



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



“Estimación del índice de área foliar de la variedad híbrida de palma aceitera obtenido a través de imágenes multiespectrales captadas desde un vehículo aéreo no tripulado (UAV)”

Ávila Chimarro, Luis Adrián

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Agropecuaria

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

Ing. Sinde González, Izar Ph.D.

26 de agosto del 2022



CONTENIDO DE LA EXPOSICIÓN

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

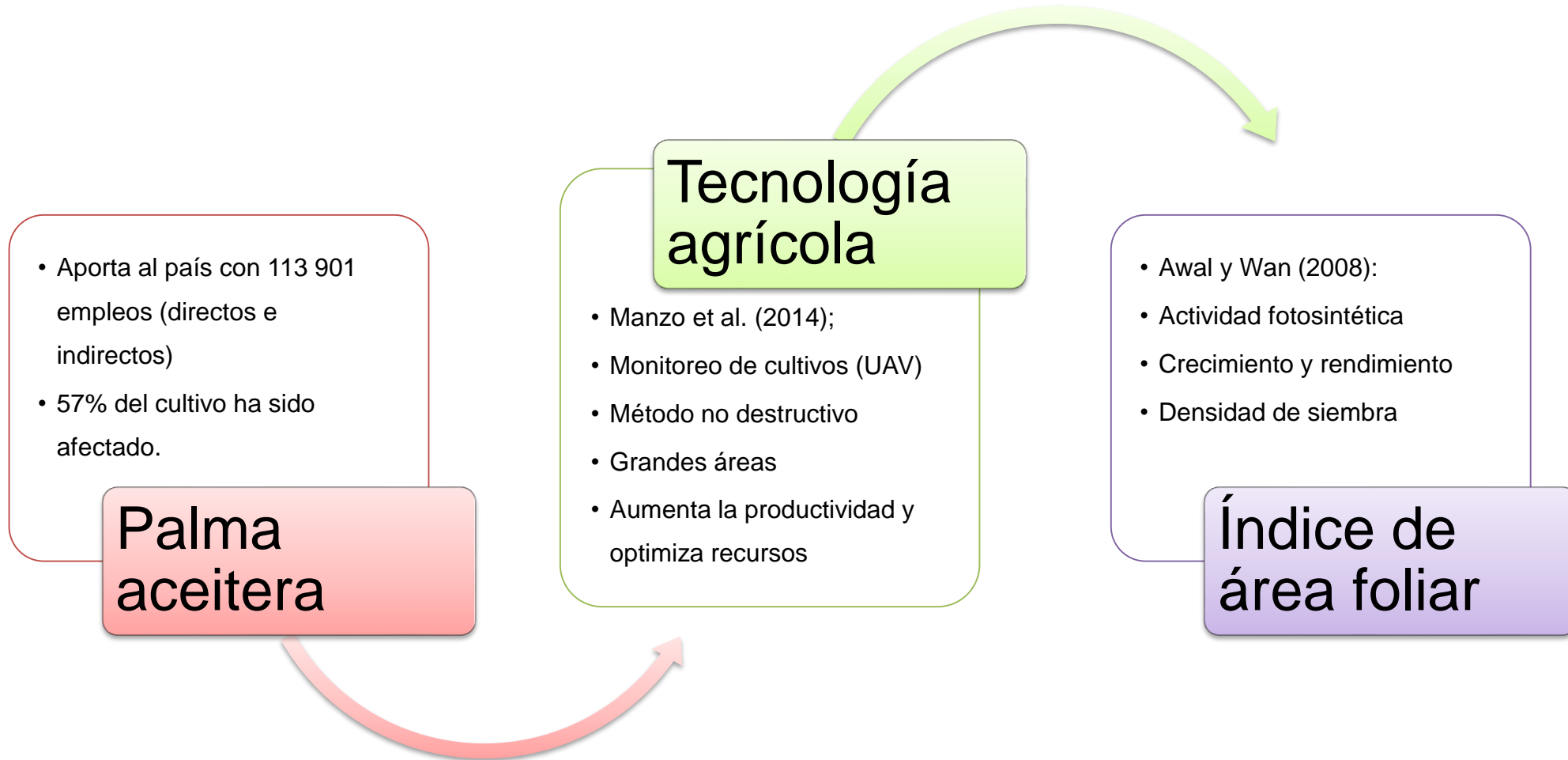
METODOLOGÍA

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES





GENERAL

Estimar el índice de área foliar de la variedad híbrida de palma aceitera obtenido a través de imágenes multispectrales captadas desde un vehículo aéreo no tripulado.

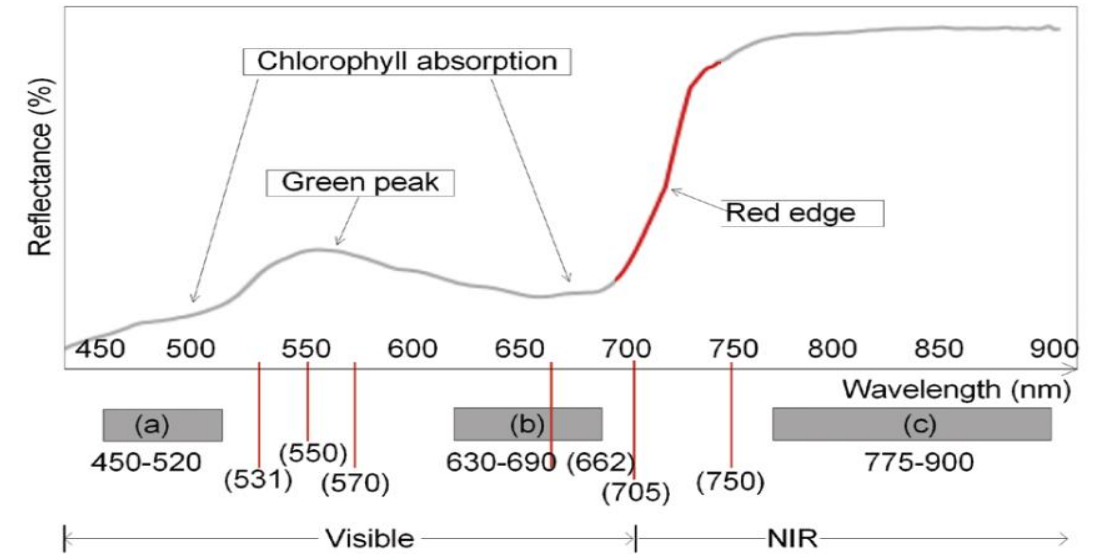
ESPECÍFICOS

- Relacionar los datos obtenidos del UAV en palma híbrida con los valores medidos con un espectrorradiómetro.
- Ajustar modelos para estimación de índice de área foliar de palma híbrida a través de imágenes UAV.
- Determinar la precisión de los modelos para índice de área foliar por medio de los índices de vegetación captados desde un UAV.

Las imágenes multispectrales captadas desde un UAV permiten estimar el índice de área foliar en variedades híbridas de palma aceitera.

Teledetección

Espectro Electromagnético



- Generan datos espectrales dado a las altas resoluciones.
- Ayudan a predecir el rendimiento.
- Impactos potenciales del cambio climático.

- La resolución espectral reconoce el ancho y la ubicación de las bandas espectrales en las que el sensor va a captar la radiación reflejada.
- Las longitudes de onda más útiles en la teledetección cubren la luz visible (VIS) y se extienden a través del infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR), hasta el infrarrojo térmico (TIR) y las bandas de microondas.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Elaeis oleifera x *Elaeis guineensis* (OxG)



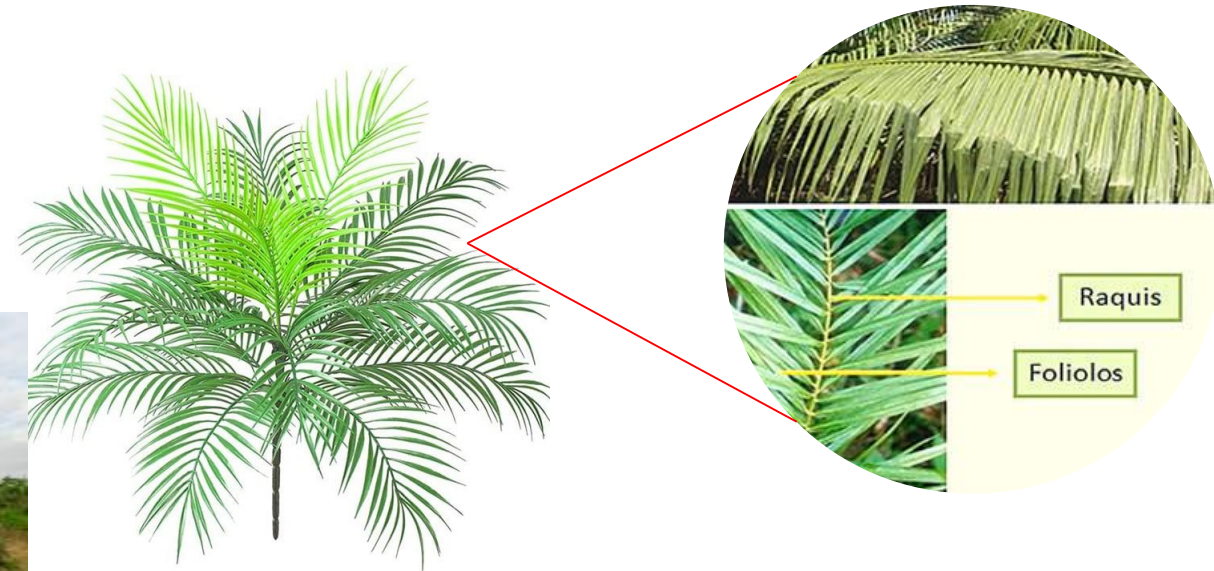
Taisha x Avros

Taisha, Morona Santiago, Ecuador



Amazon

Madres oleífera nativas de Manaus en Brasil x Pisíferas compactas.



(Fairhurst y Härdter, 2003). El índice de área foliar es la proporción del área foliar del terreno y no tiene dimensiones ya que es una proporción



$$IAF: \frac{\text{Área foliar}}{\text{Área del terreno}}$$





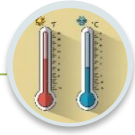
Clima

bosque húmedo tropical



Altitud

300 m.s.n.m.



Temperatura media

24,7 °C



Precipitación media anual

2704,3 milímetros

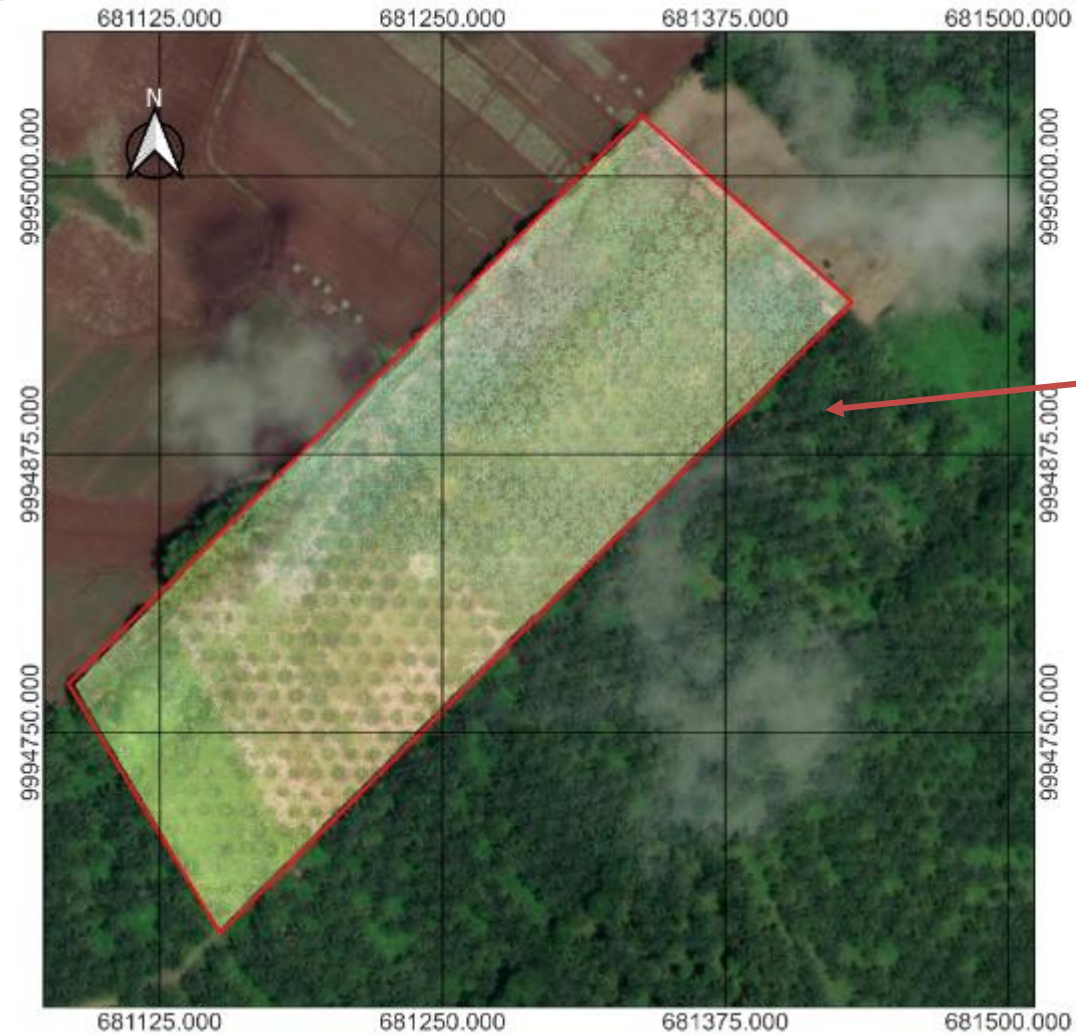


H. R.

87%



LOTE ANCUPA - UBICACIÓN



LEYENDA

□ Área de estudio

ESCALA 1:2500

35 0 35 70 105 m

Proyección Universal Transversada Mercator UTM
Elipsoide y Datum Horizontal Sistema Geodésico
Mundial WGS84
Zona 17 Sur

Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"
Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación: *Estimación del Índice de área foliar de variedades híbridas de palma aceitera obtenidas a través de imágenes multispectrales captadas desde un vehículo aéreo no tripulado (UAV).*

Autor: Ávila Chimarro, Luis Adrián



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

METODOLOGÍA



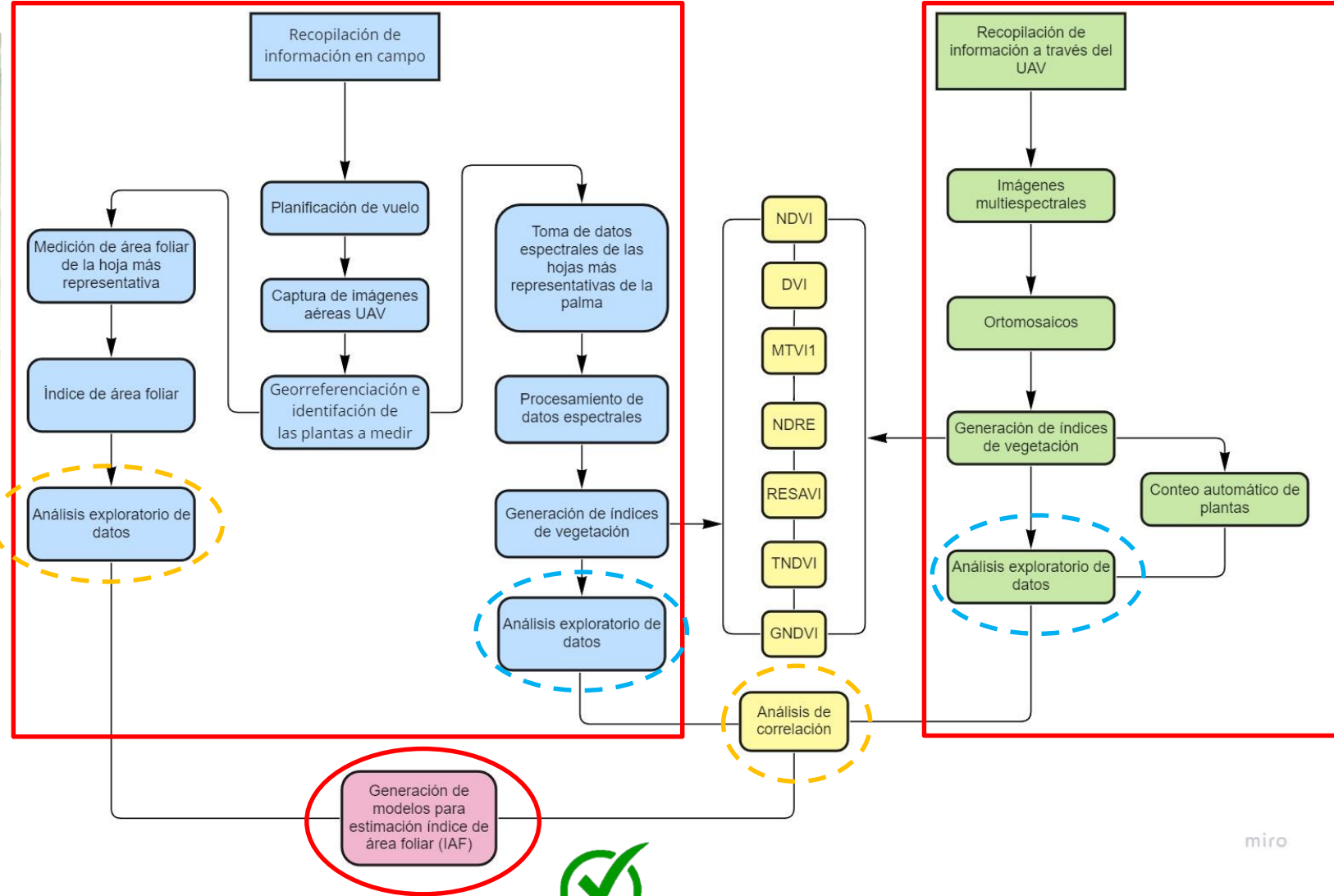
Identificación visual y georreferenciación de las plantas

8 muestras de cada variedad (n=16)

Morellato et al. (2010), quien demostró que para aplicaciones en bosques de árboles tropicales se debe tomar una **muestra mínima de 15 árboles.**

Tarricone et al. (2015), al realizar una investigación del biomonitoreo con árboles basada en la estandarización de la recolección y conservación de muestras de hojas.

Evaluaron no más de 5 árboles por sitio de muestreo y especie.



miro



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MEDICIÓN DEL ÁREA FOLIAR EN CAMPO

Se determinó de acuerdo a la metodología de (Olsson et al., 2021)



Medición de área foliar de la hoja más representativa

Índice de área foliar

Análisis exploratorio de datos

$$AF = b(n \times lw)$$

$$IAF: \frac{\text{Área foliar}}{\text{Distancia entre hileras} \times \text{distancia entre plantas}}$$



CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS ESPECTRALES

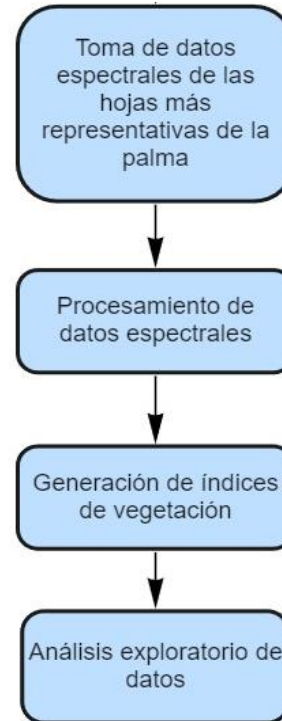
(Romero et al., 2022)



Captura en 3 foliolos



PRS-1100 (Spectral evolution, Haverhill, USA)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Wvl	Reflect % 1	Reflect % 2	Reflect % 3	Reflect % 4	Reflect % 5	Reflect % 6	Reflect % 7	Reflect % 8
2	312	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	313	18.129	17.545	16.991	17.379	16.125	17.971	19.950	19.932
4	314	18.098	17.441	17.223	17.609	16.390	18.431	19.230	19.886
5	315	17.395	17.790	16.901	16.548	16.409	19.218	19.191	20.498
6	316	17.347	17.516	16.973	16.605	16.586	18.197	19.122	20.123
7	317	17.644	17.097	17.156	16.876	16.354	17.676	19.169	19.311
8	318	18.023	16.853	17.126	17.014	15.838	17.986	19.309	18.617
9	319	18.004	17.356	16.057	16.781	15.932	17.777	19.419	19.232
10	320	17.549	17.008	16.224	16.559	16.232	18.113	19.215	19.313
11	321	17.300	16.782	16.696	16.366	16.618	18.533	19.023	19.285
12	322	17.800	17.618	16.441	16.203	16.927	18.496	19.119	19.641
13	323	17.516	17.384	16.112	16.123	16.003	17.687	18.285	19.633
14	324	17.018	17.376	16.114	16.414	15.735	17.421	18.192	19.629
15	325	16.675	17.658	16.359	16.842	16.257	17.747	18.825	19.681
16	326	17.103	17.166	16.111	16.388	16.046	17.347	18.401	19.617
17	327	17.218	17.222	16.132	16.386	16.144	18.011	18.975	19.646
18	328	17.039	17.383	16.027	16.492	16.076	18.624	19.585	19.290
19	329	16.823	16.626	14.960	15.839	14.846	16.925	18.183	17.682
20	330	16.921	16.644	15.852	15.997	15.355	16.662	18.397	18.256
21	331	16.640	16.442	16.344	15.963	15.483	16.898	18.313	18.573
22	332	15.828	15.657	15.430	15.354	14.389	17.033	17.235	17.578
23	333	16.025	15.446	15.450	15.436	14.505	16.718	17.670	17.554
24	334	16.069	16.252	15.733	15.238	14.820	16.903	18.305	18.069
25	335	16.127	17.224	15.850	15.055	15.095	17.253	18.597	18.559

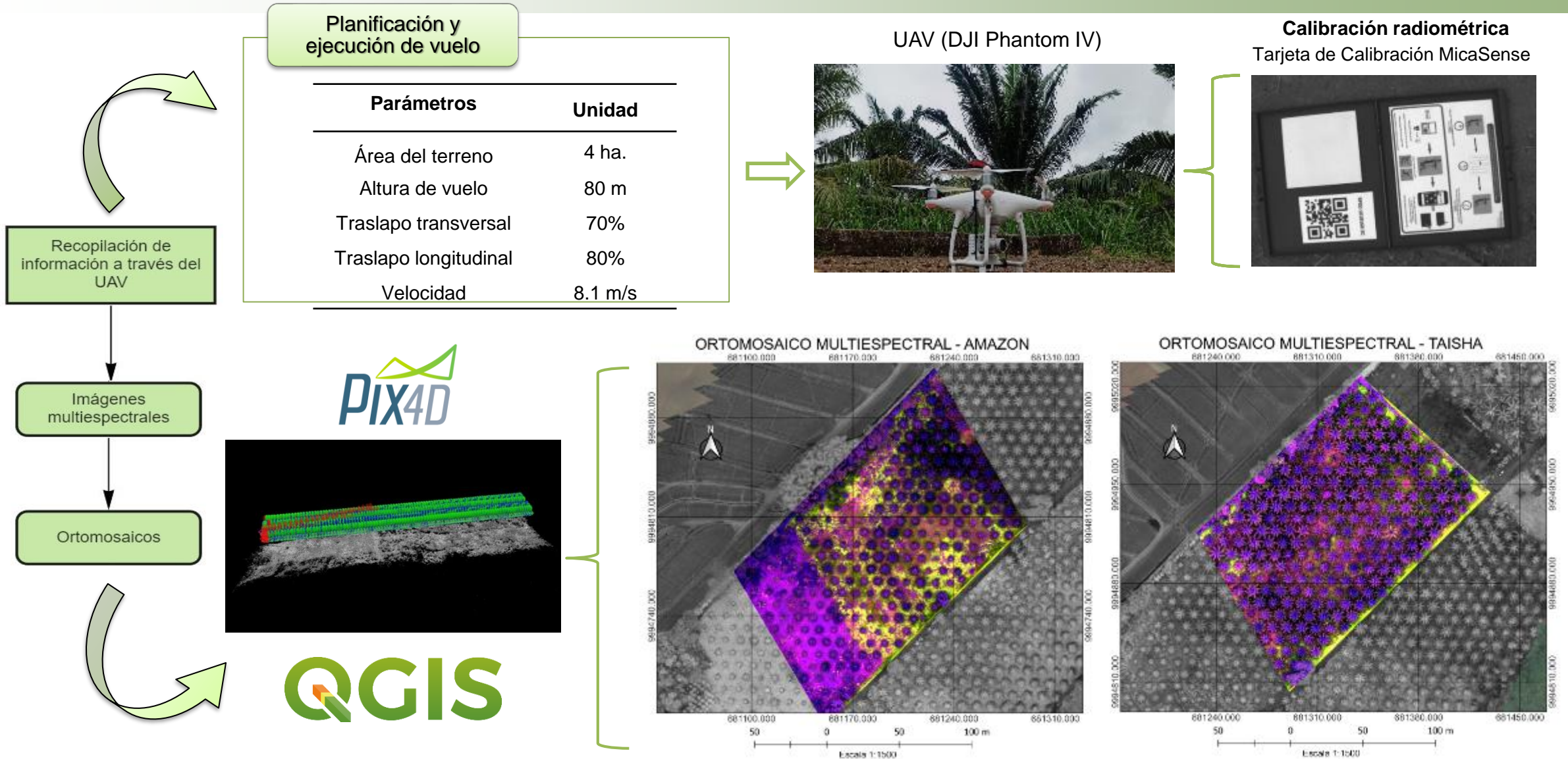
Rangos de longitudes de onda

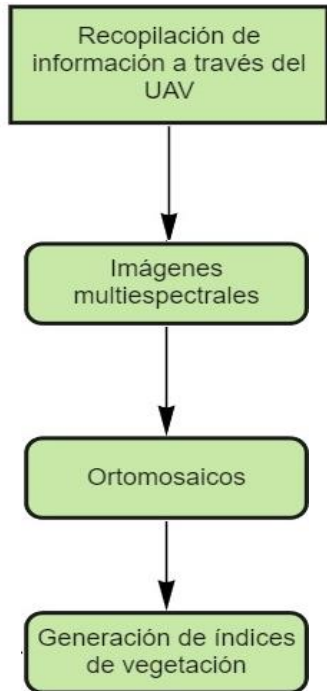
Banda	Rango	Fuente
Azul (B)	[400 – 500]	(Chuvieco y Huete, 2009)
Verde (G)	[500 – 600]	(Chuvieco y Huete, 2009)
Rojo (R)	[600 – 680]	(Chuvieco y Huete, 2009)
Borde Rojo (Red Edge)	[680 – 750]	(Blackburn, 1998)
Infrarrojo Cercano (NIR)	[750 – 1100]	(Chuvieco y Huete, 2009)

Bandas	No. plantas							
Verde	0.074	0.060	0.047	0.060	0.055	0.070	0.051	0.053
Rojo	0.056	0.044	0.032	0.040	0.040	0.054	0.035	0.036
EDGE	0.184	0.173	0.182	0.179	0.186	0.178	0.206	0.208
NIR	0.414	0.406	0.434	0.400	0.450	0.413	0.485	0.485

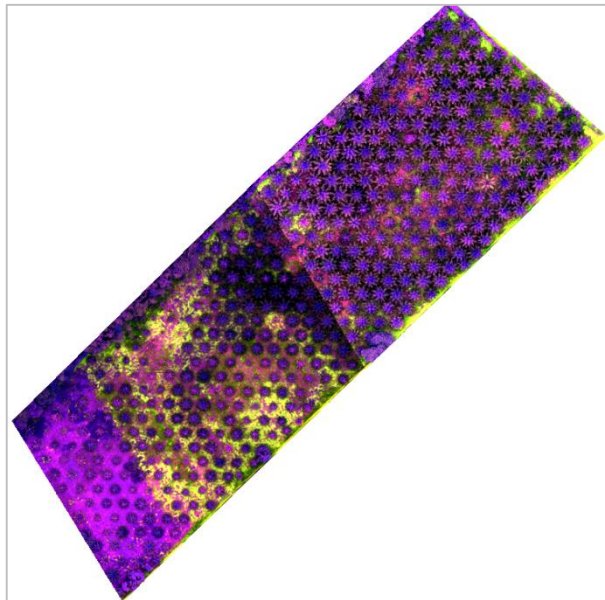


METODOLOGÍA



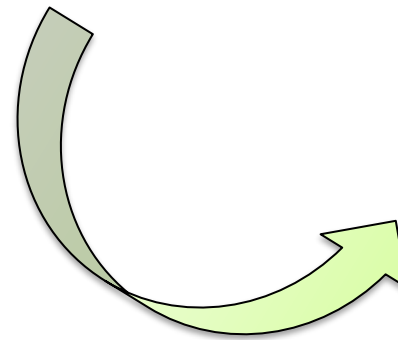
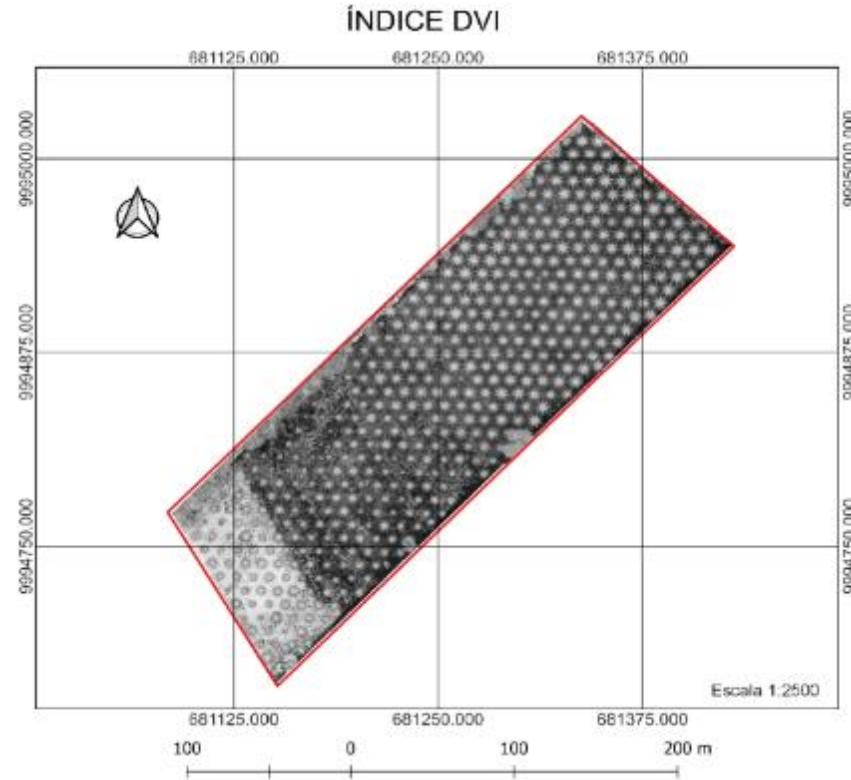
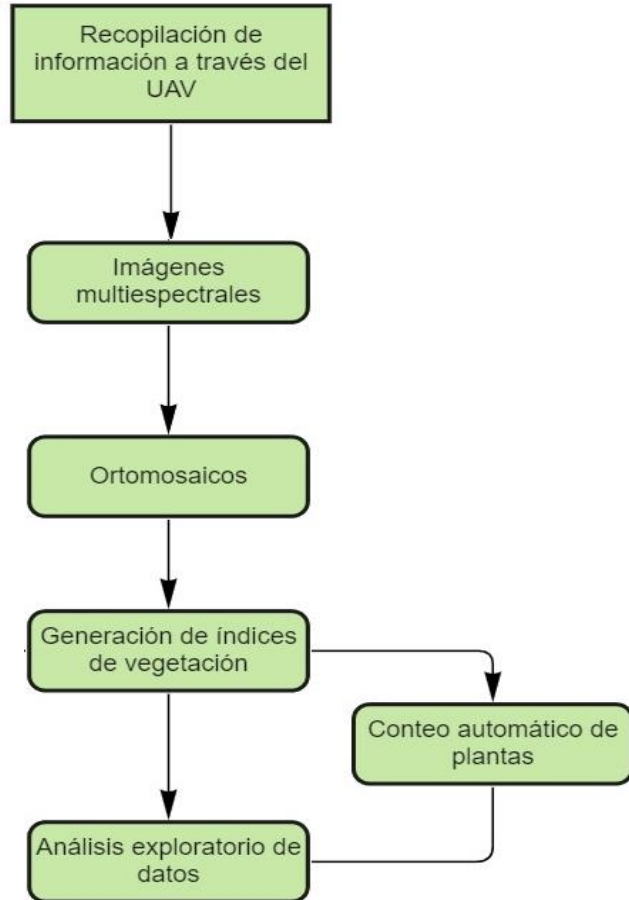


QGIS



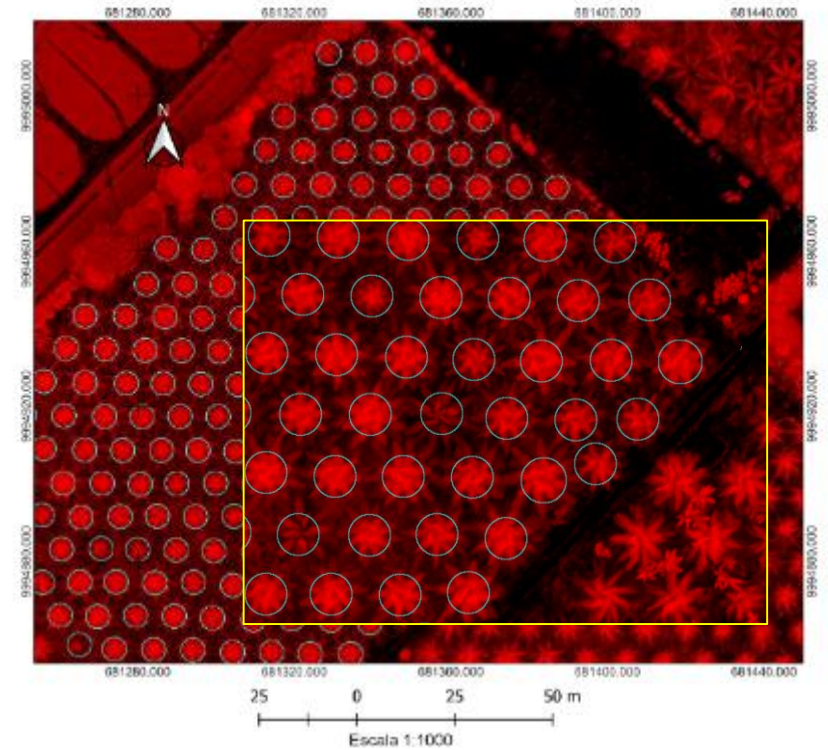
Índices de vegetación

Índice	Nombre	Fórmula	Referencia
NDVI	Índice normalizado de vegetación	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	(Rouse et al., 1973)
DVI	Índice de vegetación de diferencia	$NIR - RED$	(Tucker, 1979)
TNDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada transformada	$\left[\frac{NIR - RED}{NIR + RED} 0,5 \right]^{\frac{1}{2}}$	(Tucker, 1979)
GNDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada en verde	$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$	(Louhaichi et al., 2001)
RESAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo de borde rojo	$1,5 \frac{NIR - REDGE}{NIR + REDGE + 0,5}$	(Sripada et al., 2006)
MTVI1	Índice de vegetación triangular mejorado	$1,2[1,2(NIR - GREEN) -$	(Haboudane et al., 2004)
NDRE	Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo	$\frac{NIR - REDGE}{NIR + REDGE}$	(Tucker, 1979)



Count Crops

CONTEO AUTOMÁTICO - ENVI



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Estadística
descriptiva

Diagrama de
cajas

Correlación de
Pearson

Regresión lineal



Correlación de
Pearson

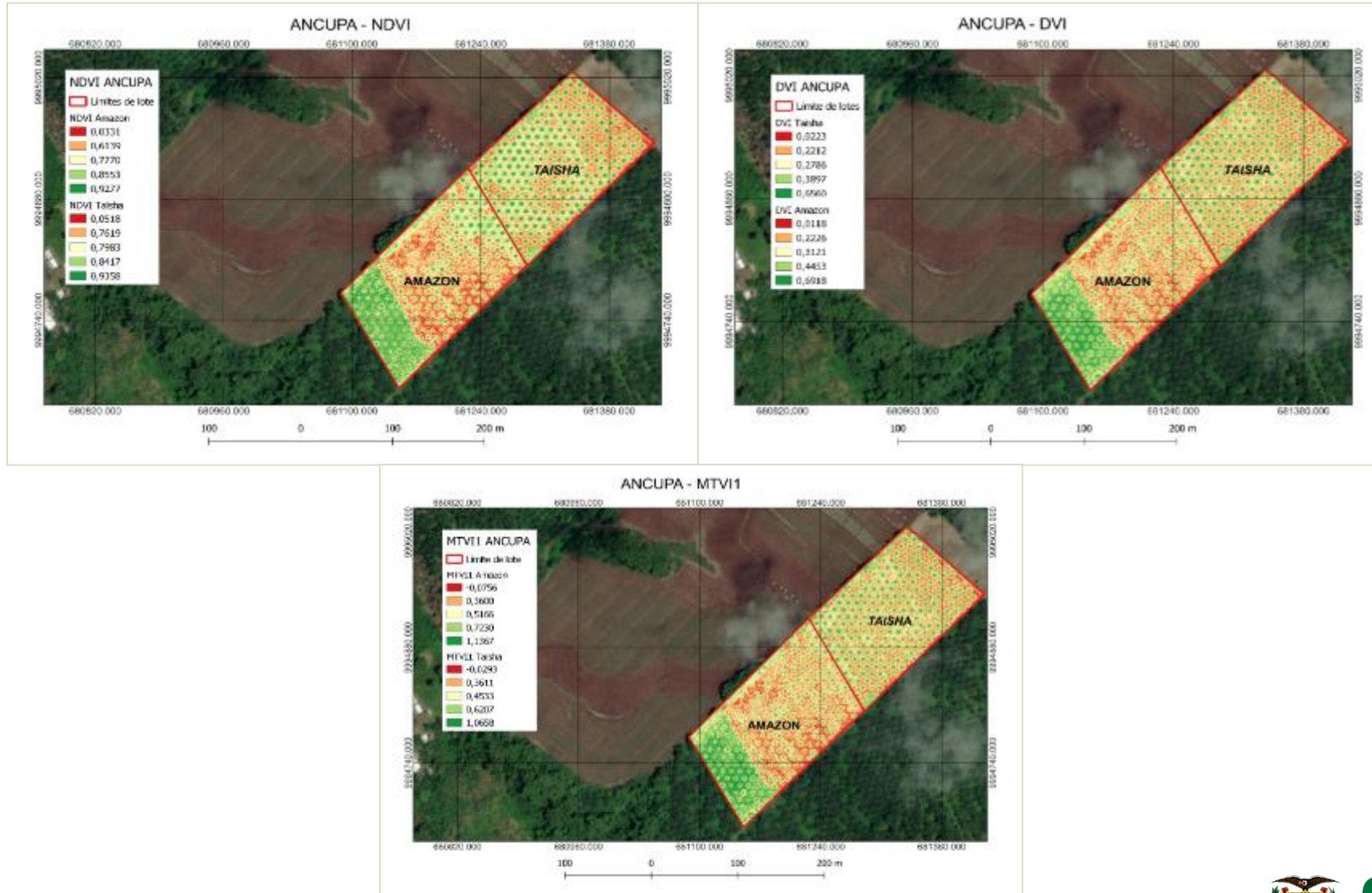
- Entre índices de vegetación obtenidos por el UAV y espectrorradiómetro, si el p-valor $<0,05 \rightarrow$ Índice de vegetación apto para estimar modelos de IAF

Regresión lineal

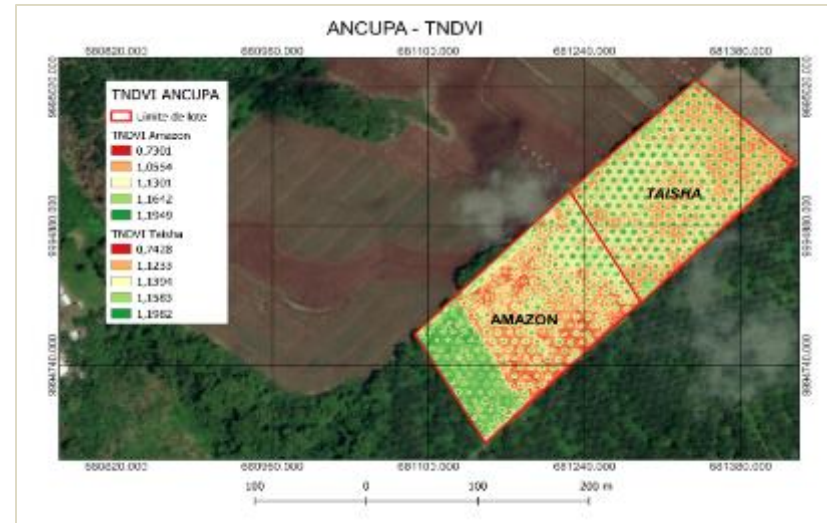
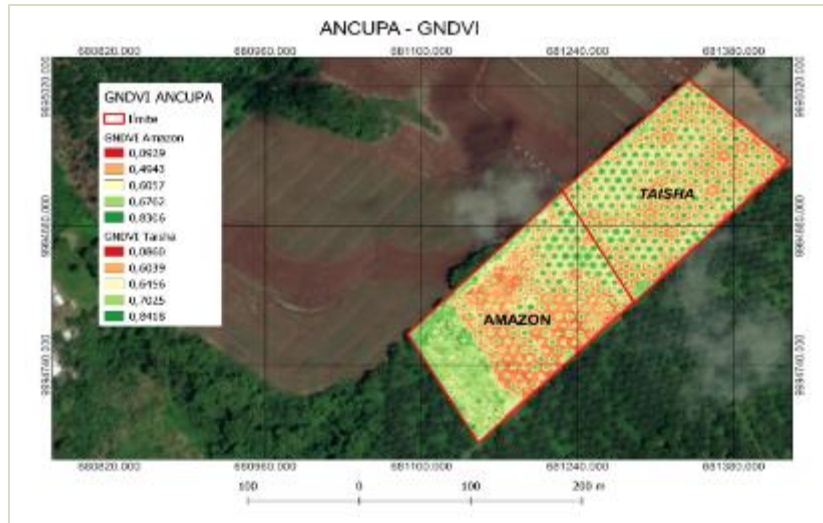
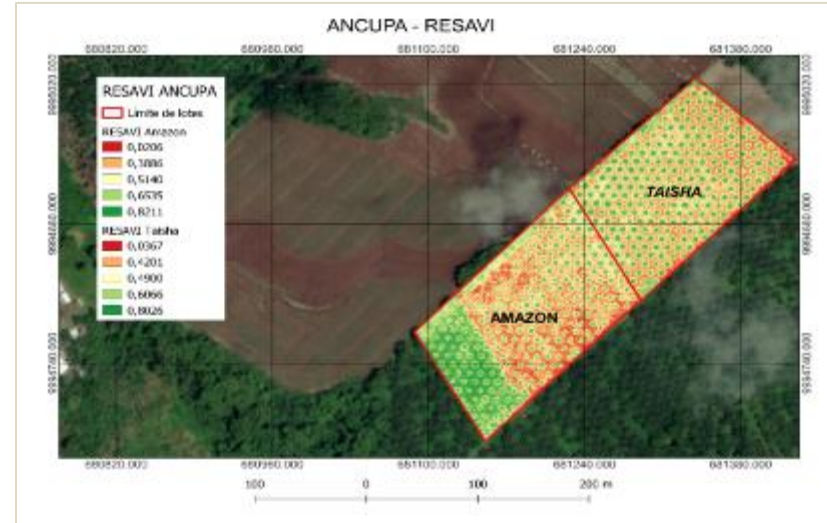
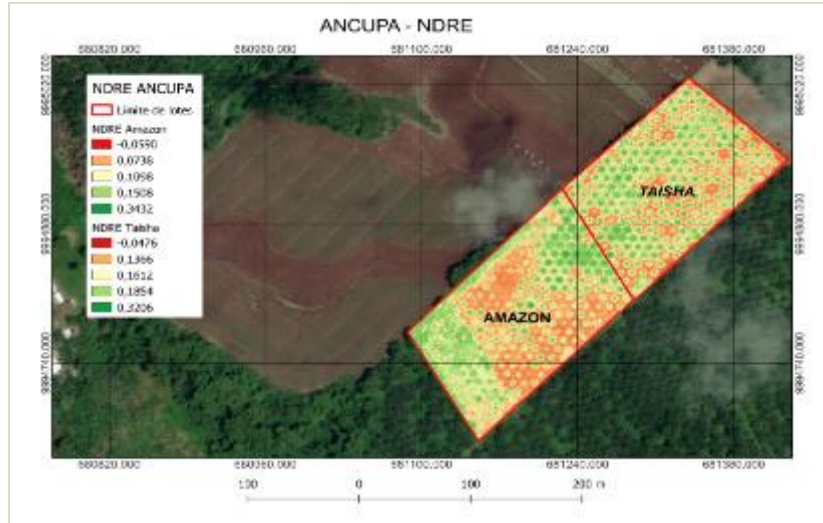
- Si p-valor $<0,05 \rightarrow$ modelos obtenidos a través del UAV se relacionan con el IAF.



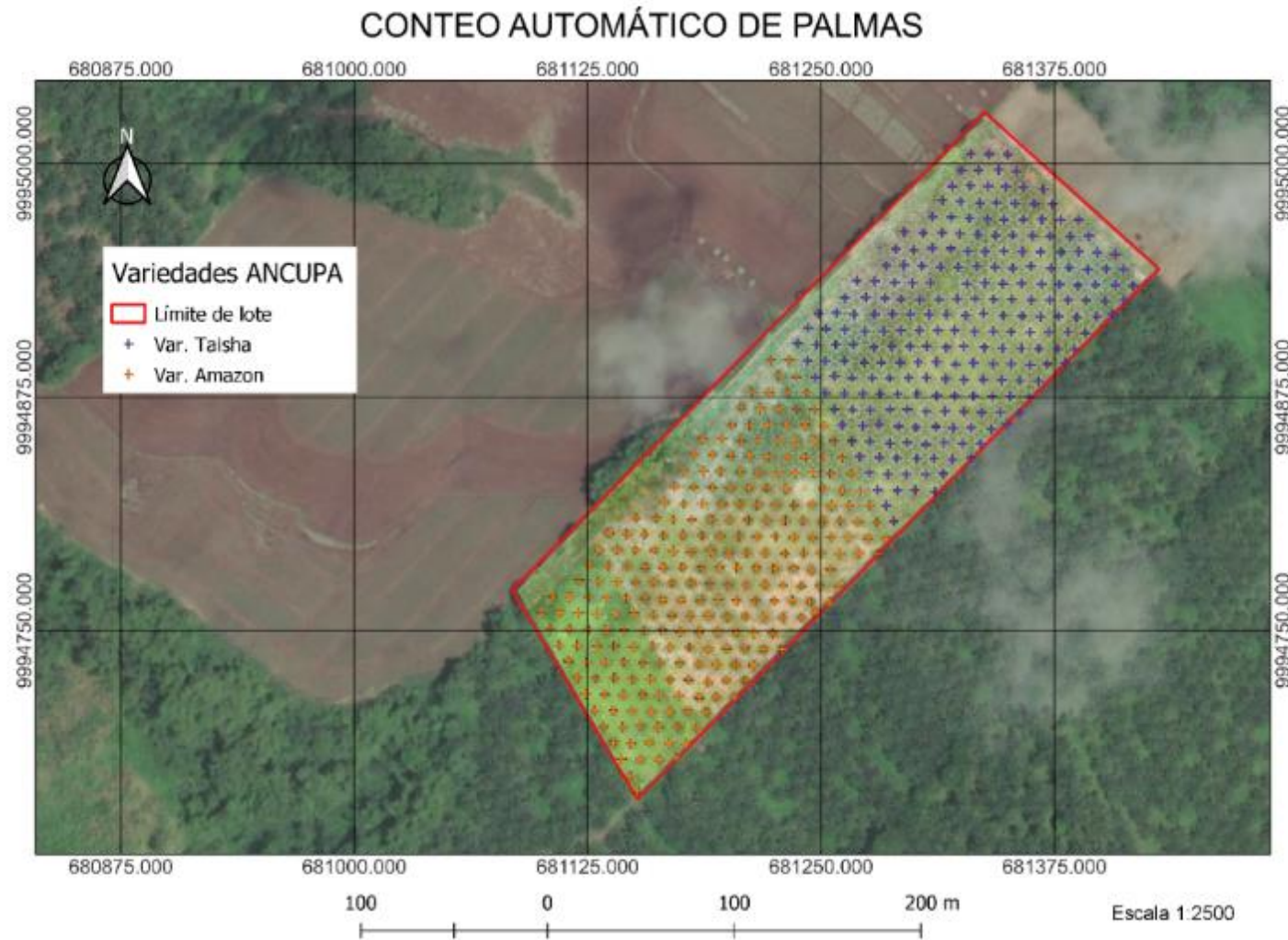
ÍNDICES DE VEGETACIÓN CON UAV



ÍNDICES DE VEGETACIÓN CON UAV



CONTEO AUTOMÁTICO DE PLANTAS



Resultados del conteo automático de plantas por variedad

Variedad	Número de plantas
Taisha	231
Amazon	254

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ÍNDICES DE VEGETACIÓN CON ESPECTRORRADIÓMETRO Y UAV

Tabla 6

Resumen estadístico de los índices de vegetación generados por el espectrorradiómetro y UAV

Índice de vegetación	Taisha	Amazon	Datos agrupados
NDVI _{spec}	0,8182 ± 0,037	0,8298 ± 0,019	0,8233 ± 0,0304
NDVI _{uav}	0,8600 ± 0,011	0,8488 ± 0,015	0,8551 ± 0,0136
GNDVI _{spec}	0,7571 ± 0,040	0,7686 ± 0,025	0,7621 ± 0,0337
GNDVI _{uav}	0,7288 ± 0,021	0,6984 ± 0,036	0,7155 ± 0,0316
DVI _{spec}	0,3898 ± 0,033	0,4019 ± 0,026	0,3951 ± 0,0297
DVI _{uav}	0,4274 ± 0,030	0,4354 ± 0,040	0,4309 ± 0,0338
MTVI1 _{spec}	0,5872 ± 0,047	0,6047 ± 0,036	0,5949 ± 0,0421
MTVI1 _{uav}	0,6740 ± 0,045	0,6959 ± 0,067	0,6836 ± 0,0549
TNDVI _{spec}	1,1479 ± 0,016	1,1531 ± 0,008	1,1502 ± 0,0132
TNDVI _{uav}	1,1662 ± 0,005	1,1584 ± 0,008	1,1628 ± 0,0074
RESAVI _{spec}	0,5985 ± 0,038	0,6121 ± 0,026	0,6045 ± 0,0327
RESAVI _{uav}	0,6385 ± 0,026	0,6382 ± 0,036	0,6384 ± 0,0296
NDRE _{spec}	0,3993 ± 0,012	0,4023 ± 0,016	0,4006 ± 0,0133
NDRE _{uav}	0,1975 ± 0,024	0,1662 ± 0,035	0,1838 ± 0,0322

Incluye la banda del verde en su cálculo

A partir de las bandas roja y NIR.

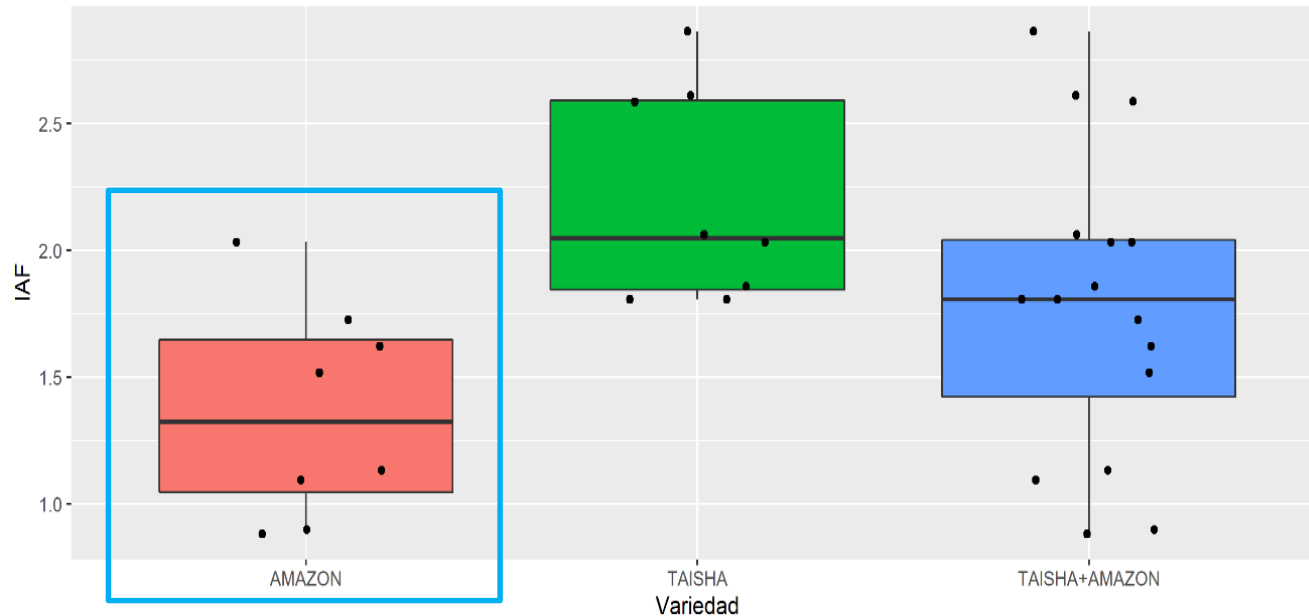
Estudios anteriores demostraron que era posible estimar el LAI a través de la reflectancia de la región de las bandas mencionadas anteriormente, que se emplean comúnmente para analizar los parámetros relacionados con el crecimiento vegetal (Duan et al., 2019).

Nota. En esta tabla se indican los valores de la media y desviación estándar.



Figura 22

Diagrama de cajas de los datos obtenidos en campo de IAF



Nota. Diagrama de cajas del índice de área foliar para Taisha, Amazon y el conjunto de datos.

En este trabajo las palmas se encontraban a una densidad de siembra de **100 palmas por hectárea**. Los valores de las medias de IAF para Taisha fue de **$2,30 \pm 0,38$** , para la variedad Amazon de **$1,41 \pm 0,44$** , y para el conjunto de datos entre Amazon y Taisha presentó una media de **$1,94 \pm 0,59$** .

Guarda relación con los resultados medidos por (Romero et al., 2022) en palmas híbridas de seis años, demostrando que a **densidades más altas los valores de IAF son más altos**, es así que a una densidad de **115 palmas por hectárea** obtuvo una media de **$3,0 \pm 0,21$** .

Amazon presentó un IAF bajo con respecto a los valores de Taisha y los presentados por (Romero et al., 2022), esto puede haber sido causa de que las hojas de **Amazon son más cortas que las de otras variedades híbridas** de palma aceitera de la misma edad (Alvarado et al., 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 7

Correlación entre índices de vegetación con espectrorradiómetro y UAV

Espectrorradiómetro	UAV	n	R	p
NDVI	NDVI	16	0,63	0,0089
GNDVI	GNDVI	16	0,56	0,0229
DVI	DVI	16	0,06	0,8286
MTVI1	MTVI1	16	0,05	0,8465
TNDVI	TNDVI	16	0,48	0,0423
RESAVI	RESAVI	16	0,14	0,5924
NDRE	NDRE	16	0,13	0,6162

Nota. En la tabla se indica los índices de vegetación que muestran diferencias significativas al correlacionar los datos del espectrorradiómetro con los del UAV.

La correlación significativa entre $NDVI_{uav}$ y $NDVI_{spec}$ es similar a los resultados de (Bhandari et al., 2018) en la ciudad de Pomona, Estados Unidos en cítricos ($R=0,6$), lo que demuestra la existencia de una correlación significativa entre las dos medidas de vegetación antes mencionadas.

Sin embargo, difieren de otros estudios realizados en pastos en varios estados fenológicos por (Cao et al., 2019) y a nivel de laboratorio (Caturegli et al., 2016).



Es probable que el número de muestras y la época de vuelo podrían haber influido en el grado de asociación entre los índices mencionados. Así, sería recomendable aumentar el número de palmas muestreadas y también realizarlo en varias épocas del año

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 7

Correlación entre índices de vegetación con espectrorradiómetro y UAV

Espectrorradiómetro	UAV	n	R	p
NDVI	NDVI	16	0,63	0,0089
GNDVI	GNDVI	16	0,56	0,0229
DVI	DVI	16	0,06	0,8286
MTVI1	MTVI1	16	0,05	0,8465
TNDVI	TNDVI	16	0,48	0,0423
RESAVI	RESAVI	16	0,14	0,5924
NDRE	NDRE	16	0,13	0,6162

Nota. En la tabla se indica los índices de vegetación que muestran diferencias significativas al correlacionar los datos del espectrorradiómetro con los del UAV.

Asimismo, el GNDVI expresó diferencias significativas ($p < 0,05$), esto puede ser debido a que la sensibilidad del rojo es al menos tres veces menor que el verde cuando la vegetación es superior al 60%, siendo probable que los índices de vegetación que utilizan la longitud de onda verde funcionen mejor (Gitelson et al., 2002).



En este contexto se entiende su buena respuesta a la correlación debido a que en la localidad que se realizó la investigación se determinó que la vegetación superaba el 50% en algunas secciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 7

Correlación entre índices de vegetación con espectrorradiómetro y UAV

Espectrorradiómetro	UAV	n	R	p
NDVI	NDVI	16	0,63	0,0089
GNDVI	GNDVI	16	0,56	0,0229
DVI	DVI	16	0,06	0,8286
MTVI1	MTVI1	16	0,05	0,8465
TNDVI	TNDVI	16	0,48	0,0423
RESAVI	RESAVI	16	0,14	0,5924
NDRE	NDRE	16	0,13	0,6162

Nota. En la tabla se indica los índices de vegetación que muestran diferencias significativas al correlacionar los datos del espectrorradiómetro con los del UAV.

De la misma manera para TNDVI, la diferencia significativa ($p < 0,05$) se atribuye a que es un **ajustado del NDVI**, es así que Onojeghuo y Blackburn (2016), al realizar las correlaciones de Pearson para estimaciones de IAF en cañaverales para los índices espectrales NDVI y TNDVI, determinó que pueden usarse para estimar el índice de área foliar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 7

Correlación entre índices de vegetación con espectrorradiómetro y UAV

Espectrorradiómetro	UAV	n	R	p
NDVI	NDVI	16	0,63	0,0089
GNDVI	GNDVI	16	0,56	0,0229
DVI	DVI	16	0,06	0,8286
MTVI1	MTVI1	16	0,05	0,8465
TNDVI	TNDVI	16	0,48	0,0423
RESAVI	RESAVI	16	0,14	0,5924
NDRE	NDRE	16	0,13	0,6162

Nota. En la tabla se indica los índices de vegetación que muestran diferencias significativas al correlacionar los datos del espectrorradiómetro con los del UAV.

Xue et al. (2004)



La variación de vigor vegetal algunos de los índices de vegetación pueden no tener la suficiente sensibilidad para identificar el área vegetal del cultivo, sino más bien de caracterizar el estado de desarrollo de un cultivo.

Por otro lado,

García Cárdenas et al. (2019)



Para identificar el valor del índice de área foliar del cultivo de arroz **donde la densidad de vegetación fue muy alta**, se enfocó en correlacionar los índices de vegetación en donde se vea **involucrado la banda del verde**, debido a que está **relacionado con la proporción de radiación absorbida fotosintéticamente** y es más próximo a detectar secciones específicas de las hojas del cultivo.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 8

Generación de modelos para IAF

Modelo	Ecuación	R ²	p
NDVI _{uav}	IAF=25,577NDVI – 21,605	0,39	0,0134
GNDVI _{uav}	IAF=14,942GNDVI – 8,7109	0,62	<0,01
TNDVI _{uav}	IAF=56,383TNDVI – 63,586	0,48	<0,01

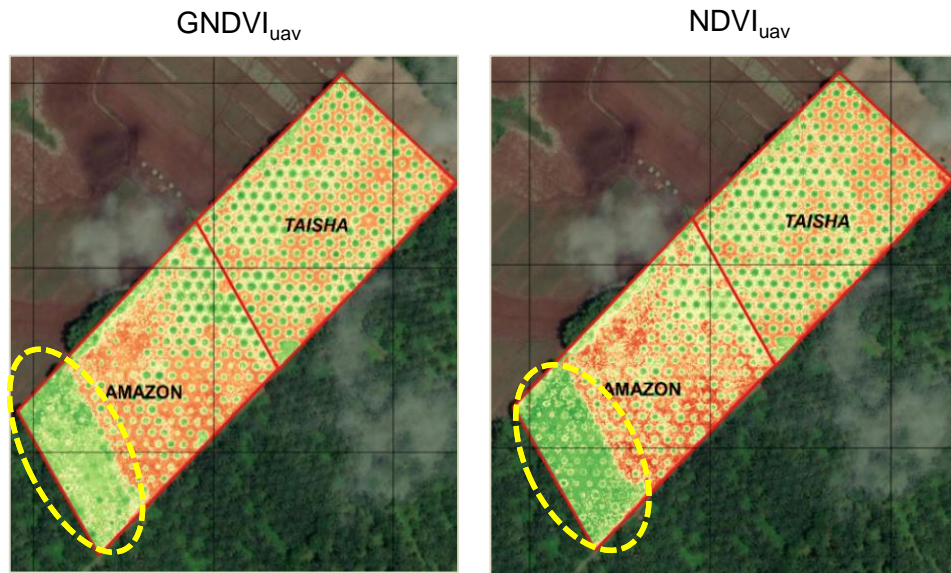
Nota. En la tabla se indica la precisión de los modelos para estimar el IAF.

El **GNDVI** fue el modelo que estuvo más relacionado con el IAF en palma aceitera.

Es más sensible que el NDVI por estar relacionado con la concentración de clorofila al usar la banda verde en lugar de la banda roja.

(García Cárdenas et al., 2019)

Los resultados para la dinámica de los índices NDVI y GNDVI expuestos por (García Cárdenas et al., 2019) concuerdan con los demostrados en esta investigación, que el GNDVI evidencia zonas de estrés en donde los mosaicos de NDVI registran zonas saludables.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 8

Generación de modelos para IAF

Modelo	Ecuación	R ²	p
NDVI _{uav}	IAF=25,577NDVI – 21,605	0,39	0,0134
GNDVI _{uav}	IAF=14,942GNDVI – 8,7109	0,62	<0,01
TNDVI _{uav}	IAF=56,383TNDVI – 63,586	0,48	<0,01

Nota. En la tabla se indica la precisión de los modelos para estimar el IAF.

Las afirmaciones anteriores son respaldadas por (Watson et al., 1999), en donde realizó un estudio en árboles con densa vegetación y demostró que el TNDVI muestra ser un buen predictor para índice de área foliar para árboles menores a ocho años.

El **TNDVI** fue el segundo mejor modelo de predicción para estimación de IAF.



Edad del cultivo: 6 años



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 8

Generación de modelos para IAF

Modelo	Ecuación	R ²	p
NDVI _{uav}	IAF=25,577NDVI – 21,605	0,39	0,0134
GNDVI _{uav}	IAF=14,942GNDVI – 8,7109	0,62	<0,01
TNDVI _{uav}	IAF=56,383TNDVI – 63,586	0,48	<0,01

Nota. En la tabla se indica la precisión de los modelos para estimar el IAF.

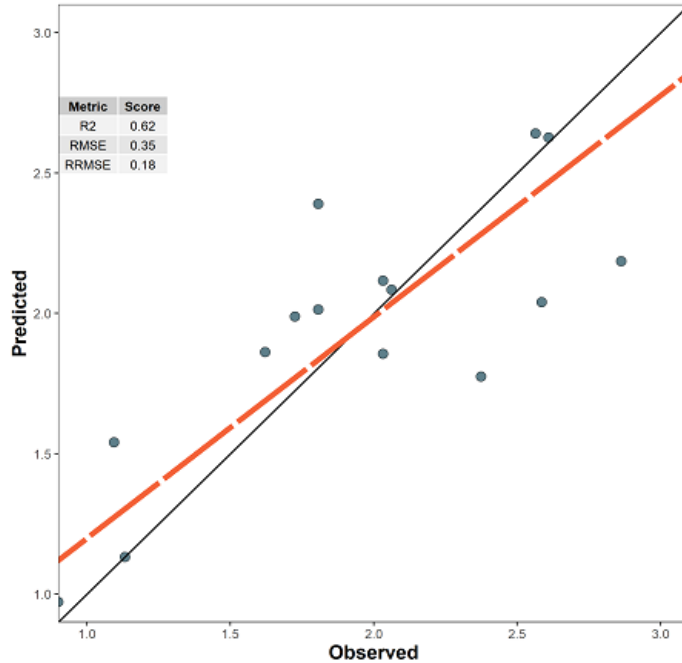
Coincide con el estudio realizado por Cao et al. (2017), en el cual se utilizó **NDVI** para monitorear el crecimiento del cultivo de trigo, y se comprobó que está limitado por la saturación que ocurre en condiciones de copas densas (IAF > 2 m² m⁻²).

Es por esta razón, se presume que los índices basados en borde de rojo (REDGE) no son precisos para predecir el IAF, esto estuvo de acuerdo con lo investigado por (Gong et al., 2021), en la estimación de área foliar en arroz donde NDVI, NDRE, OSAVI y EVI mostraron saturación en la etapa de mayor vegetación, mientras que CI verde indicó estar más relacionado linealmente con IAF.

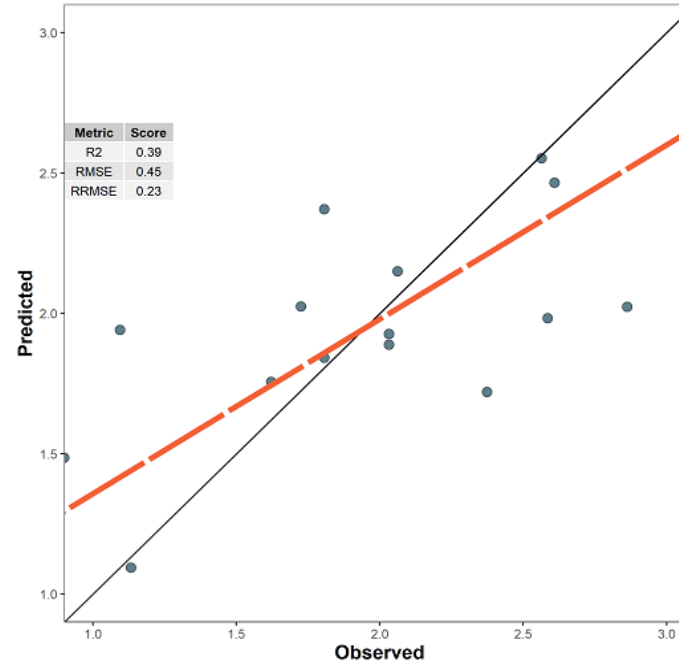


RESULTADOS Y DISCUSIÓN

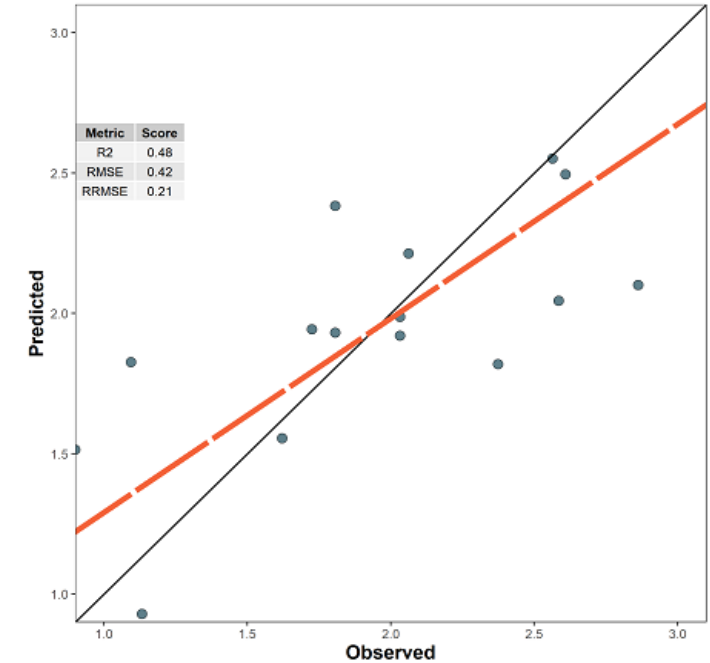
GNDVI



NDVI



TNDVI



El modelo derivado del **GNDVI** falla 0,35 por cada unidad de IAF medido en campo con un 18% de error cuadrático medio relativo de la raíz, por lo tanto,

Según (Li et al., 2013)

La precisión del modelo **para GNDVI se considera buena al presentar un RRMSE menor al 20%**,

NDVI y TNDVI al presentar un RRMSE menor al 30% la precisión del modelo se considera regular.

- Al relacionar los índices de vegetación obtenidos con el UAV y espectrorradiómetro se encontró que no todos los índices están aptos para relacionarlos en condiciones de alta vegetación.
- Se generaron tres modelos para estimar el IAF a través de imágenes multiespectrales obtenidas por el UAV, sin embargo, se encontró que el índice que presenta la banda verde (GNDVI), es el más apto para estimar el IAF en estas condiciones.
- Se determinó que el mejor modelo para estimar el índice de área foliar en variedades híbridas de palma aceitera fue mediante el GNDVI ($R^2=0,62$), seguido del TNDVI ($R^2=0,48$) y NDVI ($R^2=0,39$) respectivamente.

- Efectuar investigaciones donde se puedan relacionar los datos del espectrorradiómetro y el UAV con índices de vegetación que posean la banda del verde en su cálculo.
- Realizar un análisis de los modelos de precisión para IAF en diferentes épocas fenológicas del cultivo.
- Se recomienda realizar el vuelo fotogramétrico a una altura menor a la que se realizó esta investigación, a fin de que el software pueda obtener los polígonos de cada planta con más precisión, esto podría mejorar la relación entre los datos tomados en campo y por el UAV y por ende mejorar la estimación del índice de área foliar.

AGRADECIMIENTOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



ANCUA



UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO



GEOSPACE SOLUTIONS

Ing. Izar Sinde, Ph.D.
Director del proyecto

Ing. Vladimir Bravo Yandún.
ANCUA

Ing. Carlos Quiloango M.Sc.
Asesor externo

FAMILIA Y AMIGOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA