Termografía con aeronaves remotamente pilotadas en palma de aceite (Elaeis guineensis)

Dora Cecilia Martínez Lerma

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela De Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Programa Agronomía

Cumaral-Meta

2023

Termografía con aeronaves remotamente pilotadas en palma de aceite (Elaeis guineensis)

Dora Cecilia Martínez Lerma

Director:

Oscar Mauricio Moya Murillo

Víctor Orlando Rincón Romero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela De Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Programa Agronomía

Cumaral-Meta

2023

Nota De Aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del Jurado

Ciudad, Fecha

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, por su enseñanza en este proceso de educación superior, mi gratitud a CENIPALMA por su apoyo tecnológico e instrumentos para la ejecución del proyecto, quienes me respaldaron en la elaboración de este. Sin más duda al profesional Víctor Orlando Rincón Romero, quien, con su conocimiento y experiencia, me motivo y apoyo en el desarrollo del proyecto, aportándome ideas y asesorándome en cada paso a paso en la elaboración del proyecto, muchas gracias Ing. Por sus conocimientos, por su mentoría, por creer en mí, por enseñarme, por su respaldo, por su tiempo y por demostrarme que los logros son posibles, por aceptar ser mi director externo y ayudarme a realizar convenios con Cenipalma en la colaboración del proyecto, gracias por aportarme conocimientos laborales y enseñarme, mil gracias.

Mis agradecimientos para mi mentor y tutor Oscar Mauricio Moya, quien creyó en mi desde el primer semestre en la Universidad y en el trayecto de mi carrera profesional, quien acepto ser mi director interno, gracias por su profesionalidad y dedicación, por su apoyo en este proceso y motivación, por enseñarme y educarme, gracias profesor porque sus conocimientos me llevaron a grandes retos profesionales y laborales, con reconocimientos meritorios, nacionales en el semillero e institucionales, como estudiante de la UNAD, muchas gracias Tutor. Finalmente agradezco a Dios y mi familia, por su apoyo incondicional, por que me dieron fuerzas cuando más las necesitaba, a mi hija por ser mi motivación principal y por ayudarme a creer en mí y en que lo lograría, como merito personal y por ella, a DIOS por sus grandes bendiciones y por poner en mi vida estas maravillosa personas y entidades, que fueron participes de esta Meta.

Resumen

En el presente proyecto se establecen condiciones de confiabilidad para la adquisición de medidas térmicas en palma de aceite, Se evaluaron las variables altura, hora del día y condición climática, para determinar lineamientos que permitan maximizar la confiabilidad de la medición de temperatura por medio de sensores soportados en aeronaves remotamente pilotadas para las condiciones de palma de aceite. La temperatura del dosel en palma de aceite a través de la medición de la radiación térmica (rango del espectro electromagnético), es una variable que permite dar alerta de condiciones anormales en la planta, indicadores como déficit hídrico, deficiencia nutricional y problemas fitosanitarios, entre otras. En la actualidad, existe la medición sobre la termometría infrarroja como un método de diagnóstico temprano de palmas afectadas por la Marchitez Letal (ML), pues esta enfermedad es presentada como uno de los problemas fitosanitarios más importantes en el cultivo de palma de aceite en Colombia, donde se obtuvieron resultados de variables que permitieron complementar que la temperatura infrarroja y delta, presenta diferencias significativas entre las palmas sanas y enfermas. Como estudio se utilizó una cámara térmica Flir Duo 2 en tierra, como referencia, la cual ha sido utilizada en proyectos de investigación en palma de aceite, con el fin de evaluar la Cámara térmica FLIR Bosón soportada en un drone Autel Evo II pro, para determinar la precisión de las medidas y consideraciones para el uso de estas tecnologías.

Palabras claves: Termografía, Temperatura, Dron, Cámara térmica, Dosel.

Abstract

In the present project, reliability conditions are established for the acquisition of thermal measurements in oil palm. The variables height, time of day and climatic condition were evaluated, to determine guidelines that allow maximizing the reliability of temperature measurement by means of sensors. supported in remotely piloted aircraft for oil palm conditions. The temperature of the canopy in oil palm through the measurement of thermal radiation (range of the electromagnetic spectrum), is a variable that allows warning of abnormal conditions in the plant, indicators such as water deficit, nutritional deficiency and phytosanitary problems, among others. At present, there is the measurement of infrared thermometry as a method of early diagnosis of palms affected by Lethal Wilt (ML), since this disease is presented as one of the most important phytosanitary problems in oil palm cultivation in Colombia. Where results of variables that allowed to complement that the infrared and delta temperature were obtained, present significant differences between healthy and diseased palms. As a study, a ground-based Flir Duo 2 thermal camera was used, as a reference, which has been used in oil palm research projects, in order to evaluate the FLIR Boson thermal camera supported on an Autel Evo II pro drone, to determine the precision of the measurements and considerations for the use of these technologies.

Keywords: Thermography, temperature, drone, thermal camera, canopy.

Contenido

Introducción **11**

Justificación **13**

Objetivos **15**

Objetivo General **15**

Objetivos específicos **15**

Marco Conceptual y Teórico **16**

Descripción del Problema **19**

Metodología **21**

Zona de estudio **21**

Equipos utilizados **22**

Evaluación del efecto de la altura **25**

Evaluación del efecto de la hora del día **26**

Determinación del efecto de variables del entorno **27**

Análisis de datos **28**

Resultados y discusión **31**

Efecto de la altura en la termografía aérea **31**

Efecto de la hora del día en la termografía aérea **45**

Efecto de variables del entorno en la termografía aérea **50**

Conclusiones **53**

Recomendaciones 54

Referencias Bibliográficas..... 55

Lista de tablas

Tabla 1. Características de las palmas seleccionadas. 21

Tabla 2. Ficha técnica de Cámara térmica, FLIR DUO Pro 24

Tabla 3. Ficha técnica Aeronave EVO II PRO 25

Tabla 4. Imágenes tomadas con aeronaves remotamente pilotadas, en diferentes alturas, Imágenes térmicas e imágenes con la cámara. 31

Tabla 5. Análisis de estadística descriptiva para Altura. 36

Tabla 6. Prueba Shapiro-Wilk normality test, para Altura. 38

Tabla 7. Salida de datos; Prueba de Tukey, para Altura. 40

Tabla 8. Análisis de estadística descriptiva para Hora 46

Tabla 9. Prueba de normalidad por grupos de altura para la diferencia de T° con respecto a la referencia Hora (Shapiro-Wilk normality test). 49

Lista de Figuras

Figura 1. Campo experimental palmar las corocoras, Lote 16A, Paratebueno, Cundinamarca.22

Figura 2. Dron Autel Evo II 23

Figura 3. Cámara Térmica FLIR duo 2 24

Figura 4. Toma de Imágenes térmicas, con las 2 cámaras en diferente altura, para Dron TD Temperatura Dron y TR: Temperatura Referencia 26

Figura 5. Tomas aéreas en diferentes horas del día. 27

Figura 6. Toma de temperatura, sobre condiciones del tiempo. 27

Figura 7. Salida de datos, análisis de medida de datos. 35

Figura 8. Histograma de distribución de las diferencias de temperatura con respecto a la referencia. 35

Figura 9. Gráfico de caja y bigotes de distribución Altura referencia.37Figura 10. Salida de datos, prueba ANOVA.. 39

Figura 11. Gráfico Tukey múltiple comparisons of means, Altura. 43

Figura 12. Salida de datos atipicos. 45

Figura 13. Gráfico diferencia con respecto a la referencia para Altura. 45

Figura 14. Gráfico de caja y bigotes de distribución N_Hora 46

Figura 15. Gráfico test de normalidad del grupo de datos. 48

Figura 16. Salida de datos, test de Kruskal-Wallis. 50

Figura 17. Salida de datos, test de Wilcoxon. 50

Figura 18. Salida de datos, variable del modelo parad datos atípicos. 51

Figura 19. Salida de datos, modelo lineal. 52

Introducción

El cultivo de Palma de aceite dio sus primeros inicios en el año 1930 en Colombia, cuando los cultivos comerciales llegaron al país, sin embargo, el cultivo inicio en el continente africano específicamente en el golfo de Guinea y luego pasa a Asia Oriental en países como Indonesia, Malasia y Tailandia, allí se extendieron las áreas, siendo uno de los más grandes productores. Finalmente llego a América, dando sus primeras siembras en Brasil, desde allí se posiciona como uno de los cultivos más importantes en América y el cuarto productor y exportador a nivel mundial.(Infoagro. 2018). Cuenta con 161 municipios de 21 departamentos en Colombia, donde se genera la producción, además de ser un cultivo de amplia versatilidad, permite múltiples de usos en la industria, generando empleo a miles de familia, energías renovables y productos generados de la biomasa. (Fedepalma. 2021).

El estudio de la palma relaciona una alta gama de investigaciones asociados a las mejoras del cultivo, sin embargo cabe resaltar que la temperatura es una de las variables abióticas esenciales en el desarrollo de las plantas, con un rol importante en el crecimiento y la productividad de estas, a su vez, la temperatura medida en una planta y de manera específica en el cultivo de palma de aceite, es indicador de condiciones de estrés biótico o abiótico como déficit hídrico, estrés, desbalance nutricional, síntomas referentes a enfermedades o anomalías presentes en hojas, raíz, frutos o en su desarrollo (Henson, et al., 2005), las tecnologías asociadas a las medidas de temperaturas infrarrojas o termografía, son avances importantes en la investigación, con el aporte de nuevo avances y resultados confiables de estudio.

La termografía es una de las metodologías implementadas en los sistemas de información Geográfica y como tecnología para fines investigativos en detección temprana de enfermedades

en las plantas, también como indicador fisiológico (Md Noor, et al., 2011). La variación de la temperatura en la palma puede generar alteraciones, a mayor temperatura se puede incrementar el proceso fotosintético, pero también puede disminuir el rendimiento de este, a menor temperatura se puede generar daños en los tejidos de la planta, el déficit hídrico y estrés, también son daños fisiológicos y metabólicos, ocasionados por la temperatura (Harun & Md Noor, 2006). Las aeronaves remotamente pilotadas (ARP) o drones, se han llevado al uso generalizado en estrategias y metodologías, especialmente para la agricultura de precisión (Sagan, et al., 2019), existen sistemas para mediciones térmicas o infrarrojas y equipos con sensores e imágenes con indicadores de muy buena resolución, para determinar la temperatura en las plantas, aunque es un sistema que aun continua en proceso de investigación, los resultados han determinado métodos confiables para una agricultura sostenible y avances en el sector palmero (Messina & Modica, 2020).

En el presente proyecto, se determinaron variables de evaluación como altura, hora del día, condiciones de nubosidad, humedad relativa y temperatura ambiental, para la adquisición de medidas térmicas en palma de aceite *(Elaeis guineensis),* evaluando las condiciones confiables para el uso de la termografía aérea con las ARP, con sensores FLIR.(Sagan et al., 2019). Las variables estudiadas en el siguiente proyecto son la evaluación sobre imágenes térmicas con ARP, para análisis sobre medidas de temperaturas, que pueden relacionar un gran impacto en la investigación, con el manejo buenas prácticas agrícolas, e implementado estrategias de manejo sostenible. La detección temprana de enfermedades ha sido uno de los principales factores de investigación e innovación.

Justificación

El uso de la tecnología en cultivos de palma de aceite ha sido un factor importante para hallar respuestas a muchas de las dudas que se genera día a día, desde el estado de la fisiología de la planta, hasta la comercialización del producto final, son herramientas que reducen la incertidumbre para el uso de este tipo de equipos, en este caso la toma de temperatura con cámaras térmicas (Messina & Modica, 2020), (Giraldo Betancourt et al., 2021). Este trabajo tuvo como objetivo, analizar las herramientas tecnológicas en el cultivo de palma de aceite, identificando los beneficios que nos aporta la Termografía en la palmicultura.

Las condiciones para la toma de temperaturas en palma de aceite son las variables más importantes para hallar resultados confiables y precisos, con la implementación de la termografía aérea en las ARP. Para determinar el correcto análisis en el procesamiento de las imágenes térmicas, se evaluaron las condiciones de altura, hora del día y condiciones ambientales, medidas que pueden interferir en la temperatura de la planta, en el diagnóstico temprano de enfermedades (ML) (Giraldo Betancourt et al., 2021), también puede interceptar en costos y rendimientos de la labor.

En el año 2016 Arango et. al., ejecutaron un proyecto sobre Termometría infrarroja como un método de diagnóstico temprano de palmas afectadas por la Marchitez letal, donde se empleó la medición de temperatura en plantas sanas y enfermas, con el equipo; Termómetro Brixco® Ref. 3520. Se determinaron que las palmas enfermas presentan una temperatura alta en relación con la temperatura base de una planta sana, sobre 2°C de diferencia. El proyecto se ejecutó con una persona de campo que conoce los aspectos de las enfermedad o censador de enfermedades en palma de aceite, la persona se ubicaba a una distancia de 5 metros de la palma, dando la espalda

al sol, direccionando al dosel de la palma y toma los datos de temperatura infrarroja, ambiente y diferencia, esta labor tiene un rendimiento de 2 ha/día, 42 ha/mes y un costo de personal mensual por $900.000. (Arango Uribe et al., 2016).

Con la implementación de las ARP, como medida para tomas térmicas, se establecen 10 ha. por vuelo en 20 min, dentro del rendimiento operativo del equipo, un dron aproxima entre 8.000 dólares con Cámara térmica, se estima que la implementación de estos equipos tecnológicos puede generar rendimientos aceptables, para futuras inversiones. Al obtener estos resultados se puede determinar futuras investigaciones que contribuyan al palmicultor, como método de diagnóstico, que construya a identificar la enfermedad y mitigar la velocidad de dispersión de la enfermedad y genere condiciones positivas al sector.

Objetivos

Objetivo General

Establecer condiciones de confiabilidad para la adquisición de medidas térmicas en palma de aceite. *(Elaeis guineensis)*

Objetivos específicos

1. Evaluar la confiabilidad de los valores de temperatura sobre el dosel de las palmas, según la altura de medida térmica en el dron
2. Evaluar la hora de la medición térmica, sobre la variabilidad de los valores de temperatura en el dosel de la palma
3. Evaluar el efecto de las condiciones de nubosidad, humedad relativa y temperatura ambiental en las medidas de temperatura.

Marco Conceptual y Teórico

La agroindustria de la palma en Colombia, se categoriza como uno de los sectores de mayor liderazgo en el país, siendo este el primero productor en América y el cuarto en el mundo,(Ortiz Mora, 2019), sin embargo es uno de los cultivos más productivos y comerciales, por la gran variedad de productos y consumo a nivel nacional, la versatilidad que este cultivo permite, como múltiples usos de la industria, en alimentos, oleo química, energías renovables, productos derivados de la biomasa y amigables con el medio ambiente, además de ser un monocultivo con hasta 25 años de producción y con un promedio de 3º ton/ha en producción. Cuenta con 161 municipios de 21 departamentos en Colombia. Además de ser un cultivo de amplia versatilidad, permite múltiples de usos en la industria, generando empleo a miles de familia, con una extensión de 620.902 has, área sembrada en el país.(Fedepalma, 2022).

El estado fitosanitario en el cultivo de palma de aceite es uno de los temas principales y preocupantes en la palmicultura, en los últimos años se ha estandarizado problemas de plagas y enfermedades en el cultivo, generalizando nuevos casos, nuevos insectos y nuevas estrategias de manejo agronómico, sin embargo, la metodología de trabajo en campo debe ser gremial y unificada para que esta funcione. La zona oriental del país, es la zona más afectada con un área de 91.300has, siendo el primer sector con la mayor cantidad de área sembrada, información obtenida de catastro palmero (Fedepalma, 2022).

El gremio, cuenta con una entidad de investigación Fedepalma, Cenipalma donde se han implementado proyectos investigativos que avanzaron en el transcurso del tiempo, dando solución y acompañamiento en alguna de estas problemáticas.

En la actualidad la palma de aceite presenta una enfermedad denominada Marchitez Letal (ML), que ha sido una de las enfermedades letales con mayor impacto económico en el sector, esta ha generado incertidumbre en plantaciones, una vez que la planta presente sintomatología referente a la enfermedad, esta muere y deben ser eliminada (erradicadas). La manifestación de esta enfermedad se trasmite por un insecto vector llamado *Haplaxius crudus*, (Fedepalma, 2022), que se alimenta de gramíneas en el suelo en su estado inmaduro y luego se alimenta de la savia de la palma, si esta planta presenta la enfermedad, el vector adquiere el patógeno e infesta las demás plantas del cultivo, generando alteraciones fisiológicas en palmas afectadas (Romero et al., 2006).

El suministro del agua en la planta es esencial para su buen desarrollo y productividad, es el factor limitante para el rendimiento en la planta, el cultivo de palma de aceite debe tener condiciones óptimas para el uso eficiente del agua, el mal manejo o deficiencia de agua puede generar estrés hídrico(Cadena, 2018). La palma transpira de 5-6 mm de agua en el día, pero en zonas con baja precipitación, puede verse estrés que puede comprometer las condiciones fisiológicas en el tejido de la palma. El déficit en la planta interfiere en las estomas produciendo su cierre, que reduce la traspiración cuando se pierde agua e impide la absorción de CO2, viéndose afectada la fotosíntesis y esto produce temperaturas muy altas (Harun & Md Noor, 2006).

La agricultura de precisión (AP), se utiliza como una herramienta tecnológica para la identificación de diferentes variables, aplicables al cultivo, suelo, entre otras, como mejoras de las prácticas agrícolas, para desarrollo e implementación de insumos y estrategias viables en la agricultura. El estrés y la temperatura son las principales variables evaluadas con los sistemas electromagnéticos e infrarrojos que se utilizan para la medición de detección remota óptica (RS),

con ARPS, para medir las estimaciones de estas variables, estimando los síntomas visuales, estas herramientas son muy prometedoras para determinar posibles condiciones del cultivo (Khanal et al., 2017).

La termografía es una técnica que permite medir temperaturas a larga distancia sin contacto con la planta o el objeto, la cual podemos identificar una temperatura aceptable, esta técnica, funciona gracias a las radiaciones infrarrojas, mediante cámaras o sensores de temperatura, e instrumentos que convierten la energía infrarroja en temperatura y por medio de este poder captarla. La termografía tiene como objeto la identificación de puntos fríos o calientes por medio de imágenes o bandas de calor y lo convierte en análisis de temperatura.(Messina & Modica, 2020)

En el año 2012, (Aucique Pérez et al., 2012), determino por medio de investigaciones, que los cambios fisiológicos de la planta interfieren en el metabolismo de estas, lo que indica Aucique, que en plantas enfermas a comparación de las sanas, existen cambios en la temperatura, este tipo de comportamiento se utilizó como indicador para evaluar un diagnóstico temprano de la Marchitez Letal, se monitorearon palmas con ML en temporadas secas y húmedas, registrando valores superiores a las palmas sanas, considerando que a mayores temperaturas, son índices de que la palma está enferma (Arango Uribe et al., 2016).

Descripción del Problema

En el día, la radiación solar es mayor que la terrestre, por la tanto la superficie suele ser más caliente, lo que implicaría que la temperatura puede cambiar o variar según la hora del día hasta 1°C, con temperaturas más bajas en horas de la mañana y temperaturas altas en ultimas horas de la tarde.

La Temperatura es uno de los indicadores de estrés biótico y abiótico en la planta, que puede generar alteraciones en los procesos fisiológicos y metabólicos de esta, produciendo alteraciones como baja productividad, reducción en el crecimiento, bajo rendimientos en los cultivos y distintos escenarios en cambios de la planta. Por medio de esta podemos detectar a tiempo y generar condiciones que reduzcan los riesgos de perdidas en cultivos (Murugesan et al., 2017).

En el cultivo de palma de aceite se ha identificado, con estudios y avances, que la temperatura adecuada para el desarrollo y crecimiento de estas se encuentra entre 22°C a 32°C, con un promedio de 27°C, es la temperatura óptima para un buen crecimiento de la planta. Sin embargo, influye otras condiciones como el déficit hídrico, el estrés, enfermedades, plagas y problemas fitosanitarios, que pueden afectar la planta.

La enfermedad Marchitez Letal, pone en riesgo el futuro de la Palmi cultura, a causa de las grandes pérdidas que se ha presentado en los últimos años. Dentro de los estudios catalogados como avances de Cenipalma, existe el método de la medición con termómetros infrarrojos como diagnóstico temprano en plantas afectadas, la termografía es determinada como método promisor para la marchitez letal, pues esta enfermedad es presentada como uno de los problemas fitosanitarios mas importantes en el cultivo de palma de aceite en Colombia, donde se obtuvieron

resultados de variables que permitieron complementar que la temperatura infrarroja y delta, presenta diferencias significativas entre las palmas sanas y enfermas, presentando mayor temperatura en plantas con síntomas (Arango Uribe et al., 2016). Aunque no existe un protocolo claro de medición, que evalué y confirme claramente que identifique que la palma se encuentra enferma por Marchitez Letal.

Dentro de los estudios realizados (Henson et al., 2005), ejecuto varios métodos para detención y cuantificación del estrés abiótico en las plantas, con el fin de determinar cuáles son las condiciones ambientales de producen la reducción y perdida de la productividad. Dentro de estas identifico el déficit hídrico, exceso de agua, baja atmósfera humedad, baja o alta temperatura, deficiencia de nutrientes y baja radiación. Dentro de estos métodos utilizo la temperatura y la Evapotranspiración, utilizando instrumentos como termómetros infrarrojos y del cual Henson, determina que la diferencia de temperatura entre el dosel y el aire (ΔT) sirve como indicador de estrés de la planta desde la temperatura de la hoja, con la temperatura del aire a medida que se cierran las estomas y el enfriamiento evaporativo debido a la transpiración es reducido (Díaz García Cervigón, 2015).

Metodología

El presente proyecto es de tipo muestral, en el que se evaluó una tecnología para la optimización en tomas de temperaturas en el cultivo de palma de aceite teniendo como propósito el establecer condiciones que permitan un alto grado de confiabilidad de los datos adquiridos con la tecnología.

Zona de estudio

El proyecto se ejecutó en el Campo experimental palmar de las Corocoras, plantación ubicada en a 5km Vía Cabuyaro - Vereda Palomas de Mararabe, (Paratebueno, Cundinamarca), municipio a una altitud media de 256msnm y una temperatura promedia anual de 27 °C.

Las mediciones se realizaron en el lote 16A, que cuenta con un área sembrada de 5.6 ha (**Figura *1***) de cultivares *Eleaeis guineensis,* del cual se seleccionaron 2 palmas, con las siguientes características (**Tabla 1**).

Tabla 1

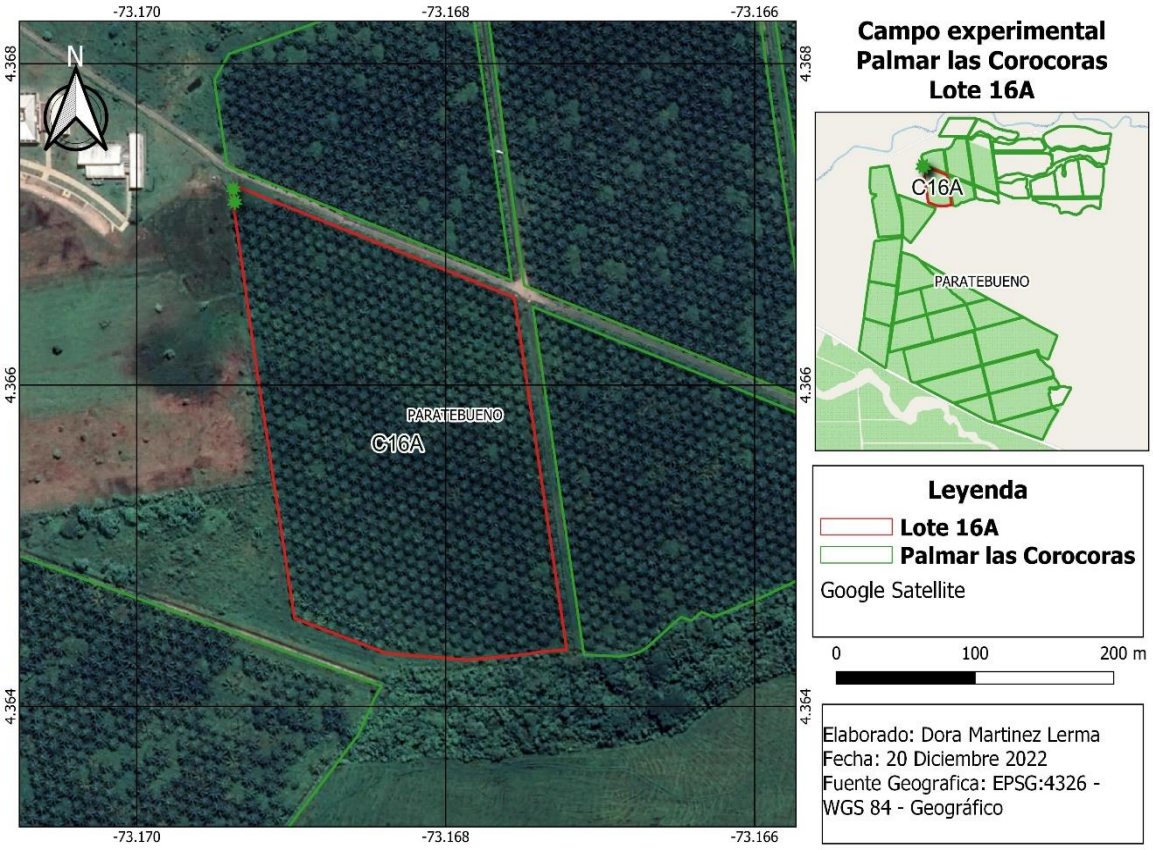
Características de las palmas seleccionadas.

Lote	Línea	Palma	Siembra	Material	Altura
16A	1	1	2015	Angola x Yagambi	8
16A	1	2	2015	Angola x Yagambi	8

Fuente. El autor.

Figura 1

Campo experimental palmar las corocoras, Lote 16A, Paratebueno, Cundinamarca.



Fuente. El autor.

Equipos utilizados

Para determinar las diferencias de temperaturas medidas en las palmas, se tomaron fotografías térmicas con cámaras de sensores FLIR, una instalada en Dron Autel Evo II pro, tomas térmicas en aire (**Figura 2**), respecto a medida de referencia cámara FLIR duo 2, tomas térmicas en tierra (**Figura 3**).

Figura 2

Dron Autel Evo II

Fuente. El autor.

La medición de temperatura en las palmas se realizó a partir de dos tipos de equipos, uno que fue considerado como referencia que corresponde a una cámara FLIR Duo Pro (**Tabla 2**) y el segundo que corresponde al equipo sometido a evaluación en el presente proyecto, es una cámara térmica integrada al dron EVO II Pro 640T (**Tabla 3**), identificando las diferencias o la tendencia que existe entre variables como hora del día, altura y efecto de las condiciones de nubosidad, humedad relativa y temperatura ambiental, identificando las diferentes mediciones entre la fluctuación térmica y la regulación de las medidas de temperatura y determinando posibles diferencias, los fabricantes de los equipos, especifican que estos no requieren de una calibración.

Figura 3

Cámara Térmica FLIR duo 2

Fuente. El autor.

Tabla 2

Ficha técnica de Cámara térmica, FLIR DUO Pro

Especificaciones Cámara FLIR Duo Pro	
Nombre del Producto	FLIR Duo pro R
Sensor de Cámara	FLIR Duo
Resolución de Sensor	4000 × 3000 pixeles
Precisión	±0,3 °C (0,5 °F) - T° 30-40 °C
Banda espectral	7,5 a 13,5 μm
Cámara termográfica	Microbolómetro VOx no refrigerado
Tamaño	87 × 82 × 69 mm
Peso	325 g – 375 g (640-25 mm)

Fuente. El autor.

Tabla 3

Ficha técnica Aeronave EVO II PRO 640T

Especificaciones de la Aeronave	
Nombre del Producto	AUTEL EVO II Pro 640T
Sensor de Cámara	FLIR Bosón
Resolución de Sensor	8000 x 6000 pixeles
Precisión	±0,5 °C (0,5 °F)
Capacidad de Batería	7100 mAh
Tiempo de vuelo	40 min.
Altura	7km
Velocidad	72.42 km/h
Peso	135g
Tamaño	424*354*110 mm (largo, ancho y alto)

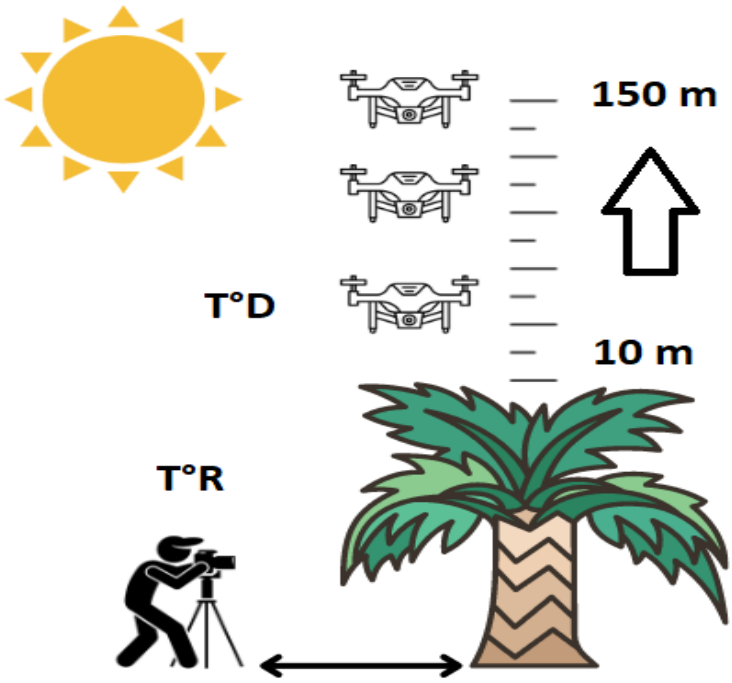
Fuente. El autor.

Evaluación del efecto de la altura

Para determinar el efecto de la altura sobre las imágenes térmicas obtenidas con el ARP EVO 640T se llevaron a cabo vuelos sobre cada una de las palmas seleccionadas realizando tomas cada 10 m, iniciado en 10 m y finalizando a 150 m, esta última altura teniendo en cuenta la resolución N° 0421 Dic 29, 2018 reglamentación Aerocivil, (Resolución 04201, 2018) , para evaluar la confiabilidad de los valores de temperatura sobre el dosel de las palmas, determinando las variables térmicas que existen entre las cámara FLR Duo Pro desde tierra y la ARP, (**Figura *4***).

Figura 4

Toma de Imágenes térmicas, con las 2 cámaras en diferente altura, para Dron TD: Temperatura Dron y TR: Temperatura Referencia



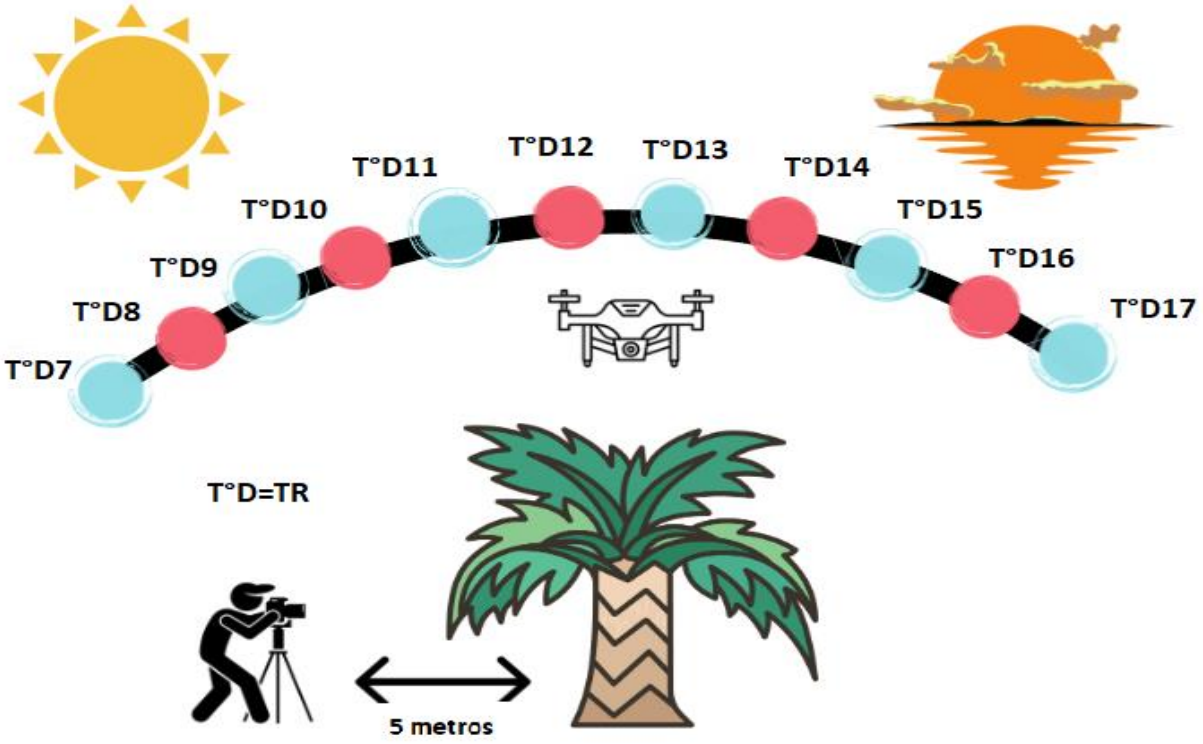
Fuente. El autor.

Evaluación del efecto de la hora del día

Para evaluación del efecto de la hora sobre imágenes térmicas con ARP, se realizaron tomas desde la 07:00am hasta las 17:00pm, (11 horas), en cada vuelo se tomaron 15 imágenes térmicas, sobre el dosel de la palma, teniendo en cuenta la variable Altura. (**Figura *5***). Analizando la hora del día en donde exista la posibilidad de determinar menos variación de acuerdo con la hora. Teniendo en cuenta que la temperatura interfiere con otros factores que influyen en ciertas funciones como la apertura o cierre de las estomas, que son importantes para los procesos de la fotosíntesis, transpiración y respiración de la planta, se tomara la base de datos de registros horarios de T y se analizara en diferentes horas del día.

Figura 5

Tomas aéreas en diferentes horas del día.



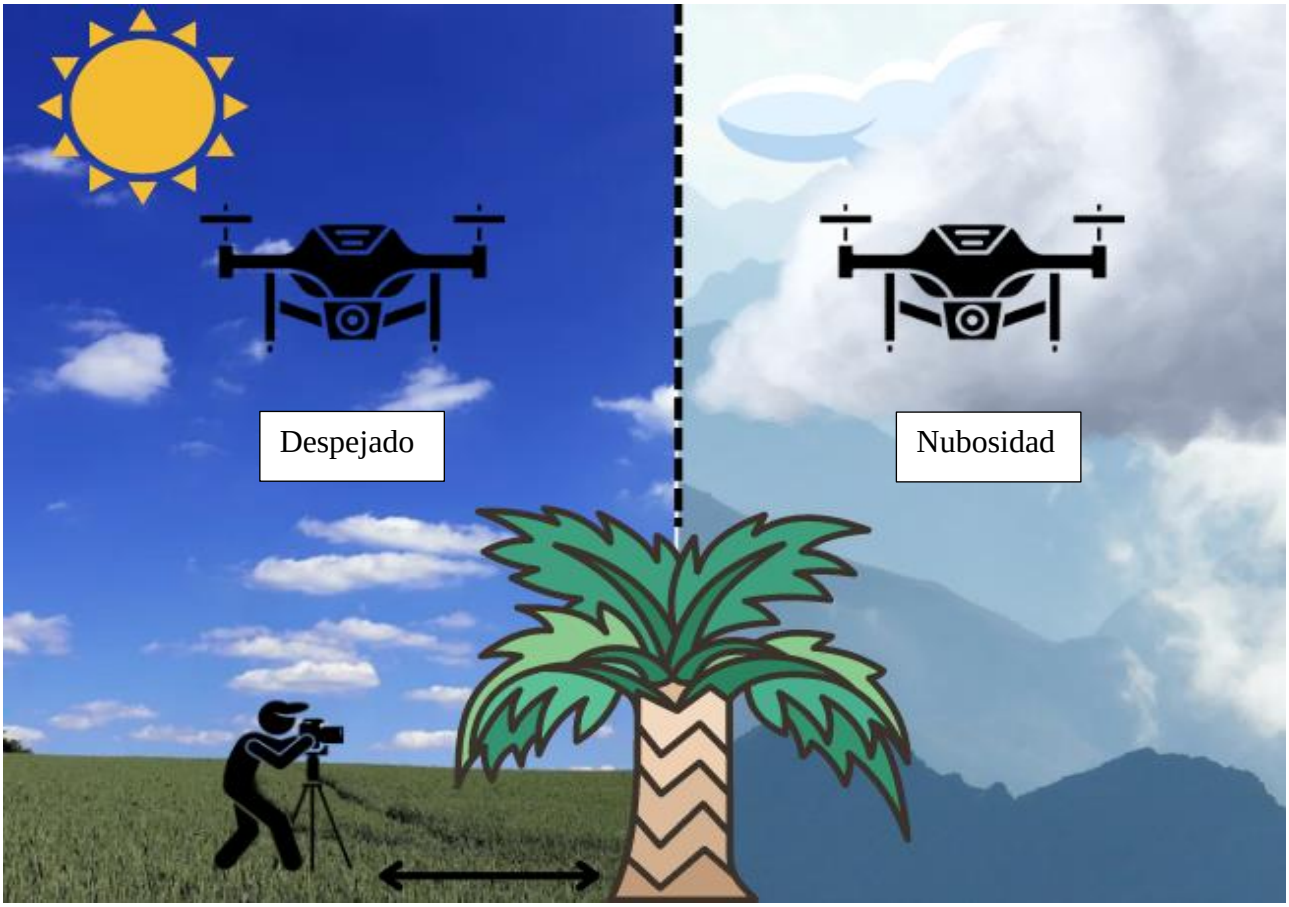
Fuente. El autor.

Determinación del efecto de variables del entorno

Para determinar el efecto en las variables del entorno se realizaron vuelos a diferentes alturas, diferentes horas, midiendo T° sobre el dosel de la palma, T° Ambiental, Humedad Relativa y condiciones como Nubosidad, (**Figura 6**) Para evaluar el efecto de las condiciones sobre la medida de temperatura en las palmas.

Figura 6

Toma de temperatura, sobre condiciones del tiempo.



Fuente. El autor.

Análisis de datos

Para procesamiento de imágenes Térmicas se realizó:

Imágenes con AUTEL EVO II Pro 640T

Se procesaron imágenes con el programa IR_PCTool, sofware gratuito de los equipos autel, que funciona para analizar mediciones de temperatura, se determinó las temperaturas, mínima, máxima y media, por imagen.

Imágenes con FLIR Duo pro R

Las imágenes tomadas con este equipo se procesaron en Qgis, sofware gratuito que funciona para análisis y procesamiento de datos, manejando algoritmos en caja de herramientas del sistemas y por medio de capas vectoriales, se seleccionó el área del dosel en imagen TIFF, procesándolo y determinando las temperaturas mínima, máxima y media.

Para la evaluación del efecto de altura se realizó:

El script de análisis se relaciona en el anexo Altura, Hora día.

Se realiza análisis comparativo de la diferencia entre los valores de T° Evo y FLIR, por cada rango de altura, desde los 10metros a 150metros de altura. Tomando la diferencia entre las medias y analizando el factor de estas.

Análisis Descriptivo:

Factor variable descriptiva – categórica

Datos atípicos:

Se comprobó valores atípicos, que pueden influir negativamente en los Resultados del ANOVA, luego se generó limpieza de estos datos y se filtro.

Normalidad de la Variable:

Con prueba Shapiro Wilks, se comprobó la normalidad de los datos, la población de la distribución normal para conjuntos pequeños, si el valor es inferior a 0.05 se rechaza como hipótesis nula, pero si este valor es mayor, se comprueba que no estamos rechazando el supuesto valor de la hipótesis.

Homogeneidad de la varianza:

Se comprobó la hipótesis nula, si los valores de altura son menores a 0.05, entonces se determina que se está incumpliendo con la supuesta hipótesis, pero en este caso se determina como una Homogeneidad de varianza, si solo si este es mayor a 0.05.

Prueba ANOVA

Se evaluó, la diferencia de temperatura media con ARP, respecto a la temperatura de la referencia FLIR y se comparó si esta es similar en todas las alturas, si este valor es menos a 0.05 se rechaza.

Prueba Tukey

Se determino en que grupos existieron diferencias, los grupos con diferencias se identificaron con valores menores a 0.001.

Este procedimiento aplico para medidas de temperaturas en variables referentes a la Altura y hora del día.

Resultados y discusión

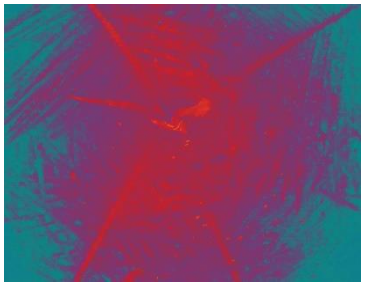
En el cumplimiento de los objetivos del proyecto se relacionan los resultados obtenidos acorde a cada objetivo específico planteado.

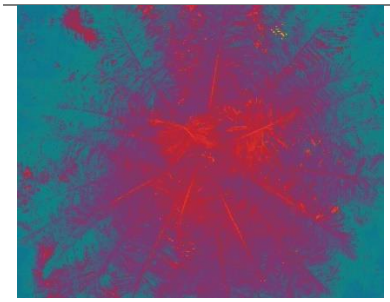
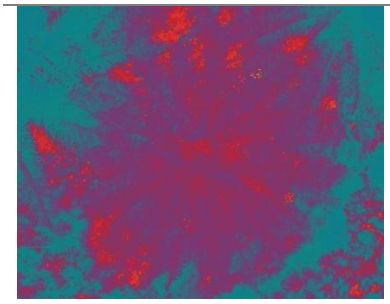
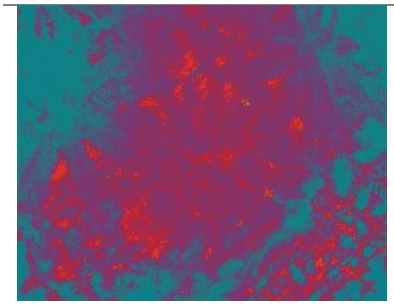
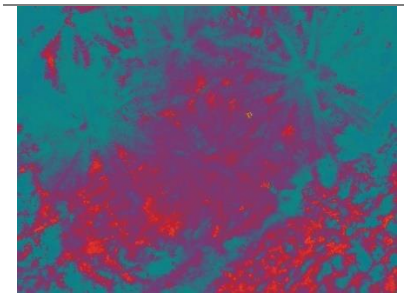
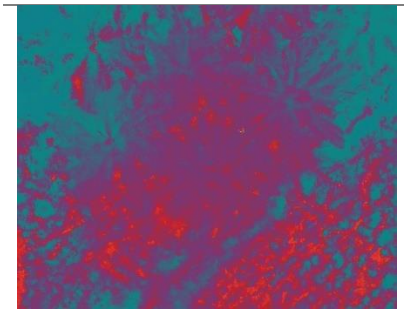
Efecto de la altura en la termografía aérea

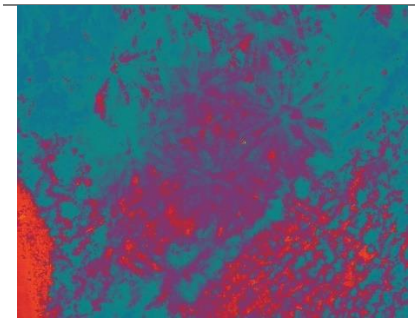
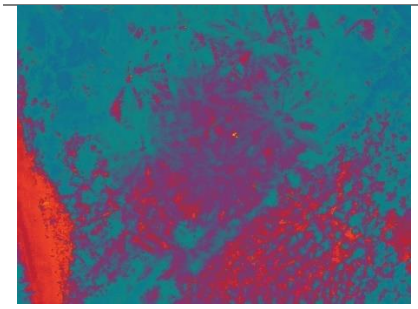
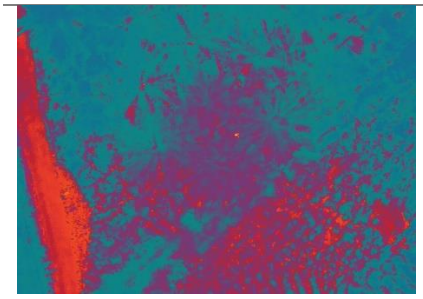
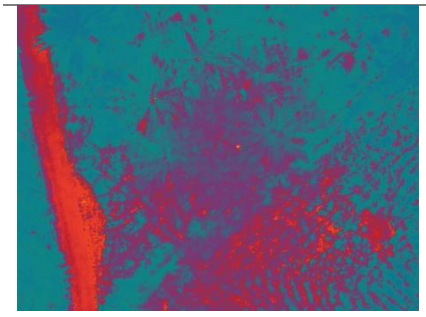
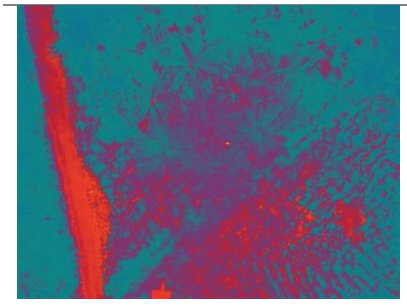
Realizar pruebas de medición para ajuste del campo de visión del instrumento, con la finalidad de obtener una mejor medida para tomas de temperatura en el dosel de la planta y definir cuál sería la mejor visión, lo que se requiere colocar diferentes distancias, entre 10 metros a 150 metros de altura (**Tabla 4**)

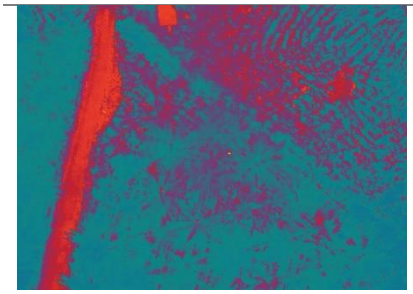
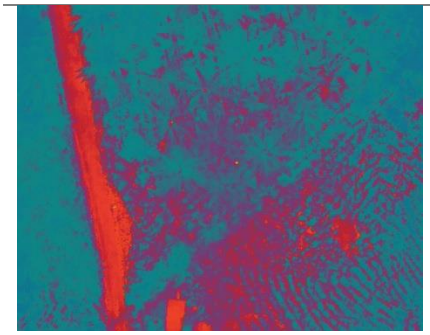
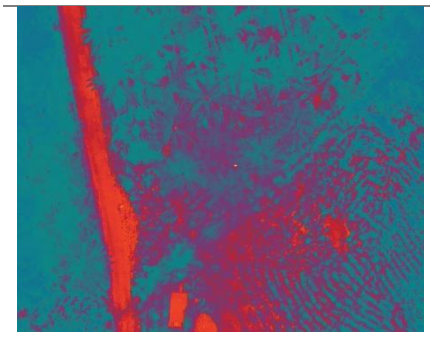
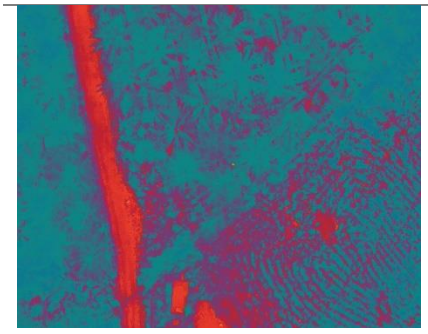
Tabla 4

Imágenes tomadas con aeronaves remotamente pilotadas, en diferentes alturas, Imágenes térmicas e imágenes con la cámara.

Imagen Térmica	Imagen	Altura/ mts
		10

		20
		30
		40
		50
		60

		70
		80
		90
		100
		110

		120
		130
		140
		150

Fuente. El autor.

Luego de depuración de valores atípicos se contó con un total de 447 datos para realizar el análisis de diferencia de medias para las diferentes alturas (10mestros – 150 metros). La matriz de datos cargada para análisis es la siguiente:

Figura 7

Salida de datos, análisis de medida de datos.

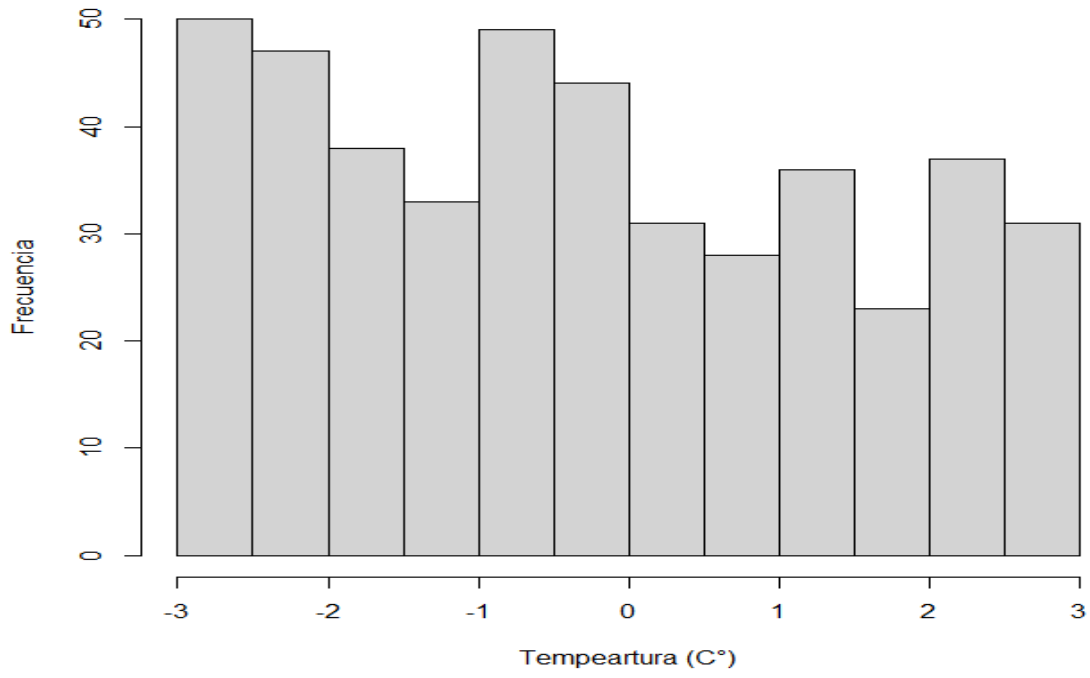
```
  FLIR_T_mean     Autel_T_mean       T_Amb           Altura      Dif_Medias      
 Min.   :29.25   Min.   :26.55   Min.   :20.10   20     : 33   Min.   :-2.9997  
 1st Qu.:30.06   1st Qu.:28.56   1st Qu.:27.40   30     : 33   1st Qu.:-1.8652  
 Median :30.36   Median :29.99   Median :30.80   40     : 33   Median :-0.3849  
 Mean   :30.37   Mean   :30.22   Mean   :29.38   120    : 32   Mean   :-0.2373  
 3rd Qu.:30.66   3rd Qu.:31.76   3rd Qu.:32.30   50     : 31   3rd Qu.: 1.1705  
 Max.   :31.32   Max.   :34.08   Max.   :34.10   60     : 31   Max.   : 2.9407  
                                                 (Other):229                    
```

Fuente. El autor.

La distribución de los datos observados muestra una ligera asimetría a derecha, con lo cual se interpreta que mayoritariamente las mediciones realizadas con el ARP presentan valores menores que la referencia (**Figura *8***)

Figura 8

Histograma de distribución de las diferencias de temperatura con respecto a la referencia.



Fuente. El autor.

En donde las variables analizadas son:

- FLIR_T_Mean: corresponde a la media de los Datos, Altura, N_hora, T_Amb,

Se realizó análisis de estadísticas descriptivas por grupos de altura (**Tabla 5**)

Tabla 5

Análisis de estadística descriptiva para Altura.

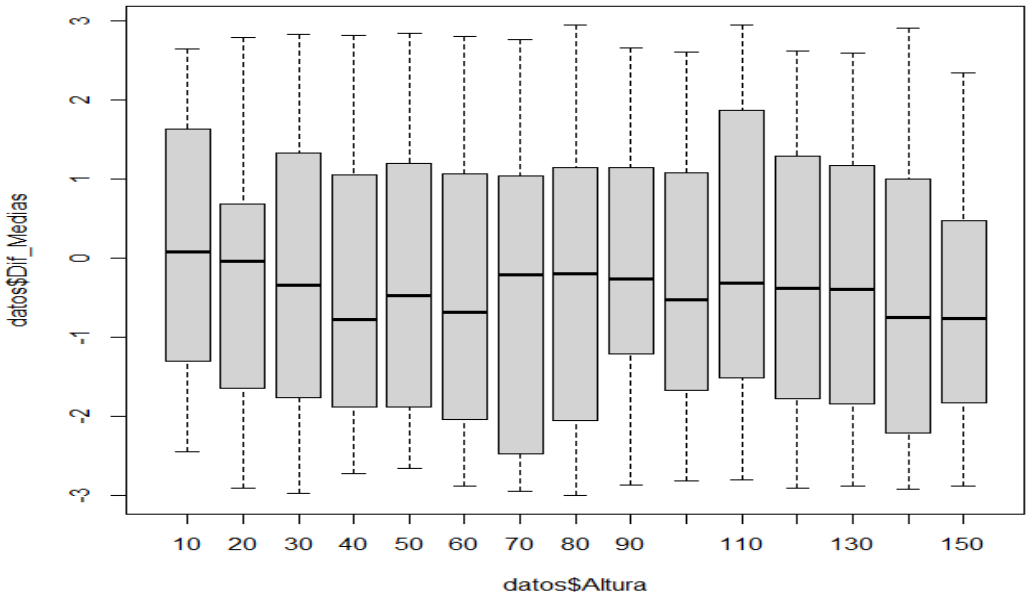
vars	**N**	**Media**	**Desv. Est.**	**Mediana**	**min**	**max**	**range**	**Sesgo**	**kurtosis**
10	1 28	0.11	1.61	0.08	-2.45	2.64	5.09	0	-1.4
20	1 33	-0.16	1.78	-0.05	-2.92	2.79	5.71	0.05	-1.25
30	1 33	-0.2	1.76	-0.34	-2.98	2.82	5.81	0.18	-1.27
40	1 33	-0.32	1.8	-0.78	-2.73	2.81	5.54	0.37	-1.27
50	1 31	-0.34	1.75	-0.48	-2.67	2.84	5.5	0.34	-1.33
60	1 31	-0.51	1.84	-0.69	-2.89	2.79	5.69	0.39	-1.32
70	1 30	-0.44	1.94	-0.22	-2.95	2.75	5.71	0.19	-1.49
80	1 28	-0.24	1.92	-0.2	-3	2.94	5.94	0.04	-1.31
90	1 26	-0.01	1.6	-0.27	-2.87	5.52	0.03	0	-1.09
100	1 28	-0.22	1.73	-0.53	-2.82	2.6	5.43	0.17	-1.26
110	1 30	0.01	1.81	-0.31	-2.8	2.94	5.74	0.23	-1.34
120	1 32	-0.17	1.78	-0.39	-2.91	2.61	5.53	0.16	-1.41
130	1 30	-0.22	1.71	-0.4	-2.89	2.6	5.48	0.14	-1.28
140	1 29	-0.55	1.68	-0.75	-2.93	2.91	5.84	0.29	-1.08
150	1 25	-0.58	1.59	-0.77	-2.89	2.34	5.23	0.27	-0.99

Fuente. El autor.

En la (**Figura 9**) se aprecia la distribución de diferencias de temperatura con respecto a la medida de referencia, agrupadas por altura de toma. El rango de diferencias con respecto a la medida de referencia es bastante amplio (± 1°C) y se puede observar que dicho rango se mantiene de manera independiente a la altura de vuelo.

Figura 9

Gráfico de caja y bigotes de distribución Altura referencia.



Fuente. El autor.

Se ejecutó una prueba shapiro Wilk para evaluar normalidad en los grupos de datos por altura (**Tabla 6**). Shapiro-Wilk normality test data: dd[x,]

Tabla 6

Prueba Shapiro-Wilk normality test, para Altura.

Altura	W	p-value
10	0.94363	0.1367
20	0.94355	0.08621
30	0.94585	0.1006
40	0.92049	0.01891
50	0.92178	0.02633
60	0.91128	0.01395
70	0.90083	0.008802
80	0.93871	0.1025
90	0.96607	0.5246
100	0.94031	0.1125
110	0.93298	0.05895
120	0.92695	0.03222
130	0.94562	0.129
140	0.94635	0.1471
150	0.94875	0.2349

Fuente. El autor.

Dado que en todos los grupos de datos por altura el p-valor de la prueba Shapiro-Wil fue superior a 0.05 no se cuenta con evidencia para rechazar la Ho, de tal forma que la distribución de cada grupo de datos es normal. Cumpliendo así este primer supuesto.

Se ejecutó una prueba de homogeneidad de varianzas, para evaluar este segundo supuesto.

Bartlett test of homogeneity of variances

data: datos$Dif_Medias and datos$Altura

Bartlett's K-squared = 2.6765, df = 14, p-value = 0.9995

El P valor es superior a 0.05 con lo cual no se cuenta con evidencia para rechazar la Ho de homogeneidad de varianzas, cumpliendo así este segundo supuesto.

Evaluados los supuestos se procedió a ejecutar una prueba de ANOVA para determinar si existen diferencias en las medias por grupo de altura.

Figura 10.

Salida de datos, prueba ANOVA.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Altura	14	16.5	1.18	0.38	0.98
Residuals	432	1339.4	3.10		

Fuente. El autor.

No se rechaza Ho, H0: La diferencia de temperatura medida con el ARP con respecto a la temperatura de # Referencia es similar en todas las alturas

Para corroborar que no existen diferencias se ejecutó una prueba de Tukey que ilustra que no existen diferencias en las medias (**Figura 10**)

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = Dif_Medias ~ Altura, data = datos)

Tabla 7

Salida de datos; Prueba de Tukey, para Altura.

$Altura	diff	lwr	upr	p adj
2-10	-0.2629344803	-1.806231	1.2803622	0.9999996
30-10	-0.3087454028	-1.852042	1.2345513	0.9999964
40-10	-0.4263402783	-1.969637	1.1169564	0.9998100
50-10	-0.4423263785	-2.008308	1.1236552	0.9997537
60-10	-0.6184121780	-2.184394	0.9475694	0.9910224
70-10	-0.5432672459	-2.121587	1.0350520	0.9977715
80-10	-0.3493182533	-1.954619	1.2559828	0.9999896
90-10	-0.1169345612	-1.752816	1.5189464	1.0000000
100-10	-0.3275239558	-1.932825	1.2777771	0.9999954
110-10	-0.0942185934	-1.672538	1.4841007	1.0000000
120-10	-0.2778657701	-1.832192	1.2764603	0.9999992
130-10	-0.3278237571	-1.906143	1.2504955	0.9999942
140-10	-0.6553525274	-2.246755	0.9360495	0.9866338
150-10	-0.6820989832	-2.334858	0.9706596	0.9863605
30-20	-0.0458109224	-1.524506	1.4328838	1.0000000
40-20	-0.1634057979	-1.642101	1.3152890	1.0000000
50-20	-0.1793918981	-1.681747	1.3229635	1.0000000
60-20	-0.3554776977	-1.857833	1.1468777	0.9999705
70-20	-0.2803327656	-1.795544	1.2348785	0.9999987
80-20	-0.0863837730	-1.629680	1.4569130	1.0000000
90-20	0.1459999192	-1.429081	1.7210808	1.0000000
100-20	-0.0645894754	-1.607886	1.4787073	1.0000000
110-20	0.1687158870	-1.346495	1.6839271	1.0000000
120-20	-0.0149312897	-1.505134	1.4752710	1.0000000
130-20	-0.0648892768	-1.580101	1.4503220	1.0000000
140-20	-0.3924180471	-1.921252	1.1364161	0.9999206

150-20	-0.4191645029	-2.011767	1.1734385	0.9998928
40-30	-0.1175948755	-1.596290	1.3610999	1.0000000
50-30	-0.1335809757	-1.635936	1.3687744	1.0000000
60-30	-0.3096667752	-1.812022	1.1926886	0.9999947
70-30	-0.2345218431	-1.749733	1.2806894	0.9999999
80-30	-0.0405728505	-1.583870	1.5027239	1.0000000
90-30	0.1918108416	-1.383270	1.7668917	1.0000000
100-30	-0.0187785530	-1.562075	1.5245182	1.0000000
110-30	0.2145268094	-1.300684	1.7297380	1.0000000
120-30	0.0308796327	-1.459323	1.5210819	1.0000000
130-30	-0.0190783543	-1.534290	1.4961329	1.0000000
140-30	-0.3466071247	-1.875441	1.1822270	0.9999826
150-30	-0.3733535804	-1.965957	1.2192494	0.9999737
50-40	-0.0159861002	-1.518341	1.4863693	1.0000000
60-40	-0.1920718997	-1.694427	1.3102835	1.0000000
70-40	-0.1169269676	-1.632138	1.3982843	1.0000000
80-40	0.0770220250	-1.466275	1.6203188	1.0000000
90-40	0.3094057171	-1.265675	1.8844866	0.9999972
100-40	0.0988163225	-1.444480	1.6421130	1.0000000
110-40	0.3321216849	-1.183090	1.8473329	0.9999886
120-40	0.1484745082	-1.341728	1.6386768	1.0000000
130-40	0.0985165212	-1.416695	1.6137278	1.0000000
140-40	-0.2290122492	-1.757846	1.2998219	0.9999999
150-40	-0.2557587049	-1.848362	1.3368443	0.9999998
60-50	-0.1760857995	-1.701735	1.3495633	1.0000000
70-50	-0.1009408674	-1.639251	1.4373694	1.0000000
80-50	0.0930081252	-1.472973	1.6589897	1.0000000
90-50	0.3253918173	-1.271923	1.9227062	0.9999955
100-50	0.1148024227	-1.451179	1.6807840	1.0000000
110-50	0.3481077851	-1.190203	1.8864181	0.9999830
120-50	0.1644606084	-1.349222	1.6781436	1.0000000

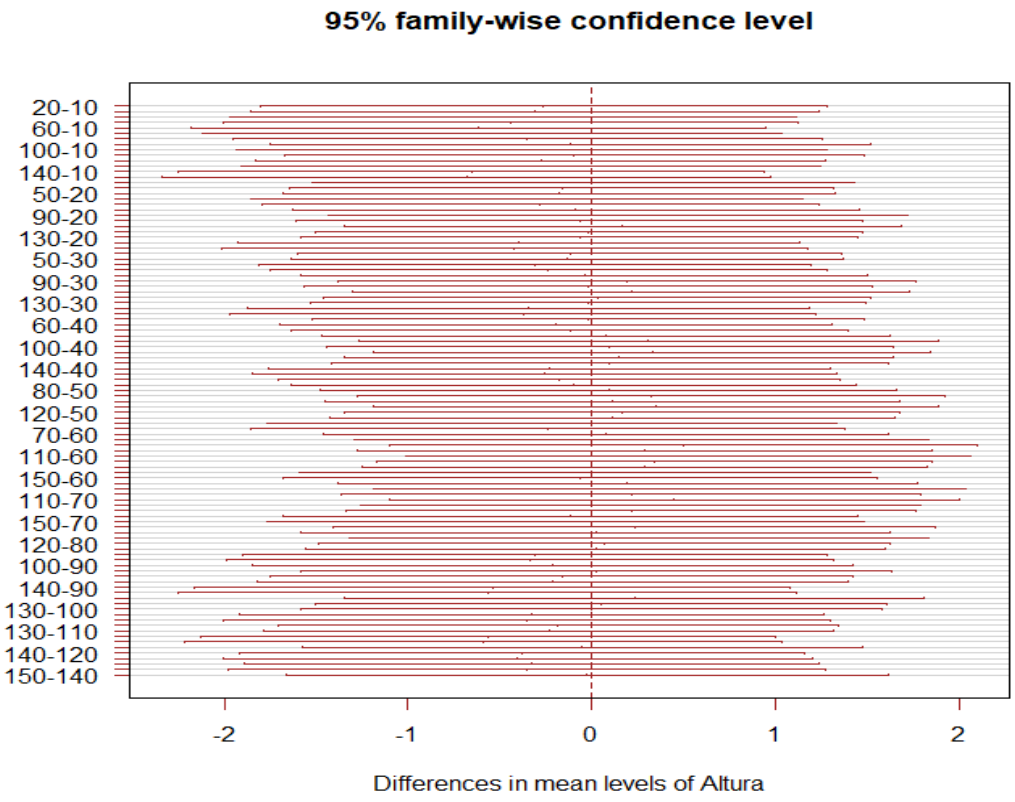
130-50	0.1145026214	-1.423808	1.6528129	1.0000000
140-50	-0.2130261490	-1.764757	1.3387043	1.0000000
150-50	-0.2397726047	-1.854368	1.3748226	0.9999999
70-60	0.0751449321	-1.463165	1.6134552	1.0000000
80-60	0.2690939247	-1.296888	1.8350755	0.9999995
90-60	0.5014776168	-1.095837	2.0987920	0.9991797
100-60	0.2908882222	-1.275093	1.8568698	0.9999986
110-60	0.5241935846	-1.014117	2.0625039	0.9979975
120-60	0.3405464080	-1.173137	1.8542294	0.9999842
130-60	0.2905884209	-1.247722	1.8288987	0.9999983
140-60	-0.0369403494	-1.588671	1.5147901	1.0000000
150-60	-0.0636868052	-1.678282	1.5509084	1.0000000
80-70	0.1939489926	-1.384370	1.7722683	1.0000000
90-70	0.4263326847	-1.183079	2.0357446	0.9998843
100-70	0.2157432901	-1.362576	1.7940626	1.0000000
110-70	0.4490486525	-1.101819	1.9999168	0.9996718
120-70	0.2654014758	-1.261042	1.7918450	0.9999994
130-70	0.2154434888	-1.335425	1.7663116	1.0000000
140-70	-0.1120852815	-1.676266	1.4520953	1.0000000
150-70	-0.1388317373	-1.765396	1.4877325	1.0000000
90-80	0.2323836921	-1.403497	1.8682646	1.0000000
100-80	0.0217942975	-1.583507	1.6270953	1.0000000
110-80	0.2550996599	-1.323220	1.8334189	0.9999998
120-80	0.0714524833	-1.482874	1.6257785	1.0000000
130-80	0.0214944962	-1.556825	1.5998138	1.0000000
140-80	-0.3060342741	-1.897436	1.2853678	0.9999978
150-80	-0.3327807299	-1.985539	1.3199778	0.9999961
100-90	-0.2105893946	-1.846470	1.4252915	1.0000000
110-90	0.0227159678	-1.586696	1.6321279	1.0000000
120-90	-0.1609312089	-1.746820	1.4249580	1.0000000
130-90	-0.2108891959	-1.820301	1.3985227	1.0000000

140-90	-0.5384179663	-2.160662	1.0838260	0.9984908
150-90	-0.5651644220	-2.247641	1.1173117	0.9982820
110-100	0.2333053624	-1.345014	1.8116246	0.9999999
120-100	0.0496581857	-1.504668	1.6039842	1.0000000
130-100	-0.0002998013	-1.578619	1.5780195	1.0000000
140-100	-0.3278285717	-1.919231	1.2635735	0.9999948
150-100	-0.3545750274	-2.007334	1.2981835	0.9999913
120-110	-0.1836471767	-1.710091	1.3427963	1.0000000
130-110	-0.2336051637	-1.784473	1.3172630	0.9999999
140-110	-0.5611339341	-2.125314	1.0030466	0.9965647
150-110	-0.5878803898	-2.214445	1.0386838	0.9962903
130-120	-0.0499579870	-1.576401	1.4764855	1.0000000
140-120	-0.3774867574	-1.917454	1.1624803	0.9999545
150-120	-0.4042332131	-2.007526	1.1990599	0.9999360
140-130	- 0.3275287703	-1.891709	1.2366518	0.9999936
150-130	-0.3542752261	-1.980839	1.2722890	0.9999895
150-140	-0.0267464557	-1.666008	1.6125156	1.0000000

Fuente. El autor.

Figura 11

Gráfico Tukey múltiple comparisons of means, Altura.



Fuente. El autor.

Como hipótesis inicial se esperaba que la altura fuera un determinante en la toma, partiendo de que en la medida que se aleja el ARP del dosel de la palma una capa de vapor de agua podría estar influyendo de manera gradual en la energía térmica emitida por el dosel y por tanto en la temperatura observada por el sensor del ARP. Bajo esta hipótesis una lectura a 10m debería ser muy similar a la lectura de referencia. Sin embargo, se encontró que la altura no influye en la diferencia entre la temperatura medida por el ARP y la referencia de tierra, pero al encontrar un rango tan amplio de diferencias de temperatura para las lecturas del ARP en principio se considera que las mediciones del ARP son de baja confiabilidad.

Efecto de la hora del día en la termografía aérea

Luego de la depuración de atípicos se contó con un total de 568 observaciones. Los datos analizados tuvieron las siguientes características.

Figura 12

Salida de datos atípicos.

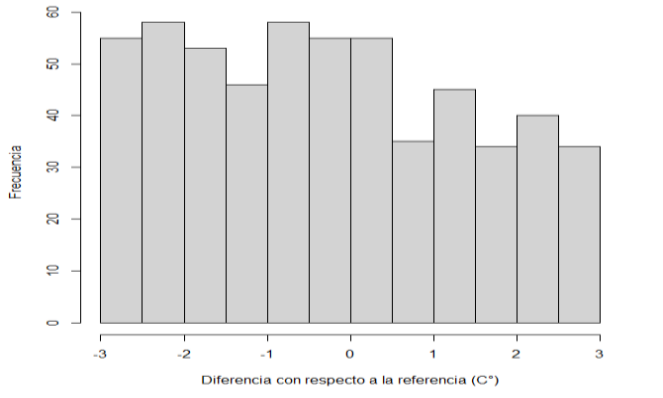
```
     N_hora      Dif_Medias
 9       : 80   Min.   :-2.9997
 16      : 71   1st Qu.:-1.7808
 13      : 65   Median :-0.3675
 14      : 64   Mean   :-0.2624
 15      : 55   3rd Qu.: 1.0610
 10      : 53   Max.   : 2.9407
 (other):180
```

Fuente. El autor.

De manera similar a lo identificado en la evaluación del efecto de la evaluación del efecto de la altura sobre la medición, se encontró una leve asimetría a derecha, con lo cual el patrón de submedición del sensor ARP sobre la referencia se mantiene (**Figura 13**)

Figura 13

Gráfico diferencia con respecto a la referencia para Hora del día.

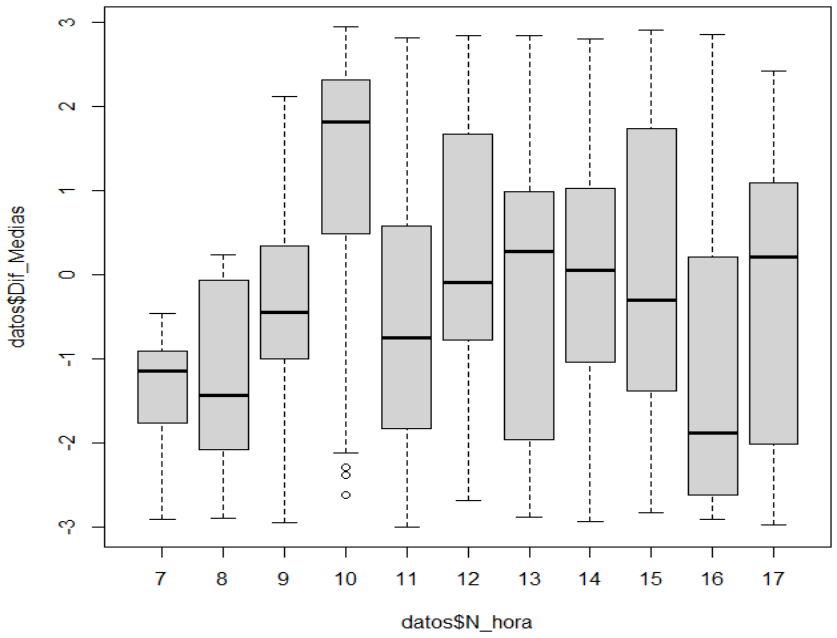


Fuente. El autor.

La distribución de datos con respecto a la hora del día en que se realizó la medición muestra una tendencia de las horas cercanas al medio a concentrar una menor diferencia con respecto a la referencia (**Figura 14**)

Figura 14

Gráfico de caja y bigotes de distribución N_Hora



Fuente. El autor.

La estadística descriptiva por grupo de hora muestra que la hora en que se presenta la diferencia media mas pequeña se presenta a las 9 y 14 horas (**Tabla 8**)

Tabla 8

Análisis de estadística descriptiva para Hora

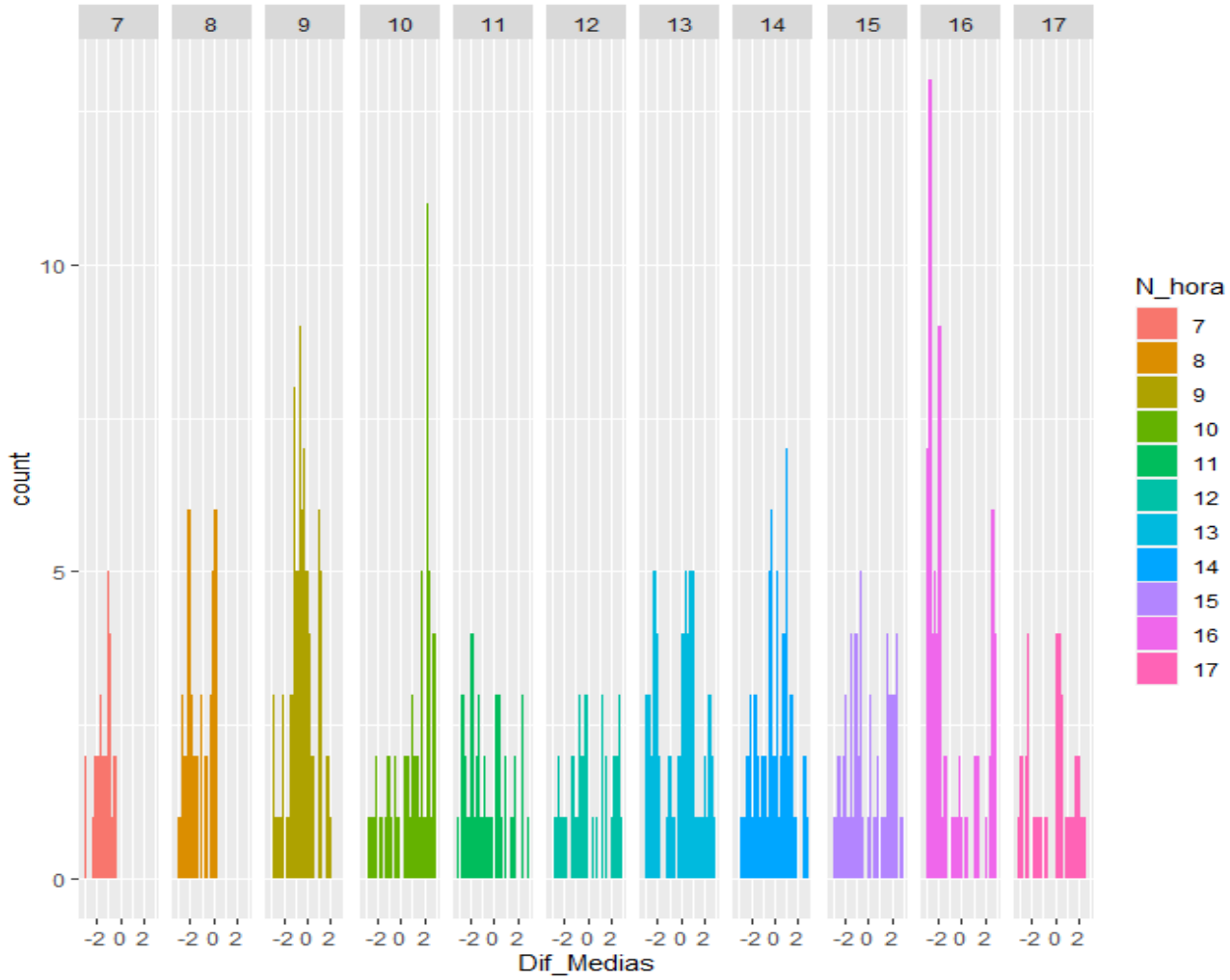
vars	N	Media	Desv. Est	Mediana	Min	Max	Rango	Sesgo	kurtosis
7	1 26	-1.37	0.64	-1.15	-2.91	-0.47	2.44	-0.73	-0.14
8	1 40	-1.21	1.04	-1.44	-2.9	0.23	3.13	0.07	-1.61
9	1 80	-0.36	1.17	-0.45	-2.95	2.12	5.08	-0.09	-0.31
10	1 53	1.09	1.62	1.81	-2.63	2.94	5.57	-0.91	-0.49
11	1 41	-0.45	1.68	-0.75	-3 2.82	5.82	0.36		-.1
12	1 37	0.25	1.69	-0.09	-2.69	2.85	5.54	-0.01	-1.24
13	1 65	-0.12	1.71	0.27	-2.89	2.84	5.72	-0.13	-1.2
14	1 64	-0.02	1.42	0.04	-2.94	2.79	5.73	-0.08	-0.72
15	1 55	0.05	1.71	-0.31	-2.83	2.91	5.74	0.06	-1.43
16	1 71	-0.99	2.03	-1.89	-2.92	2.85	5.77	0.9	-0.82
17	1 36	-0.23	1.72	0.21	-2.98	2.42	5.4	-0.16	-1.41

Fuente. El autor.

La distribución de los datos de las 9 y 14 horas llama la atención debido a una concentración hacia una diferencia de 0°. Permitiendo considerar a prioridad estas horas como horas óptimas para llevar a cabo las tomas de datos con el ARP. Previo a la elaboración del test de normalidad en la siguiente imagen se evidencia la posible ausencia de normalidad en algunos grupos de datos.

Figura 15

Gráfica prueba de normalidad del grupo de datos.



Fuente. El autor.

La evaluación del supuesto de normalidad por grupos de horas permitió identificar que solamente las 7, 9, 11 y 14 horas presentan normalidad (**Tabla 9**)

Tabla 9

Prueba de normalidad por grupos de altura para la diferencia de T° con respecto a la referencia Hora (Shapiro-Wilk normality test).

Hora	**W**	**p-value**
7	0.9328	0.09038
8	0.88883	0.0009192
9	0.97827	0.1904
10	0.85999	1.8e-05
11	0.94615	0.0513
12	0.93949	0.04444
13	0.93558,	0.002165
14	0.97908	0.3482
15	0.92886	0.002966
16	0.7912	1.186e-08
17	0.92224	0.01465

Fuente. El autor.

Debido a la ausencia de cumplimiento de supuesto de normalidad para la diferencia de temperatura con respecto a la referencia por grupos de horas, se procedió a utilizar el test de Kruskal-Wallis para comparar los datos obtenidos en las diferentes horas del día.

Figura 16

Salida de datos, test de Kruskal-Wallis.

```
        Kruskal-Wallis rank sum test

data:  Dif_Medias by N_hora
Kruskal-Wallis chi-squared = 77.637, df = 10, p-value = 1.456e-12
```

Fuente. El autor.

El test encontró significancia en la diferencia de al menos 9 grupos. Las diferencias fueron identificadas por medio del test de Wilcoxon. Las diferencias por cada grupo de acuerdo al test se presentan a continuación:

Figura 17

Salida de datos, test de Wilcoxon.

```
        Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum exact test

data:  datos$Dif_Medias and datos$N_hora

   7       8       9       10      11      12      13      14      15      16
8  1.00000 -       -       -       -       -       -       -       -       -
9  0.00045 0.08057 -       -       -       -       -       -       -       -
10 5.2e-06 2.2e-07 5.9e-06 -       -       -       -       -       -       -
11 1.00000 1.00000 1.00000 0.00241 -       -       -       -       -       -
12 0.00109 0.02940 1.00000 1.00000 1.00000 -       -       -       -       -
13 0.07275 0.03427 1.00000 0.00431 1.00000 1.00000 -       -       -       -
14 0.00061 0.00287 1.00000 0.00589 1.00000 1.00000 1.00000 -       -       -
15 0.03651 0.02931 1.00000 0.09281 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 -       -
16 1.00000 1.00000 0.04103 4.3e-05 1.00000 0.03998 0.33318 0.01539 0.03103 -
17 0.75135 0.24550 1.00000 0.00798 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000
```

Fuente. El autor.

Efecto de variables del entorno en la termografía aérea

Características de las variables de entrada:

FLIR_T_Mean: Es una variable dependiente, las otras son las independientes. Esta corresponde a los valores medios de temperatura de la palma adquiridos con la Cámara flir

Autel T° media: Corresponde a los valores independientes relacionados con las variables estudiadas Altura, Hora y condiciones. En función de la dependiente.

Previa revisión de datos atípicos el resumen de los datos utilizados para analizar se muestra a continuación:

Figura 18

Salida de datos, variable del modelo parad datos atípicos.

```
  Autel_T_mean       T_Amb           H_Amb       TipoCielo
 Min.   :26.55   Min.   :20.10   Min.   :45.80   0: 81
 1st Qu.:28.59   1st Qu.:26.40   1st Qu.:48.90   1:487
 Median :29.93   Median :29.95   Median :60.30
 Mean   :30.17   Mean   :29.16   Mean   :59.33
 3rd Qu.:31.72   3rd Qu.:32.30   3rd Qu.:63.70
 Max.   :34.08   Max.   :34.10   Max.   :85.80
```

Fuente. El autor.

Se procedió a seleccionar las variables que entran en el modelo buscando inferir colinealidad entre las variables respuesta, se muestran las correlaciones lineales entre las variables, diagramas de dispersión y distribución de estas. Se toma la correlación lineal entre las variables respuesta como un indicador de existencia de colinealidad, se observa posible existencia colinealidad en las variables temperatura del ambiente (T_Amb) y humedad relativa (H_Amb). Con respecto a la variable categórica de condición de nubosidad (TipoCielo) no se encontró relación.

A partir del R^2 de relación se determinó que existe una mayor relación con la humedad relativa que con la temperatura del ambiente.

Se realizó la estimación de un modelo lineal con las variables independientes, y dicho modelo confirmó que la humedad relativa guarda una alta significancia en los valores de temperatura medidos con el ARP.

Figura 19

Salida de datos, modelo lineal.

```
Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.15561 -0.38470  0.02916  0.31604  1.71578

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 38.28831    1.97023  19.433  < 2e-16 ***
T_Amb       -0.13441    0.04155  -3.235  0.00148 **
H_Amb       -0.07582    0.01360  -5.573 1.06e-07 ***
TipoCielo1   0.43810    0.14004   3.128  0.00209 **
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.5466 on 158 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3513,    Adjusted R-squared:  0.3389
F-statistic: 28.52 on 3 and 158 DF,  p-value: 8.61e-15
```

Fuente. El autor.

A nivel de interpretación física se argumenta la relación con la humedad relativa entendiendo que el vapor de agua presente en el ambiente puede llegar a determinar la temperatura medida en el dosel de la palma teniendo en cuenta que incide en la regulación térmica del organismo y adicionalmente y en las condiciones de toma de datos a través del ARP el mismo vapor de agua puede llegar a interferir en la energía térmica emitida a través del dosel.

Conclusiones

De acuerdo con lo encontrado la altura de vuelo no presenta una incidencia significativa sobre los valores de T medidos con el drone y su comparación con la referencia en tierra.

Las horas de toma recomendadas a partir de los datos son las 9 y 14 horas, considerando que fueron aquellas las que presentaron menor desviación con respecto a las medidas de referencia.

Las condiciones del ambiente (temperatura y humedad) impactan la termografía aérea de manera inversamente proporcional, en el caso de las condiciones del cielo no se encontró impacto significativo con respecto a los valores que se puedan medir de temperatura por medio del ARP.

Las variables, Altura, Hora del día y condiciones del cielo influyen de gran manera en las medidas de temperatura, la relación entre los equipos, no influye de gran manera en las variables estudiadas, lo que se puede determinar que las medidas no tienen variación significativa relacionando la cámara FLIR con el ARP.

Recomendaciones

Es importante identificar las características de los equipos a utilizar, que puedan causar posibles alteraciones en la ejecución de actividades diarias, las variables Altura, Hora y condiciones, son medidas importantes a la hora de realizar vuelos con los ARP.

Dentro de los resultados, se pudo determinar las posibles horas de vuelo que no interfieren en los cambios de las variables y que no alteran las medidas de temperatura, se recomienda realizar vuelos entre las horas 09:00am hasta las 14:00pm, esto con el fin de obtener buenos resultados a la hora de realizar tomas térmicas con los ARP.

Referencias Bibliográficas

Arango Uribe, M., Hernandez, D., Bustillo Pardey, A., & Beltran Giraldo, J. (2016). Termometría infrarroja como un método de diagnóstico temprano de palmas afectadas por la Marchitez l. *Https://Web.Fedepalma.Org/Sites/Default/Files/Files/Cenipalma/Posteres-Rt-Nacional/17_Termometriainfrarroja_como_metodo_diagnostico_temprano_de_ML.Pdf*, 1. https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Cenipalma/posteres-rt-nacional/17_Termometriainfrarroja_como_metodo_diagnostico_temprano_de_ML.pdf

Aucique Pérez, C. E., Martinez Hormaza, A., & Romero, H. M. (2012). *Uso de la temperatura foliar como indicador fisiológico temprano de la Marchitez letal (ML) en palma de aceite (Elaeis guineensis, Jacq.)*. *170*, 1–4.

Cadena, I. J. (2018). Factores de estrés abiótico que afectan la nutrición en el cultivo de palma de aceite. *GREPALMA*, 1–55. https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2018/11/D1-C4-Factores-de-estrés-abiático-que-limitan-la-eficiencia-nutricional.pdf

Díaz García Cervigón, J. J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad Complutense De Madrid*, *Junio*, 77. https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf

Fedepalma. (2022). *Anuario Estadístico*.

Giraldo Betancourt, C., Torres Leon, J. L., & Monsalve Tellez, J. M. (2021, November). Detección temprana de la Marchitez letal (ML) en palma de aceite basada en ortomosaicos térmicos normalizados adquiridos con aeronaves remotamente pilotadas. *Ceni Avances*, *194*, 1–8.

Harun, M. H., & Md Noor, M. R. (2006). Canopy temperature difference (CTD) for detecting stress in oil palm. *MPOB Information Series, June 2006*(MPOB TT No. 309), 1–4.

Henson, I., Noor, M. R., Harun Haniff, M., Yahya, Z., & Mustakim, S. N. A. (2005). Stress development and its detection in young oil palm in north Kedah, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, *17*(June), 11-.

Infoagro. (2018). *EL CULTIVO DE LA PALMA AFRICANA*. https://infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_africana_aceitera_coroto_de_guinea_aabora.htm

Khanal, S., Fulton, J., & Shearer, S. (2017). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *139*, 22–32. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001

Md Noor, M. R., Harun Haniff, M., & Maisarah Jantan, N. (2011). Physiological Plant Stress and Responses in Oil Palm. *Oil Palm Bulletin*, *62*(May), 25–32.

Messina, G., & Modica, G. (2020). Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture : State of the Art and Future Research Outlook. *Remote Sensing*, 1–26.

Murugesan, P., Aswathy, G. M., Sunil Kumar, K., Masilamani, P., Kumar, V., & Ravi, V. (2017). Oil palm (Elaeis guineensis) genetic resources for abiotic stress tolerance: A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, *87*(5), 571–579.

Ortiz Mora, Y. A. (2019). LA PALMA DE ACEITE COMO EJEMPLO PARA LA AGROINDUSTRIA EN COLOMBIA. In *Αγαη* (Vol. 8, Issue 5).

Romero, H. M., Ayala Diaz, I. M., & Navia, E. (2006). Ceniavance, Alteraciones fisiológicas en

palmas afectadas por Marchitez Letal (ML). In *140*. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/ceniavances/article/view/10325/10315

Sagan, V., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Eblimit, K., Peterson, K. T., Hartling, S., Esposito, F., Khanal, K., Newcomb, M., Pauli, D., Ward, R., Fritschi, F., Shakoor, N., & Mockler, T. (2019). UAV-based high resolution thermal imaging for vegetation monitoring, and plant phenotyping using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640, and thermomap cameras. *Remote Sensing*, *11*(3). https://doi.org/10.3390/rs11030330

Resolución 04201, 1 (2018). https://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/sistema- de-aeronaves-pilotadas-a-distancia-rpas-drones/Documents/RESL. N° 04201 DIC 27 de 2018.pdf