo frío en los meses de octubre a mayo, verano cálido seco y ventoso de junio a septiembre.
Topografía	La mayor parte del área presenta pendientes pronunciadas las que en algunos casos sobrepasan el 50%. Los territorios de las comunidades tienen pendientes superiores al 10%

Fuente: PDOT Palmira (2019)

Una vez localizada la plantación, se llevó a cabo un recorrido exhaustivo y un reconocimiento detallado del rodal, se realizó un análisis in-situ de las características dasométricas de los árboles presentes en la zona de estudio, asegurando el cumplimiento de parámetros fundamentales para una evaluación precisa. Estos parámetros incluyeron la homogeneidad del rodal, con especial atención a los diámetros de los troncos, así como la medición de las alturas totales y comerciales de los árboles. Este proceso fue fundamental para establecer una base de datos confiable, que permitirá realizar posteriores análisis sobre el crecimiento, desarrollo y estado general de la plantación. Además, la observación directa en el sitio brindó la oportunidad de identificar y registrar cualquier factor ambiental o condición específica del terreno que pudiera influir en el desarrollo de los árboles (Durán et al., 2018).

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de *Pinus radiata* d. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

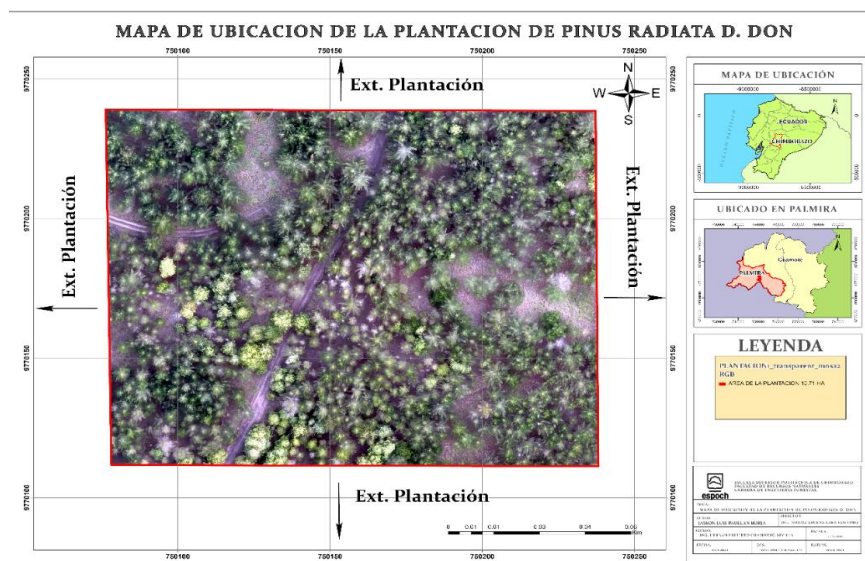


Figura 1: Ubicación plantación *Pinus radiata* D. Don

b. Delimitación y georreferenciación

Se realizó un recorrido en la plantación de *Pinus radiata* en el predio de la comunidad Galte 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 (Cabrera et al., 2014)

c. 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, 10.71 ha es el 100%, solo el 4% es para ejecutar el muestreo sistemático en la plantación de Palmira.

d. Determinación de unidades de muestreo

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. (FERREIRA, O.1994).

e. Estimación de alturas totales de manera tradicional

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 verificó 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.

f. Áreas de copas

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 $A_c = \pi 4 (D_c)^2$ correspondiente a cada individuo, así obtuve de esta manera las áreas de copa respectivas.

g. Planificación del vuelo mediante RPAS

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 realizó 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 asegura un trasplante del 70 % tanto vertical como horizontal entre las fotografías (Hobby et al., 2023).

h. 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), logramos la captura de imágenes RGB (Montaner et al., 2006).

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.

i. Procesamiento y generación 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 (Parra et al., 2021).

j. Cálculo de alturas mediante ArcGIS Pro

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 (Noboa et al., 2019)

k. Cálculo de áreas de copa mediante 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

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

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 (Montaner et al., 2006)

Resultados y discusión

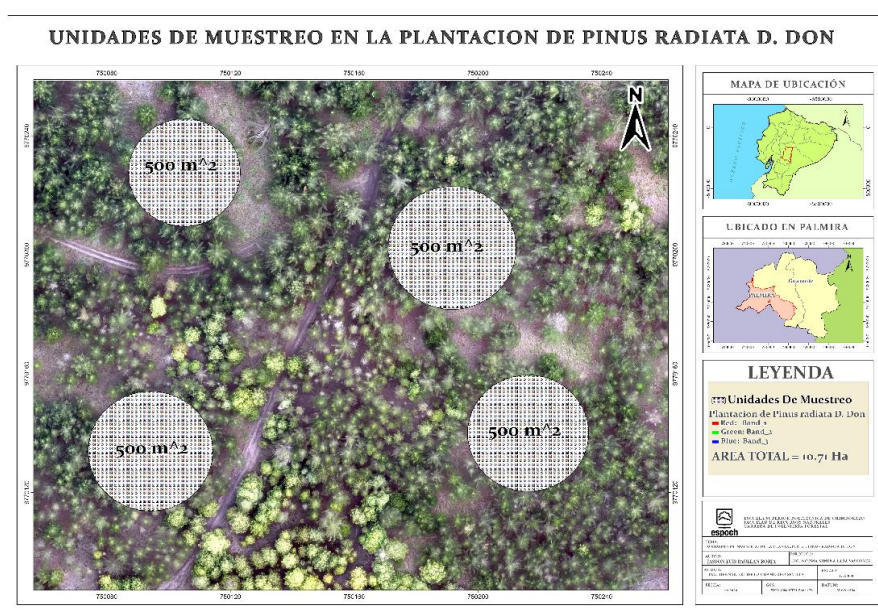


Figura 2: Localización Unidades de muestreo

Como se muestra en la figura 2, 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).

a. Altura total y Diámetro de copa de manera tradicional

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

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira provincia de Chimborazo

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.

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

Tabla 1. Promedio alturas totales por parcela

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 $Ac=\pi4 (Dc)2$ 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.

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

Tabla 2. Promedio áreas de copas por parcela

b. Productos fotogramétricos

Ortomosaico de plantación forestal

Como se muestra en la ilustración 3, se generó un ortomosaico 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.

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

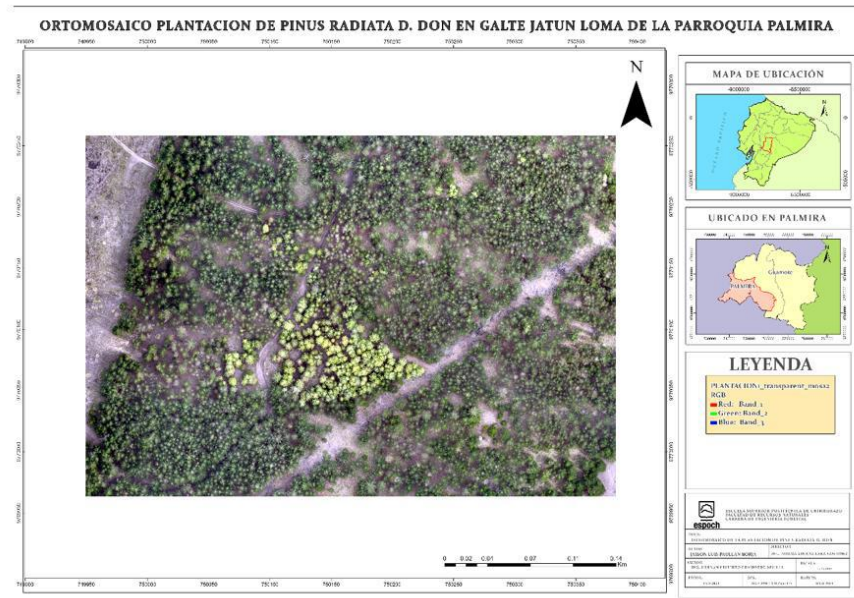


Figura 3. Ortomosaico plantación forestal

DTM (Modelo Digital de Terreno)

La ilustración 4, 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.

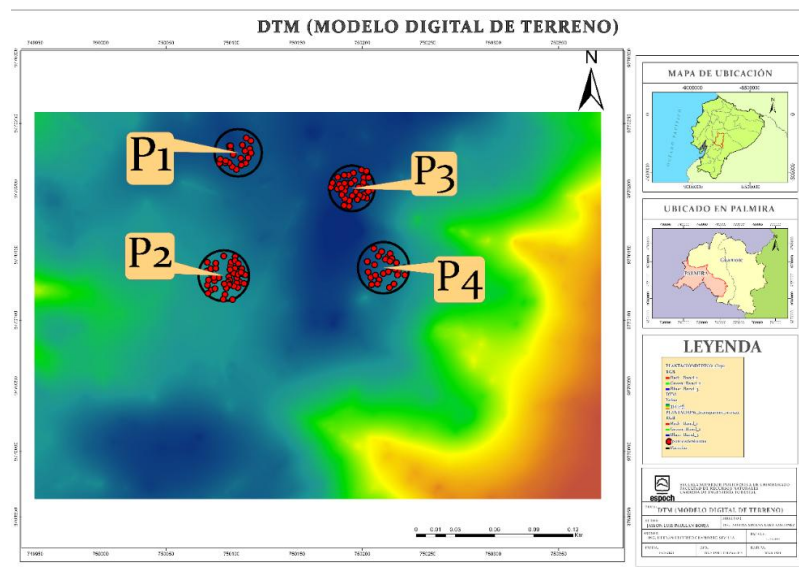


Figura 4. Modelo Digital de Terreno

DSM (Modelo Digital de Superficie)

Como se muestra en la ilustración 5, 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.

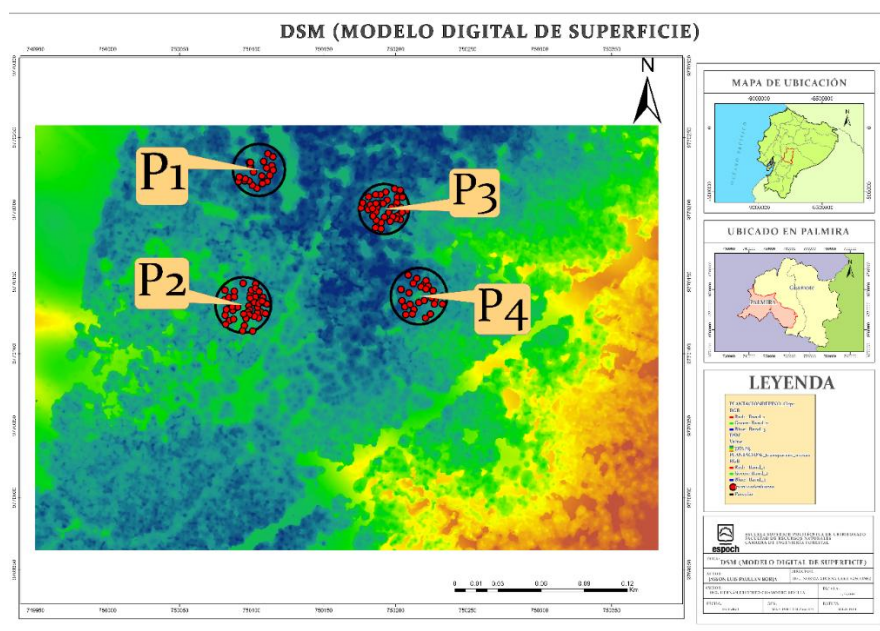


Figura 5. Modelo Digital de Superficie

NDVI (Índice de Vegetación Normalizada)

Como se representa en la ilustración 6, 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.

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira provincia de Chimborazo

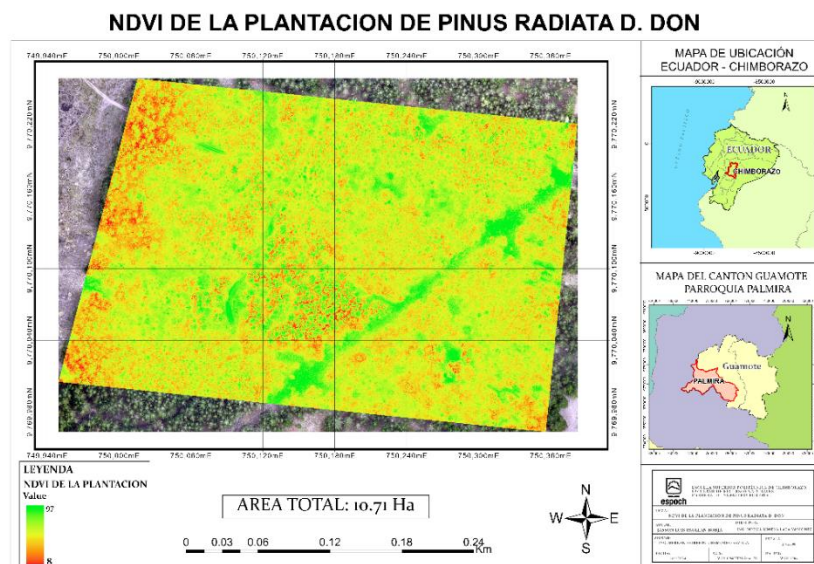


Figura 6. Estado de salud mediante NDVI

c. Cálculo de alturas y áreas de copas mediante RPAS

Alturas totales

Como se muestra en la tabla 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.

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

Tabla 3. Promedio alturas totales mediante RPAS

Áreas de copa

Como se muestra en la ilustración 7, 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.

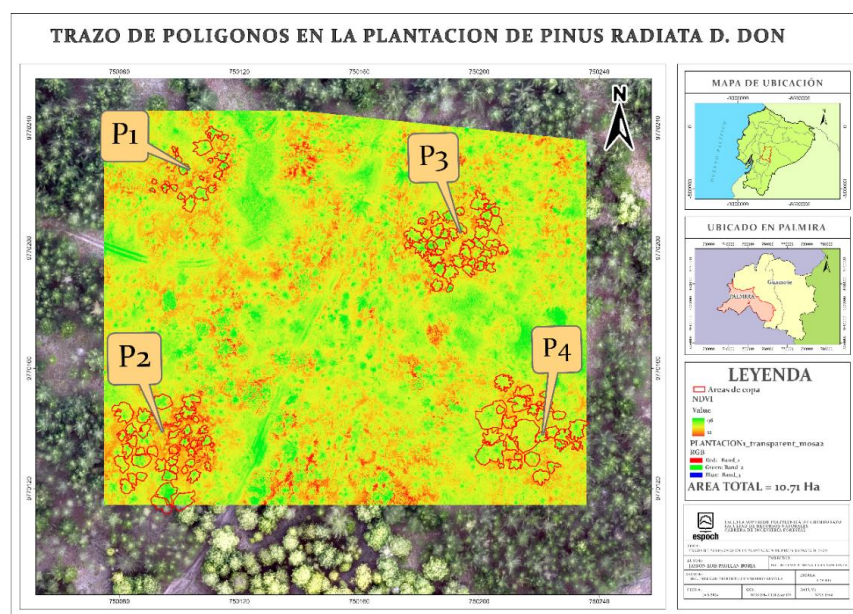


Figura 7. Polígonos para determinar áreas de copas

Reclasificación de áreas de copa mediante clasificación supervisada

Como se muestra en la ilustración 8, 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.

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

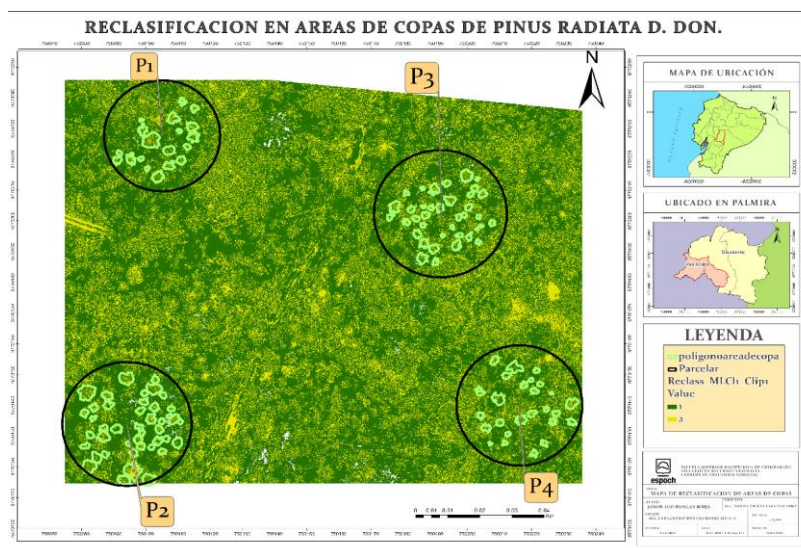


Figura 8. Polígonos para determinar áreas de copas

Ráster a polígono en las áreas de copa

Como se muestra en la ilustración 9, 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.

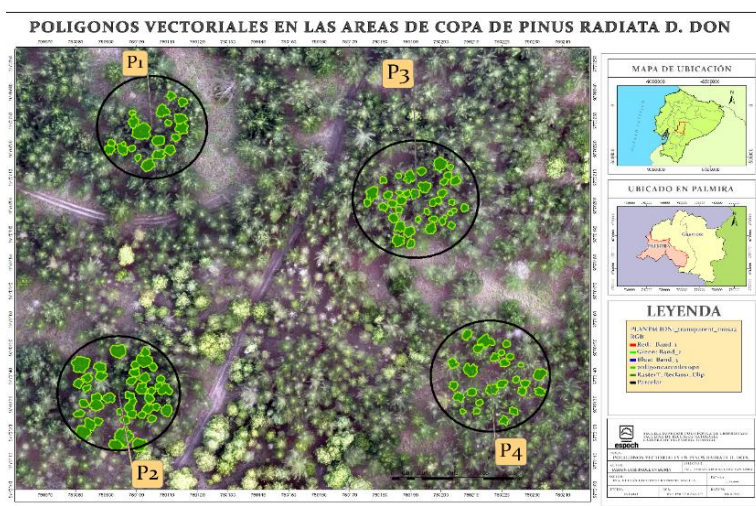


Figura 9. Polígonos para determinar áreas de copas

Áreas de copa

Como se muestra en la tabla 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 .

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

Tabla 4. Promedio áreas de copa mediante RPAS

Coefficiente de correlación entre las variables en estudio

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.

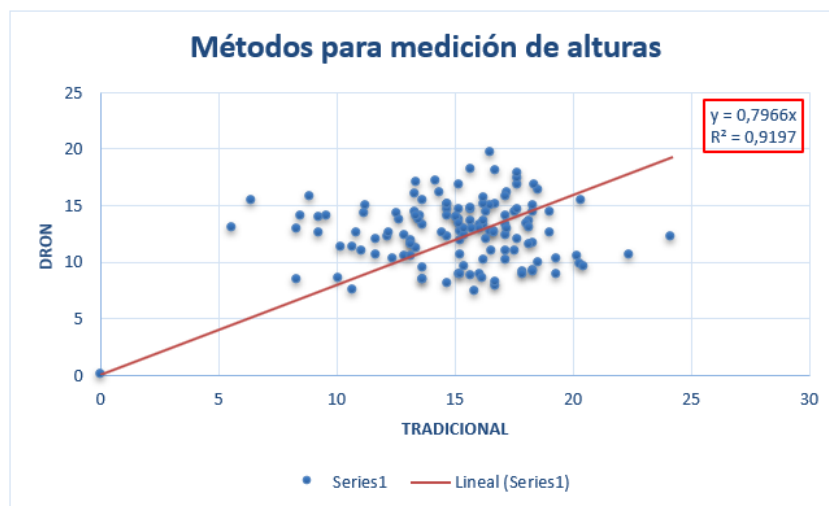


Figura 10. Correlación entre método tradicional y RPAS

Variable área de copa

El análisis del coeficiente de correlación en la variable áreas de copa, representado en la ilustración 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.

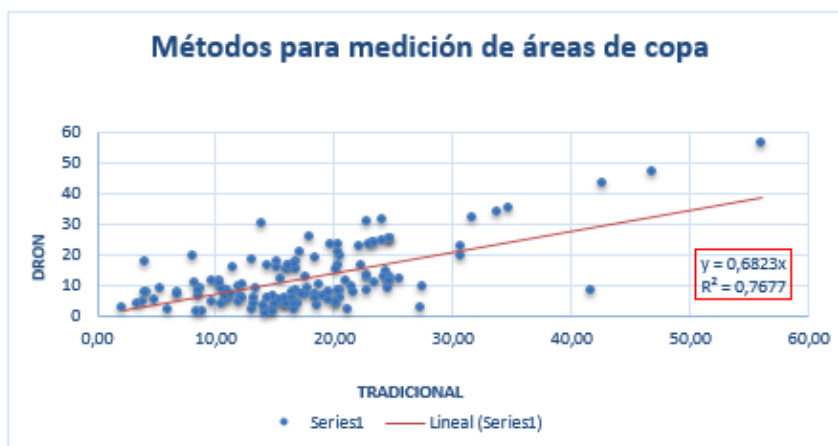


Figura 11. Correlación áreas de copa método tradicional y RPAS

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

La determinación del tamaño y número de parcelas es crucial en inventarios forestales (Zurita et al., 2022) 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) 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) 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) 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)

En lo que respecta al cálculo de las áreas de copa, el estudio de (Zurita et al., 2022) 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).

Los resultados del estudio concuerdan con lo reportado por (Puliti et al., 2015), que también encontraron una tendencia del método 2 a precisar mejor las alturas totales que con el método 1 de

Comparación de alturas totales y áreas de copa en una plantación de pinus radiata d. Don ubicada en la parroquia palmira, provincia de Chimborazo

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), 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) 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) 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) para la variable alturas realizo 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) 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) 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) obtuvo una fuerte correlación en el método independiente con el método dependiente 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) 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) 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

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.

Referencias

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://propoplus.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%3Bdica.%20Hojas%20aciculares%20en%20fasc%C3%ADculos%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.