

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



Estimación de biomasa mediante vehículos aéreos no tripulados en el Taller de Enseñanza e Investigación de la UNTUMBES

TESIS para optar el título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente

AUTOR: Bach. Luis Alvaro Valladolid Luna

Tumbes, 2026

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



Estimación de biomasa mediante vehículos aéreos no tripulados en el Taller de Enseñanza e Investigación Forestal de la UNTUMBES

Tesis Aprobada en forma y estilo por:

Mg. Cesar Yoel Feijoo Carrillo (Presidente)

Mg. Jhon Henry Rimaycuna Ramírez (Secretario)

Dr. Miguel Antonio Puestas Chully (Vocal)

Tumbes, 2026

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



Estimación de biomasa mediante vehículos aéreos no tripulados en el Taller de Enseñanza e Investigación Forestal de la UNTUMBES

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

Bach. Luis Alvaro Valladolid Luna (Autor)

Dr. Miguel Antonio Puestas Chully (Asesor)

Mg. Antoni David Jiménez Dios (Co asesor)

Tumbes, 2026

Copia del Acta de sustentación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO
SECRETARIA ACADÉMICA



"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL

En Tumbes, a los veinte días del mes de febrero de dos mil veintiséis, siendo las 09:00 horas, con 15 minutos (), de la 11:00 a.m., de forma presencial en el aula F-1, en las instalaciones de la escuela de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, se reunieron el Jurado Calificador, designado por Resolución N° 097-2024/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, **Mg. Cesar Yoel Feijoo Carrillo** (Presidente), **Mg. Jhon Henry Rimaycuna Ramirez** (Secretario), **Dr. Miguel Antonio Puestas Chully** (Vocal), , reconociendo en la misma resolución además, al **Dr. Miguel Antonio Puestas Chully**, como **Asesor** y al **Ing. Jiménez Dios Antoni David**, como **Co-asesor**, se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis, "**Estimación de biomasa mediante vehículos aéreos no tripulados en el Taller de Enseñanza e Investigación Forestal de la UNTUMBES**", para optar el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, presentado por el **Bach. Luis Alvaro Valladolid Luna**, Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo N° 75 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara al **Bach. LUIS ALVARO VALLADOLID LUNA**; Aprobado, por Unanimidad, con el calificativo BUENO.

Se hace conocer al sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que al jurado le indica.
 En consecuencia, queda Apto para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del Título Profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.
 Siendo las Trece horas y Cinco minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 20 - Febrero - 2026

 Mg. Cesar Yoel Feijoo Carrillo DNI N° <u>47466283</u> CODIGO ORCID <u>0009-0007-6197-123X</u> Presidente	 Mg. Jhon Henry Rimaycuna Ramirez DNI N° <u>70047386</u> CODIGO ORCID <u>0000-0002-2767-9133</u> Secretario
 Dr. Miguel Antonio Puestas Chully DNI N° <u>02660522</u> CODIGO ORCID <u>0000-0003-1979-9572</u> Vocal	

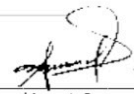
C.C. - JURADOS (03) -ASESOR Y(CO)-INTERESADO-ARCHIVO (Decanato)
 S.acad.

Informe de Similitud

Estimación de biomasa mediante vehículos aéreos no tripulados en el Taller de Enseñanza e Investigación de la UNTUMBES

por Luis Álvaro Valladolid Luna

Fecha de entrega: 15-ago-2025 01:39p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2730120812
Nombre del archivo: Informe_final_Tesis_Alvaro_Valladolid.pdf (4.43M)
Total de palabras: 7622
Total de caracteres: 43555



Dr. Miguel Antonio Puestas Chully
Asesor de Tesis
ORCID ID: 0000-0003-1979-9572

Estimación de biomasa mediante vehículos aéreos no tripulados en el Taller de Enseñanza e Investigación de la UNTUMBES

INFORME DE ORIGINALIDAD

18 %	17 %	9 %	9 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3 %
2	www.coursehero.com Fuente de Internet	1 %
3	id.scribd.com Fuente de Internet	1 %
4	www.researchgate.net Fuente de Internet	1 %
5	datospdf.com Fuente de Internet	1 %
6	riuma.uma.es Fuente de Internet	1 %
7	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	1 %
8	pmcarbono.org Fuente de Internet	1 %
9	api-repositorio.unia.edu.pe Fuente de Internet	1 %
10	"Inventarios Forestales Nacionales de América Latina y el Caribe", Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021 Publicación	1



Dr. Miguel Antonio Puestas Chully
Asesor de Tesis
ORCID ID: 0000-0003-1979-9572

11	Submitted to Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador Trabajo del estudiante	1%
12	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
13	Eleoven Arias Aguila, Rosemary Vela Cardich, Lia Ramos Fernandez. "Desarrollo y aplicación del modelamiento de calidad del agua con GESCAL-AQUATOOL en el río Lurín-Lima-Perú", Tecnología y ciencias del agua, 2022 Publicación	<1%
14	Submitted to usach Trabajo del estudiante	<1%
15	infocarbono.minam.gob.pe Fuente de Internet	<1%
16	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
17	keneamazon.net Fuente de Internet	<1%
18	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1%
19	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1%
20	Stone, Austin. "A Methodology for Scaling Agricultural Biomass From Ground to Regional Scales Using Remote Sensing and Machine Learning Analysis", University of Georgia, 2023 Publicación	<1%
21	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1%
22	dl.djicdn.com Fuente de Internet	



Dr. Miguel Antonio Puestas Chully
Asesor de Tesis
ORCID ID: 0000-0003-1979-9572

		<1%
23	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
24	Submitted to Universidad Industrial de Santander UIS Trabajo del estudiante	<1%
25	purl.org Fuente de Internet	<1%
26	repositorio.unica.edu.pe Fuente de Internet	<1%
27	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1%
28	BENITES HIDALGO JULIO CESAR. "Informe de Gestión Ambiental del Servicio de Protección contra Inundaciones y Erosiones del Centro Poblado de Casa Blanqueada e Infraestructura de Irrigación-IGA0014582", R.D.G. N° 255-2015-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2021 Publicación	<1%
29	cicy.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	<1%
30	ojs.upv.es Fuente de Internet	<1%
31	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
32	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1%
33	comisiones.ipgh.org Fuente de Internet	<1%


 Dr. Miguel Antonio Puestas Chully
 Asesor de Tesis
 ORCID ID: 0000-0003-1979-9572

34 repositorio.espe.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

35 www.dspace.uce.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

36 repositorio.unal.edu.co <1 %
Fuente de Internet

37 repositorio.uniandes.edu.co <1 %
Fuente de Internet

Excluir citas Activo Excluir coincidencias < 15 words
Excluir bibliografía Activo



Dr. Miguel Antonio Puestas Chully
Asesor de Tesis
ORCID ID: 0000-0003-1979-9572

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado, especialmente para mis padres, e esposa y mi hijo, que fueron quien me ayudaron en el proceso de culminación de mis estudios superiores y gracias a ellos pude culminar satisfactoriamente mi carrera.

AGRADECIMIENTO

Especialmente a agradecer a dios, porque en el trascurso de todos mis estudios me ha guiado y protegido siempre, por otro lado, agradecer a todos los docentes de la escuela de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, por las enseñanzas aplicadas y por ayudarme en este proceso de estudios en la formación académica que me brindaron. Y a todas las personas que me ayudaron a concluir este proyecto.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	xv
II. REVISION DE LITERATURA	16
2.1. Bases teóricas – científicas.....	16
2.1.1. Teledetección y fotogrametría.....	16
2.1.2. Aeronave pilotada a distancia (RPA)	17
2.1.3. Biomasa	19
2.2. Antecedentes:	20
III. MATERIALES Y METODOS.....	22
3.1. Equipos y materiales.....	22
3.1.1. Software	22
3.1.2. Equipos	22
3.1.3. Materiales	23
3.2. Tipo de investigación.....	23
3.3. Área de estudio.....	23
3.4. Población y muestra.....	24
3.5. Distribución de unidades de muestreo	24
3.6. Unidades de muestreo	24
3.7. Metodología	25
3.7.1. Parámetros de vuelo.....	25
3.7.2. Procesamiento de fotografías aéreas	26
3.7.3. Clasificación supervisada de ortofotos	26
3.7.3.1. Segmentación OBIA (clasificación basada en objetos).....	26
3.7.3.2. Datos de entrenamiento y validación	27
3.7.3.3. Clasificación de Random Forest (RF).....	27
3.7.3.4. Evaluación de la precisión del clasificador.....	28
3.7.4. Índices de vegetación	28
3.7.5. Estimación de biomasa y carbono	28
3.7.5.1. Parámetros de evaluación	28
3.7.5.2. Variables dasométricas	29
3.7.5.3. Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa.....	29
3.7.6. Correlación entre índices de vegetación y biomasa.....	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	33
4.1. Determinación de biomasa aérea en el ámbito de estudio	33

4.2. Correlación de fotografías aéreas y biomasa aérea	35
4.3. Correlación de Imágenes satelitales y biomasa aérea.....	36
V. CONCLUSIONES.....	40
VI. RECOMENDACIONES	41
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	42
VIII. ANEXOS.....	46

INDICE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de equipo RAP Phantom 4 Multiespectral.....	22
Tabla 2. Parámetros de vuelo	25
Tabla 3. Índices espectrales de vegetación	28
Tabla 4: Parámetros estadísticos	33
Tabla 5. Coeficiente de determinación (R^2) en índices de vegetación y banda NIR época lluviosa	36
Tabla 6. Coeficiente de determinación (R^2) en índices de vegetación y banda NIR época seca	36
Tabla 7. Modelos de regresión cúbica para la estimación de biomasa aérea.....	37

INDICE FIGURAS

Figura 1. Proceso de obtención de información espacial	17
Figura 2. Vehículo aéreo tripulado a distancia	19
Figura 3. Mapa de ubicación del taller de enseñanza forestal y fauna silvestre - UNTUMBES	23
Figura 4. Diseño de unidad de muestreo	25
Figura 5. Segmentación OBIA en ortofotos	27
Figura 6. Datos de entrenamiento y validación del clasificador	27
Figura 7. Comparación de imágenes aéreas RGB y clasificación supervisada con respecto a la biomasa aérea	34
Figura 8. Precisión de modelos de regresión entre biomasa y NDVI UAV	35
Figura 9. Modelo de regresión cúbica biomasa aérea - NDVI húmedo	37
Figura 10. Modelo de regresión cúbica biomasa aérea - SAVI húmedo	38

INDICE ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de procesamiento de la parcela 1	46
Anexo 2. Parámetros de procesamiento de la parcela 2	48
Anexo 3. Parámetros de procesamiento de la parcela 3	50
Anexo 4. Parámetros de procesamiento de la parcela 4	52
Anexo 5. Parámetros de procesamiento de la parcela 5	54
Anexo 6. Medición de diámetro de copa en arbustos.....	56
Anexo 7. Medición de diámetro a la altura del pecho árbol 1	56
Anexo 8. Medición de diámetro a la altura del pecho árbol 2	57
Anexo 9. Mapa de biomasa aérea en el taller de enseñanza forestal y fauna silvestre - UNTUMBES	58

RESUMEN

La presente investigación tuvo como previsto estimar la biomasa aérea mediante el uso combinado de fotografías aéreas con un vehículo aéreo tripulado a distancia e imágenes satelitales Sentinel-2, aplicando índices espectrales derivados de ambas plataformas. Para ello, se establecieron 20 parcelas circulares anidadas, distribuidas aleatoriamente en el taller de Enseñanza Forestal y Fauna Silvestre de la Universidad Nacional de Tumbes, donde se evaluaron arbustos con diámetros ≥ 40 cm y árboles con DAP ≥ 10 cm. La biomasa aérea se estimó mediante ecuaciones alométricas validadas. Los resultados de campo indican que la biomasa aérea presenta una media poblacional comprendida entre 1.91 y 3.77 t ha⁻¹, reflejando la heterogeneidad estructural del bosque seco tropical. Al correlacionar estos datos con los índices espectrales de vegetación obtenidos por vehículos aéreos tripulados a distancia (NDVI, SAVI, GNDVI y NIR), se observó que los modelos de regresión lineal, exponencial, cuadrática y cúbica presentan coeficiente de determinación bajos, demostrando una capacidad predictiva insuficiente. Esta limitación se explica por la degradación de la señal espectral en ambientes secos, donde el dosel leñoso y la defoliación estacional reducen la sensibilidad del NDVI. En contraste, los modelos generados de NDVI derivado de imágenes del sensor Sentinel-2, particularmente durante periodo lluvioso, mostrando un desempeño considerablemente superior. El modelo cúbico alcanzó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.50$, con RMSE = 1.37 t ha⁻¹ y MAE = 1.14 t ha⁻¹, indicadores que reflejan una precisión moderada y una capacidad del NDVI satelital para capturar la respuesta fenológica del bosque seco tropical cuando la vegetación presenta mayor vigor fotosintético. La investigación contribuye con información técnica y científica relevante para la gestión y monitoreo del bosque seco tropical.

Palabras claves: biomasa aérea, índices de vegetación, vehículo aéreo tripulado a distancia, imágenes satelitales.

ABSTRACT

The present study aimed to estimate aboveground biomass through the combined use of aerial photographs acquired with an unmanned aerial vehicle (UAV) and Sentinel-2 satellite imagery, employing spectral vegetation indices derived from both platforms. To achieve this, 20 nested circular plots were randomly established within the Forest and Wildlife Teaching Workshop of the Universidad Nacional de Tumbes. In these plots, shrubs with crown diameters ≥ 40 cm and trees with DBH ≥ 10 cm were measured. Aboveground biomass was estimated using validated allometric equations.

Field results indicate that aboveground biomass ranges between 1.91 and 3.77 t ha⁻¹, reflecting the structural heterogeneity of the tropical dry forest. When correlating these field measurements with vegetation indices obtained from UAV imagery (NDVI, SAVI, GNDVI, and NIR), the linear, exponential, quadratic, and cubic regression models exhibited low coefficients of determination, demonstrating insufficient predictive capability. This limitation is attributable to the degradation of the spectral signal in dry environments, where woody canopy structure and seasonal defoliation reduce the sensitivity of NDVI.

In contrast, models developed using NDVI derived from Sentinel-2 imagery—particularly during the rainy season—showed considerably better performance. The cubic model achieved a coefficient of determination of $R^2 = 0.50$, with RMSE = 1.37 t ha⁻¹ and MAE = 1.14 t ha⁻¹, indicating moderate accuracy and an improved capacity of satellite-derived NDVI to capture the phenological response of the tropical dry forest when vegetation exhibits greater photosynthetic vigor.

This research provides valuable technical and scientific information to support the management and monitoring of tropical dry forest ecosystems.

Keywords: aboveground biomass, vegetation indices, remotely piloted aerial vehicle, satellite imagery.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques son ecosistemas terrestres sumamente diversos, generan condiciones de vida para un gran número de especies, incluye animales, plantas y microorganismos, constituyen como un sumidero de carbono, y se estima más de 650.00 millones de toneladas de carbono, donde el 44 % se almacena en la biomasa, 11 % en madera muerta y hojarasca, y el 45 % en el suelo. (WWF, 2016). En el Perú el sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUSTS), en el año 2019 registró emisiones netas de 100 794.05 Gg CO₂ eq, representando el 47.90 %, del total de emisiones a nivel nacional; siendo la principal fuente las subcategorías de tierras de cultivo y pastizales. (Ministerio del Ambiente, 2019). Ante esta problemática, los países industrializados y no industrializados han celebrado múltiples tratados y acuerdos internacionales, con el fin de promover políticas, normativas y mecanismos, con el propósito de adoptar medidas de adaptación y mitigación. (DiLas-Jiménez, Ortecho Llanos, & Alvarez Ticllasuca, 2020). Entre estos mecanismos que buscan mitigar los gases de efecto invernadero se encuentra los proyectos REDD+ (Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y Degradación), En el Perú durante la última década, se han implementado iniciativas REDD+, por organizaciones no gubernamentales (ONG) y actores del sector privado. (Peña & Sarmiento Barletti, 2023), sin embargo para determinar el stock y almacenamiento de carbono, es una tarea compleja que necesita métodos tradicionales mediante inventarios forestales que pueden producir resultados precisos, pero estos procesos son laboriosos y consumen mucho tiempo. (Cheng, Ou, Wang, & Liu, 2024), se propone alternativas tecnológicas como la teledetección, que puede proporcionar muchas ventajas para la cuantificación y mapeo de la biomasa y carbono forestal, y puede ser precisa tanto temporal como espacialmente. (Mohd Zaki & Abd Latif, 2017).

La presente investigación tiene como objetivo “Estimar la biomasa mediante vehículo aéreos no tripulados en el taller de Enseñanza e Investigación Forestal de la UNTUMBES”, del cual generará información que permita estimar de manera espacial el almacenamiento de carbono.

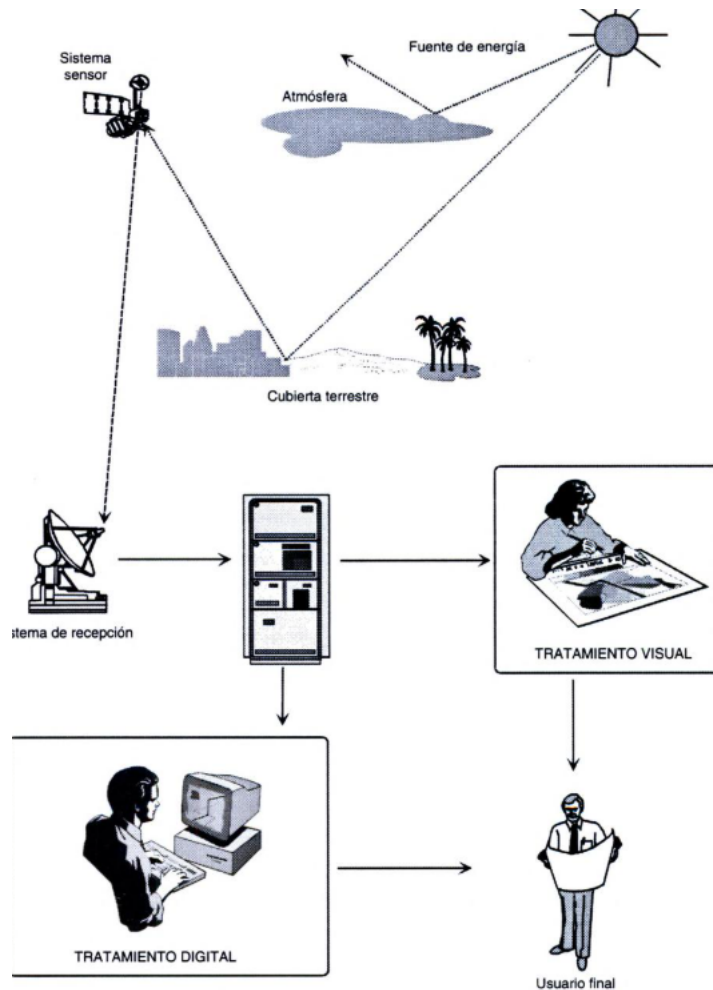
II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Bases teóricas – científicas

2.1.1. Teledetección y fotogrametría

La teledetección es el procedimiento o técnica de obtener información sin tener contacto en ella, tiene como objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes tomadas en satélites artificiales. (Muñoz Nieto & Pérez Gutiérrez, 2006). Es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie de la tierra desde sensores espaciales o aéreos, asumiendo que entre el suelo y los sensores existe una interacción energética artificial. Asu vez, es precisos que ese haz energético recibido sea almacenado, convenientemente, en las estaciones receptoras. Un sistema de teledetección espacial incluye (I) Fuente de energía, es el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. (II) Cubierta terrestre, formada por diferentes masas de vegetación, agua, suelo, construcción humana, reciben la señal energética procedente del (I), la reflejan o emiten de acuerdo sus características físicas. (III) Sistema sensor, compuesto por el sensor y la plataforma que lo alberga. Su misión es captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla al sistema de recepción. (IV) sistema de recepción, reciben información transmitida por la plataforma, se graba en un formato, tras las oportunas correcciones se distribuye a los interesados. (V)Intérprete, quien convierte los datos e información temática de interés. (VI) Usuario final, encargado de analizar el documento, fruto de la interpretación. (Chuvieco, 2008).

Figura 1. Proceso de obtención de información espacial



La Fotogrametría, es la ciencia que se ocupa de obtener mediciones exactas mediante las fotografías. (Schreuder, 1963). Es una medida de un objeto cualquiera, tanto en su forma como su situación, mediante fotografías del mismo objeto. Las fotografías aéreas, no solamente tiene el fin las medidas, también la investigación y la significación del contenido de las vistas, constituyendo la fotointerpretación. (Lehmann, 1975).

2.1.2. Aeronave pilotada a distancia (RPA)

La Aeronave Pilotada a Distancia, es una aeronave pilotada por un piloto remoto, emplazando en una estación de piloto remoto, ubicada fuera de la

aeronave (en tierra, barco, otra aeronave, en el espacio), quien monitorea y aeronave y tiene responsabilidad directa de la conducción segura de la aeronave durante todo su vuelo. Una RPA puede poseer varios tipos de tecnología de piloto automático pero, en todo momento el piloto remoto puede intervenir en la gestión del vuelo. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2015). El dron, es un término amplio utilizado para describir cualquier tipo de vehículo aéreo no tripulado (UAV), por lo tanto se puede utilizar para UAV que se controlan de forma remota, como aquellos que se manejan mediante computadoras a bordo. Estos tipos de UAV pueden parecer un avión pequeño o un helicóptero. (Tabachnik, 2020).

Aunque los modelos de drones pueden variar, ciertos componentes son consistentes y esenciales para su operación. (Skiba, 2024)

Marco o chasis: cuerpo del dron, manteniendo todos los componentes unidos, en una configuración que favorece un rendimiento aerodinámico óptimo.

Brazos: soportan los motores y conectan al marco. Brazos más largos mejoran la estabilidad, mientras los más cortos aumentan maniobrabilidad.

Motores: vitales para la proporción del dron, ubicados en los extremos de los brazos generan elevación, trabajan en conjunto con las hélices para levantar al dron.

Hélices: conectadas a los motores, proporciona elevación al girar.

Batería: Alimenta a los motores y otros componentes eléctricos.

Placa controladora del vuelo: actúa como cerebro del dron, recibiendo y procesando información de diversas fuentes para controlar movimiento de vuelo.

Sensores: esenciales para el rendimiento, incluyen sensores de velocidad, altura y posición, proporcionando datos cruciales en el vuelo.

Cámara: Integral para la fotografía aérea o filmación, las cámaras son comunes en los drones, con estructuras que soportan la instalación de cámaras.

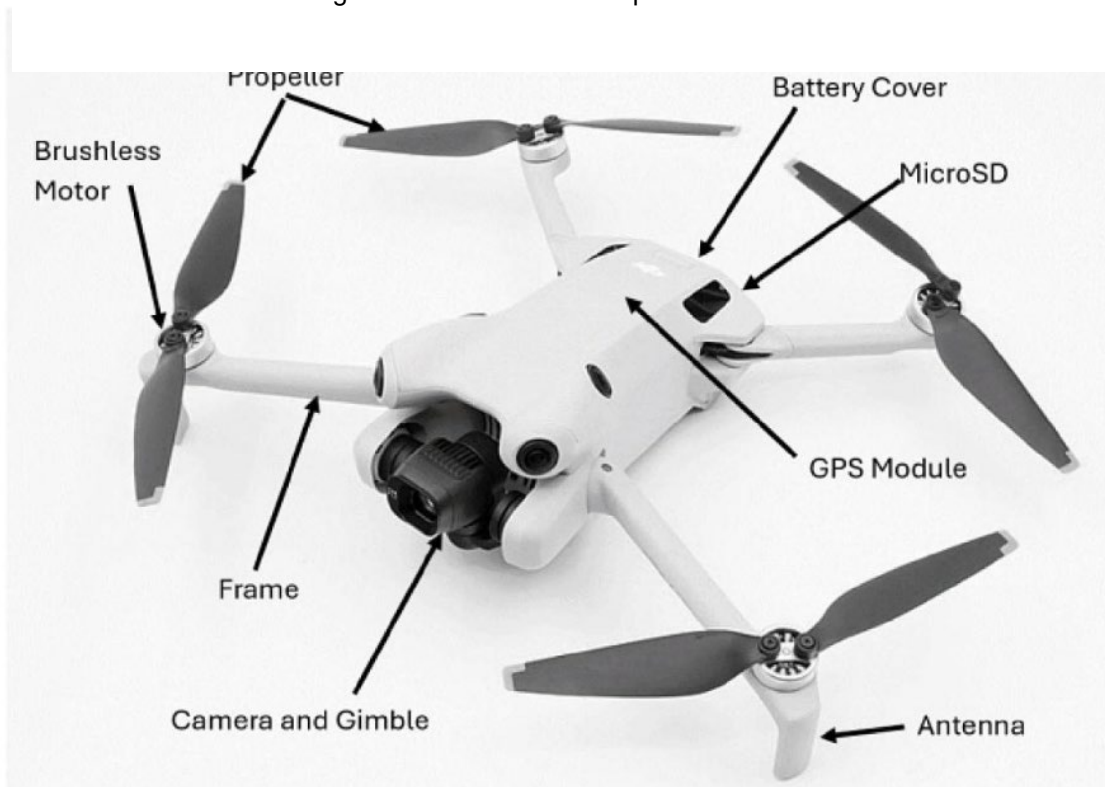
Gimbal: Estabiliza la cámara durante el vuelo, evitando que vibraciones del motor afecten la calidad de la imagen.

Controladores de velocidad variable o controladores de velocidad (ECS): mejoran la experiencia de vuelo, permitiendo ajustes de velocidad.

Estación de control del dron: comprende el transmisor de radio, receptor, componente de la gestión de datos y control remoto.

Tren aterrizaje: asegura integridad del dron al hacer contacto con el suelo, manteniendo distancia entre el cuerpo del dron y suelo.

Figura 2. Vehículo aéreo tripulado a distancia



2.1.3. Biomasa

La biomasa consiste en la materia orgánica aérea o subterránea, viva o muerta (ejemplo los árboles, cultivos, las raíces, etc). La biomasa corresponde a la definición común por encima del suelo y la biomasa por debajo del suelo. La Biomasa por encima del suelo, es todo el bioma viva encima del suelo incluye

tocón, tronco, corteza, ramas, semillas y las hojas. La biomasa por debajo del suelo, constituye la biomasa viva de las raíces. Las raíces de menos de 2 mm de diámetro están excluidas, debido que no puede distinguirse, de manera empírica, de la materia orgánica del suelo y hojarasca. (FAO, 2004).

2.2. Antecedentes:

(Bhardwaj, Banday, Pala, & Rajput, 2016), En su investigación seleccionaron tres bosques a diferentes altitudes, A₁ (600 – 900 m), A₂(900 – 1200 m), y A₃(1200 – 1500 m), sobre el nivel del mar con valores normalizados del NDVI en N₁(0.0 – 0.1), N₂(0.1-0.2), N₃(0.2-0.3), N₄(0.3-0.4) y N₅(0.4-0.5), con el propósito de estudiar la relación con la biomasa y el depósito de carbono en el Estado de Huachal Pradesh, India. La relación con el NDVI ($R^2= 0.62$) es el más alto a través de funciones cúbicas.

(Gasparri, Bono, Karszenbaum, & Montenegro, 2007). Su investigación, determinaron la biomasa del bosque seco del Parque Chaqueño de Argentina, mediante imágenes satelitales. Se estimó la biomasa aérea a partir de datos de campo, que se relacionó con datos espectrales. La estación seca resulto ser la mejor época para vincular datos satelitales con estructura del bosque, debido que los pastos y arbustos se ven afectados por el déficit hídrico.

(Mejia, Andrade, & Segura, 2023), su investigación se centró en la estimación de biomasa aérea y carbono mediante herramientas de teledetección y modelación matemática en bosques secos del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), Universidad del Tolima. Se establecieron un total de 59 parcelas temporales, en las cuales se estimó la biomasa aérea y carbono midiendo árboles y empleando modelos alometricos y una fracción de carbono de 0.47. Los índices empleados fueron (NDVI, EVI, SAVI y OSAVI), proviniendo de imágenes de dos épocas, lluviosa y seca para el satélite Sentinel 2. El NDVI en época lluviosa obtuvo el mejor resultado con referente al $R^2= 0.87$, y permitió genera un modelo de estimación de biomasa.

(Muhe & Argaw, 2022), El presente estudio examinó el uso potencial y frecuencia temporal en la evaluación de biomasa forestal. Uso el potencial de bandas multiespectrales , índices de vegetación y variables biofísicas derivadas de imágenes Sentinel-2 en el modelado de biomasa aérea, en bosque tropical afro

montano de la reserva de la biosfera Yayu. Los resultados de la predicción se validaron con base en la magnitud de los coeficientes de determinación entre los valores observados y predichos y la magnitud del Error Cuadrático Medio (RMSE). Se observó una fuerte correlación (r que va de 0.65 a .74), entre las variables biofísicas de la imagen Sentinel 2 y la biomasa medida en campo.

(Perea-Ardilla, Andrade-Castañeda, & Segura-Madrigal, 2021); en su estudio, estimó la biomasa aérea y carbono, en Bosques del Santuario de Fauna y flora Iguaque, en Boyacá, Colombia, aplicando técnicas de teledetección. Donde establecieron 23 parcelas de muestreo de 250 m², donde midieron a los árboles con dap \geq 10 cm. La biomasa aérea se correlacionó utilizando índices de vegetación, como el NDVI, SAVI y EVI, derivados de las imágenes Landsat 8. Donde se desarrolló un modelo preciso de NDVI en época seca con (R^2 ajustado = 0.79 y error medio cuadrático = 17.1 Mg/ha).

(Lu, y otros, 2022), en su estudio propusieron una solución basada en vehículo aéreo no tripulado (UAV) y datos de Sentinel – 2, que nos permitió estimar y mapear con éxito la estimación de *Phragmites australis*, en la Reserva de Humedales Nan Da Gang, en la provincia de China de Hebei. Se construyó un modelo de biomasa ($R^2= 0.74$, RMSE= 194 g/m²), basado en NDVI y la altura del dosel derivado de UAV.

(Su-Ying, Xiao-Bing, Ge, & Na, 2007); Correlaciono la biomasa y cinco índices de vegetación, con cuatro positivas (NDVI, SAVI, MSAVI y RSR) y negativas (RVI). Los coeficientes de correlación (R^2) de los 15 modelos fueron > 0.6 , lo que indica que un modelo de regresión de biomasa de índices de vegetación

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Equipos y materiales

3.1.1. Software

- Agisof Metashape
- Qgis 3.28
- R studio
- Microsoft Word
- Excel
- Power point

3.1.2. Equipos

- Laptop
- GPS Garmin 84 S
- Equipo RPA Phantom 4 Multiespectral

Tabla 1. Especificaciones técnicas de equipo RAP Phantom 4 Multiespectral

Aeronave	Especificaciones
Peso de despegue	1487 g
Distancia diagonal (sin incluir hélices)	350 mm
Distancia max. Servicio sobre el nivel del mar	6000 m
velocidad de ascenso máxima	6 m/s (vuelo automático), 5 m/s (control manual)
Velocidad de descenso	3 m/s
Velocidad máxima	50 km/h
Tiempo de vuelo max	27 minutos aprox
Temperatura de funcionamiento	De 0° C a 40° C
Cámara	Especificaciones
Sensores	Seis CMOS de 1/2.9°, incluye un sensor RGB, para imágenes de luz visible, y cinco sensores monocromos para imágenes multiespectrales
Filtros	Azul(B), 450 nm +- 16 nm, Verde (G) 560 nm +- 16 nm, Rojo ®, 650 nm +- 16 nm, Borde rojo (RE) 730 nm +- 16 nm, infrarrojo cercano (NIR) 840 nm +- 26 nm.

3.1.3. Materiales

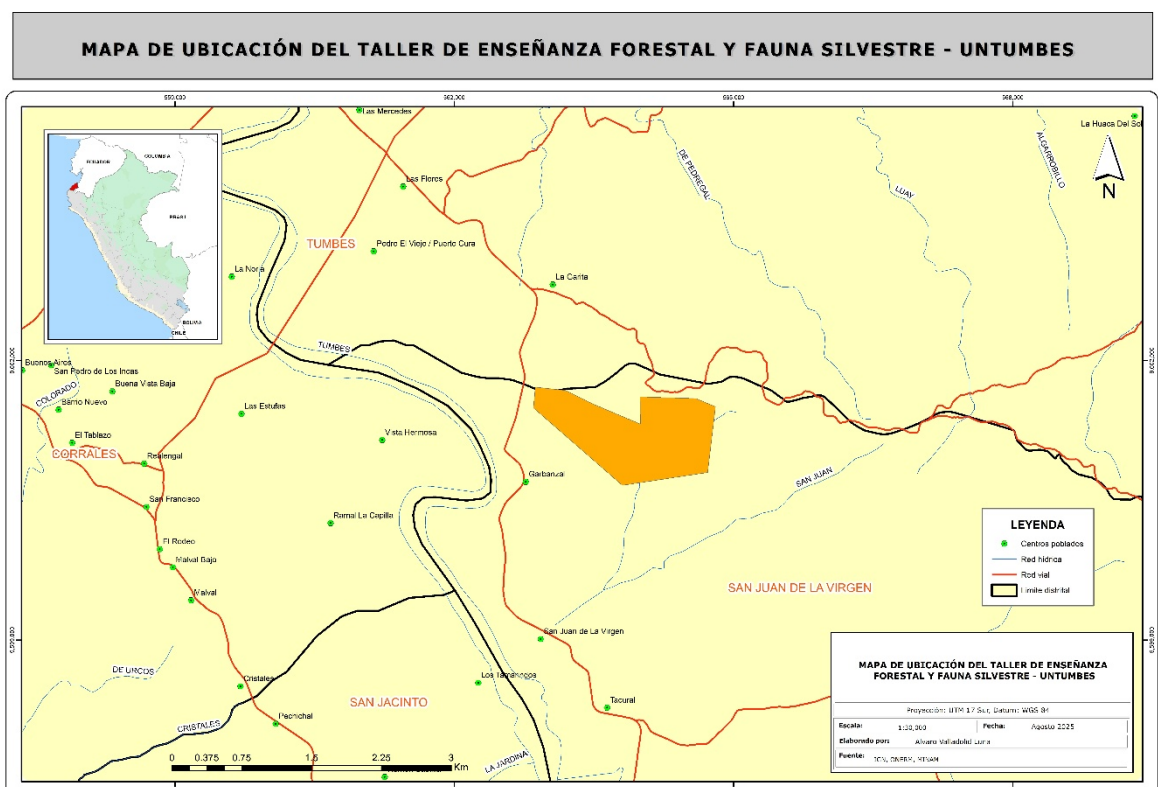
- Wincha metálica de 5 metros
- Cinta métrica
- Vernier
- Fichas de evaluación
- Tableros
- Lápiz
- Borrador
- Tajador

3.2. Tipo de investigación

3.3. Área de estudio

Corresponde al taller de enseñanza e investigación forestal y fauna silvestre, de la Universidad Nacional de Tumbes, con una superficie de 127.23 ha, ubicado en el centro poblador de Garbanzal, distrito de San Juan de la Virgen, provincia y departamento de Tumbes, como se aprecia en la figura 3.

Figura 3. Mapa de ubicación del taller de enseñanza forestal y fauna silvestre - UNTUMBES



3.4. Población y muestra

La población es la superficie del taller de enseñanza e investigación forestal de la UNTUMBES, con una superficie de 127.23 ha, respectivamente.

La muestra, corresponde a las parcelas de evaluación, el tamaño mínimo se obtiene mediante la siguiente ecuación propuesta por (Ministerio del Ambiente, 2015):

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

Donde:

N : superficie total de la muestra (ha)

S : superficie total a evaluar del área del proyecto (ha)

a : 5

b : 0.001

Al aplicar la ecuación, obtuvimos un total de 5.13 ha de muestreo, estas con el área de las unidades de muestreo que es 0.28 ha, obteniendo un total de 18.32 unidades de muestreo, por consiguiente se vio pertinente evaluar 20 unidades de muestreo.

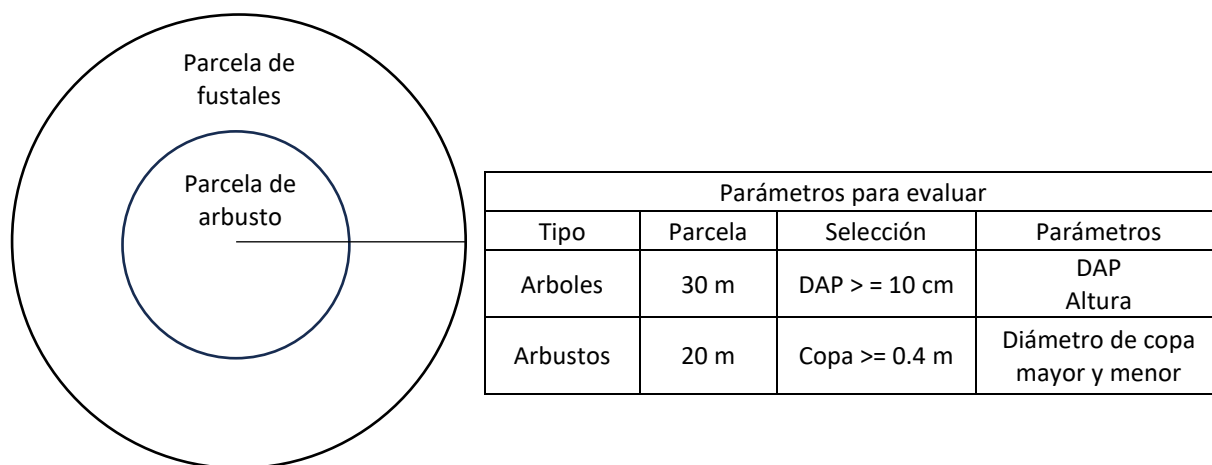
3.5. Distribución de unidades de muestreo

Las unidades de muestreo se distribuyeron acorde al área donde se realizó el sobrevuelo del vehículo aéreo tripulado a distancia, los 20 puntos se dispersaron aleatoriamente.

3.6. Unidades de muestreo

Las unidades de muestreo corresponden a las parcelas de evaluación, con una superficie de 0.28 ha, de forma circular y anidada, como se observa en la figura.

Figura 4. Diseño de unidad de muestreo



3.7. Metodología

3.7.1. Parámetros de vuelo

En la aplicación de DJI GO, se delimito en ámbito de evaluación, para ello se obtuvo los siguientes datos:

Tabla 2. Parámetros de vuelo

Parámetros	Descripción
Altura	100 metros
Angulo de las líneas de vuelo	Responde según dirección del sol
Cámara	RGB y multiespectral
Overlap	80 %
Velocidad de vuelo	6 Km/s
GSD	5 cm

La fecha de sobrevuelo se realizó en octubre del 2024, época en la cual muchas especies caducifolias han perdido su follaje, de acuerdo a la estación meteorológica “Campo Sede”, en el distrito y departamento de Tumbes en las coordenadas geográficas Latitud

3°33'4.14" y Longitud 80°25'46.64", registra una temperatura de 24.4 °, precipitación de 00 mm y una velocidad del viento de 4.6 (m/s), parámetros adecuados para realizar el vuelo. De acuerdo a la norma NTC-001-2015, el área de vuelo no se considera zona restringida y tampoco se sobrepasó la altura de 150 m, el operador del vehículo fue el Ing. Antoni David Jimenez Dios quien cuenta licencia para volar dron del MTC.

3.7.2. Procesamiento de fotografías aéreas

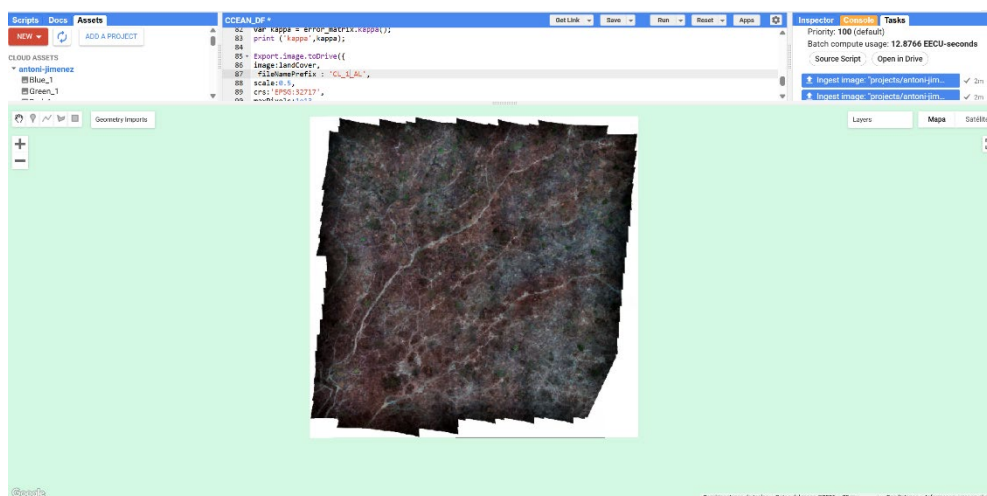
El procesamiento se realizó en el software Agisoft Metashape; donde obtuvimos ortofotos, en la siguiente figura, muestra el proceso metodológico.

3.7.3. Clasificación supervisada de ortofotos

3.7.3.1. Segmentación OBIA (clasificación basada en objetos)

Las bandas, blue, green y red, se importaron a la plataforma de Google Earth Engine (GEE), realizando una combinación de color natural, posteriormente mediante el algoritmo `ee.Algorithms.Image.Segmentation.SNIC`, nos permitió realizar la segmentación, mediante la agrupación de superpíxeles, en el caso de estudio se utilizó el tamaño `seedGrid` de 3, "compacidad" como 0, "conectividad" 4 y "neighborhoodSize" como 128.

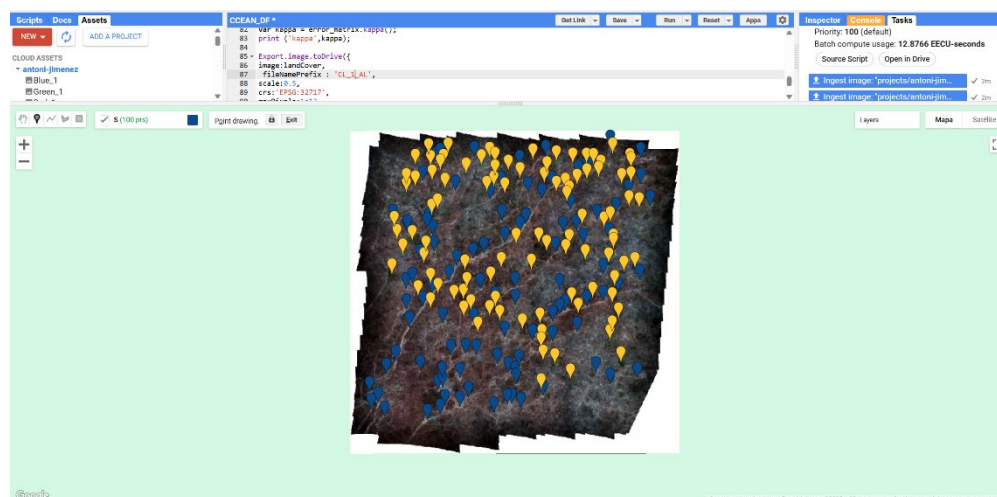
Figura 5. Segmentación OBIA en ortofotos



3.7.3.2. Datos de entrenamiento y validación

Mediante la fotointerpretación, se logró determinar 02 tipos de coberturas, (1) suelo desnudo y (2) vegetación. Las muestras de entrenamiento y validación se obtuvieron mediante la interpretación de las ortofotos. Donde se seleccionaron 200 puntos de muestreo, de los cuales el 50 % es utilizado para el entrenamiento y el 50 % para la validación.

Figura 6. Datos de entrenamiento y validación del clasificador



3.7.3.3. Clasificación de Random Forest (RF)

La clasificación de Random Forest, logra determinar las coberturas en el área de estudio, con base a estudios relacionados, seleccionamos 1000 árboles de entrenamiento según. (Phan, Kuch, & Lehnert, 2020)

3.7.3.4. Evaluación de la precisión del clasificador

Se utiliza métricas de precisión extraídas de la matriz de confusión, como la exactitud general y coeficiente de Kappa, datos obtenidos mediante los puntos de muestreo utilizados en la validación en la plataforma Google Earth Engine.

3.7.4. Índices de vegetación

Se utilizaron las ortofotos para obtener índices de vegetación a base de las bandas red, blue, green y nir. Así mismo se utilizaron imágenes satelitales de mediana resolución espacial como las que dispone Sentinel 2, teniendo en cuenta la época seca y época de lluvias. Los índices utilizados fueron:

Tabla 3. Índices espectrales de vegetación

Índice de vegetación	Formula	Referencia
NDVI	$\frac{(nir - red)}{(nir + red)}$	(Rouse, Hass, Schell, & Deering, 1974)
SAVI	$(NIR-Rojo/NIR+Rojo+L) \times (1+L)$	(Huete, 1988)
OSAVI	$\frac{(nir - red)}{nir + red + 0.16}$	(Rondeux, Steven, & Baret, 1996)
GNDVI	$\frac{(nir - green)}{(nir + green)}$	(Gitelson, Kaufman, & Merzlyak, 1996)

Se obtiene el promedio de los índices de vegetación, según el número de píxeles que entre en la parcela de 0.28 ha, respectivamente.

3.7.5. Estimación de biomasa y carbono

3.7.5.1. Parámetros de evaluación

Los parámetros de evaluación de las unidades de muestreo consistieron en lo siguiente:

- Árboles: se evaluaron a todos los individuos forestales con DAP mayor o igual a 10 cm

- Arbustos: se evaluaron a todos los individuos con diámetro de copa mayor o igual a 40 cm.

3.7.5.2. Variables dasométricas

Diámetro a la altura del pecho – DAP (cm)

Se obtiene el DAP de todos los individuos forestales de la categoría de árboles, que cumplan los parámetros de evaluación según el ítem (3.6.5.1), siguiendo la forma de medición según el Anexo (). Se utilizó la cinta diamétrica para medir la circunferencia de cada fuste, y mediante la siguiente ecuación se obtuvo el DAP.

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

Donde:

DAP : Diámetro a la altura del pecho (cm)

CAP: Circunferencia a la altura del pecho (cm)

π : Pi (3.1415....)

Altura total (m)

La altura total se obtiene para las categorías de árboles y arbustos, se mide mediante el uso de wincha metálica y vara telescópica, así mismo se utilizará el clinómetro para árboles más altos, Anexo ().

Diámetro de copa (m)

El diámetro de copa se obtiene para la categoría de arbustos, se mide mediante el uso de wincha metálica, en forma de cruz, obteniendo el diámetro mayor y menor.

3.7.5.3. Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa

La estimación de biomasa se obtuvo mediante el método indirecto, que consiste en la aplicación de ecuaciones alométricas, se describe a continuación las siguientes ecuaciones.

- (Llanos Aguilar, 2010), en su investigación, determino una ecuación alométrica para la estimación de biomasa del algarrobo con DAP mayor o igual a 10 cm:

$$B = 18.552 + 0.052 * DAP^2 * H$$

Donde:

B: Biomasa aérea (Kg)

DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm)

H: Altura total (m)

- (Chave, y otros, 2005), propone ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa aérea en ecosistemas áridos, en base a la densidad básica de la madera de cada especie.

$$\ln(AGB) = -2.680 + 1.805 * \ln(D) + 1.038 * \ln(H) + 0.377 * \ln(\rho)$$

Donde:

(*AGB*): Biomasa aérea (kg)

D: Diámetro a la altura del pecho (cm)

H: Altura total (m)

(ρ): Densidad básica de la madera (g/cm³)

Se describe la densidad básica para las siguientes especies:

- *Neltuma sp* (algarrobo): 0.7 g/cm³. (AIDER, 2015)
- *Bursera graveolens* (Kunth) Triana & Planch (palo santo) : 0.4 g/cm³. (Feijoo, y otros, 2025)
- *Loxopterygium huasango* Spruce ex Engel (hualtaco): 0.65 g/cm³. (Feijoo, y otros, 2025).
- *Morisia scabrida* (Kunth) Christenh & Byng (sapote de campo): 0.83 g/cm³. (Feijoo, y otros, 2025).
- *Libidibia glabata* (Kunth) C.Cast. & G.P.Lewis (Charan negro): 0.79 g/cm³. (Feijoo, y otros, 2025)

- (AIDER, 2015); para la estimación de la biomasa en arbustos en bosque seco, se utilizó la siguiente ecuación:

$$CA = 0.1151X^{3.1299}$$

Donde:

CA: Contenido de carbono en arbusto (kg)

X: Diámetro promedio de copa (m)

En este caso se divide el valor CA por la fracción de carbono que es 0.5, respectivamente.

3.7.6. Correlación entre índices de vegetación y biomasa

Se correlaciona los valores de los índices de vegetación, bandas red, blue, green y nir, con valores en tn/ha de biomasa, para lo cual se utilizaron diversas regresiones, con el fin de obtener el más preciso. Se utilizó el programa Rstudio para realizar los modelos de regresión.

Las regresiones utilizadas fueron:

Lineal: “ $y \sim a + b \cdot x$ ”

Cuadrática: “ $y \sim a + b \cdot x + c \cdot x^2$ ”

Exponencial: “ $y \sim a \cdot \exp(b \cdot x)$ ”

Cubica: “ $y \sim a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3$ ”

Para determinar la precisión de los modelos de regresión se obtuvo el error cuadrático medio RMSE y el error absoluto medio (MAE), mediante las siguientes fórmulas:

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

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

Donde:

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

r_n : Calificación real en el conjunto de datos de prueba

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

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación de biomasa aérea en el ámbito de estudio

En el taller de enseñanza forestal y fauna silvestre de la Universidad Nacional de Tumbes, de las 20 parcelas instaladas, se obtuvo un promedio de biomasa aérea de 2.84 tn/ha, una desviación estándar de 1.99 tn/ha. Se estima que el promedio poblacional se encuentra entre los valores de 1.91 tn/ha y 3.77 tn/ha, respectivamente.

$$P(1.91 \text{ tn/ha} < u < 3.77 \text{ tn/ha}) = 95\%$$

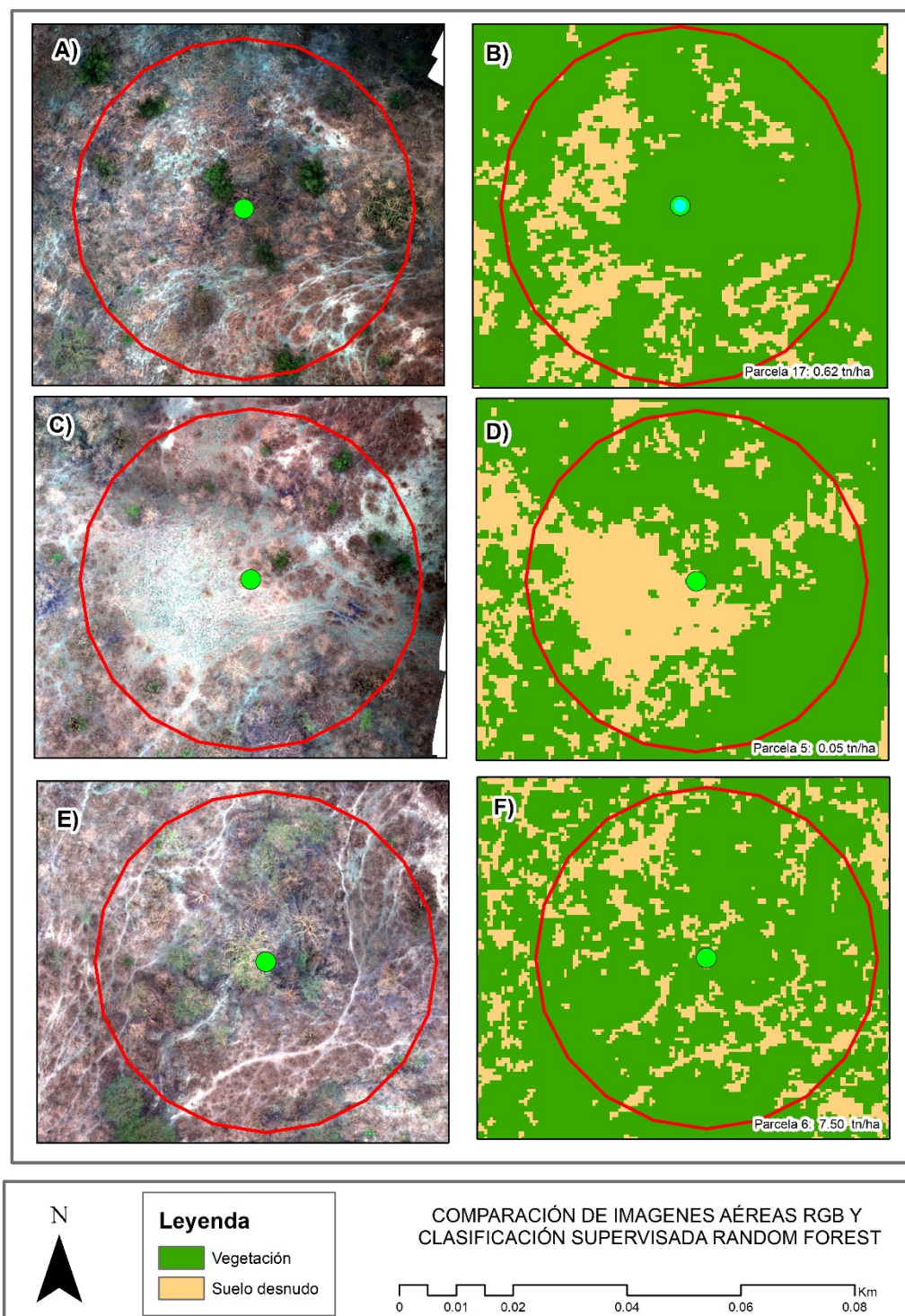
Tabla 4: Parámetros estadísticos

Parámetros estadísticos	Valores
\bar{X} (promedio) tn/ha	2.84
S(desviación estándar) tn/ha	1.99
Límite inferior – tn/ha	1.91
Límite superior – tn/ha	3.77
N (número de muestras)	20.00
CV (%)	70.04
Error de muestreo (%)	32.73

Calcular la biomasa aérea, permite definir el estado de conservación de los bosques u otros ecosistemas naturales (Gasparri, Bono, Karszenbaum, & Montenegro, 2007), aquellas parcelas que se ubican en los valores del rango inferior, generalmente corresponden a matorrales, con poca presencia de árboles leñosos, a diferencia a las parcelas que contienen mayor contenido de biomasa aérea, Esto se debe principalmente a que las parcelas de menor

contenido de biomasa son áreas de mayor perturbación, relacionado al grado del impacto de las actividades económicas del hombre sobre el bosque. (Muhe & Argaw, 2022).

Figura 7. Comparación de imágenes aéreas RGB y clasificación supervisada con



Nota: A) Imagen aérea RGB parcela 17, B) Imagen clasificada parcela 17, C) Imagen aérea RGB parcela 5, D) imagen clasificada parcela 5, E) Imagen aérea RGB parcela 6, D) Imagen clasificada parcela 6.

4.2. Correlación de fotografías aéreas y biomasa aérea

La estimación de la biomasa es un aspecto importante en la gestión de los ecosistemas, donde la aplicación de drones, ofrece información valiosa para la conservación y gestión de los ecosistemas naturales (Matyukira & Mhangara, 2024)

Figura 8. Precisión de modelos de regresión entre biomasa y NDVI UAV

Regresión	Ecuación	R ²
Lineal	Biomasa (tn/ha) = 2.33 + 3.29*NDVI	0.011
Exponencial	Biomasa (tn/ha) = 2.28 *exp(1.59*NDVI)	0.014
Cuadrático	Biomasa (tn/ha) = 2.73 + -24.67*NDVI + 193.82*NDVI ²	0.119
Cúbico	Biomasa (tn/ha) = 2.66 - 53.61*NDVI + 814.72*NDVI ² - 2818.49*NDVI ³	0.179

Las regresiones tanto lineal, exponencial, cuadrático y cúbica, de acuerdo al coeficiente de determinación (R²), señala que los modelos no estiman correctamente la biomasa aérea, utilizando el NDVI de vehículos aéreos tripulados a distancia, esto es debido a que la señal espectral del dosel leñoso se ve afectada por el fondo (vegetación herbácea verde) y la defoliación de árboles caducifolios (Shi, y otros, 2021). Sin embargo, los UAV, tienen un amplio potencial, para la estimación de biomasa aérea, aplicando otras técnicas, así lo demuestra (Lu, y otros, 2022), donde propuso en su estudio estimar y mapear con éxito la biomasa de *Phragmites australis* en la Reserva de Humedales Nan Da Gang, en la provincia de China de Hebei; mediante una solución basada en vehículos aéreos tripulados a distancia y datos de Sentinel 2, donde obtuvo un modelo (R²= 0.74, RMSE = 174 g/m²), basado en NDVI y la altura del dosel derivado de datos UAV).

4.3. Correlación de Imágenes satelitales y biomasa aérea

Las imágenes satelitales, nos permite obtener información relevante y estimar variables sobre el terreno. Existe desafíos para estimar la biomasa aérea, debido a la dificultad de las áreas de evaluación, cubicación, etc . (Moradi, Darvishsefat, Pourrahmati, Delijouei, & Borz, 2022).No solo son costosos sino también poco prácticos para monitorear áreas grandes e inaccesibles. La aplicación de datos de teledetección ha mejorado enormemente la estimación de biomasa, por ejemplo Sentinel 2, que proporciona datos de hasta 10 m de resolución (Adamu, y otros, 2021).

Tabla 5. Coeficiente de determinación (R^2) en índices de vegetación y banda NIR época lluviosa

Modelos	NDVI	SAVI	OSAVI	GNDVI	NIR
Lineal	0.17	0.29	0.24	0.23	0.40
Exponencial	0.25	0.37	0.32	0.30	0.48
Cuadrático	0.46	0.45	0.46	0.39	0.48
Cúbico	0.50	0.54	0.53	0.50	0.53

Tabla 6. Coeficiente de determinación (R^2) en índices de vegetación y banda NIR época seca

Modelos	NDVI	SAVI	OSAVI	GNDVI	NIR
Lineal	0.15	0.16	0.16	0.21	0.03
Exponencial	0.17	0.15	0.16	0.19	0.02
Cuadrático	0.18	0.16	0.17	0.21	0.05
Cúbico	0.18	0.24	0.19	0.27	0.05

De acuerdo a los resultados de regresión lineal, exponencial, cuadrático y cúbico (ver tabla 3 y 4), señala que la estimación de biomasa tiene mayor coeficiente de determinación (R^2), en época lluviosa (media obtenida entre enero – junio), esto demuestra que la temporalidad de las imágenes tiene influencia en la estimación de biomasa aérea, concuerda con el estudio de (Mejia, Andrade, & Segura, 2023), que estimaron la biomasa aérea y carbono mediante herramientas de teledetección y modelación matemática en bosques secos del centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, donde encontró que en época lluviosa el NDVI presento mejor correlación $R^2(0.87)$. Sin embargo algunos estudios

realizados en ecosistema de bosque seco tropical, señalan que las mejores correlaciones se encuentran en la época seca (Perea-Ardilla, Andrade-Castañeda, & Segura-Madriral, 2021) (Gasparri, Bono, Karszenbaum, & Montenegro, 2007).

Tabla 7. Modelos de regresión cúbica para la estimación de biomasa aérea

Modelo	Ecuación	R	R2	RMSE (tn/ha)	MAE (tn/ha)
1	Biomasa (tn) = -5.88 + 29.70*NDVI - 49.46*NDVI^2 + 27.28*NDVI^3	0.71	0.5	1.37	1.14
2	Biomasa (tn) = -5.43 + 41.91*SAVI - 107.17*SAVI^2 + 91.10*SAVI^3	0.73	0.54	3.18	2.84

Figura 9. Modelo de regresión cúbica biomasa aérea - NDVI húmedo

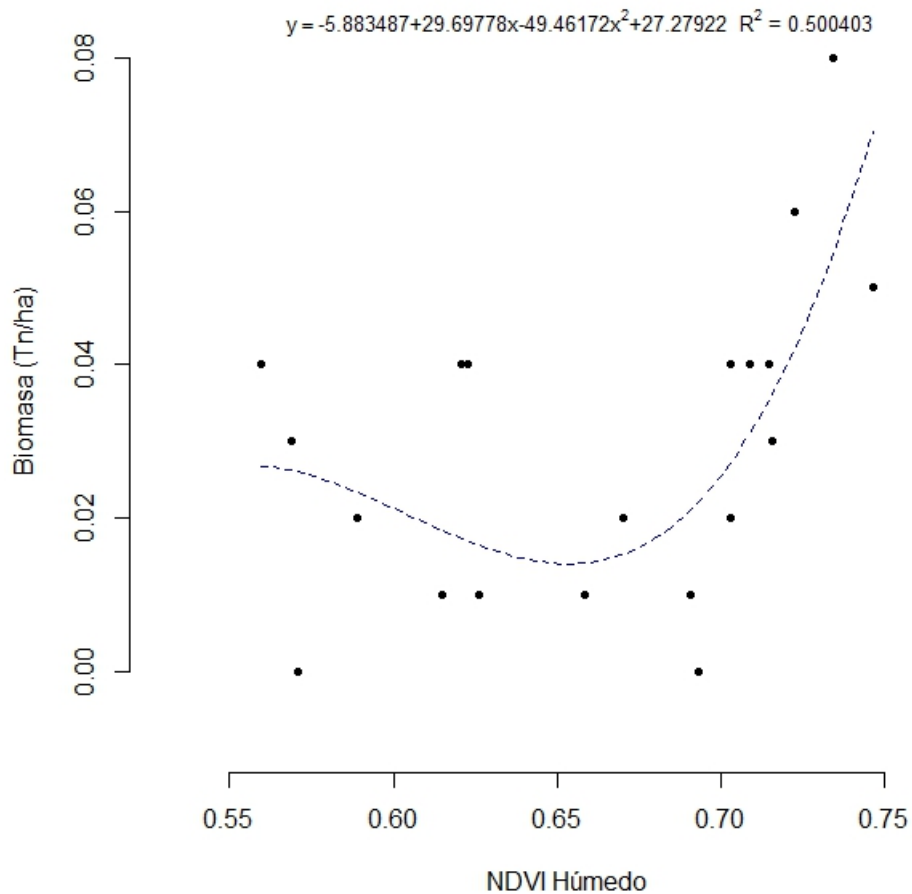
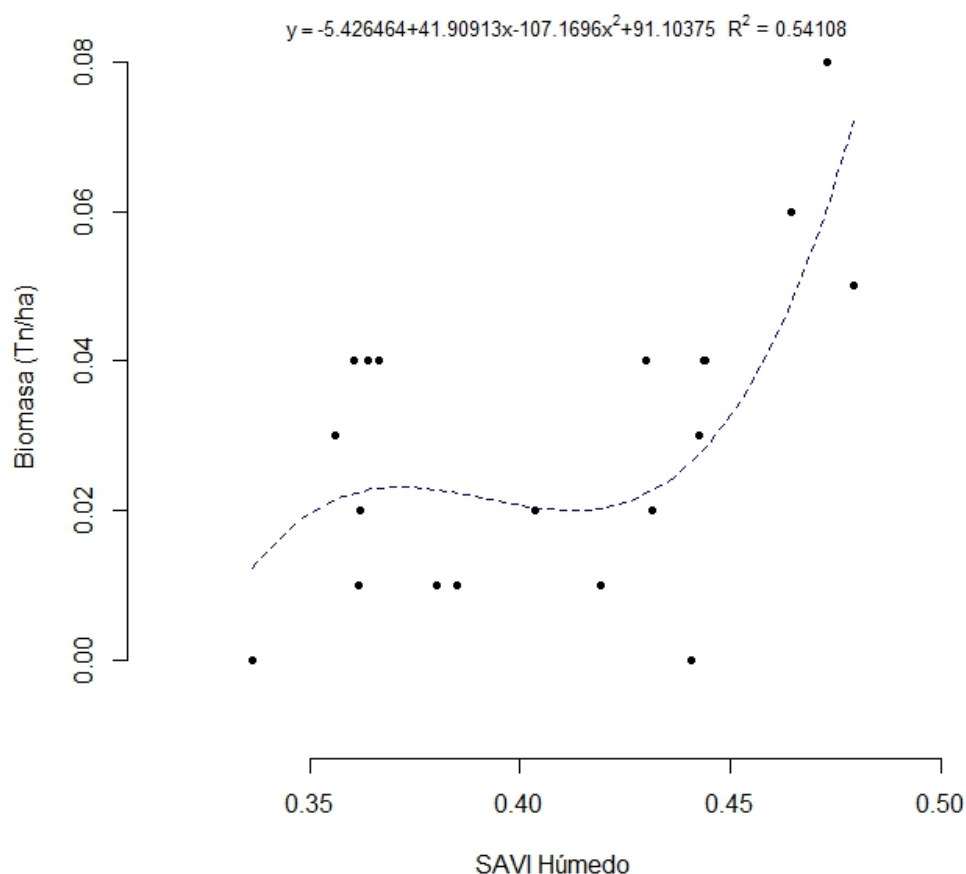


Figura 10. Modelo de regresión cúbica biomasa aérea - SAVI húmedo



Las regresiones cúbicas, son los modelos que muestra mayor precisión en la estimación de biomasa aérea, estudios afirman la capacidad de la regresión cúbica, tal como (Bhardwaj, Banday, Pala, & Rajput, 2016), señala que la regresión cúbica es posible estimar la biomasa aérea utilizando el NDVI, con un valor de coeficiente de determinación R^2 (0.62). (Su-Ying, Xiao-Bing, Ge, & Na, 2007), indica que el modelo polinomial cúbico es el mejor para simular la biomasa de NDVI, respectivamente.

Los resultados indica, que el SAVI, presente mayor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.54$), en comparación al NDVI ($R^2 = 0.5$), sin embargo el SAVI presenta mayor error e su estimación (RMSE = 3.18 tn/ha, MAE = 2.84 tn/ha) y NDVI (RMSE = 1.37 tn/ha, MAE = 1.14 tn/ha). Por ende, el NDVI, estima con mayor precisión la biomasa aérea, así lo afirma (Mejia, Andrade, & Segura, 2023), donde obtuvo un coeficiente

de determinación ($R^2=0.87$), al relacionar el NDVI en época lluviosa y biomasa aérea, en bosque seco del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, Colombia. (Perea-Ardilla, Andrade-Castañeda, & Segura-Madrigal, 2021); en su investigación obtuvo un modelo preciso utilizando el NDVI para estimar biomasa aérea (R^2 ajustado = 0.79 y error medio cuadrático = 17, Mg/ha), en bosques de Santuario de Fauna y Flora Iguaque, en Boyacá, Colombia.

V. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en el taller de Enseñanza Forestal y Fauna Silvestre de la Universidad Nacional de Tumbes evidencian que la biomasa aérea presenta una media de 2.84 t ha^{-1} , con una desviación estándar de 1.99 t ha^{-1} . El intervalo de confianza estimado ($1.91 - 3.77 \text{ t ha}^{-1}$) sugiere una variabilidad estructural considerable dentro del ecosistema evaluado, característica típica de formaciones boscosas con heterogeneidad en la cobertura arbórea y arbustiva.
- Los modelos de regresión lineal, exponencial, cuadrática y cúbica desarrollados a partir del NDVI derivado de vehículos aéreos tripulados a distancia, mostraron coeficientes de determinación bajos, lo que evidencia una capacidad predictiva limitada. Esta baja asociación se explica por la alteración de la señal espectral debido al dosel leñoso, la defoliación de especies caducifolias, factores que reducen la sensibilidad del NDVI para caracterizar adecuadamente la biomasa aérea en ecosistemas secos.
- En contraste el NDVI derivado de imágenes satelitales mostró un desempeño moderadamente superior al emplear un modelo cúbico, alcanzando un R^2 de 0.50, RMSE de 1.37 t ha^{-1} y MAE de 1.14 t ha^{-1} , lo cual indica una capacidad predictiva aceptable pero aún con limitaciones para aplicaciones de manejo forestal de alta precisión. Los mejores ajustes se registraron en época lluviosa (enero-junio), periodo en el cual la vegetación alcanza mayor vigor fotosintético y el NDVI presenta mejor respuesta espectral, reduciendo la interferencia causada por la fenología caducifolia.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la aplicación de técnicas de teledetección, para la estimación de biomasa y carbono forestal, para ecosistemas de bosque seco tropical.
- Se sugiere la aplicación de otros índices de vegetación , variables biofísicas, y datos obtenidos por vehículos aéreos tripulados a distancia, para mejorarlos modelos de regresión, utilizados en la estimación de biomasa aérea.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adamu, B., Ibrahim, S., Rasul, A., Whanda, S., Headboy, P., Muhammed, I., & Maiha, I. (2021). Evaluating the accuracy of spectral indices from Sentinel-2 data for estimating forest biomass in urban areas of the tropical savanna. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100484. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100484>
- AIDER. (2015). *Proyectos de carbono forestal en el Perú. La Experiencia de AIDER para mitigar el cambio climático*. Lima.
- Bhardwaj, D., Bandy, M., Pala, N., & Rajput, B. (2016). Variation of biomass and carbon pool with NDVI and altitude in sub-tropical forests of northwestern Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(635). doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5626-3>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., . . . Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improvised estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*(145), 87-99. doi:DOI 10.1007/s00442-005-0100-x
- Cheng, F., Ou, G., Wang, M., & Liu, C. (2024). Remote Sensing Estimation of Forest Carbon Based on Machine Learning Algorithms. *Forest*, 15(4), 681. doi:<https://doi.org/10.3390/f15040681>
- Chuvienco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona: Ariel . S.A. Obtenido de https://www.google.com.pe/books/edition/Teledeteccion_ambiental/aKsNXCVCtcQC?hl=es-419&gbpv=1&dq=teledeteccion&pg=PA31&printsec=frontcover
- DiLas-Jiménez, J., Ortecho Llanos, R., & Alvarez Ticllasuca, A. (2020). Captura de carbono: Un enfoque sobre el cambio climático y los servicios ecosistémicos en el Perú. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica Alpha Centauri*, 1(2).
- FAO. (2004). *Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005: Términos y definiciones*. Roma.
- Feijoo, C., Cartuche-Peralta, K., Pucha-Cofrep, D., Espinoza-Ami, F., Zhingre, W., & Homeier, J. (2025). Densidad de la madera en 22 especies del bosque seco del sur de Ecuador a lo largo de dos gradientes altitudinales. *Bosque Latitud Cero*, 15(1), 44-56. doi:<https://doi.org/10.54753/blc.v15i1.2324>

- Gasparri, N. P., Bono, J., Karszenbaum, H., & Montenegro, C. (2007). Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina. *In XII congreso de la Asociación Española de Teledetección*, 19-21.
- Gitelson, A., Kaufman, Y., & Merzlyak, M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS - MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Lehmann, G. (1975). *Fotogramtería*. Barcelona: Editores técnico asociados,s.a. Obtenido de <https://www.google.com.pe/books/edition/Fotogrametr%C3%ADa/LrHda8Nw4QUC?hl=es-419&gbpv=1&dq=fotogrametría&pg=PA1&printsec=frontcover>
- Llanos Aguilar, M. (2010). *Determinación de biomasa aérea del algarrobo Prosopis pallida (h&b.ex.willd.)h.b.k. var. pallida ferreira en los bosques secos de la comunidad campesina José Ignacio Távora Pasapera del departamento de Piura*. Lima. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e4e7648f-8243-4c7b-a965-42b15f7ac26c/content>
- Lu, L., Luo, J., Xin, Y., Duan, H., Sun, Z., Qiu, Y., & Xiao, Q. (2022). How can UAV contribute in satellite-base phragmites australis aboveground biomass estimating? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103024. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103024>
- Matyukira, C., & Mhangara, P. (2024). Utilising RGB drone imagery and vegetation indices accurate above-ground biomass estimation: a case study of the cradle nature reserve, Gauteng Province, South Africa. *Geocarto International*. doi:<https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2390512>
- Mejía, C., Andrade, H., & Segura, L. (2023). Estimación de biomasa y carbono con herramientas de teledetección en bosques secos tropicales del Tolima, Colombia. *Revista de teledetección*(61), 57 - 70. doi:<https://doi.org/10.4995/raet.2023.19242>
- Mejía, C., Andrade, H., & Segura, M. (2023). Estimación de biomasa y carbono con herramientas de teledetección en bosques secos tropicales del Tolima, Colombia. *Revista de Teledetección*, 62, 57-70. doi:<https://doi.org/10.4995/raet.2023.19242>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2015). *Norma técnica complementaria NTC 001-2015*.

- Ministerio del Ambiente. (2019). *Documento de Resultados del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 200 - 2019*. Obtenido de https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/01/Informe-INGEI-2019-VF_2.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Guía de inventario de la flora y vegetación*. Lima. Obtenido de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/155205/07_guia-a-de-flora-y-vegetacion.pdf?v=1532447513
- Mohd Zaki, N., & Abd Latif, Z. (2017). Carbon sinks and tropical forest biomass estimation: a review on role of remote sensing in aboveground - biomass modelling. *Geocarto International*, 32, 701-716. doi:<https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1178814>
- Moradi, F., Darvishsefat, A., Pourrahmati, M., Delijouei, A., & Borz, S. (2022). Estimating Aboveground Biomass in Dense Hyrcanian Forests by the of Sentinel-2 Data. *Forest*, 13(1), 104. doi:<https://doi.org/10.3390/f13010104>
- Muhe, S., & Argaw, M. (2022). Estimation of above - aground biomass in tropical afro - montane forest using Sentinel-2 derived indices. *Environmental Systems Research*, 11(5). doi:<https://doi.org/10.1186/s40068-022-00250-y>
- Muñoz Nieto, A., & Pérez Gutiérrez, C. (2006). *Teledeteccion : Nociones y Aplicaciones*. Obtenido de https://www.google.com.pe/books/edition/Teledeteccion_Nociones_y_Aplicaciones/SfrGxbO1DT0C?hl=es-419&gbpv=1
- Peña, P., & Sarmiento Barletti, J. (2023). La regulación para mercados de carbono de REDD+ en Perú, avances jurídicos y de políticas públicas. *CIFOR*. Obtenido de DOI: 10.17528/cifor/008804
- Perea-Ardilla, M., Andrade-Castañeda, H., & Segura-Madrigal, M. (2021). Estimación de biomasa aérea y carbono con teledetección en bosques altoandinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque. *Revista Cartografica*(102), 91-123. doi:<https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier—The Role of Image Composition. *Remote Sensing*, 12(15), 2411. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12152411>
- Rondeux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 96-107. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rouse, J., Hass, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *NASA Spex.Publ*, 351(1), 309.
- Schreuder, G. (1963). *Manual de Fotogrametria Forestal*. Turrialba: Centro de Enseñanza e Investigación. Obtenido de

https://www.google.com.pe/books/edition/Manual_de_Fotogrametria_Forestal/q44gAQAAIAAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=fotogrametria&pg=PP9&printsec=frontcover

- Shi, Y., Wang, Z., Liu, L., Li, C., Peng, D., & Xiao, P. (2021). Improved Estimation of Woody Aboveground Biomass of Sparse Mixed Forest over Dryland Ecosystem by Combining Landsat-8, GAOFeN-2, and UAV Imagery. *Remote Sensing*, 13(23), 4859. doi:<https://doi.org/10.3390/rs13234859>
- Skiba, R. (2024). *Operaciones con drones pilotaje recreativo y comercial*. After Midnight Publishing. Obtenido de https://www.google.com.pe/books/edition/Operaciones_con_Drones/d10GEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
- Su-Ying, L., Xiao-Bing, L., Ge, Y., & Na, F. (2007). Vegetation indexes-biomass models for tropical semi-arid-steppe - A case study for xilinhote in Northern China. *Chinese Journal of Planet Ecology*, 31(1), 23-3. doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5626-3>
- Tabachnik, I. (2020). *Drones*. RedUsers. Obtenido de <https://www.google.com.pe/books/edition/Drones/YdPKDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0>
- WWF. (2016). *Cambio Climático, los bosques y las medidas para reducir las emisiones provenientes de la deforestación*. Asunción: WWF. Obtenido de https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/wwf_cambio_climatico_final.pdf

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de procesamiento de la parcela 1

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	995
Cámaras orientadas	995
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	1,086,810 de 1,132,393
RMS error de reproyección	0.203169 (0.455998 pix)
Error de reproyección máximo	0.609877 (16.6779 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.07001 pix
Colores de puntos	1 banda, uint16
Puntos claves	No
Multiplicidad media de puntos de paso	3.8788

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	4,000
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	2 minutos 32 segundos
Tiempo de orientación	7 minutos 45 segundos

Mapas de profundidad

Número	199
--------	-----

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Duración del procesamiento	8 minutos 19 segundos

Nube de puntos densa

Puntos	98,345,887
Colores de puntos	5 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	8 minutos 19 segundos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	7 minutos 1 segundo

Modelo

Caras	19,517,277
Vértices	9,765,446
Colores de vértices	5 bandas, uint16
Textura	4,096 x 4,096, 6 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Tipo de superficie	Bajorrelieve / terreno
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Número de caras	19,669,170
Duración del procesamiento	3 minutos 55 segundos

Parámetros de texturizado

Generales

Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	4,096 x 4,096
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de mapeado en UV	3 minutos 8 segundos
Tiempo de mezcla	16 minutos 18 segundos

Modelo de teselas

Textura	5 bandas, uint16
---------	------------------

Parámetros de reconstrucción

Datos fuente	Malla
Tamaño de tesela	256
Número de caras	Alta
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Duración del procesamiento	27 minutos 8 segundos

Modelo digital de elevaciones

Tamaño	12,544 x 13,132
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)

Parámetros de reconstrucción

Datos fuente	3
Interpolación	Habilitada
Duración del procesamiento	1 minuto 12 segundos

Ortomosaico

Tamaño	8,265 x 8,016
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Colores	5 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	1 minuto 22 segundos

Software

Versión	1.5.1 build 7618
Plataforma	Windows 64

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	995
Cámaras orientadas	995
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	848,992 de 892,997
RMS error de reproyección	0.192153 (0.51203 pix)
Error de reproyección máximo	0.577557 (20.2199 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.3929 pix
Colores de puntos	1 banda, uint16
Puntos claves	No
Multiplicidad media de puntos de paso	4.97688

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	4,000
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	2 minutos 49 segundos
Tiempo de orientación	5 minutos 58 segundos

Mapas de profundidad

Número	199
--------	-----

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Duración del procesamiento	11 minutos 22 segundos

Nube de puntos densa

Puntos	75,492,378
Colores de puntos	5 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	11 minutos 22 segundos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	9 minutos 4 segundos

Modelo

Caras	14,971,472
Vértices	7,491,286
Colores de vértices	5 bandas, uint16
Textura	4,096 x 4,096, 6 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Tipo de superficie	Bajorelieve / terreno
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Número de caras	15,098,475
Duración del procesamiento	3 minutos 19 segundos

Parámetros de texturizado

Generales

Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	4,096 x 4,096
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de mapeado en UV	2 minutos 12 segundos
Tiempo de mezcla	13 minutos 30 segundos

Modelo de teselas

Textura	5 bandas, uint16
---------	------------------

Parámetros de reconstrucción

Datos fuente	Malla
Tamaño de tesela	256
Número de caras	Alta
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Duración del procesamiento	18 minutos 12 segundos

Modelo digital de elevaciones

Tamaño	11,396 x 11,546
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)

Parámetros de reconstrucción

Datos fuente	3
Interpolación	Habilitada
Duración del procesamiento	1 minuto 2 segundos

Ortomosaico

Tamaño	7,399 x 6,907
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Colores	5 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	1 minuto 15 segundos

Software

Versión	1.5.1 build 7618
Plataforma	Windows 64

Parámetros de procesamiento

Generales	
Cámaras	1030
Cámaras orientadas	1030
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo
Nube de puntos	
Puntos	807,255 de 857,548
RMS error de reproyección	0.202193 (0.467012 pix)
Error de reproyección máximo	0.607408 (17.6939 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.18533 pix
Colores de puntos	1 banda, uint16
Puntos claves	No
Multiplicidad media de puntos de paso	5.78026
Parámetros de orientación	
Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	4,000
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	3 minutos 16 segundos
Tiempo de orientación	5 minutos 21 segundos
Mapas de profundidad	
Número	206
Parámetros de reconstrucción	
Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Duración del procesamiento	10 minutos 14 segundos
Nube de puntos densa	
Puntos	94,904,398
Colores de puntos	5 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	10 minutos 14 segundos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	7 minutos 27 segundos
Modelo	
Caras	18,798,769
Vértices	9,406,796
Colores de vértices	5 bandas, uint16
Textura	4,096 x 4,096, 6 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Tipo de superficie	Bajorrelieve / terreno
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Número de caras	18,980,879
Duración del procesamiento	4 minutos 18 segundos
Parámetros de texturizado	

Generales

Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	4,096 x 4,096
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de mapeado en UV	2 minutos 41 segundos
Tiempo de mezcla	14 minutos 28 segundos

Modelo de teselas

Textura	5 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	Malla
Tamaño de tesela	256
Número de caras	Alta
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Duración del procesamiento	28 minutos 14 segundos

Modelo digital de elevaciones

Tamaño	12,195 x 12,453
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	3
Interpolación	Habilitada
Duración del procesamiento	1 minuto 28 segundos

Ortomosaico

Tamaño	8,930 x 8,627
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Colores	5 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	1 minuto 50 segundos

Software

Versión	1.5.1 build 7618
Plataforma	Windows 64

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	985
Cámaras orientadas	985
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	911,684 de 955,538
RMS error de reproyección	0.204692 (0.467069 pix)
Error de reproyección máximo	0.614743 (16.2531 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.11988 pix
Colores de puntos	1 banda, uint16
Puntos claves	No
Multiplicidad media de puntos de paso	4.60509

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	4,000
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	2 minutos 26 segundos
Tiempo de orientación	4 minutos 56 segundos

Mapas de profundidad

Número	197
--------	-----

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Duración del procesamiento	10 minutos 25 segundos

Nube de puntos densa

Puntos	82,553,165
Colores de puntos	5 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	10 minutos 25 segundos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	7 minutos 50 segundos

Modelo

Caras	16,365,657
Vértices	8,188,901
Colores de vértices	5 bandas, uint16
Textura	4,096 x 4,096, 6 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Tipo de superficie	Bajorrelieve / terreno
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Número de caras	16,510,632
Duración del procesamiento	3 minutos 54 segundos

Parámetros de texturizado

Generales

Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	4,096 x 4,096
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de mapeado en UV	2 minutos 21 segundos
Tiempo de mezcla	13 minutos 29 segundos

Modelo de teselas

Textura	5 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	Malla
Tamaño de tesela	256
Número de caras	Alta
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Duración del procesamiento	22 minutos 58 segundos

Modelo digital de elevaciones

Tamaño	12,682 x 12,946
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	3
Interpolación	Habilitada
Duración del procesamiento	1 minuto 10 segundos

Ortomosaico

Tamaño	7,835 x 7,473
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Colores	5 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	1 minuto 22 segundos

Software

Versión	1.5.1 build 7618
Plataforma	Windows 64

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	985
Cámaras orientadas	985
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Nube de puntos

Puntos	700,876 de 745,249
RMS error de reproyección	0.206947 (0.436066 pix)
Error de reproyección máximo	0.621883 (13.4916 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	1.9939 pix
Colores de puntos	1 banda, uint16
Puntos claves	No
Multiplicidad media de puntos de paso	6.47998

Parámetros de orientación

Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	4,000
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	2 minutos 45 segundos
Tiempo de orientación	7 minutos 4 segundos

Mapas de profundidad

Número	197
--------	-----

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Nivel de filtrado	Agresivo
Duración del procesamiento	14 minutos 30 segundos

Nube de puntos densa

Puntos	67,059,705
Colores de puntos	5 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	14 minutos 30 segundos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	9 minutos 47 segundos

Modelo

Caras	13,298,186
Vértices	6,654,636
Colores de vértices	5 bandas, uint16
Textura	4,096 x 4,096, 6 bandas, uint16

Parámetros de reconstrucción

Tipo de superficie	Bajorrelieve / terreno
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Extra alta
Filtrado de profundidad	Agresivo
Número de caras	13,411,941
Duración del procesamiento	2 minutos 34 segundos

Parámetros de texturizado

Generales	
Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	4,096 x 4,096
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de mapeado en UV	2 minutos 18 segundos
Tiempo de mezcla	12 minutos 23 segundos
Modelo de teselas	
Textura	5 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	Malla
Tamaño de tesela	256
Número de caras	Alta
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Duración del procesamiento	18 minutos 32 segundos
Modelo digital de elevaciones	
Tamaño	11,047 x 10,928
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	3
Interpolación	Habilitada
Duración del procesamiento	59 segundos
Ortomosaico	
Tamaño	7,583 x 6,996
Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG::4326)
Colores	5 bandas, uint16
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	1 minuto 23 segundos
Software	
Versión	1.5.1 build 7618
Plataforma	Windows 64

Anexo 6. Medición de diámetro de copa en arbustos



Anexo 7. Medición de diámetro a la altura del pecho árbol 1



Anexo 8. Medición de diámetro a la altura del pecho árbol 2



Anexo 9. Mapa de biomasa aérea en el taller de enseñanza forestal y fauna silvestre - UNTUMBES

