



**COORDINACIÓN DE GOBERNANZA DEL AGUA
Y FORTALECIMIENTO DE
CAPACIDADES**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA**

TESIS

**USO DE IMÁGENES AÉREAS OBTENIDAS CON DRON PARA LA
ESTIMACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS EN EL CULTIVO
DE LIMA 'PERSA'**

que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias y Tecnología del
Agua**

Presenta

Augusto Omar Villa Camacho

Tutor: Doctor Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

Cotutor: Doctor Raúl Berdeja Arbeu

Jiutepec, Morelos

Año: 2023

F.C4.03.44.1





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "Uso de imágenes aéreas obtenidas con dron para la estimación de requerimientos hídricos en el cultivo de lima 'Persa'", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Augusto Omar Villa Camacho

Jiutepec, Morelos a Noviembre de 2023

F.C4.03.43.1





MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA
(INGENIERÍA EN SISTEMAS HIDRÁULICOS)

Comité tutorial:

Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

Dr. Raúl Berdeja Arbeu

Dr. Alberto González Sánchez

Dr. José Antonio Quevedo Tiznado

M.C. Fabiel Vazquez Cruz

Tutor de tesis

Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

Jiutepec, Morelos

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Agradecimiento

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) la beca otorgada sin la cual este estudio no habría sido posible.

A mi querida familia, cimiento de mi vida, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor fuente de fortaleza y motivación. Sin ustedes, este logro no sería posible.

A mi respetado tutor Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, por su amistad, sabiduría, paciencia y orientación inestimable. Su guía experta ha sido fundamental en este camino. Sus enseñanzas han dejado una huella indeleble en mi formación académica y personal.

A mi apreciado comité tutorial: Dr. Raúl Berdeja Arbeu, Dr. Alberto González Sánchez, Dr. José Antonio Quevedo Tiznado, M.C. Fabiel Vazquez Cruz, cuyas contribuciones y evaluaciones críticas han enriquecido este trabajo y me han impulsado a superar mis límites.

A mis amigos, compañeros de risas y desafíos, por su apoyo moral y amistad inquebrantable a lo largo de esta travesía académica. Sus ánimos y momentos compartidos hicieron más ligera esta travesía.

A la familia Berdeja, por su apoyo incondicional y amistad a lo largo de este camino, les dedico mi tesis con profundo agradecimiento. Gracias por formar parte de este importante capítulo de mi vida.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Hipótesis.....	3
3. CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LIMA 'PERSA' EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ	4
3.1. Introducción	4
3.2. Metodología	5
3.2.1. Ubicación.....	5
3.2.2. Fuente de datos	6
3.2.3. Principales características de la producción.....	7
3.3. Resultados y discusión	8
3.3.1. Características de la agricultura en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz	8
3.3.2. Análisis de la superficie cultivada	9
3.3.3. Producción agrícola en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz	11
3.3.4. Valor económico de la producción agrícola en Martínez de la Torre, Veracruz	13
3.4. Conclusiones	14
4. ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MEDIANTE SEIS MÉTODOS EMPÍRICOS EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ	15
4.1. Introducción	15
4.2. Metodología	16
4.2.1.1. Información meteorológica y análisis de calidad de datos.....	16
4.2.2. Métodos empíricos para calcular evapotranspiración de referencia.....	17
4.2.3. Análisis estadístico.....	18

4.3.	Resultados y discusión	19
4.3.1.	Análisis de temperaturas y precipitaciones.....	19
4.3.2.	Evapotranspiración de referencia (ETo).....	20
4.3.3.	Análisis estadístico.....	21
4.3.4.	Análisis mensual de la evapotranspiración de referencia.....	22
4.4.	Conclusiones	26
5.	ANÁLISIS DEL EFECTO DEL RIEGO EN EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTO DE LIMA 'PERSA' (<i>Citrus latifolia</i>) EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ	27
5.1.	Introducción	27
5.2.	Materiales y métodos	28
5.2.1.	Localización del área de experimentación	28
5.2.2.	Material vegetal y manejo agronómico	29
5.2.3.	Instrumentos de medición	31
5.2.4.	Metodología.....	31
5.2.5.	Medición y observaciones de referencia in situ	32
5.2.6.	Diseño experimental	33
5.3.	Resultados y discusión	36
5.3.1.	Frutos cosechados de lima 'Persa' en intervalos de riego	36
5.3.2.	Etiquetado de ramas en árboles de lima 'Persa'.....	38
5.3.3.	Contenido de clorofila en hojas de lima 'Persa'.....	40
5.4.	Conclusiones	42
6.	OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN ESPACIAL EN CULTIVO DE LIMA 'PERSA' MEDIANTE IMÁGENES RGB OBTENIDAS CON DRON	43
6.1.	Introducción	43
6.2.	Materiales	44
6.2.1.	Ubicación.....	44
6.2.2.	Equipo para toma de imágenes aéreas (Dron).....	44
6.2.3.	Software para la adquisición y procesamiento de imágenes	46
6.3.	Metodología	47

6.3.1.	Puntos de control en tierra	47
6.3.2.	Preparación, ejecución de la misión de vuelo y adquisición de imágenes	48
6.3.3.	Procesamiento fotogramétrico	49
6.3.4.	Segmentación de imágenes	50
6.3.5.	Cálculo de índices espectrales	51
6.4.	Resultados.....	53
6.4.1.	Obtención de imágenes aéreas y productos fotogramétricos	53
6.4.2.	Extracción de cobertura vegetal (Segmentación)	55
6.4.3.	Análisis de correlación para Índices espectrales	56
6.5.	Conclusiones	57
7.	ESTIMACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DE LIMA 'PERSA' A PARTIR DE IMÁGENES OBTENIDAS DE DRONES PARA EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.....	58
7.1.	Introducción	58
7.2.	Materiales y métodos	59
7.2.1.	Área de estudio.....	59
7.2.2.	Metodología	59
7.2.3.	Adquisición de datos	61
7.2.4.	Procesamiento de datos.....	62
7.2.5.	Análisis comparativo.....	66
7.2.6.	Calendarización del riego con el uso de drones	66
7.3.	Resultados y discusión	67
7.3.1.	Datos climáticos y evapotranspiración de referencia.....	67
7.3.2.	Kc de referencia FAO-56.....	69
7.3.3.	Información estructural y espectral del cultivo	70
7.3.4.	Kc mediante drones.....	72
7.3.5.	Análisis espacio temporal de ETc	76
7.3.6.	Calendarización del riego	78
7.4.	Conclusiones	81
8.	CONCLUSIONES GENERALES	82
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.	6
FIGURA 2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA PRODUCCIÓN PARA EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.	8
FIGURA 3. EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE SEMBRADA, COSECHADA Y SINIESTRADA (RIEGO Y TEMPORAL).....	9
FIGURA 4. EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE SEMBRADA, COSECHADA Y SINIESTRADA (RIEGO).	10
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.....	11
FIGURA 6. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DE PRODUCCIÓN DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.	12
FIGURA 7. RENDIMIENTO DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.....	13
FIGURA 8. VALOR DE PRODUCCIÓN DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.....	14
FIGURA 9. VALORES MENSUALES DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN (PERIODO 2000 – 2015)...	19
FIGURA 10. TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL Y PRECIPITACIÓN ANUAL ACUMULADA (PERIODO 2000 – 2015).....	20
FIGURA 11. COMPORTAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL DE MÉTODOS EMPÍRICOS CON RESPECTO AL MÉTODO DE REFERENCIA PMMF.	21
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET _o) MÍNIMA Y MÁXIMA ESTIMADA CON EL MÉTODO TH (PERIODO 2000-2015).	23
FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET _o) PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (STD) ESTIMADA CON EL MÉTODO TH (PERIODO 2000-2015).	24
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET _o) MENSUAL CON EL MÉTODO TH (PERIODO 2000-2015).	25
FIGURA 15. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	29
FIGURA 16. MANEJO AGRONÓMICO DEL CULTIVO DE LIMA 'PERSA'; A, FERTILIZACIÓN FOLIAR CON BAYFOLAN FORTE, B: CONTROL DE MALEZAS CON DESBROZADORA.	30
FIGURA 17. SENSOR SPAD 502 PLUS.	31
FIGURA 18. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL EFECTO DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA'.	32
FIGURA 19. VARIABLES DE RESPUESTA MEDIDOS EN LIMA 'PERSA'.	33
FIGURA 20. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO.....	34
FIGURA 21. DISTRIBUCIÓN DE TRATAMIENTOS EN PARCELA DE ESTUDIO.	35
FIGURA 22. PORCENTAJE DE FRUTO DE EXPORTACIÓN EN ÁRBOLES DE LIMA 'PERSA' PARA EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.	40
FIGURA 23. DRON UTILIZADO (DJI MINI SE).	45
FIGURA 24. FLUJOGRAMA PARA LA ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CON DRON....	47
FIGURA 25. APOYO TOPOGRÁFICO, A: COLOCACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL, B: OBTENCIÓN DE COORDENADAS CON GPS, C: DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL.....	48
FIGURA 26. PROGRAMACIÓN DE MISIÓN DE VUELO EN EL SOFTWARE LITCHI.	49
FIGURA 27. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PIX4DMAPPER (PIX4D, 2023).	50

FIGURA 28. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES MEDIANTE eCOGNITION (TRIMBLE GERMANY GMBH, 2023).	51
FIGURA 29. FECHAS DE VUELO CON DRON PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA' EN EL RANCHO SAN ANTONIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.....	53
FIGURA 30. OBTENCIÓN DE ORTOMOSAICO PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA' EN EL RANCHO SAN ANTONIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.....	54
FIGURA 31. OBTENCIÓN DE DTM Y DSM PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA' EN EL RANCHO SAN ANTONIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.....	55
FIGURA 32. EXTRACCIÓN DE COBERTURA VEGETAL EN ÁRBOLES DE LIMA 'PERSA', A) ORTOMOSAICO, B) EXTRACCIÓN MEDIANTE ALGORITMO SVM.	56
FIGURA 33. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES DE VEGETACIÓN.	57
FIGURA 34. FLUJOGRAMA DE TRABAJO PARA LA DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA'.	60
FIGURA 35. ADQUISICIÓN DE DATOS, A) MEDICIÓN DE ALTURAS DE PLANTA, B) SENSOR HOBO MX2302.	61
FIGURA 36. FLUJOGRAMA DE OBTENCIÓN DE ALTURAS DE PLANTA CON EL USO DE DRON.....	64
FIGURA 37. DESCRIPCIÓN DE MODELOS (DSM, DTM), (OUATTARA ET AL. 2022).....	64
FIGURA 38. TEMPERATURA MEDIA Y HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL OBTENIDA A PARTIR DEL SENSOR HOBO MX2302.....	68
FIGURA 39. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MENSUAL POR EL MÉTODO PMMF Y PRECIPITACIÓN MENSUAL CON OBSERVACIONES DE SATÉLITE.	69
FIGURA 40. ALTURA DE PLANTACIÓN ESTIMADA CON MEDICIONES EN CAMPO Y ALTURAS DE PLANTA OBTENIDOS CON DRON.....	71
FIGURA 41. CORRELACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS PRINCIPALES ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA ESTRÉS HÍDRICO.....	72
FIGURA 42. DIAGRAMA DE CAJAS PARA VALORES DE Kc ESTIMADOS A PARTIR DE MÉTODOS EMPÍRICOS CON DRON.....	74
FIGURA 43. REGRESIÓN LINEAL DE VALORES DE Kc OBTENIDOS A PARTIR DE IMÁGENES DE DRONES COMPARADOS CON VALORES DE REFERENCIA FAO -56 (Kc FULL).	75
FIGURA 44. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL COEFICIENTE DE CULTIVO MEDIANTE EL MÉTODO (Nh) PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA'.	76
FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO (ET _c) MEDIANTE EL MÉTODO (Nh) PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA'.....	77
FIGURA 46. DIAGRAMA DE CAJAS DE ETC (Nh) MENSUAL.	78
FIGURA 47. REQUERIMIENTOS DE RIEGO MENSUALES CALCULADOS A PARTIR DE IMÁGENES OBTENIDAS CON DRON.....	80

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. INFORMACIÓN ESTADÍSTICA DEL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ (SIAP, 2022).	6
CUADRO 2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA AGRICULTURA EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.	8
CUADRO 3. ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO (COORDENADAS EN SISTEMA UTM)	17
CUADRO 4. MÉTODOS EMPLEADOS PARA CÁLCULO DE ETO.	17
CUADRO 5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS MÉTODOS EMPÍRICOS.	22
CUADRO 6. FERTILIZACIÓN FOLIAR, CONTROL DE PLAGAS Y ENFERMEDADES EN CULTIVO DE LIMA 'PERSA'.	30
CUADRO 7. DISEÑO DE TRATAMIENTOS DE RIEGO PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA'.	33
CUADRO 8. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE PESO FRESCO DE FRUTO EN LIMA 'PERSA'.	36
CUADRO 9. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE DIÁMETRO ECUATORIAL EN FRUTOS EN LIMA 'PERSA'.	37
CUADRO 10. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE DIÁMETRO POLAR EN FRUTOS EN LIMA 'PERSA'.	37
CUADRO 11. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE NÚMERO DE FRUTOS POR M ² EN LIMA 'PERSA'.	38
CUADRO 12. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE NÚMERO DE FLORES EN RAMA DE LIMA 'PERSA'.	38
CUADRO 13. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE NÚMERO DE FRUTOS AMARRADO EN RAMA DE LIMA 'PERSA'.	39
CUADRO 14. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE CARACTERÍSTICA DE FRUTOS ETIQUETADOS A LA COSECHA EN LIMA 'PERSA'.	39
CUADRO 15. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY DE VALOR PORCENTAJE DE NITRÓGENO EN HOJAS DE LIMA 'PERSA'.	41
CUADRO 16. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE PLATAFORMA AÉREA Y CÁMARA.	45
CUADRO 17. ÍNDICES DE VEGETACIÓN BASADOS EN BANDAS DE LA REGIÓN VISIBLE (RGB).	52
CUADRO 18. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TUKEY PARA LOS MÉTODOS DE Kc CON DRON Y MÉTODOS DE REFERENCIA FAO-56.	70
CUADRO 19. COEFICIENTES DE CULTIVO OBTENIDOS CON DRON.	73
CUADRO 20. CALENDARIZACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS PARA EL CULTIVO DE LIMA 'PERSA'	79
CUADRO 21. ESTIMACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DIARIOS.	102

Uso de imágenes aéreas obtenidas con dron para la estimación de requerimientos hídricos en el cultivo de lima 'Persa'

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Una deficiente aplicación del agua de riego no solo influye en el rendimiento, sino también en la calidad del fruto (rendimiento, peso, diámetro ecuatorial y polar, grosor de la cáscara, peso y porcentaje de jugo y la acidez), minimizando las oportunidades de mercado (Guerra *et al.*, 2015). El clima desempeña un papel fundamental en la productividad agrícola, como señalan (Adams *et al.*, 1998). Debido al crecimiento de la concentración de gases de efecto invernadero, es prácticamente inevitable experimentar modificaciones en el clima, a las cuales la agricultura deberá ajustarse. Esto conllevará no solo a modificaciones en los tipos y combinaciones de cultivos que se cultivan, sino también a un aumento en la inversión (McCarl, 2010). Más allá de las oportunidades de adaptación, se prevé que el cambio climático tendrá un impacto económico especialmente significativo en el sector agrícola (Fischer *et al.*, 2005; Mendelsohn, 2009).

Debido a los cambios climáticos globales, al desequilibrio entre el suministro de agua y la demanda, así como el crecimiento poblacional, es particularmente necesario mejorar el uso del agua de los cultivos (Zhang *et al.*, 2018). Los contrastes climáticos durante un ciclo anual, expresados en las estaciones, desempeñan un papel importante para el desarrollo fenológico de las plantas, siendo los eventos meteorológicos como la lluvia, temperatura y radiación solar, los reguladores principales en la floración y desarrollo del fruto. La correcta programación de calendarios de riego, así como las prácticas agrícolas para la gestión del recurso hídrico, han ayudado a mejorar y optimizar el rendimiento de los cultivos y la conservación de los recursos hídricos (Costa *et al.*, 2020). El desafío más importante para la agricultura en todo el mundo es la necesidad de producir más alimentos en condiciones de escasez de agua (Han *et al.*, 2018).

En México se siembran cada año 560,000 ha de cítricos; las principales variedades son: naranjas, limones, tangerinas y toronjas. El país es el segundo exportador de limón a nivel mundial con 12.29% del valor de las exportaciones mundiales (SIAP, 2017). De lima 'Persa' se cultivan 93,303 ha, el principal estado productor es Veracruz y el Distrito de Desarrollo Rural de Martínez de la Torre, Veracruz, es el más importante a nivel nacional con 35,438 ha (SIAP, 2020).

En los últimos años, los vehículos aéreos no tripulados (VANT o Dron) se han convertido en una plataforma avanzada de fenotipado de campo para proporcionar datos con alta resolución espacio-temporal (Ojeda *et al.*, 2017). Estos vehículos han impulsado el uso de imágenes aéreas cercanas a la tierra para monitorear el estado hídrico de los cultivos (Zhang *et al.*, 2019). Una de las ventajas más comunes es que los drones pueden proporcionar datos de alta calidad a la escala y el tiempo requeridos, los cuales se pueden utilizar para obtener datos de bajo costo con la frecuencia que requiere la tarea de supervisión debido a su facilidad de operación e implementación (Zhang & Kovacs, 2012). Se encuentran pocos estudios en México relacionados con el uso de sensores remotos y drones para la determinación del estado nutricional, monitoreo de plagas y enfermedades, así como la detección del estrés hídrico.

Tradicionalmente, la recolección de datos sobre las condiciones de cultivo se lleva a cabo en el campo mediante mediciones puntuales, lo que implica una inversión considerable de tiempo y recursos humanos en proporción al tamaño del área cultivada. No obstante, el desarrollo de modelos simples para obtener esta información podría proveer a los agricultores de lima Persa una herramienta valiosa para planificar de manera más efectiva tareas en campo, crucialmente, la gestión del riego basada en la evapotranspiración del cultivo y finalmente la elaboración de calendarios de riego. El empleo de drones para recopilar información detallada sobre variables agronómicas abre un campo de oportunidad significativo para la investigación. Estas variables, incluida la evapotranspiración, son esenciales para diseñar sistemas de riego eficientes. Utilizar drones para adquirir datos resulta especialmente eficaz en áreas extensas, permitiendo una recopilación más rápida y detallada.

Este estudio se enfocó en evaluar la viabilidad de obtener datos sobre el cultivo de lima 'Persa' mediante la aplicación de riego, estimar la evapotranspiración de referencia, así como calcular la evapotranspiración de cultivo y calendarización del riego mediante el procesamiento de imágenes capturadas con un dron. La obtención precisa de estos datos es crucial para la elaboración de calendarios de riego más precisos y adaptados a las necesidades específicas de cada cultivo."

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1.Objetivo general

Estimación del requerimiento del riego en el cultivo de lima 'Persa' a partir de imágenes obtenidas con un dron en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

2.2.Objetivos específicos

- Caracterizar de la producción de lima 'Persa' en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz
- Estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.
- Establecer y dar seguimiento a una parcela de lima 'Persa' con cuatro tratamientos de riego en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz
- Realizar sobrevuelos de una parcela de lima persa mediante un dron para la adquisición y procesamiento de imágenes RGB de alta resolución y obtener productos fotogramétricos, índices espectrales y cobertura vegetal.
- Calcular los requerimientos y calendario de riego para el cultivo de lima 'Persa' a partir de los productos obtenidos de imágenes RGB de alta resolución.

2.3.Hipótesis

La estimación de requerimientos de riego en lima 'Persa' es factible mediante el uso de imágenes aéreas adquiridas con un dron para las condiciones de Martínez de la Torre, Ver.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LIMA 'PERSA' EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ

3.1.Introducción

México cuenta con el primer lugar a nivel global en producción de limón, siendo esta de 2.6 millones de toneladas (SIAP, 2017), lo que representa el 12.3% de la producción mundial. En el país la producción de limón es principalmente de limón agrio mexicano, el limón italiano y con una participación del 49%, la lima 'persa' (SIAP, 2017). En 2018, el 95% de lima persa fue producido principalmente en los estados de Veracruz, Oaxaca y Jalisco. Teniendo Veracruz una participación de 657,350 toneladas lo que implica un 53% del total de limones persa producidos en el país, la mayoría con destino internacional.

En México se siembran 560,000 ha de cítricos; las principales variedades son: naranjas, limones, tangerinas y toronjas. De lima 'persa' se cultivan 93,303 ha, siendo el principal productor el estado de Veracruz. En este estado, el Distrito de Desarrollo Rural de Martínez de la Torre es el más importante a nivel nacional, con 34,848 ha (SIAP, 2022). En este al igual que en otros estados el uso deficiente de la aplicación del agua de riego no solo influye en el rendimiento, sino también en la calidad del fruto (rendimiento, el peso del fruto, el diámetro ecuatorial y polar del fruto, el grosor de la cáscara, el peso y el porcentaje de jugo, la acidez) y minimiza las oportunidades de mercado (Guerra *et al.*, 2015).

La producción de estos frutos se expandió en México durante el siglo XX. Inicialmente, se establecieron los primeros cultivos en el estado de Michoacán con el propósito de atender la demanda de limones frescos y aceite de limón en los mercados de Estados Unidos y Francia, así como el creciente consumo local (Hernández & Olvera, 2010).

Hoy en día, diversas variedades de limones provienen de distintos estados de México. Veracruz se destaca como el principal productor de lima persa, mientras que Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca, ubicados a lo largo de la costa del Pacífico, disfrutaron de un clima propicio para la cosecha de limas. Además, otros estados como Chiapas, Tabasco, Puebla, Jalisco, Yucatán y Tamaulipas también contribuyen a la producción, consolidando a México como un líder mundial en este sector (USDA Foreign Agricultural Service, 2017).

La mayoría de los agricultores no utilizan la medición de la humedad del suelo como referencia para determinar cuándo comenzar y cuánto tiempo deben durar los riegos. En su lugar, se basan en una evaluación visual de las necesidades de agua de los árboles (González *et al.*, 2007). Los cítricos necesitan que la humedad en el suelo se ajuste a las necesidades específicas de la especie y al estado de crecimiento y desarrollo de la plantación (Pérez *et al.*, 2008; Rodríguez-Gamir *et al.*, 2010). Por tanto, es fundamental comprender tanto el contenido de humedad volumétrica como el potencial de agua en el suelo. La gestión eficiente del riego no solo desempeña un papel crucial en la maximización de los rendimientos agronómicos, sino que también contribuye a la preservación del medio ambiente al reducir al mínimo la contaminación del agua.

En términos de rentabilidad, la calidad de la fruta se ha convertido tan importante como el rendimiento (Yilmaz *et al.*, 2018). El tamaño, forma, color, carencia de defectos, cantidad de jugo y sabor, son algunos de los atributos de calidad que pueden verse afectados por las prácticas culturales usadas para desfasar la cosecha (Almaguer *et al.*, 2011). En este sentido este capítulo tiene como objetivo obtener las características de la agricultura en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

3.2. Metodología

3.2.1. Ubicación

El experimento se realizó en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz con 120 metros de altitud, entre los paralelos 19° 58' y 20° 17' de latitud norte; los meridianos 96° 56' y 97° 10' de longitud oeste. El lugar presenta un clima clasificado como A (m) W'' (e), caracterizado como clima cálido húmedo, con lluvias todo el año, temperatura anual de 26 °C y precipitación anual de 1,626 mm (Figura 1).

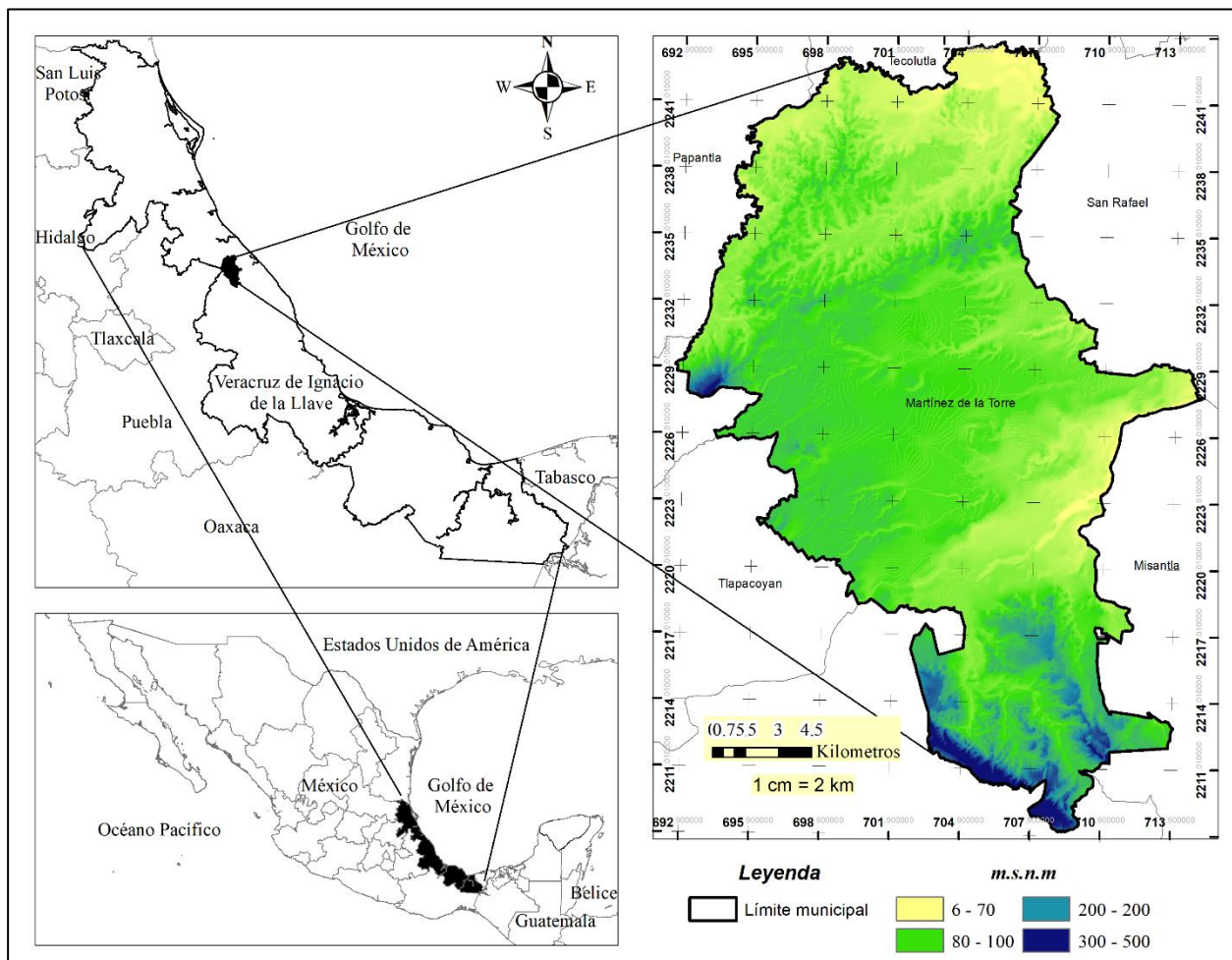


Figura 1. Ubicación de Martínez de la Torre, Veracruz.

3.2.2. Fuente de datos

Se obtuvo información estadística de producción agrícola anual del servicio de información agroalimentaria y pesca (SIAP), del periodo 2006 a 2021 en las modalidades Riego y Temporal del municipio de Martínez de la Torre Veracruz (Cuadro 1).

Cuadro 1. Información estadística del municipio de Martínez de la Torre, Veracruz (SIAP, 2022).

Fuente de datos:	Estadística de la producción Agrícola del municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.
Periodo de tiempo:	2006 a 2021

Modalidad:	Riego + Temporal
Ciclo agrícola:	Otoño-invierno (OI), primavera-verano (PV) y perennes (PER)
Tipo de información:	Superficie sembrada (ha), superficie cosechada (ha), superficie siniestrada (ha), valor de la producción (miles de pesos), rendimiento (ton/ha), producción (Ton).

Los datos obtenidos del SIAP solo se encuentran disponibles hasta el año 2022. Esta información es obtenida mediante encuestas realizadas por municipio.

3.2.3. Principales características de la producción

En la figura 2, se muestran las principales características de la producción para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, a partir de los datos obtenidos del anuario estadístico de la producción agrícola (SIAP, 2022). Para las características generales de la agricultura, en el municipio de Martínez de la Torre Veracruz se analizó en el año 2022 para los principales cultivos de los ciclos otoño-invierno (O-I), primavera-verano (P-V) y perennes (PER), así como la superficie sembrada, producción y el valor de la producción.

En la distribución de la superficie sembrada, se analizó la superficie total para los ciclos (O-I, P-V y Per) y se agrupó por modalidad temporal y riego para un periodo de 2006 a 2021. Para la evolución de la superficie se analizó en riego-temporal y solo con los datos anuales de riego. También se calculó el incremento y descenso de superficie sembrada, superficie cosechada y superficie siniestrada para el periodo 2006 a 2021. Con base en los valores de superficie sembrada del periodo 2006 a 2021, se analizó la distribución de los principales cultivos de importancia para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, para los ciclos O-I, P-V y PER. Con base en los resultados de los principales cultivos de importancia, se seleccionaron los cultivos del ciclo PER para analizar el volumen de producción, seguido por el rendimiento anual y el valor de la producción para el periodo de 2006 a 2021.

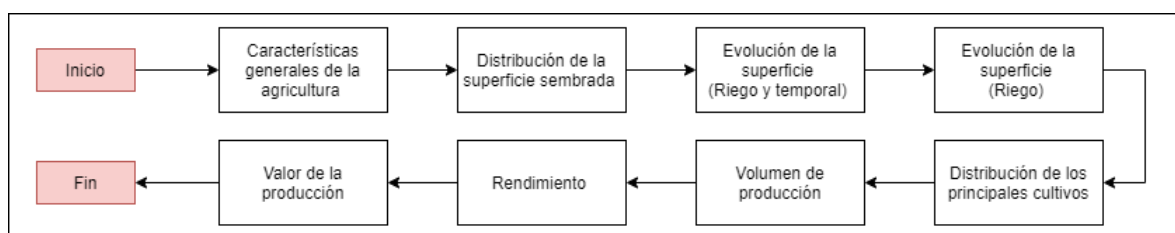


Figura 2. Principales características de la producción para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

3.3.Resultados y discusión

3.3.1. Características de la agricultura en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz

En el cuadro 2 se muestran las características generales de la agricultura del municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, donde se cultivan cerca de 12 cultivos en tres ciclos agrícolas: otoño invierno (OI), primavera verano (PV) y perennes (PER), bajo dos modalidades (riego y temporal). El municipio tiene 28.7 mil hectáreas de cultivo con las cuales se generan más de 28 mil toneladas de productos agrícolas que equivalen a 2.3 mil millones de pesos anuales (SIAP, 2022).

Cuadro 2. Características generales de la agricultura en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

	Unidad	OI	PV	PER	Total
Especies cultivadas	Número	2.00	2.00	8.00	12.00
	%	16.67	16.67	66.67	100.00
Superficie sembrada (ha)	Hectáreas	278.00	214.00	28215.06	28707.06
	%	0.97	0.75	98.29	100.00
Producción (ha)	Toneladas	226.00	214.00	28151.06	28591.06
	%	0.79	0.75	98.46	100.00
Valor de la producción (miles de pesos)	Miles \$	1678.00	2183.00	2375552.00	2379413.00
	%	0.07	0.09	99.84	100.00

La superficie cultivada para el periodo de 2006 a 2021 se divide en 2 modalidades (Riego y temporal). La modalidad de temporal presenta una superficie del 97.2 %, mientras que la modalidad riego tan solo el 2.8%. Para la modalidad de riego, el 100% de la distribución es en el ciclo PER. Mientras que, para la modalidad temporal, PER ocupa el 98.3% de la superficie, PV tan solo 1% y el ciclo OI 0.7%.

3.3.2. Análisis de la superficie cultivada

Analizando la base de datos del (SIAP, 2022), se encontró que en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, en los años 2008 a 2011 disminuyó la superficie sembrada de 38,200 ha a 27.500 ha. Esto representa el 71.9 % del total para la modalidad riego y temporal (Figura. 3). En 2013 comenzó un aumento en la superficie cosechada de 27 mil ha a 29.7 mil ha en 2019 que equivale a un aumento del 6.7 %, mientras que en 2021 volvió a ver un descenso del 4%. La superficie siniestrada presentó una mayor superficie en el periodo de 2011 a 2018 con un promedio de 1.1 mil ha.

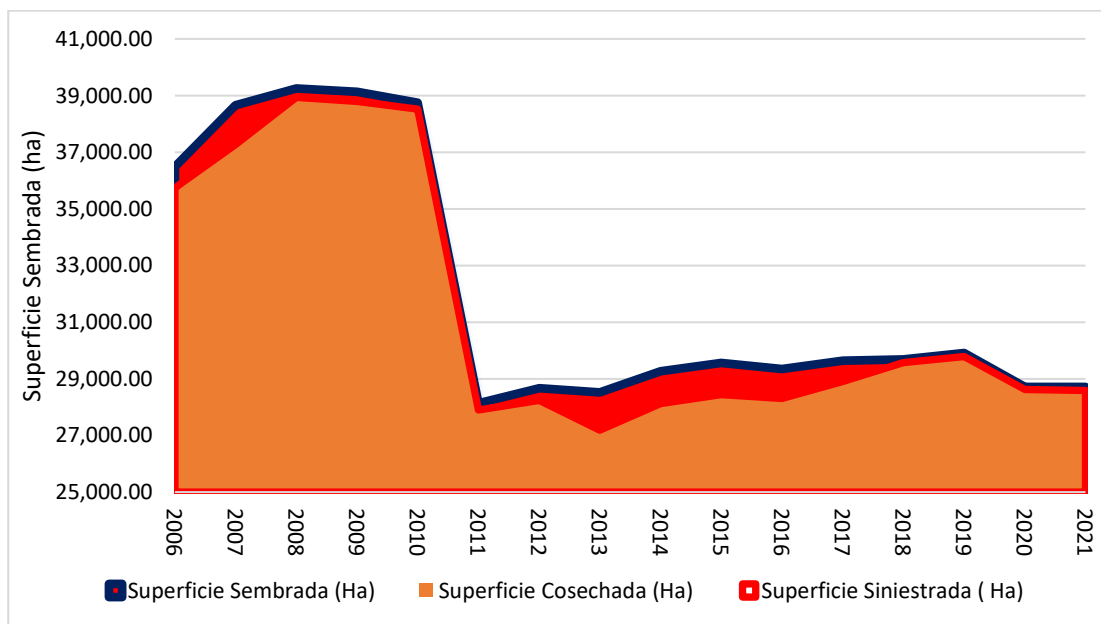


Figura 3. Evolución de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada (riego y temporal).

Por otra parte, la superficie sembrada para la modalidad de riego presentó una importante reducción con respecto a los años anteriores, mostrando en los años 2011, 2016 y 2020, una superficie sembrada de 819, 694 y 693 ha respectivamente. Los registros del (SIAP, 2022) indican que la mayor superficie sembrada se reportó en el año 2007 con 920 ha (Figura. 4), en el año 2006 se presentó una superficie sembrada de 921 ha, mientras que en el año 2021 disminuyó a 694 ha que representa el 75% del total.

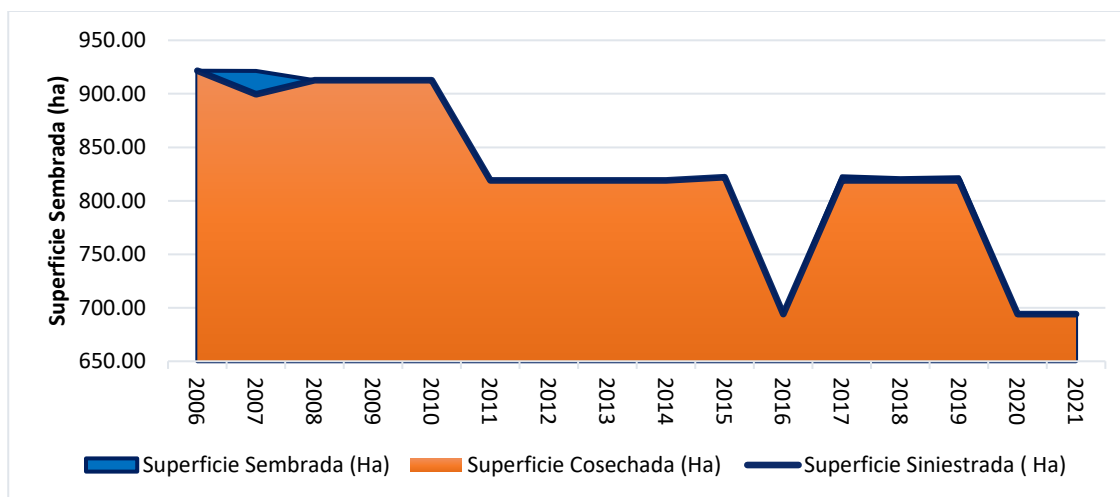


Figura 4. Evolución de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada (riego).

Distribución de la superficie sembrada por cultivo

El establecimiento de los cultivos varía según el ciclo. En la figura 5 se muestra la distribución porcentual de los principales cultivos por cada ciclo para el periodo 2006-2021, con una superficie promedio de 386 mil ha. En el ciclo OI predomina el cultivo de maíz de grano (82%) y frijol (10%) con una superficie sembrada de 2,900 ha, que representa el 0.76%. En PV el maíz grano con 91% y frijol 9%, con una superficie sembrada de 3,300 ha, que representa el 0.86% del total. En el ciclo PER los cítricos ocupan la mayor distribución, el limón con el 46% y naranja con 35%, siendo estos los más relevantes con una superficie total sembrada de 379, 7500 ha que representa el 98.4% del total.

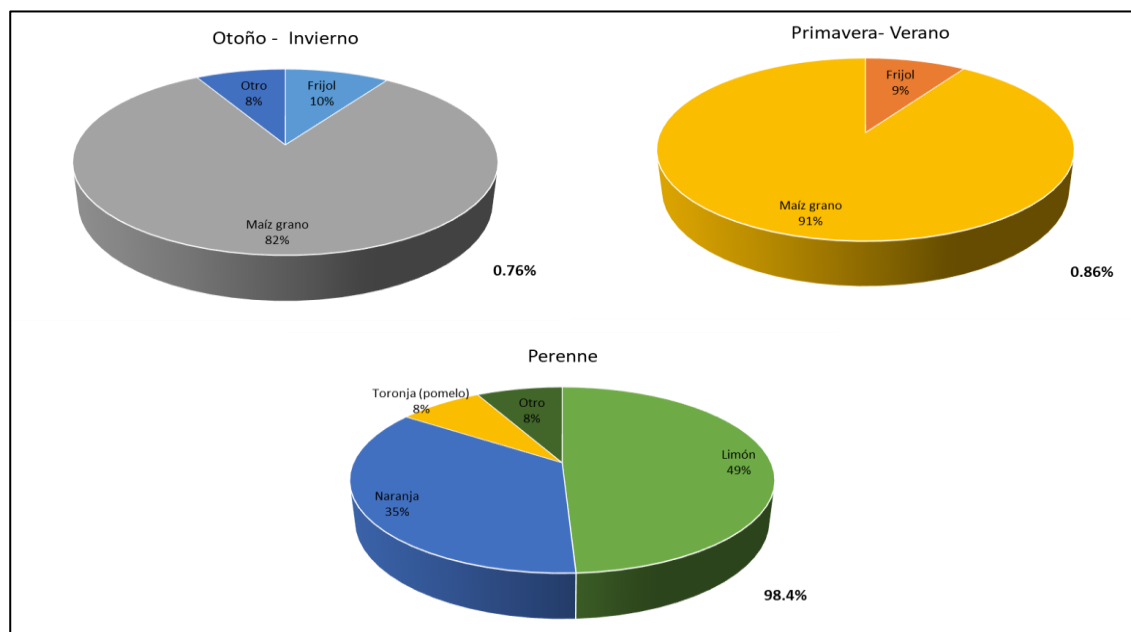


Figura 5. Distribución de los principales cultivos en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

3.3.3. Producción agrícola en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz

En la figura 6 se muestra la evolución del volumen de la producción de los principales cultivos del municipio de Martínez de la Torre, Veracruz. El cultivo de limón ocupa el mayor volumen de la producción en el municipio, en el año 2008 alcanzó la mayor producción con 294 mil Ton. Sin embargo, a lo largo del periodo 2006-2021 presentó disminución en el año 2011 con 197 mil Ton, lo que equivale a una pérdida del 33%. En 2018 también disminuyó a 204 mil ton, mientras que en el 2021 presentó un aumento del 36% con un valor de 278 mil Ton.

El cultivo de naranja alcanzó su máxima producción en 2006 con 208 mil Ton, en el periodo de 2011 a 2021 se mantuvo constante con un promedio de 120 mil Ton de producción con dos disminuciones en 2013 y 2017, quedando con 85 y 98 mil Ton respectivamente. Por otra parte, el cultivo de toronja alcanzó su producción más alta en el año 2012 con 124 mil Ton y disminuyó hasta 2021 con 98 mil Ton que equivale a una reducción en la producción del 26%.

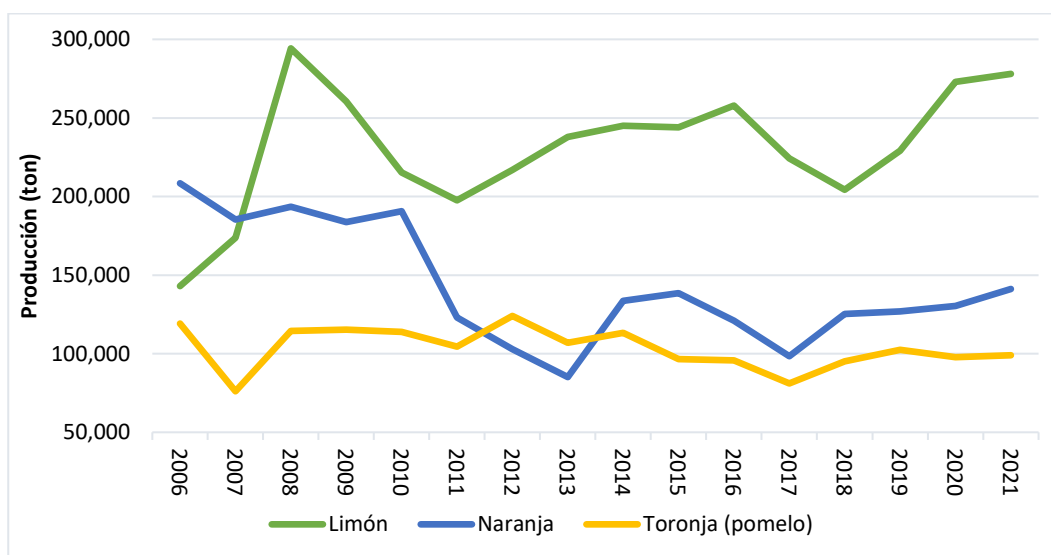


Figura 6. Evolución del volumen de producción de los principales cultivos en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

El rendimiento de los principales cultivos del municipio de Martínez de la Torre, Veracruz se muestra en la figura 7. El cultivo de toronja presenta el mayor rendimiento de la región con un promedio de 43 ton/ha, alcanzando el mayor rendimiento en 2012 con 52 ton/ha. Los cultivos de limón y toronja presentan rendimientos similares con un promedio de 15 y 13 ton/ha respectivamente, el cultivo de limón alcanzó su rendimiento máximo en 2016 con 17.5 ton/ha, mientras que naranja en 2015 con 14.8 ton/ha.

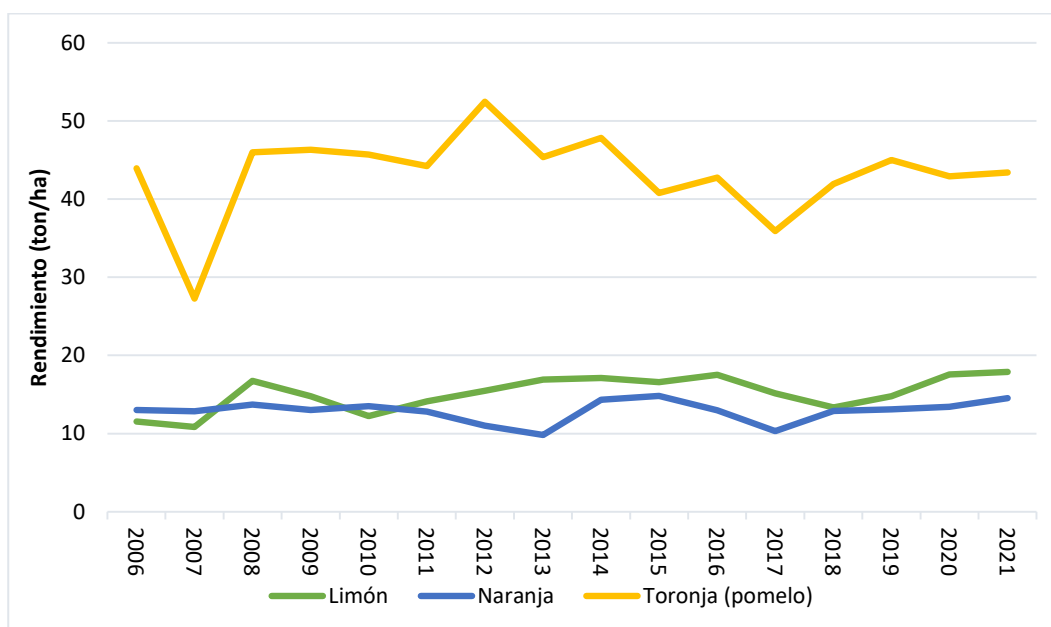


Figura 7. Rendimiento de los principales cultivos en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

3.3.4. Valor económico de la producción agrícola en Martínez de la Torre, Veracruz

En la figura 8 se muestra el valor de la producción para los principales cultivos del municipio de Martínez de la Torre, Veracruz. El cultivo de limón es el que aporta el mayor valor de la producción con un máximo de 2 mil millones de pesos, en el periodo de 2006 a 2020 presentó un aumento anual promedio de 15%, mientras que en 2021 disminuyó en un 13%, con un valor de la producción de 1.7 mil millones de pesos. La naranja aporta un valor de la producción promedio de 209 millones de pesos; el mayor aumento fue en 2020 con 397 millones de pesos. El cultivo de toronja, por otra parte, aporta un valor promedio de 174 millones de pesos y el valor máximo se presentó en el año 2019 con 340 millones de pesos.

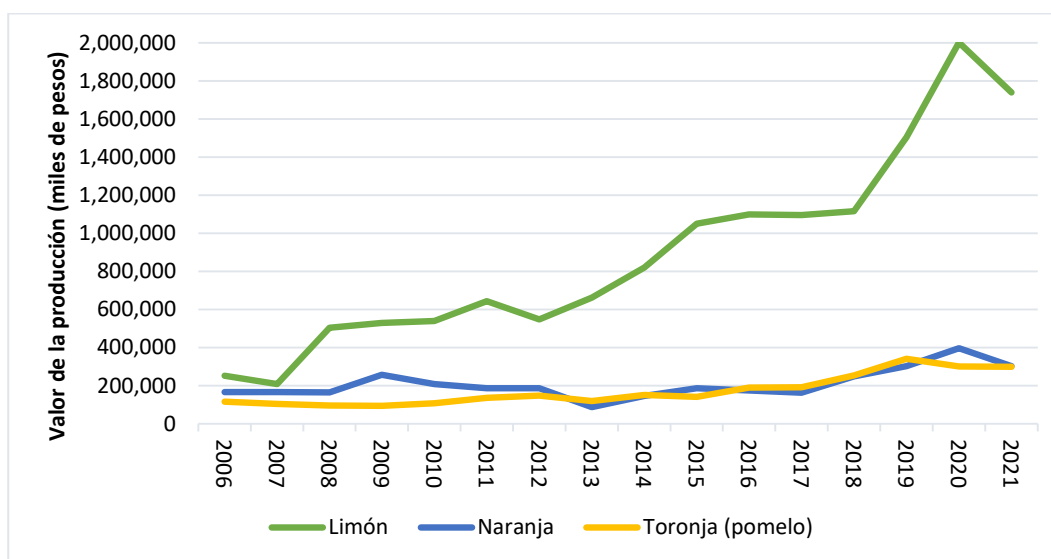


Figura 8. Valor de producción de los principales cultivos en Martínez de la Torre, Veracruz.

La lima 'Persa' es la principal variedad de cítricos en la región, ya que aporta el mayor valor de la producción a nivel nacional e internacional, además de presentar diversas cosechas en todos los años en comparación de las demás variedades de cítricos, que solo producen 2 veces por año.

3.4. Conclusiones

La agricultura de riego en el Municipio de Martínez de la Torre, Veracruz ha experimentado una disminución en los últimos años, representando únicamente un 2.8% de la superficie total destinada a la siembra. Este declive ha generado desafíos significativos en lo que respecta a la calidad de la producción agrícola en los últimos años. La disponibilidad del recurso hídrico se convierte en un elemento crítico para mejorar tanto la cantidad como la calidad de los cultivos. Situaciones de sequías extremas, como la que se experimentó en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz en el año 2019, pueden dar lugar a pérdidas que alcanzan hasta un 20% en la producción y, a su vez, repercutir negativamente en la calidad de los productos agrícolas.

4. ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MEDIANTE SEIS MÉTODOS EMPÍRICOS EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ

4.1.Introducción

La evapotranspiración (ET) es un componente importante en los modelos de balance hídrico y la programación del riego (Fisher y Pringle, 2013). La programación del riego se ha definido durante mucho tiempo como una técnica para mejorar la gestión del agua aplicada en la agricultura la cual ayuda a mejorar los recursos hídricos y el rendimiento de los cultivos. La demanda de evapotranspiración del medio ambiente se estima en función de las condiciones climáticas y, a menudo, se estima como la evapotranspiración de un cultivo de pasto de referencia teórico (ET_o), con el cultivo definido como una superficie uniforme de pasto en crecimiento activo, que da sombra completamente al suelo y sin falta de agua (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Desde el siglo pasado se han propuesto muchos métodos para estimar ET_o basados en datos meteorológicos, y van desde relaciones empíricas desarrolladas localmente hasta modelos de transferencia de energía (Allen *et al.*, 1998). Si bien el método FAO-56 se ha convertido en el estándar en todo el mundo para estimar ET_o, es un método complejo que requiere varios parámetros meteorológicos, incluida la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar y la velocidad del viento, que deben medirse en condiciones estrictas de instrumentación, ubicación y mantenimiento. A menudo, las limitaciones (incluidas las financieras, de personal, de instrumentación y de mantenimiento) hacen que los datos meteorológicos necesarios para usar el método FAO-56 no estén disponibles, y se deben usar métodos alternativos. Si bien no hay consenso sobre el método más apropiado para usar cuando los datos requeridos no están disponibles (Itier *et al.*, 1996), Allen *et al.* (1998) recomienda utilizar un método reducido en datos meteorológicos, estimar los parámetros meteorológicos faltantes y relacionarlo con el método estándar FAO-56. Bautista *et al.* (2009) mencionan que otros métodos solo contemplan la temperatura, como, por ejemplo, Thornthwaite (1948) y Hargreaves (1985). Estos métodos tienen la ventaja de requerir pocos datos meteorológicos, que muchas veces son difíciles de conseguir para grandes superficies.

Sin embargo, su uso está limitado a climas similares a aquellos en los que se desarrollaron (Xu y Singh, 2000; Xu y Chen, 2005) por lo que su aplicación puede resultar en errores significativos cuando los resultados se extrapolan a otras áreas climáticas (Hounam, 1971). Por lo tanto, se hace necesario desarrollar procedimientos para realizar ajustes regionales y locales de métodos alternativos para obtener las mejores estimaciones de ETo (Rosenberg *et al.*, 1983; Borges y Mendiondo, 2007). En este sentido, este capítulo tiene como objetivo determinar la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante seis métodos empíricos y su variación espacial para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

4.2. Metodología

4.2.1.1. Información meteorológica y análisis de calidad de datos

Los valores diarios de temperatura y precipitación se obtuvieron de 11 estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA-SMN, 2022) para el periodo 2000 - 2015 (Cuadro 3). Los datos fueron sometidos a una prueba de calidad mediante el paquete CLIMATOL, desarrollado para el software R (R Core Team, 2020). Para determinar el método de Penman - Monteith (PMMF), se utilizó el método de cálculo de datos faltantes descrita por Allen *et al.* (1998). Los valores faltantes se estimaron mediante el método de interpolación inverso de la distancia ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), según la Ecuación 1 (Shepard, 1968):

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)} \quad \text{Ec. 1}$$

dónde: Z_p es el valor estimado para el punto, n es el número de puntos utilizados en la interpolación, Z_i es la observación meteorológica conocida, d_i es la distancia entre estaciones (m) y p es la potencia que está en función del grado de ondulación del terreno: 1 para plano y 2 para abrupto.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio (coordenadas en sistema UTM)

Clave	Nombre	Latitud (m)	Longitud (m)	Altura (m.s.n.m.)
21143	SAN JOSE ACATENO	688194	2223564	114
21201	LAS MARGARITAS	677849	2212384	2422
30055	EL REMOLINO (CFE)	687833	2256775	119
30079	JOLOAPAN (CFE)	677623	2234524	47
30371	GUTIERREZ ZAMORA II	698271	2256893	20
30171	TECOLUTLA	708574	2268088	7
30102	MARTINEZ DE LA TORRE (DGE)	698652	2223680	89
30337	LIBERTAD	709111	2223802	59
30108	MISANTLA	719847	2201787	310
30054	EL RAUDAL	740336	2235280	10
30462	TENOCHTITLAN	719985	2190716	892

4.2.2. Métodos empíricos para calcular evapotranspiración de referencia

Se seleccionaron cinco métodos empíricos para el cálculo de la ETo, esto de acuerdo a la disponibilidad de datos meteorológicos en la zona de estudio (Cuadro 4). El método de referencia fue el Penman-Monteith modificado por la FAO (PMMF), mientras que los métodos a comparar fueron: Hargreaves (Hg), Turc (Tc), Thornthwaite (Th), Malmstrom (Mm) y Hargreaves modificado por Droogers (Dg).

Cuadro 4. Métodos empleados para cálculo de ETo.

Mét.	Ecuación	Referencia
Hg	$ET_o = 0.023(0.408) (T_m + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} * R_a$	Hargreaves (1985)
Tc	$ET_o = a * C * (R_G + b) * \left(\frac{T_m}{T_m + 15} \right)$	Turc (1961)
Th	$ET_o = 16 d \left(\frac{10T_m}{I} \right)^a$	Thornthwaite (1948)

Mm	$ET_o = 4.09 * 6.11 \exp\left(\frac{17.27T_m}{237.3 + T_m}\right)$	Malmstrom (1969)
Dg	$ET_o = 0.0013 * 0.408Ra(T_{avg}+17)(TD - 0.0123P)^{0.76}$	Droogers (2002)
PMMF	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	Allen <i>et al.</i> (1998)

dónde: T_{mn}, es temperatura mínima mensual (°C); T_{mx}, es temperatura máxima mensual (°C); T_m, temperatura media (°C); T_{avg} Temperatura promedio mensual(°C); TD rango de temperatura (°C) P; Precipitación (mm/mes); a y b, constantes empíricas; C, constante dependiente de humedad relativa, ϕ, radiación global [MJ/m² día]; R_s, radiación solar [MJ/m² día]; R_a, radiación extraterrestre [MJ/m² día]; R_n, radiación neta (MJ/ m² día); G, flujo calórico (MJ/ m² día) ;p, porcentaje medio anual de horas diurnas; d, número de días por mes; I, índice de calor anual; γ, Constante psicrométrica (kPa/ °C); Δ, pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (kPa/ °C); u₂, velocidad del viento a 2 m de altura (m/s); e_s – e_a, déficit de tensión de vapor (kPa).

4.2.3. Análisis estadístico

Un análisis de varianza (ANOVA) fue empleado para evaluar la precisión de los métodos empíricos comparado con el método de referencia (PMMF). Los estadísticos de prueba considerados fueron: coeficiente de determinación (R²), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RCME) y el error medio (EM), calculados mediante las siguientes ecuaciones (2,3 y 4), según lo recomienda Djaman (2019):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a}) (t_i - \bar{t})]^2}{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2] [\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2]} ; \quad \text{Ec. 2}$$

$$RCME = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)^2}{N} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 3}$$

$$EM = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)}{N} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

dónde: a_i es el dato estimado por el método, t_i es el dato observado, a es el promedio de los datos estimados por el método, t es el promedio de los datos observados y N es el número total de observaciones (Alexandris *et al.*, 2006; Tabari, 2010; Cervantes *et al.*, 2012).

4.3.Resultados y discusión

4.3.1. Análisis de temperaturas y precipitaciones

En la figura 9 se muestran los valores mensuales de temperaturas promedio y precipitaciones para el periodo analizado (2000 – 2015). La temperatura máxima promedio osciló en un rango de 23.4 a 32.7 °C, siendo el máximo en junio y el mínimo en enero. La temperatura mínima promedio en un rango de 13.7 a 21.5 °C en los meses de enero y junio respectivamente. Mientras que la precipitación promedio anual osciló de 59 a 330 mm para los meses de marzo y septiembre.

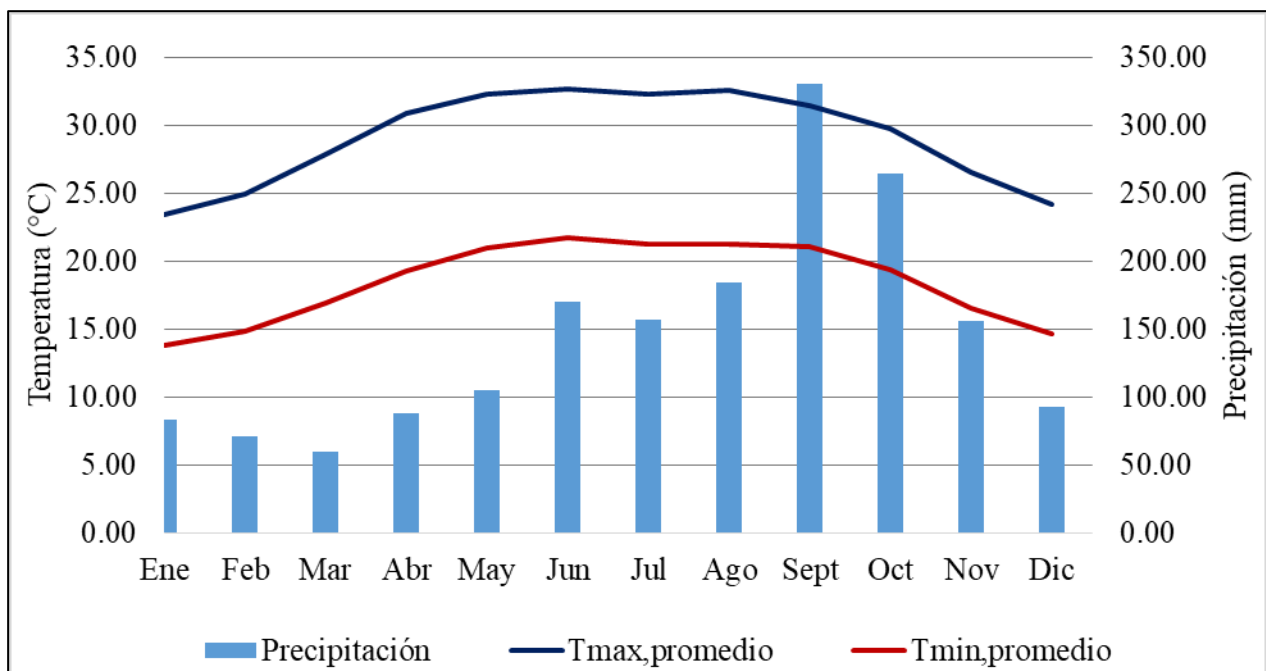


Figura 9. Valores mensuales de temperatura y precipitación (Periodo 2000 – 2015).

En la figura 10 se muestra la variación temporal de temperatura máxima y mínima anual promedio, así como para la precipitación anual acumulada para el periodo 2000 – 2015. La temperatura máxima en este periodo se presentó en el año 2007 en un rango de 33.2 a 26.3 °C, mientras que la

temperatura mínima en el año 2006 con un rango de 19.4 a 13.3 °C. En cuanto a la precipitación máxima acumulada para este periodo, el valor máximo fue de 368 mm (2013), mientras que la mínima precipitación acumulada fue de 152 mm en 2006.

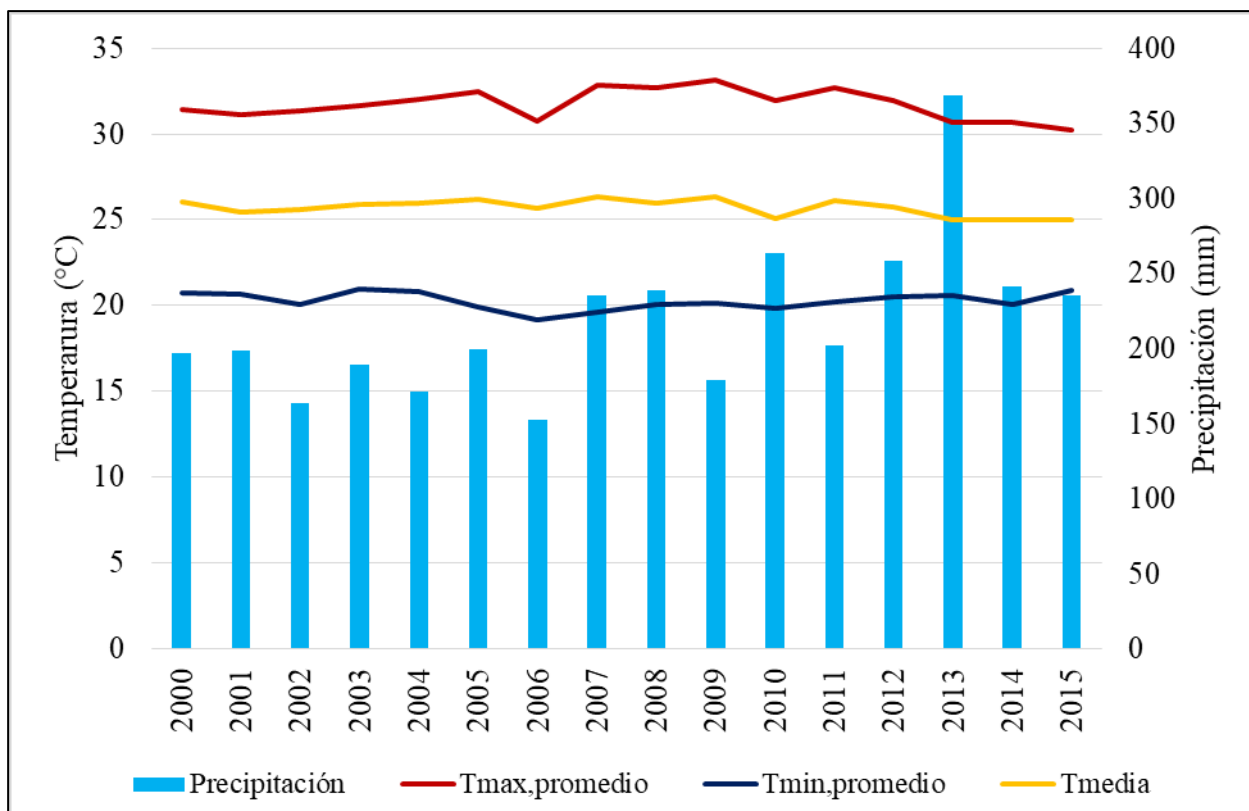


Figura 10. Temperatura promedio anual y precipitación anual acumulada (Periodo 2000 – 2015).

4.3.2. Evapotranspiración de referencia (ETo)

Un análisis comparativo de los valores promedio mensuales de la ETo, estimado con los diferentes métodos empíricos se muestra en la figura 11. Se observa un incremento que inicia en el mes de enero hasta alcanzar su valor máximo en el mes de junio y desciende gradualmente hasta el mes de diciembre.

De acuerdo con los resultados, los valores máximos de la ETo se presentan en junio (3.5 a 5.5 mm·día⁻¹), y los mínimos en enero con 1.5 a 2.9 mm·día⁻¹. Cinco métodos sobrestiman a PMMF la mayor parte del año con valores promedios que varían de 2.4 a 4.6 mm·día⁻¹ (Tc, BC, Th, Mm y Dg). El método que presenta menores diferencias con respecto a PMMF es Th en los meses de

enero a abril (entre 1.5 a 4.1 mm·día⁻¹) y en los meses de septiembre a diciembre con valores que van desde 4.4 a 1.6 mm·día⁻¹.

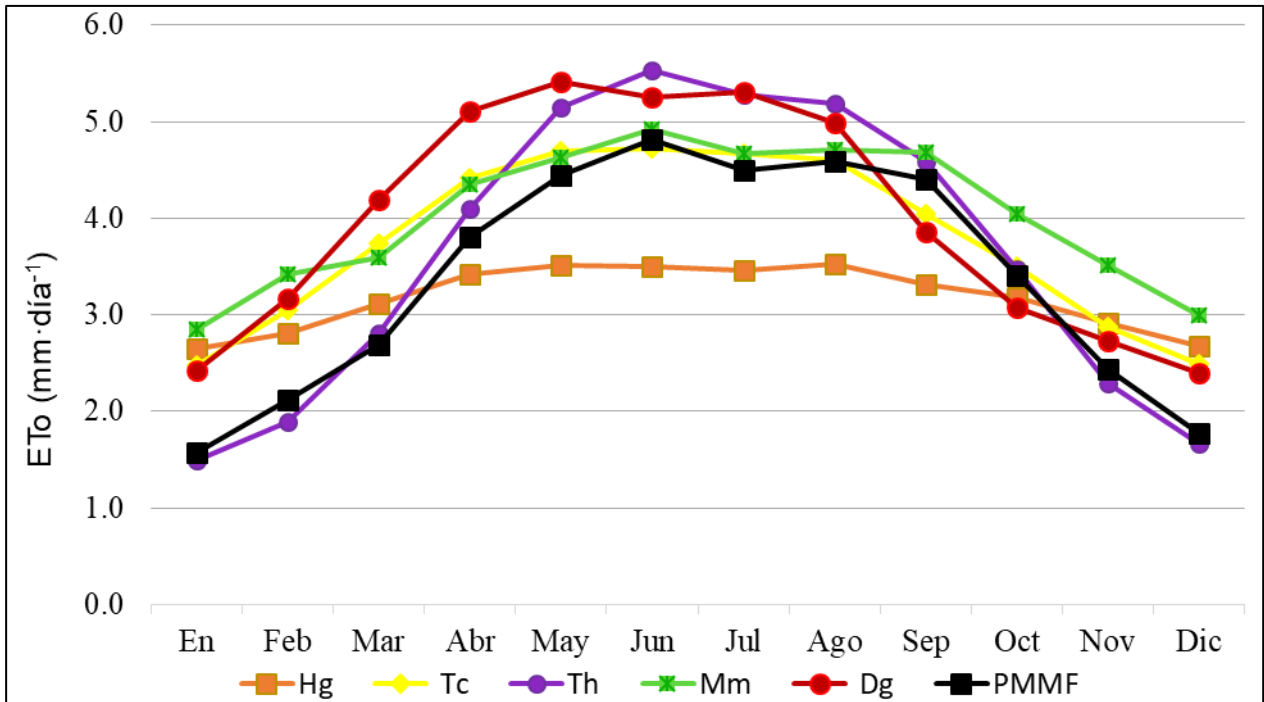


Figura 11. Comportamiento de la evapotranspiración mensual de métodos empíricos con respecto al método de referencia PMMF.

4.3.3. Análisis estadístico

Los métodos Tc, Th y Mm (Cuadro 5), tuvieron valores de R^2 por encima del valor mínimo (0.70) reportado por Moriasi *et al.* (2007). Esto indica un buen ajuste con respecto al método de referencia para las condiciones climáticas evaluadas. Sin embargo, los métodos Hg y Dg presentaron los valores más bajos de R^2 con 0.6 y 0.5 respectivamente. Los valores de RCME oscilaron entre 0.3 y 1.1 mm·día⁻¹, mientras que el EM varió de 0.1 a -0.3 mm·día⁻¹. Cabe apreciar que todos los métodos sobre estimaron al método de referencia. El método más cercano a PMMF fue Th con $R^2 = 0.94$, $RCME = 0.33$ mm·día⁻¹ y $EM = 0.13$ mm·día⁻¹. Los resultados obtenidos con el método Th concuerdan con lo reportado por Hafeez *et al.* (2020), así mismo Bautista *et al.* (2009), menciona que el método Th es una buena alternativa para estimar ETo durante los meses lluviosos. Por su parte Bautista *et al.* (2009) encontró que para climas semiáridos y subhúmedos Th presenta mejores

resultados con respecto a PMMF durante meses lluviosos $R^2 = 0.76$. Penman (1956), afirmó que el modelo de Thornthwaite es adecuado en condiciones de clima húmedo.

Cuadro 5. Resultados del análisis estadístico para los métodos empíricos.

Método	R^2	RCME (mm/d ⁻¹)	EM (mm/d ⁻¹)
Hg	0.63	1.12	-0.31
Tc	0.74	0.83	0.28
Th	0.94	0.33	0.13
Mm	0.90	0.87	0.54
Dg	0.57	1.11	0.49

Dg = Hargreaves modificado por Droogers; Hg = Hargreaves; Tc = Turc; BC = Blaney Criddle; Mm = Malmstrom; Th = Thornthwaite; R^2 = coeficiente de determinación; RCME = raíz cuadrada del error cuadrático medio; EM = error medio.

4.3.4. Análisis mensual de la evapotranspiración de referencia

La interpolación espacial con los valores puntuales de la ETo por el método Th para las zonas en donde no se cuenta con información climática, permite la elaboración de mapas para analizar la variabilidad espacial. En la figura 12 se presentan mapas estacionales generados a partir de la interpolación espacial de la ETo diaria calculada con el método Th. Los valores más bajos de la ETo mínima, se presentaron en un rango de 1.4 a 1.9 mm·día⁻¹ con un incremento que va desde las partes más altas a las bajas en dirección oeste-este. El valor más bajo de la ETo mínima (1.2 mm·día⁻¹) se dio en la estación Misantla (clave 30108, a 310 m s. n. m.). Por otra parte, los valores de la ETo máxima se presentaron en un rango de 5.4 a 6.5 mm·día⁻¹ con un incremento predominante de sur a oeste. El valor más alto de la ETo máxima (7.1 mm·día⁻¹) se presentó en la estación San José Acateno (clave 21143, a 114 m s. n. m.).

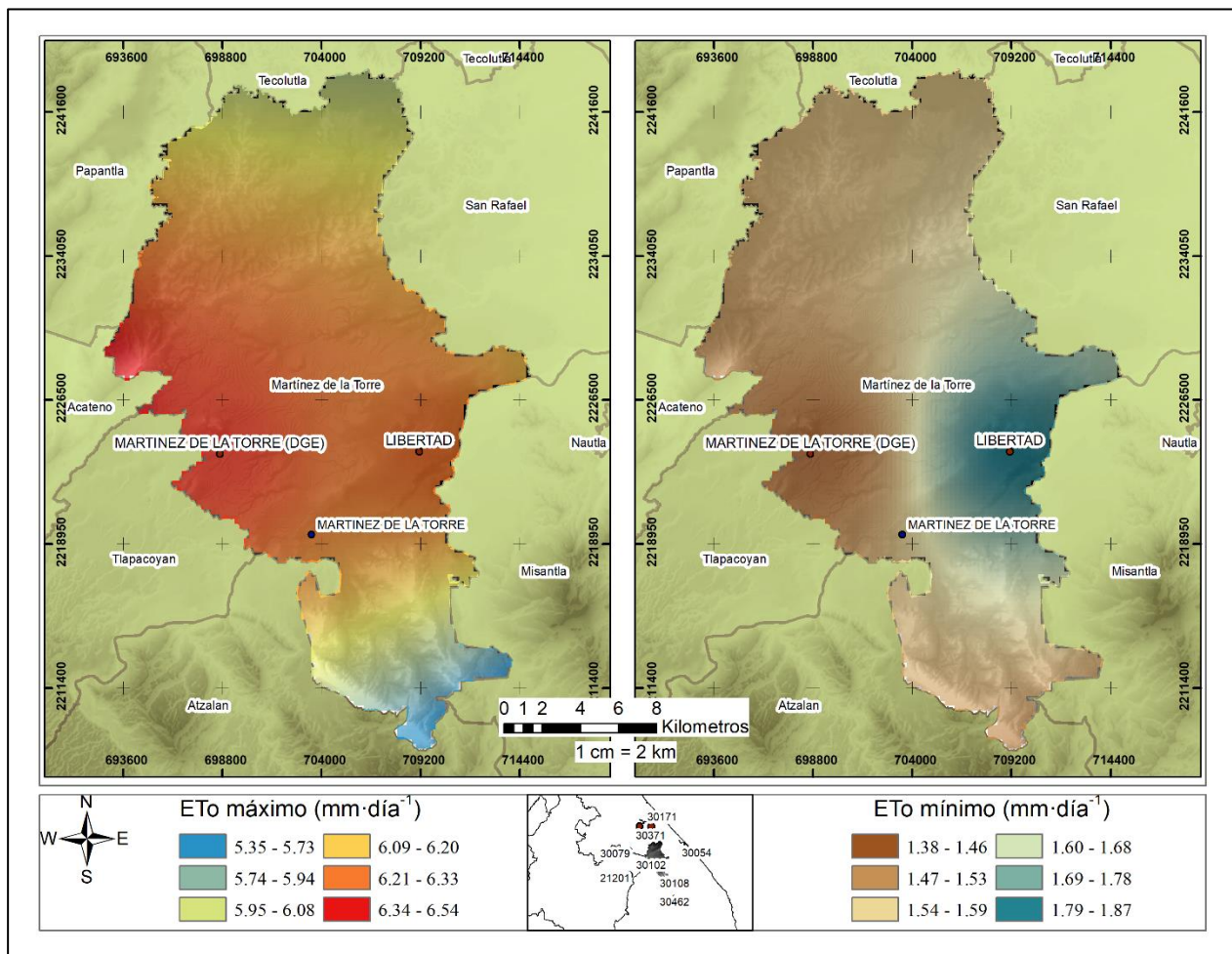


Figura 12. Distribución espacial de la evapotranspiración de referencia (ETo) mínima y máxima estimada con el método Th (periodo 2000-2015).

En la figura 13 se presentan mapas estacionales de valores promedio diario y desviación estándar (STD) de ETo estimada con el método Th. Los valores de la ETo promedio, se presentaron en un rango de 3.5 a 4.1 mm·día⁻¹ con un incremento que va en dirección sur a este, los valores máximos y mínimos de ETo promedio (4.1 y 2.8 mm·día⁻¹) se presentaron en la estación San José Acateno (clave 30108, a 310 m s. n. m.) y Tenochtitlan (clave 21143, a 114 m s. n. m.). Por otra parte, los valores de la ETo STD se presentaron en un rango de 1.4 a 1.9 mm·día⁻¹ con un incremento predominante de las partes altas a las bajas de sur a oeste. El valor más alto de la ETo máxima (1.9 mm·día⁻¹) se presentó en la estación San José Acateno (clave 21143, a 114 m s. n. m.).

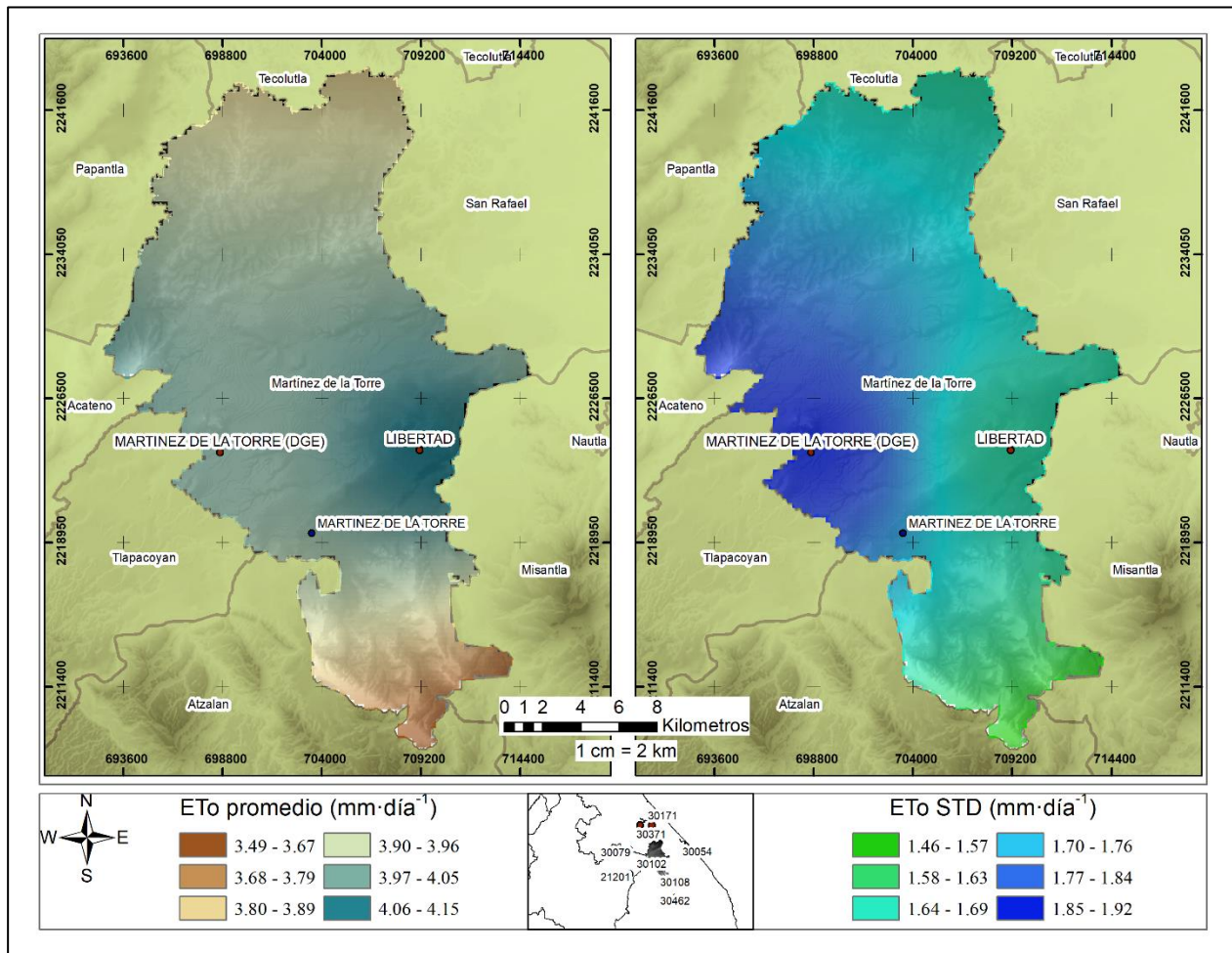


Figura 13. Distribución espacial de la evapotranspiración de referencia (ET_0) promedio y desviación estándar (STD) estimada con el método Th (periodo 2000-2015).

A partir de interpolación de los valores de ET_0 mensuales estimados mediante Th se generaron mapas mensuales de ET_0 (Figura 14). Los valores más bajos de la ET_0 mínima, se presentaron en el mes de enero en un rango de 1.3 a 2 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$, de esta manera aumenta de manera constante al mes de junio en un rango de 5.5 a 6.5 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ siendo este mes el que presenta mayor ET_0 , dicho aumento se presenta en la zona sur con un valor de 4.6 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ (altitud de 186 m.s.n.m.) y se extiende al oeste alcanzando un valor máximo de 6.5 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ (altitud de 96 m.s.n.m.). Mientras que en los meses de julio a diciembre se presenta un descenso de los valores de ET_0 en un rango de 5.5 a 2 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$. Los valores de ET_0 presentan una relación con respecto a la altitud, los valores

de ETo aumentan conforme la altitud disminuye, mientras que disminuyen conforme la altitud aumenta; este comportamiento se mantiene constante en los 12 meses analizados.

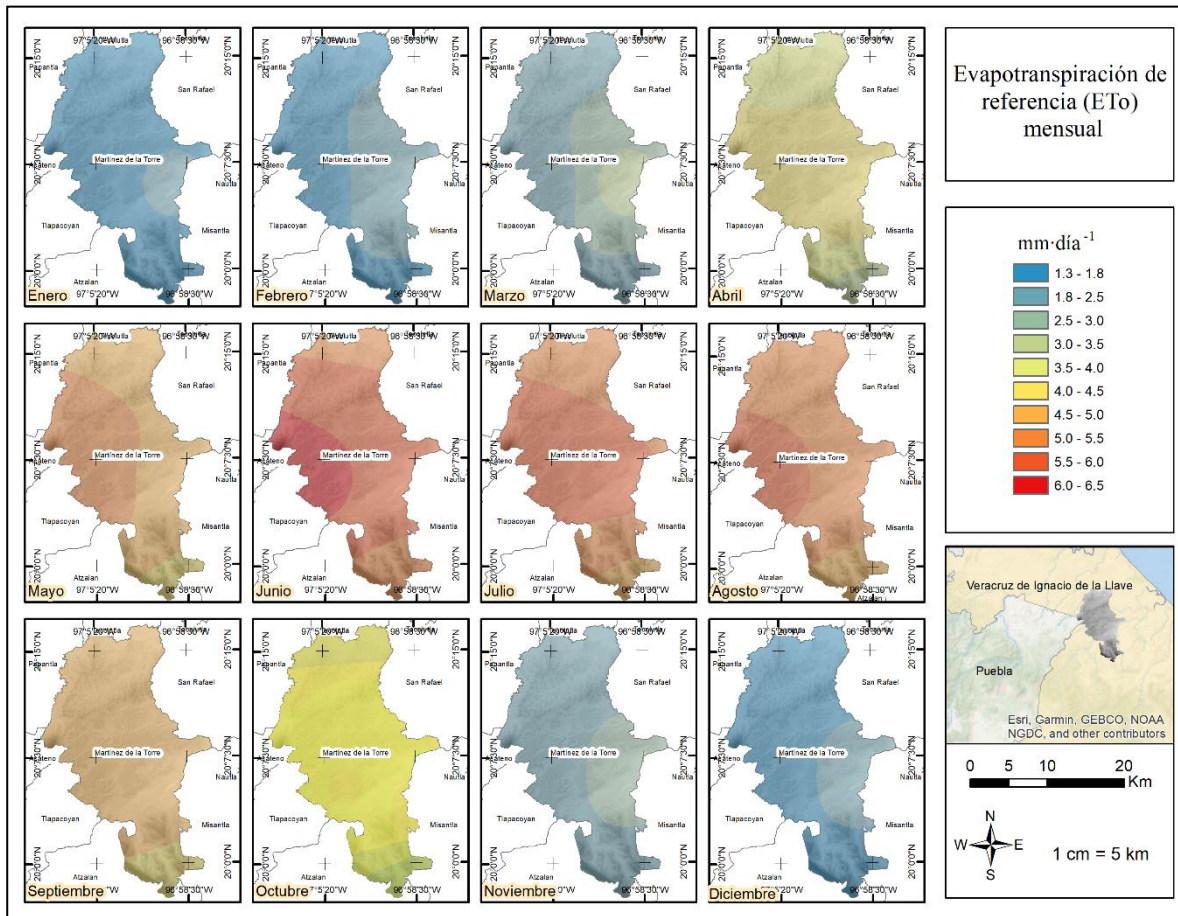


Figura 14. Distribución espacial de la evapotranspiración de referencia (ETo) mensual con el método Th (periodo 2000-2015).

La creación de mapas de ETo son una herramienta que ayuda en la planificación de la programación del riego que pueden ayudar a mejorar la gestión del agua aplicada a los cultivos sembrados en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz (Capítulo 3) la cual permite mejorar la gestión de los recursos hídricos y el rendimiento de los cultivos.

4.4.Conclusiones

Los métodos empíricos utilizados sobrestiman la ETo con diferencias significativas con respecto al método de referencia PMMF, sin embargo, los métodos Th y Mm que necesitan valores de temperatura como entrada se aproximan más a PMMF. Estos métodos tienen una ventaja con respecto a PMMF, que solo necesitan observaciones de temperatura, las cuales están disponibles en la mayoría de las estaciones meteorológicas de Martínez de la Torre, Veracruz.

A escala mensual el método empírico Th tiene una mayor aproximación a PMMF en los meses con bajas precipitaciones (enero – abril y septiembre – diciembre), por lo que este método es más utilizado en regiones áridas y semiáridas. Mientras que el método Mm tiene una mayor aproximación a PMMF en los meses con mayores precipitaciones (mayo – agosto).

5. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL RIEGO EN EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTO DE LIMA 'PERSA' (*Citrus latifolia*) EN EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ

5.1.Introducción

En cítricos existen muchos factores que reducen rendimiento de fruto como son: ambiente (la temperatura, luminosidad, humedad relativa y el bióxido de carbono CO₂), plagas, enfermedades, riego, fertilización, porta injerto, entre otros (Agusti, 2010). Para aumentar la producción de lima 'Persa' en la época invernal en México, se han estudiado varias prácticas como el uso de hormonas, estrés hídrico, fertilización y anillado, en tratamientos solos y combinados (Almaguer *et al.*, 2011; Ambriz *et al.*, 2018).

Cuando el agua aportada por la lluvia es inferior a la evapotranspiración potencial del cultivo es necesario la aplicación del riego para obtener mejor producción. El abonado, la poda y las labores culturales favorecen la producción, pero ninguna de las anteriores es absolutamente indispensable como el riego (Vélez *et al.*, 2012).

El riego es una práctica necesaria para que la producción cítrica sea eficiente y rentable. La mayoría de los productores, durante la época de sequía utilizan diversos métodos y técnicas para solventar el déficit hídrico, controlar la maduración, calidad y producción de las plantas de cítricos (Wagner *et al.*, 2002). Una gestión adecuada del riego se fundamenta en una precisa estimación de las demandas de agua de los cultivos. En el ámbito de los cultivos arbóreos, se está reemplazando el uso tradicional de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y los coeficientes de cultivo (K_c) propuestos por Allen *et al.* (1998) con modelos más precisos para calcular el consumo de agua por parte de los árboles, como los presentados por Rana *et al.* (2005), Fereres *et al.* (2012) y Villalobos *et al.* (2013). En lo que respecta a los cítricos, es posible evaluar los requerimientos máximos de agua utilizando un modelo sencillo basado en la cobertura del suelo, según lo propuesto por Villalobos *et al.* (2009). A menudo, dado que los recursos hídricos se vuelven cada vez más escasos, no es posible satisfacer completamente todas las necesidades de agua, lo que conlleva la implementación de estrategias de riego deficitario.

Los efectos provocados por la insuficiencia de agua en los procesos de las plantas varían en función de la especie y la intensidad, la duración y la evolución temporal del estrés según Bradford y Hsiao (1982). Existe evidencia que sugiere que el estrés hídrico puede resultar en una disminución del crecimiento de la parte superior y el tronco de las plantas como señaló Levy *et al.* (1978). Además, los impactos del estrés hídrico en el rendimiento de las plantas están vinculados a la fase fenológica en la que se presente dicho estrés. En muchas especies, existen etapas de crecimiento "cruciales" en las que la escasez de agua puede conllevar una disminución más significativa del rendimiento en comparación con otros períodos de crecimiento según Vaux y Pruitt (1983). En el caso de los cítricos, generalmente se considera que los períodos de floración y cuajado son las fases más críticas en este sentido, como mencionan Doorenbos y Kassam (1979).

En la región de Martínez de la Torre, Veracruz, en los meses con precipitaciones de septiembre a marzo, se presentan las condiciones favorables para el desarrollo de la agricultura, sin embargo, en los meses de abril para agosto se necesitan riegos de auxilio para ayudar al desarrollo de flor y fruto amarrado en lima 'Persa'. Por lo antes mencionado, el siguiente trabajo de investigación tiene por objetivo analizar el efecto del riego en el rendimiento y calidad de fruto de lima 'persa' mediante la implementación de un experimento con cuatro niveles de riego.

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Localización del área de experimentación

El experimento se realizó de enero a mayo de 2019, en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, en el Rancho 'San Antonio', localizado a 120 metros de altitud, entre los paralelos 19° 58' y 20° 17' de latitud norte y meridianos 96° 56' y 97° 10' de longitud oeste. El lugar presenta un clima clasificado como A (m) W'' (e), caracterizado como clima cálido húmedo, con lluvias todo el año, temperatura anual de 26 °C y precipitación anual de 1,626 mm (García, 1989). En la figura 15, se muestra la micro localización del área de estudio.

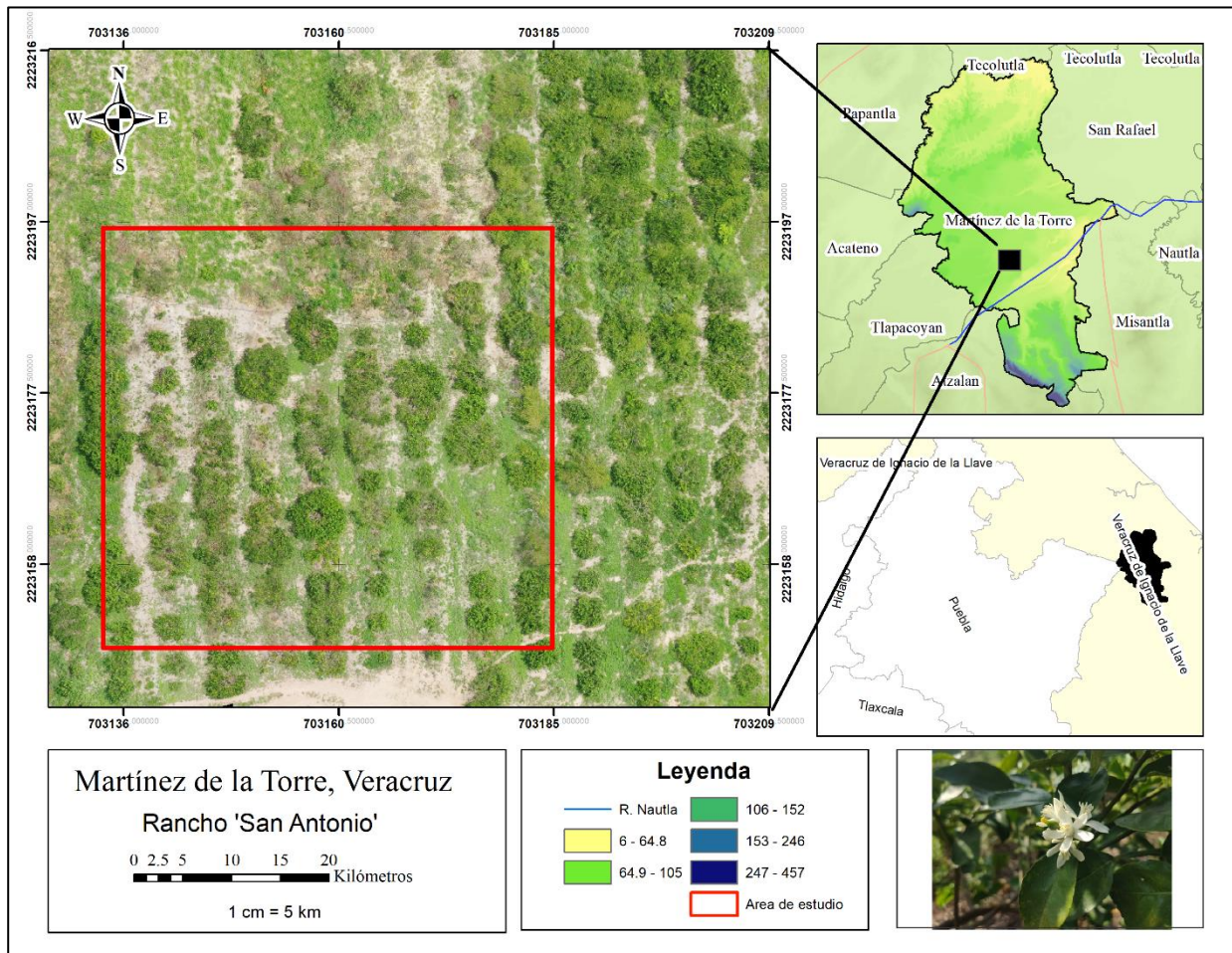


Figura 15. Ubicación del área de estudio.

5.2.2. Material vegetal y manejo agronómico

Se utilizaron árboles de lima 'Persa' (*Citrus latifolia*) de entre 4 a 9 años con distancia de plantación de 6 x 4 m. La lima 'Persa' es un árbol que alcanza una altura media de 4.2 m, la copa es elipsoidal u ovalada, la ramificación es densa y los ápices de los retoños presentan una tonalidad verde claro. La producción se inicia a los dos años de trasplante del injerto, fructifica todo el año; en condiciones de buen mantenimiento y manejo de la plantación puede durar de 30 a 50 años (Manzanilla *et al.*, 2018). El limón 'Volkameriana' es un patrón considerado como tolerante a tristeza, exocortis y psorosis, se utiliza como patrón de limón por tener buena resistencia a las enfermedades fungosas, además de presenta buena resistencia a suelos calizos, salinidad del suelo y a *Phytophthora* sp (Ambriz *et al.*, 2019).

Se realizó poda de descentrado en el mes enero de 2022, en el mes de febrero de 2022 se fertilizó al suelo con 2 kilos de la fórmula 18-9-18 por árbol (aplicación cada 2 meses), el control de malezas se realizó de manera manual con desbrozadora, así como el control de plagas y enfermedades (cada 40 días). En el área de estudio se presenta una textura de suelo franco, pH de 5.19, densidad real de 2.2 tm^{-3} . En el cuadro 6, se muestran los productos utilizados para el control de plagas, enfermedades y fertilizante foliar. El control de plagas y enfermedades se realizó con las mismas dosis para los cuatro tratamientos, en las mismas fechas.

Cuadro 6. Fertilización foliar, control de plagas y enfermedades en cultivo de lima 'Persa'.

Producto	Nombre comercial	Fabricante	Dosis	Aplicación
Insecticida	Actara [®] 25WG	Syngenta	250 g/ha	Cada 40 días
Fungicida	Sanazole	VELSIMEX	0.5 L/ha	Cada 40 días
Fertilizante foliar	Bayfolan [®] Forte	Bayer	2 L/ha	Cada 40 días

Las aplicaciones de productos químicos se realizaron con una mochila de aspersion con capacidad de 20 L, con salida a punto de rocío para toda el área de estudio (Figura. 16a). Mientras que el control de malezas se realizó de forma manual con desbrozadora (Figura. 16b).



Figura 16. Manejo agronómico del cultivo de lima 'Persa'; a, Fertilización foliar con Bayfolan forte, b: Control de malezas con desbrozadora.

5.2.3. Instrumentos de medición

El sensor SPAD-502Plus (Figura. 17) permite determinar la cantidad relativa de clorofila presente, midiendo la absorbancia de la hoja a dos longitudes de onda. Tiene picos de absorbancia en las zonas azul (400-500 nm.), rojas (600-700 nm.) y sin absorbancia en el infrarrojo cercano. Además, se utilizaron otros instrumentos como balanza digital (Truper BASE-5EP) para pesar el fruto y vernier (Truper) para medir (diámetro ecuatorial y polar) del fruto.



Figura 17. Sensor SPAD 502 plus.

Existen trabajos que utilizan el sensor SPAD para monitorear la respuesta de la clorofila en cultivos con aplicaciones de riego (Swader y Moore, 2022; Rocuzzo *et al.*, 2014; Aparicio *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2022).

5.2.4. Metodología

En la figura 18, se muestra un flujograma de los pasos realizados para determinar el efecto del riego en el cultivo de lima 'Persa'. Este inicia con la determinación del experimento (árboles de lima 'Persa' de 8 años de edad), manejo agronómico (fertilización foliar, control de plagas y enfermedades, aplicaciones cada 40 días), sistema de riego instalado, aplicación de tratamientos de riego cada 15 días (T1 = 200L/Árbol, T2 = 150L/Árbol, T3 = 100L/Árbol, T4 = sin aplicación de riego), Medición de variables agronómicas (a)Frutos cosechados entre intervalos de riego, b) Etiquetado de ramas en árboles de lima 'Persa' y c) medición de hojas con sensor SPAD) y análisis

estadístico. Para la obtención de los efectos del riego en lima 'Persa' enfocados en el rendimiento y calidad de fruto.

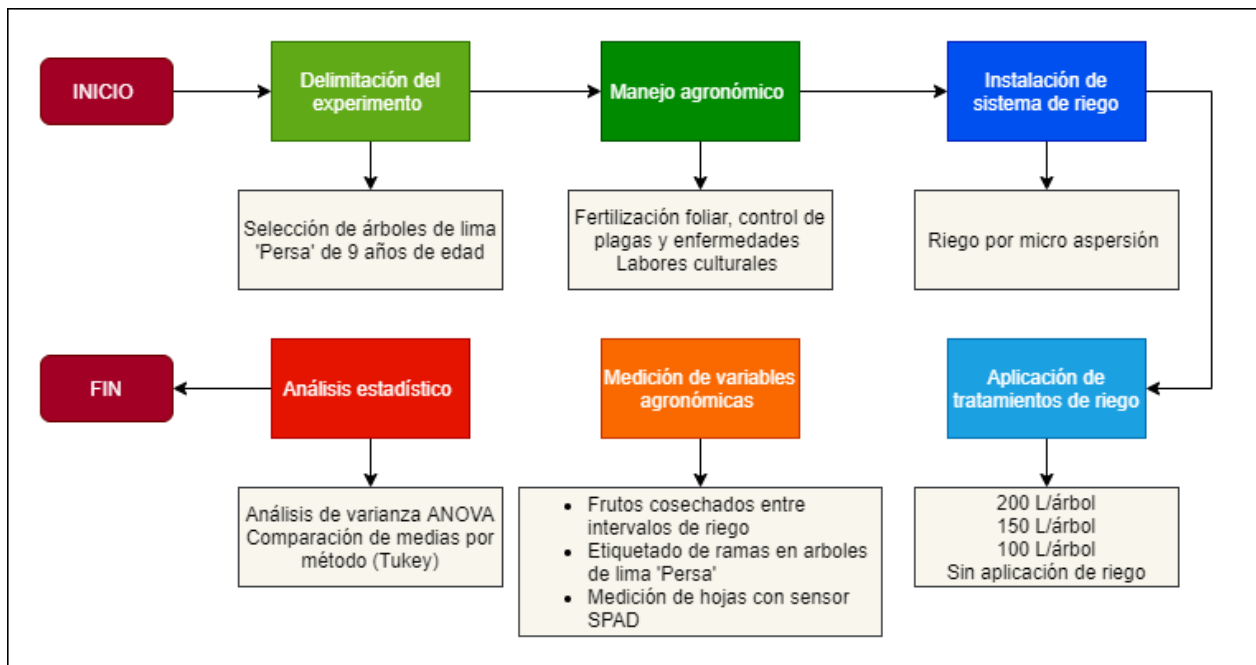


Figura 18. Metodología para determinar el efecto del riego en el cultivo de lima 'Persa'.

5.2.5. Medición y observaciones de referencia in situ

La adquisición de variables agronómicas se describe en la figura 19. Debido a que el cultivo de lima 'Persa' produce durante todo el año, la adquisición de variables se realizó de dos maneras:

- 1) Se evaluaron 30 frutos escogidos al azar entre intervalos de riego, durante toda la temporada seca (25-abril a 06-agosto), determinando en cada muestra: a) peso de fruto (PF), medido con báscula digital, b) diámetro polar y ecuatorial (DP, DE), medido con vernier, c) frutos por m³ (FM), contados mediante un cuadro de madera de un metro.
- 2) Se etiquetaron dos ramas por árbol para monitorear la etapa fenológica de flor a cosecha, con una duración aproximada de 4 meses (02-julio a 13-octubre) y cada 8 días se determinaron las siguientes variables: a) número de flores, b) número de frutos, c) características físicas de 30 frutos por tratamiento (PF, DP, DE), d) a 100 frutos por

tratamientos se obtuvo el porcentaje de frutos de exportación (PFE), basado en la marca oficial México Calidad Selecta en lima 'Persa' (SAGARPA, 2004).

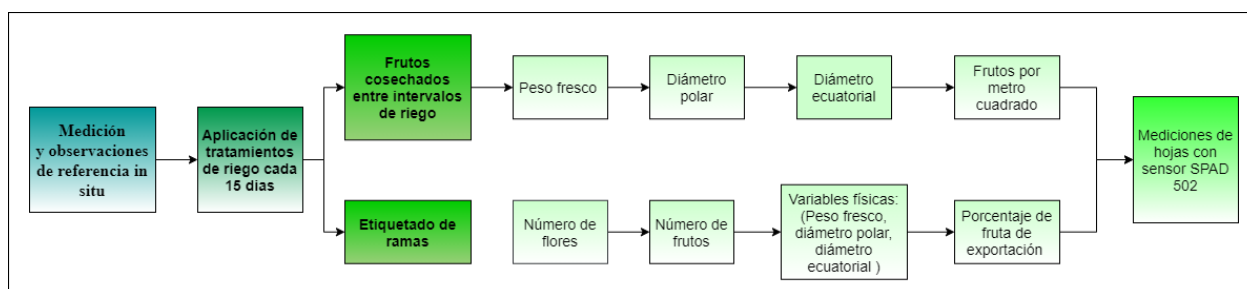


Figura 19. Variables de respuesta medidos en lima 'Persa'.

Cada 15 días desde la primera aplicación de tratamientos de riego (25-abril) se realizaron mediciones a cinco hojas al azar por árbol por tratamiento, mediante un sensor SPAD 502 plus. Los valores obtenidos por medio del sensor SPAD se convirtieron a porcentaje de nitrógeno en hojas de lima 'Persa' con la siguiente ecuación (Heo y Park, 2022):

$$y = 0.033x - 0.045 \quad \text{Ec. 5}$$

dónde: X Son los valores obtenidos de la planta en unidades SPAD, Y es el contenido de nitrógeno en porcentaje

5.2.6. Diseño experimental

El diseño experimental que se empleó fue completamente al azar con cuatro tratamientos, 10 repeticiones y utilizando como unidad experimental el árbol de lima 'Persa'. Se realizaron análisis de varianza ANOVA y pruebas de comparación de medias por el método de Tukey ($P \leq 0.05$) para lo cual se utilizó el software de cómputo R versión 4.2.2 (R Core Team, 2020) empleando el paquete 'agricolae' (Mendiburu, 2021). Los tratamientos de riego se describen en el cuadro 7.

Cuadro 7. Diseño de tratamientos de riego para el cultivo de lima 'Persa'.

Tratamientos	Dosis	Fecha de aplicación
Tratamiento 1 (T1)	200 litros/planta	Cada 15 días de abril a julio de 2022

Tratamiento 2 (T2)	150 litros/planta	Cada 15 días de abril a julio de 2022
Tratamiento 3 (T3)	100 litros/planta	Cada 15 días de abril a julio de 2022
Testigo	Sin aplicación	Sin aplicación

En condiciones tropicales, Orduz y Fisher (2007) reportaron que en mandarina “arrayana” injertada sobre mandarina Cleopatra de 6 años de edad los requerimientos hídricos anuales son de 1046 mm, mientras que Wagner (2002) reportó que en naranja ‘Valencia’ injertada aplicaron intervalos de riego de 200 litros en un área circular de 3,14 m². De esta manera se tomó como referencia la aplicación de 200 litros/árbol para el tratamiento 1 y se fue reduciendo en un 25% para el tratamiento 2, 50% para el tratamiento 3 y sin aplicación de riego para el tratamiento 4.

La lima 'Persa' requiere de volúmenes de agua frecuentes por lo que se instaló un sistema de riego por micro aspersión, que consiste en una bomba de 6.5 HP (Figura 20a), línea de conducción de 2” de diámetro de polietileno, seis líneas regante de 20 mm con una longitud de 41 metros de material de polietileno y un aforo promedio de 4 litros por minuto (Figura 20b), instalados de la forma que se muestra en la figura 18c.



Figura 20. Instalación del sistema de riego por goteo.

Los requisitos de agua para los limones son fundamentales y su disponibilidad se ve afectada por diferentes escenarios ambientales como, temperatura, humedad, iluminación, velocidad del viento y las características básicas de la planta (área y regulación estomática de las hojas) (Caballero *et*

al., 2019). El establecimiento de los tratamientos de riego por goteo se muestra en la figura 21. Como se observa, se establecieron un espaciamiento de árboles de lima 'Persa' para mitigar los efectos de riego entre tratamientos.



Figura 21. Distribución de tratamientos en parcela de estudio.

La toma de agua y bomba se encuentran a una distancia de 51 m de las líneas regantes, se establecieron 6 líneas regantes de 45 m de longitud y espaciamiento de 6 m. Se establecieron un

total de 80 árboles de lima 'Persa' establecidas en la parcela de estudio, con una superficie efectiva de 1600 m².

5.3.Resultados y discusión

5.3.1. Frutos cosechados de lima 'Persa' en intervalos de riego

a) Peso de fruto de lima 'Persa'

El peso fresco de fruto es un indicador de la producción en la planta. El valor de peso fresco de fruto en lima 'Persa' (Cuadro 8) presentó diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$), en las fechas con aplicación de intervalos de riego (25-abr, 04-jun, 02-jul) solo se presentaron diferencias estadísticas significativas en la primera fecha, para los tres tratamientos (T2, T3 y T4) con respecto a T1.

Las mediciones de peso de fruto para las fechas (14-may, 16-jul, 06-ago) se realizaron posterior a los intervalos de riego; se puede apreciar que, para las 3 fechas, T1 presentó diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) con respecto a T4 con valores de medias 69, 60.6 y 70 gr respectivamente.

Cuadro 8. Comparación de medias de Tukey de peso fresco de fruto en lima 'Persa'.

Tratamientos	25-abr	14-may	04-jun	02-jul	16-jul	06-ago
T1	48.6 b	69.0 a	71.0 a	67.9 a	60.6 a	70.0 a
T2	60.3 a	60.3 ab	73.7 a	60.8 a	57.5 ab	67.1 ab
T3	63.1 a	51.4 ab	72.1 a	65.4 a	55.9 ab	61.7 b
T4	62.2 a	59.7 b	67.0 a	62.8 a	51.5 b	63.3 ab
DMS	5.9	10.3	9.2	7.3	6.4	7.3
CV (%)	12.1	20.7	15.6	13.8	13.7	13.4

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

b) Diámetro ecuatorial en frutos de lima 'Persa'

En el Cuadro 9 se muestran los valores de diámetro ecuatorial en frutos de lima 'Persa', los cuales presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$), para las fechas (14-may, 02-jul, 16-jul). El tratamiento T1 obtuvo la mayor media con 4.84, 4.81 y 4.63 cm respectivamente, para la fecha de 14-may el tratamiento T3 presentó el menor valor con 4.35 cm. Para las fechas 02-jul y

16-jul T2 fue el menor, con 4.57 y 4.39 cm respectivamente, mientras que en las fechas 25-abr, 04-jun y 06-ago no presentó diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$).

Cuadro 9. Comparación de medias de Tukey de diámetro ecuatorial en frutos en lima 'Persa'.

Tratamientos	25-abr	14-may	04-jun	02-jul	16-jul	06-ago
T1	4.67 a	4.84 a	4.90 a	4.81 a	4.63 a	4.79 a
T2	4.62 a	4.65 a	5.04 a	4.57 b	4.39 b	4.74 a
T3	4.70 a	4.35 b	4.97 a	4.71 ab	4.45 ab	4.74 a
T4	4.72 a	4.56 ab	4.84 a	4.66 ab	4.34 b	4.63 a
DMS	0.18	0.29	0.22	0.23	0.19	0.16
CV (%)	3.7	7.7	5.6	6.0	5.4	4.2

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

c) Diámetro polar en frutos de lima 'Persa'

En el (Cuadro 10) se muestran los valores de diámetro polar en frutos de lima 'Persa', los cuales presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$). Para la fecha (14-mayo) T1 fue el mayor con 5.74 cm, mientras que T3 el menor con una media de 5.02 cm. Para la fecha (16-jul) el tratamiento T1 obtuvo el mayor valor con 5.3 cm y T4 la menor, con 4.96 cm.

Cuadro 10. Comparación de medias de Tukey de diámetro polar en frutos en lima 'Persa'.

Tratamientos	25-abr	14-may	04-jun	02-jul	16-jul	06-ago
T1	5.64 a	5.74 a	5.49 a	5.40 a	5.31 a	5.42 a
T2	5.53 a	5.45 ab	5.57 a	5.29 a	5.20 ab	5.40 a
T3	5.69 a	5.02 c	5.62 a	5.30 a	4.98 b	5.34 a
T4	5.72 a	5.36 bc	5.50 a	5.20 a	4.96 b	5.26 a
DMS	0.31	0.36	0.35	0.32	0.31	0.22
CV	6.7	8.0	7.6	7.4	7.4	5.1

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación

d) Número de frutos de lima 'Persa' por metro cuadrado a la cosecha

Los frutos por metro cuadrado a la cosecha (Cuadro 11) presentó diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$), para la fecha con aplicaron de intervalos de riego (10-may). Para T1 con un valor de media de 11.7 presentando diferencias estadísticas significativas con respecto a T4 con un valor de 2.3.

Cuadro 11. Comparación de medias de Tukey de número de frutos por m² en lima 'Persa'.

Tratamientos	10-may	06-ago
T1	11.7 a	3.2 a
T2	8.0 ab	2.7 a
T3	4.2 bc	2.4 a
T4	2.3 c	1.4 a
DMS	4.07	2.80
CV	61.7	115.9

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

5.3.2. Etiquetado de ramas en árboles de lima 'Persa'.

a) Número de flores en lima 'Persa'

El número de botones florales en ramas de lima 'Persa' (Cuadro 12) presentó diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$). El mayor número de flores fue de 6.2 para el T1, con respecto a T3 que presentó una media de 2.4 (02-jul). En la segunda fecha no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$).

Cuadro 12. Comparación de medias de Tukey de número de flores en rama de lima 'Persa'.

Tratamientos	02-jul	16-jul
T1	6.28 a	5.85 a
T2	4.35 ab	9.57 a
T3	2.42 b	8.14 a
T4	3.57 b	8.14 a
DMS	2.60	4.61
CV (%)	62.4	58.0

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).
DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

b) Numero de frutos amarrados de lima 'Persa'

El número de botones florales en ramas de lima 'Persa' (Cuadro 13) no presentó diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en las cinco fechas de evaluación.

Cuadro 13. Comparación de medias de Tukey de número de frutos amarrado en rama de lima 'Persa'.

Tratamientos	13-ago	27-ago	10-sep	26-sep	13-oct
T1	1.07 a	1.35 a	1.28 a	1.21 a	1.21 a
T2	0.57 a	0.78 a	0.71 a	0.71 a	0.71 a
T3	0.85 a	0.92 a	0.78 a	0.71 a	0.71 a
T4	0.78 a	1.07 a	1.0 a	0.85 a	0.85 a
DMS	1.06	1.14	1.06	1.03	1.04
CV (%)	129.0	109.0	111.6	118.3	118.4

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).
DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

c) Características de frutos etiquetados de lima 'Persa'

El valor de peso fresco de fruto en lima 'Persa' (Cuadro 14) presentó diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$). El tratamiento T1 presentó el valor máximo con 64.4 g con respecto al testigo con un valor de 57.2 gr, mientras que diámetro polar y ecuatorial no presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en los cuatro tratamientos.

Cuadro 14. Comparación de medias de Tukey de característica de frutos etiquetados a la cosecha en lima 'Persa'.

Tratamientos	13-oct		
	Peso fresco (gr)	D. Polar (cm)	D. Ecuatorial (cm)
T1	64.3 a	5.47 a	4.88 a
T2	59.2 ab	5.45 a	4.82 a

T3	60.6 ab	5.50 a	8.85 a
T4	57.2 b	5.37 a	4.78 a
DMS	5.1	0.23	0.14
CV (%)	10.2	3.7	3.7

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

d) Porcentaje de fruto de exportación de lima 'Persa'

El porcentaje de fruta de exportación (06-sep) osciló de 77 en el Testigo a 84 con el tratamiento T2. En la segunda fecha de evaluación (16-sep) los valores fueron de 79 en el Testigo a 85 con el tratamiento T1 (Figura 22). García *et al.* (2010) encontró una disminución en el rendimiento del 21% al aplicar una menor lámina de riego (184 mm) con respecto a una lámina de 317 mm para naranjos.

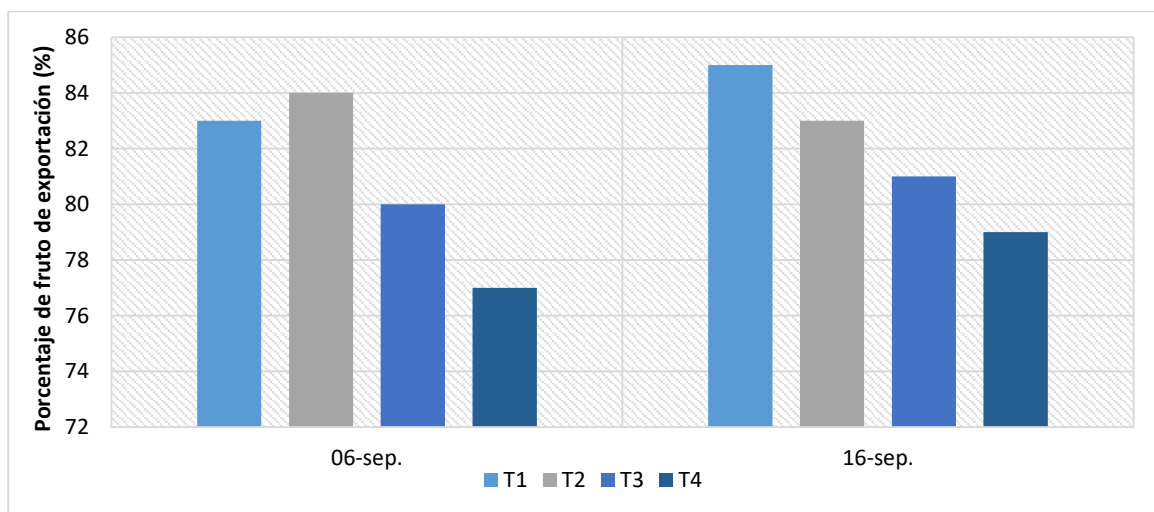


Figura 22. Porcentaje de fruto de exportación en árboles de lima 'Persa' para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

5.3.3. Contenido de clorofila en hojas de lima 'Persa'.

Los valores analizados (Cuadro 15) presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$). Para la fecha de 14-may, los tres tratamientos con aplicación de riego tuvieron diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo, siendo T1 el que obtuvo mayor media con 2.1

con respecto al T4 con 2.0. Así mismo, en la fecha 18-jun los tres tratamientos con riego presentaron diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo (T4), siendo T1 el mayor valor de media con 68.4. En las fechas (16-jul y 06-ago) el tratamiento sin aplicación de riego (T4) se homogeneizó por consecuencia de las precipitaciones ocurridas en esos periodos. Los valores varían de acuerdo a las aplicaciones de riego anteriores a la toma de variables en campo, las fechas que no presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) concuerdan con las aplicaciones de riego realizadas en campo (25-abr, 04-jun, 02-jul).

Cuadro 15. Comparación de medias de Tukey de valor porcentaje de nitrógeno en hojas de lima 'Persa'.

Tratamientos	25-abr	14-may	04-jun	18-jun	02-jul	16-jul	06-ago
T1	2.1 a	2.1 a	2.1 a	2.2 a	2.1 a	2.2 a	2.2 a
T2	2.1 a	2.1 a	2.1 a	2.1 a	2.1 a	2.2 a	2.2 a
T3	2.0 a	2.0 a	2.0 a	2.1 a	2.1 a	2.2 a	2.1 a
T4	2.0 a	1.8 b	2.0 a	1.9 b	2.0 a	2.0 b	2.1 b
DMS	0.11	0.13	0.19	0.09	0.11	0.12	0.8
CV (%)	7.8	9.7	13.8	6.7	7.6	8.7	5.5

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación.

El crecimiento es uno de los procesos más afectados por el déficit hídrico. Rodríguez *et al.* (2010), mencionan que el desarrollo vegetativo es muy sensible al déficit hídrico; la disminución del área foliar es un mecanismo adoptado por las plantas para reducir la pérdida del agua (Tudela y Primo, 1992). Shalhevet y Levy (1990) mencionan que mantener la humedad en el suelo durante al menos un ciclo del cultivo garantiza una mejor producción y mejora la calidad del fruto, mientras que Orduz y Fisher (2007) reportaron que, en mandarina Cleopatra, la falta de agua puede inducir la floración en condiciones tropicales.

Las hojas están adaptadas para conservar el agua gracias a sus distintas capas cerosas, Pérez *et al.* (2008) mencionan que como consecuencia al estrés hídrico se produce una disminución del área foliar y un gran perturbador del balance hormonal de muchas especies vegetales alterando

significativamente los procesos fisiológicos del crecimiento y desarrollo del fruto. Castel y Buj (1990) encontraron que el déficit hídrico durante la fase de floración y cuajado del fruto ocasiona el aumento de caída de flores y frutos pequeños, condicionando el número de frutos y disminuyendo los volúmenes de producción. Maotani *et al.* (1977) encontraron en mandarinas Satsuma que el crecimiento del fruto era más sensible al estrés que el crecimiento de las hojas. Mientras que (García *et al.*, 2010) un mayor suministro de agua durante el crecimiento de la fruta con respecto a la floración impulsó el tamaño de la fruta.

El crecimiento secundario de órganos vegetativos tiene su origen en el cambium vascular, donde se diferencian en células del floema y xilema. Esto se debe al potencial de turgencia, suministro de sales minerales, agua y materia elaborada (Taiz y Zeiger, 2015; Veléz *et al.*, 2012), debido a esto, el crecimiento es uno de los procesos más afectados por el déficit hídrico.

5.4. Conclusiones

La aplicación del riego favorece al aumento del número de flores al inicio de la floración; no obstante, durante la siguiente semana de floración ya no se ve afectada debido a que se presentan otros factores bióticos (animales, plantas, hongos, bacterias y protistas), abióticos (agua, el suelo, el aire, la luz solar, la temperatura) y competencias nutrimentales que afectan su desarrollo.

Las características físicas (peso y diámetro) del fruto de lima 'Persa' en la cosecha se ven afectadas con las aplicaciones de riego con diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo, lo que se ve reflejado en un mayor peso y diámetro de fruto. Por otra parte, no hay diferencias estadísticas significativas en el número de frutos amarrados durante todo el ciclo de maduración. En los meses más calurosos de mayo a septiembre, las aplicaciones de riego ayudan a mejorar el porcentaje de fruta de exportación; estas aplicaciones de riego mejoran el llenado de fruto debido que el cultivo de lima 'Persa' produce durante todo el año y puede presentar diferentes etapas fenológicas en una misma fecha de monitoreo.

6. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN ESPACIAL EN CULTIVO DE LIMA 'PERSA' MEDIANTE IMÁGENES RGB OBTENIDAS CON DRON

6.1.Introducción

Se han presentado dificultades y pérdidas importantes en el establecimiento de los cítricos, además de problemas tecnológicos (Mateus & Órduz, 2012). Dentro de los más importantes están: a) deficiencias en el establecimiento, manejo agrícola y fitosanitario del cultivo, en especial en los primeros años (aplicación de correctivos y fertilización, podas de formación, riego y manejo fitosanitario), b) altos costos de producción, que se encuentran relacionados con el excesivo uso de agroquímicos y de mano de obra por deficiencias en la mecanización de las labores del cultivo y de la cosecha.

El uso de los vehículos aéreos no tripulados (por sus siglas en inglés UAV), comúnmente conocidos como drones, han combinado la fotografía aérea y la teledetección para expandirse en negocios exitosos que incorporan usuarios individuales y agencias gubernamentales para mapear la superficie de la Tierra de forma repetitiva (Nex & Remondino, 2014). En los últimos años, los drones han ganado un interés considerable como plataforma de detección remota para diversas aplicaciones prácticas, como monitoreo de tráfico (Kyrkou *et al.*, 2018), búsqueda y rescate (Petrides *et al.*, 2017), agricultura de precisión (Murugan *et al.*, 2017) y procesamiento de imágenes (Zhao *et al.*, 2017).

La detección remota con drones tiene las siguientes ventajas, obtiene información de áreas grandes, fáciles de volar y tienen la flexibilidad de volar a diferentes altitudes (Jintasuttisak *et al.*, 2022), son adecuadas para áreas inaccesibles en las que el usuario del dron controla los datos espaciales, temporales y resolución del producto (Toth & Józków, 2016). La salida de una imagen orto - rectificada para un área específica se puede lograr en cuestión de horas (Unger *et al.*, 2016), lo que proporciona un monitoreo rentable y oportuno del entorno (Zhang *et al.*, 2016, Anderson & Gaston, 2013). Las herramientas de segmentación de imágenes de aprendizaje supervisado ya se han utilizado para medir los parámetros de la copa de los árboles. La mayoría de estos métodos utilizan cámaras RGB para recopilar datos bidimensionales (Cong *et al.*, 2022).

El estado de salud de los cultivos, a partir de diferentes características como, contenido de clorofila (Petach *et al.*, 2014), estado nutricional (Abdulridha *et al.*, 2018) y estado hídrico (Lima *et al.*, 2016) se puede determinar a partir de los índices de vegetación obtenidos de imágenes con dron. Elegir el índice de vegetación adecuado para cada aplicación constituye un reto. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo obtener los productos fotogramétricos de ortomosaico, modelo digital de superficie (DSM) y modelo digital de elevación (DTM), índices espectrales y la cobertura vegetal a partir de imágenes RGB obtenidas con un dron, lo que permitirá obtener información más detallada de las características del cultivo con miras a hacer más eficientes las labores culturales como el riego, mejorando la producción del cultivo de lima 'Persa'.

6.2. Materiales

6.2.1. Ubicación

El experimento se realizó en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, en el rancho San Antonio, cuyas características más importantes se describieron en el capítulo 5.

6.2.2. Equipo para toma de imágenes aéreas (Dron)

La plataforma aérea para la adquisición de las imágenes estuvo integrada por un VANT y una cámara digital. El dron (DJI Mini SE) es un cuadricóptero (Figura. 23) que cuenta con un diseño plegable y un peso ultra ligero (249 g), lo que facilita su transporte y permite hacer vuelos estacionarios, facilitando volar tanto en interiores como en exteriores.



Figura 23. dron utilizado (DJI mini SE).

El dron tiene la capacidad de realizar despegues y aterrizajes verticales automáticos, presentando una capacidad de carga de 250 gramos. Esto le permite volar y obtener imágenes de manera automática con las siguientes características, que dependerá del modo de vuelo elegido para su funcionamiento (posición, sport y cinesmooth.) (Cuadro 16).

Cuadro 16. Características generales de plataforma aérea y cámara.

Plataforma aérea	Cámara
Velocidad máxima de ascenso: 4m/s	Sensor CMOS: 1/2.3"
Velocidad mínima de ascenso: 3m/s	Resolución de video: 2.7K
Velocidad máxima de traslado: 10m/s	Resolución de fotografías: 12 MP
Tiempo máximo de vuelo: 20 min	Tamaño de imagen: 4000 x 3000 pixel
Sistema de geo posicionamiento: GPS	Cámara RGB

dónde: CMOS es Complementary Metal Oxide Semiconductor, MP es megapíxel y RGB bandas visibles (red, green y blue), GPS es Global Positioning System.

6.2.3. Software para la adquisición y procesamiento de imágenes

a) Software de planeación de vuelo

El software Litchi (versión beta), es un software de planificación de misiones de vuelo de waypoint para drones DJI, compatible con las plataformas (Mini 2, Mini SE, Air 2S, Mavic Mini 1, Mavic Air 2, Mavic 2, Mavic, Phantom 4, Phantom 3, Inspire 1, Inspire 2 y Spark), disponible para sistema Android e IOS (VC Technology Ltd, 2023). Con este software se puede crear una misión pre programada definiendo puntos de paso (waypoints), parámetros de vuelo (velocidad, altitud) que permite al dron despegar y aterrizar de forma automática, obteniendo a su vez fotografías o video.

b) Software fotogramétrico

El software Pix4D Pro Mapper es una herramienta utilizada en el campo de la fotogrametría digital orientada a dron. Utilizado en el procesamiento de las imágenes y la reconstrucción de los modelos en 3D (Pix4D, 2023). PiX4D es un software de procesamiento de imágenes, que son obtenidas del mapeo con drones mediante el uso de algoritmos y técnicas de procesamiento fotogramétrico, puede generar (nubes de puntos, modelos digitales de superficie y ortomosaicos).

c) Segmentación de imágenes

El software Trimble eCognition es utilizado para automatizar el análisis de datos geoespaciales. eCognition Developer es una potente herramienta de desarrollo para realizar análisis de imágenes basados en objetos utilizando procesos patentados de segmentación y clasificación. Construye una imagen de forma iterativa, reconociendo grupos de píxeles como objetos. Al igual que la mente humana, utiliza el color, la forma, la textura y el tamaño de los objetos, así como su contexto y relaciones. Se utiliza en ciencias de la tierra con el fin de elaborar conjuntos de reglas (o aplicaciones para eCognition Architect) para el análisis automático de datos de teledetección (Trimble Germany GmbH, 2023).

d) Cálculo de índices espectrales

El procesamiento de imágenes para la obtención de índices espectrales se realizó en R versión 3.6.3 (R Core Team, 2020) con los paquetes sp (Roger *et al.*, 2013) y roster versión 3.6-11(Hijmans, 2022).

6.3. Metodología

En la figura 24, se muestra el flujograma de trabajo para la adquisición y procesamiento de imágenes con dron. Inicia con colocación de puntos de control y obtención de sus coordenadas, preparación y ejecución del vuelo, adquisición de imágenes cada 15 días, procesamiento de imágenes y obtención de productos fotogramétricos, proceso de segmentación de árboles de lima 'Persa', cálculo de índices de vegetación (IV) basados en RGB y finaliza en el análisis de correlación para la selección de IV enfocados al estrés hídrico.

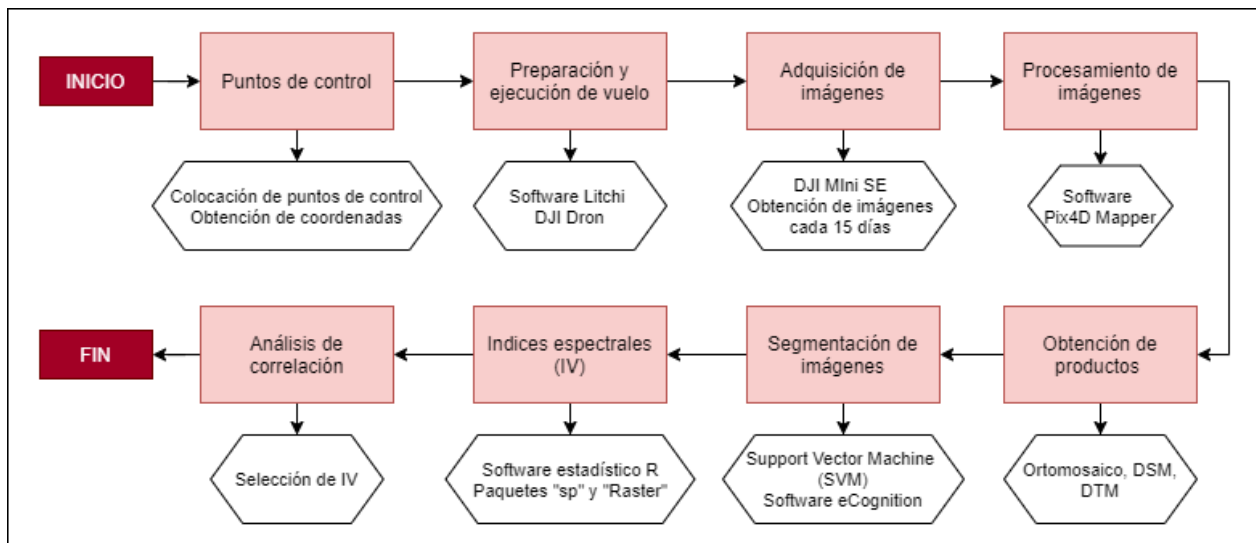


Figura 24. Flujograma para la adquisición y procesamiento de imágenes con dron.

A continuación, se describen todos los pasos en la adquisición y procesamiento de imágenes obtenidas con dron.

6.3.1. Puntos de control en tierra

Se colocaron 5 puntos de control fijo distribuidos uniformemente sobre el terreno antes realizar el primer vuelo (Figura. 25a). Las coordenadas de estos puntos se obtuvieron con GPS (eTrex® 22x) con precisión de $\pm 3\text{m}$ (Figura. 25b). Las coordenadas de cada punto de control se muestran en el Cuadro 16, en el sistema UTM Zona 14 Norte datum WGS84 (Figura. 25c).

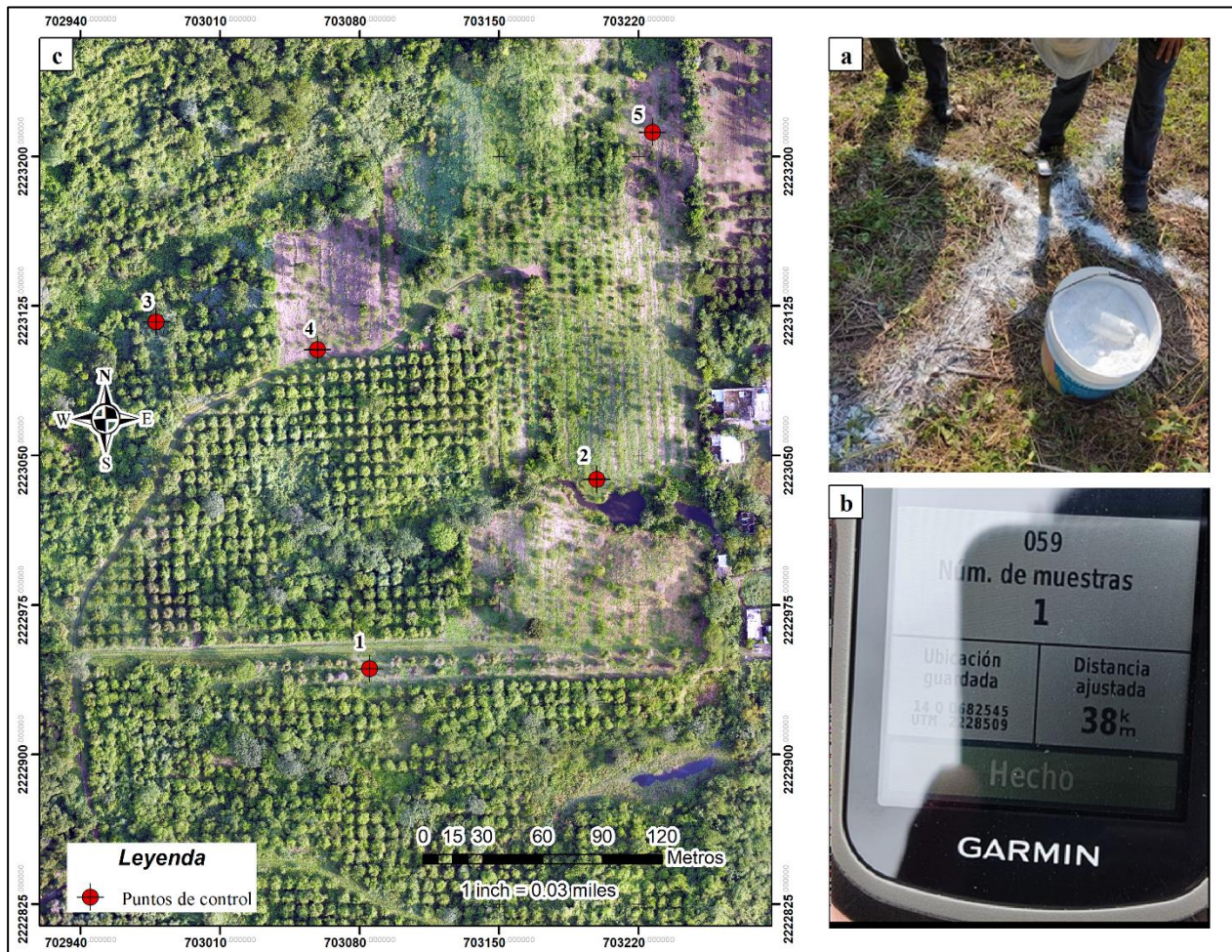


Figura 25. Apoyo topográfico, a: Colocación de puntos de control, b: Obtención de coordenadas con GPS, c: Distribución de puntos de control.

6.3.2. Preparación, ejecución de la misión de vuelo y adquisición de imágenes

Las características generales del vuelo y obtención de imágenes son las siguientes: traslape lateral y frontal del 75%, velocidad media de vuelo 6 m/s, captura de fotos cada segundo, retorno a casa al terminar la misión. El vuelo tiene una altitud de 75 m, una duración de 14 minutos, 11 líneas de vuelo con una longitud de 280m por línea y una distancia entre línea de 40 m (Figura. 26). Se obtuvieron un promedio de 520 fotografías RGB por vuelo. La adquisición de imágenes se realizó cada 15 días, iniciando el día 14 de abril de 2022, para una superficie de 4 ha.



Figura 26. Programación de misión de vuelo en el software Litchi.

6.3.3. Procesamiento fotogramétrico

En la figura 27 se muestra el procedimiento realizado para el procesamiento de imágenes, iniciando con la importación de imágenes obtenidas con dron hasta la creación de los productos fotogramétricos de Ortomosaico, DSM y DTM. El DSM es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo, mientras que el DTM recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo (vegetación, edificaciones y demás elementos). El procesamiento se realizó en el software Pix4Dmapper. Las fechas de adquisición de imágenes y procesamiento de imágenes con dron se realizaron cada 15 días, completando un estadio fenológico, comenzando en la fecha del 14 de abril de 2022. De esta forma, se generó un ortomosaico y dos modelos (DSM y DTM) para cada fecha de vuelo con una resolución de 0.027 cm/pixel, en formato Tiff. Cuando las imágenes han sido corregidas en su geometría y posicionadas en un sistema de referencia, a través de un proceso de restitución, es posible generar un mosaico rectificado u ortomosaico de la zona levantada con imágenes

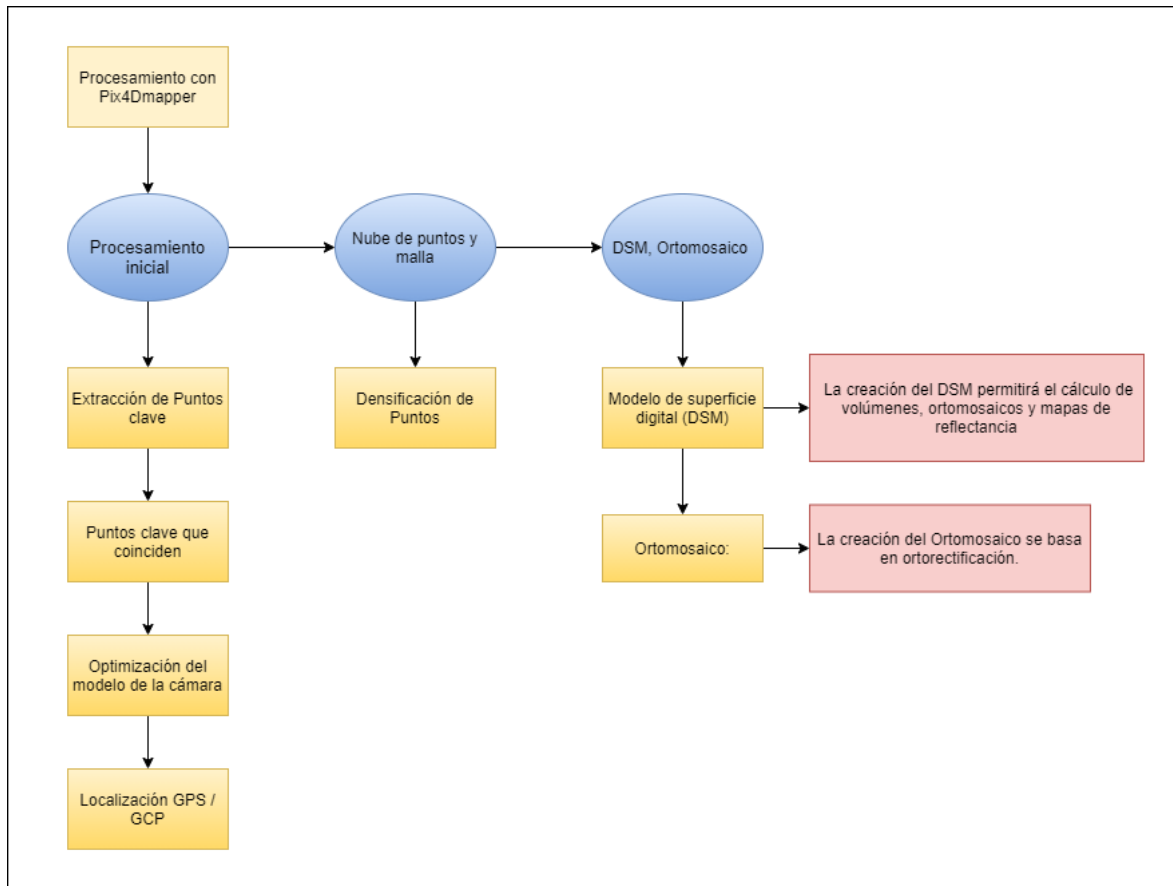


Figura 27. Procesamiento de imágenes Pix4Dmapper (Pix4D, 2023).

6.3.4. Segmentación de imágenes

Para la segmentación se utilizó el algoritmo de máquina de soporte vectorial (Support Vector Machine, SVM) implementado en el software eCognition (Figura. 28). SVM es un algoritmo de aprendizaje supervisado utilizado con frecuencia en muchos problemas de clasificación y regresión. La clasificación mediante SVM se realizó con un algoritmo de segmentación multiresolución, lo que requiere primero la toma de muestras de referencia para el entrenamiento para posteriormente evaluar sus métricas de precisión. Los parámetros utilizados fueron los siguientes: de escala de 15, con condición de umbral (con respecto a la mediana y desviación estándar de la imagen). El algoritmo SVM se entrenó para identificar 3 clases: árboles de lima 'Persa', suelo y otro tipo de vegetación. Para el entrenamiento y la clase árbol de lima 'Persa' se seleccionaron de manera manual 20 árboles representativos a lo largo de toda la imagen. Para la

clase suelo se realizó la selección manual de zonas con superficie de suelo desnudo y maleza. Finalmente, se seleccionó de forma manual toda la vegetación que no correspondía con árboles de tipo lima 'Persa'.

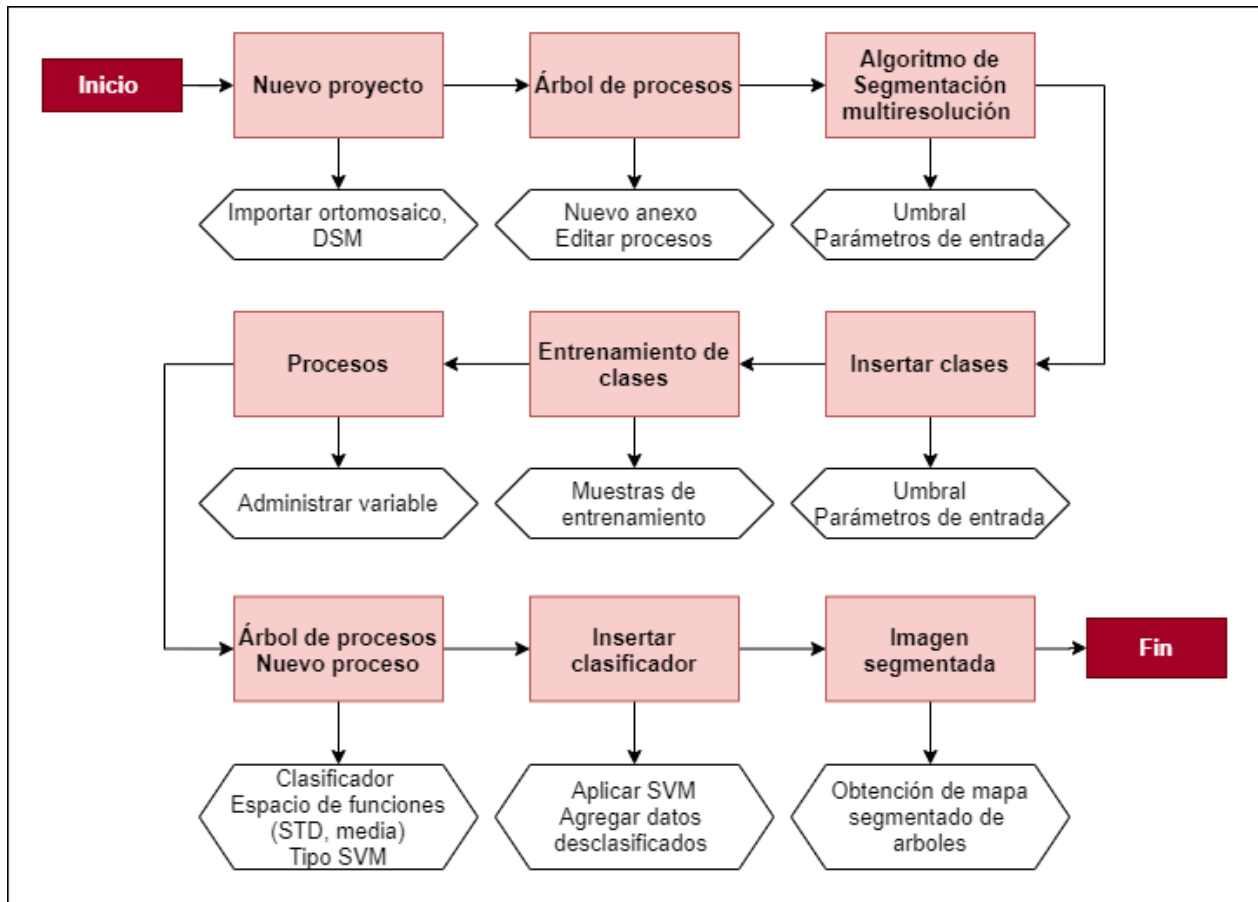


Figura 28. Segmentación de imágenes mediante eCognition (Trimble Germany GmbH, 2023).

6.3.5. Cálculo de índices espectrales

Los índices de vegetación (IV) obtenidos a partir de sensores remotos (SR) son algoritmos bastante simples y efectivos para evaluaciones cuantitativas y cualitativas de la cobertura vegetal, el vigor y la dinámica de crecimiento, entre otras aplicaciones. Estos índices se han implementado ampliamente en aplicaciones SR utilizando diferentes plataformas aéreas y satelitales con avances recientes que utilizan vehículos aéreos no tripulados (UAV) (Xue y Su, 2017). Se calcularon usando las bandas roja, verde y azul (Cuadro 17) por sus siglas en inglés (RGB). Con la finalidad

de realizar una correlación entre los índices de vegetación, de acuerdo a la aplicación para determinar estrés hídrico (Enciso *et al.*, 2001). El análisis de correlación consiste en un procedimiento estadístico para determinar si dos variables están relacionadas o no. El resultado del análisis es un coeficiente de correlación que puede tomar valores entre -1 y +1 (el signo positivo indica una relación positiva entre las dos variables, mientras que signo negativo indica que existe una relación negativa). En el cuadro 17 se muestran los índices de vegetación basados en la región visible (RGB).

Cuadro 17. Índices de vegetación basados en bandas de la región visible (RGB).

Abreviación	Índice	Fórmula	Referencia
TGI	Triangular Greenness Index	$G - 0.39R - 0.61B$	(Hunt <i>et al.</i> , 2013)
ExB	Excess Blue index	$1.4B - G$	(Guijarro <i>et al.</i> , 2011)
ExR	Excess Red	$\frac{1.4R - G}{R + G + B}$	(Meyer <i>et al.</i> , 1998)
vNDVI	Visual Normalized Difference Vegetation Index	$0.5268(R^{-0.1294}G^{0.3389}B^{-0.318})$	(Costa <i>et al.</i> , 2020)
Gmb	Difference between green and blue	$G - B$	Kawashima and Nakatani, (1998)
Grr	Green Red Ratio Index	G/R	Kawashima and Nakatani, (1998)
ExG	Excess Green	$2G - R - B$	(Woebbecke <i>et al.</i> , 1995)
SAT	Saturation	$100 - 300 \left[\frac{\min(R,G,B)}{R+G+B} \right]$	Ahmad and Reid, (1996)
Gmr	Difference Between Green And Red	$G - R$	Kawashima and Nakatani, (1998)
IKAW	Kawashima index	$(R - B)/(R + B)$	(Kawashima and Nakatani, 1998)
Mgrvi	Modified Green Red Vegetation Index	$\frac{G^2 - R^2}{G^2 + R^2}$	Bendig, <i>et al.</i> (2015)
Gli	Green Leaf Index	$\frac{(G - R) + (G - B)}{2G + R + B}$	(Gobron <i>et al.</i> , 2000; Hunt <i>et al.</i> , 2013)
Grvi	Green-red vegetation index	$\frac{R - G}{R + G}$	(Tucker, 1979)
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index	$\frac{G - R}{G + R - B}$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)

dónde: RGB son las bandas del espectro visible rojo (Red), verde (Green) y, azul (Blue).

Diversos estudios han mostrado que el desempeño de algunos índices de vegetación difiere en relación con los parámetros específicos que se desean estimar, cuyas características también influyen en la respuesta espectral del cultivo (Mattar *et al.*, 2014). Por esta razón y las características de la cámara del dron se usaron índices basados en la región visible.

6.4.Resultados

6.4.1. Obtención de imágenes aéreas y productos fotogramétricos

En la figura 29, se muestran los vuelos realizados, comenzando en la fecha del 14 de abril de 2022 y ordenados de acuerdo a los días julianos y etapas fenológicas correspondientes. Cabe mencionar que en el caso del cultivo de lima 'Persa' se pueden presentar diferentes etapas fenológicas en una misma fecha, por este motivo sólo se siguió un etiquetado fenológico.

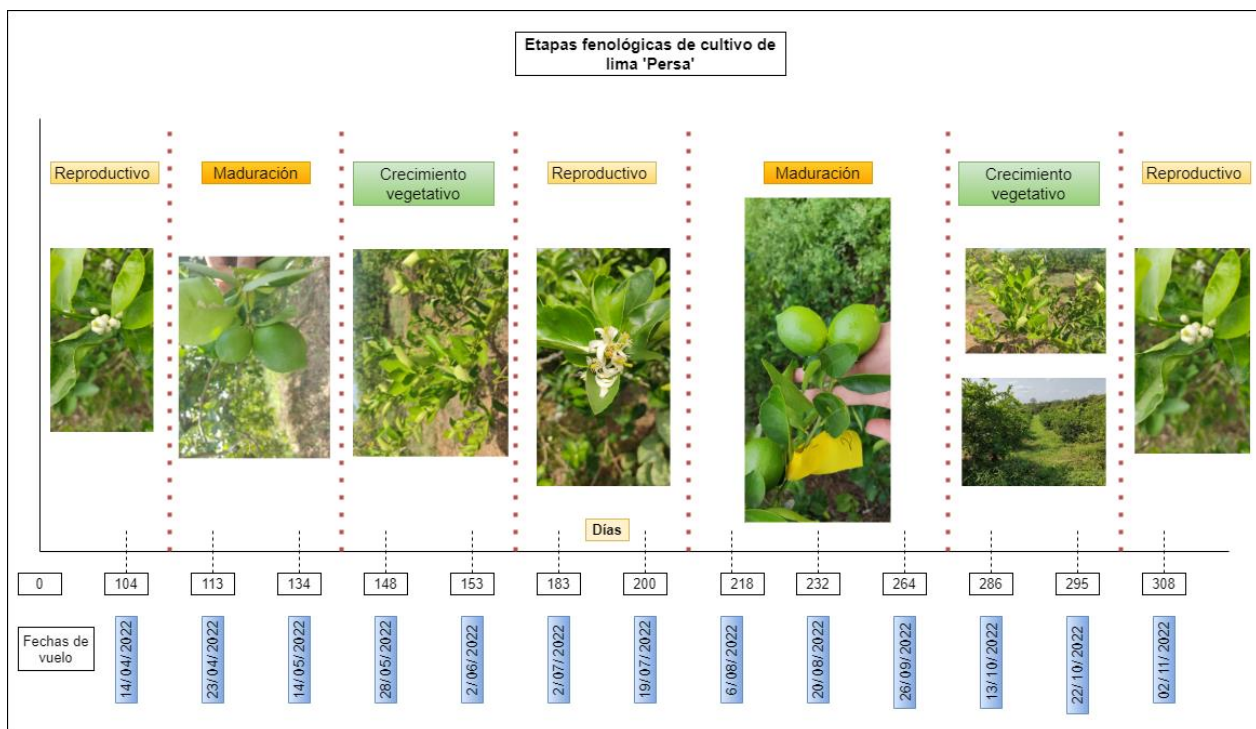


Figura 29. Fechas de vuelo con dron para el cultivo de lima 'Persa' en el rancho San Antonio de Martínez de la Torre, Veracruz.

Se obtuvo un promedio de 530 imágenes por vuelo, a una velocidad de 4.5 m/s y una duración promedio de vuelo de 14 minutos. La captura de fotos se realizó cada segundo con una resolución de 2 cm. Se obtuvo un ortomosaico para cada fecha de vuelo a una resolución de 0.027 cm/pixel. En la Figura 30, se muestran la fecha del 2 de junio de 2022.



Figura 30. Obtención de ortomosaico para el cultivo de lima 'Persa' en el rancho San Antonio de Martínez de la Torre, Veracruz.

En la figura 32, se muestra el modelo digital de elevaciones (DTM) y modelo digital de superficie (DSM) para el 2 de junio del 2022. Para el caso del DTM se encuentra en un rango de altitud de 79 a 85 metros (Figura. 31a) los cuales decrecen de oeste a noreste e, mientras que el DSM se encuentra en un rango de altitud de 79 a 91 metros (Figura. 31b).

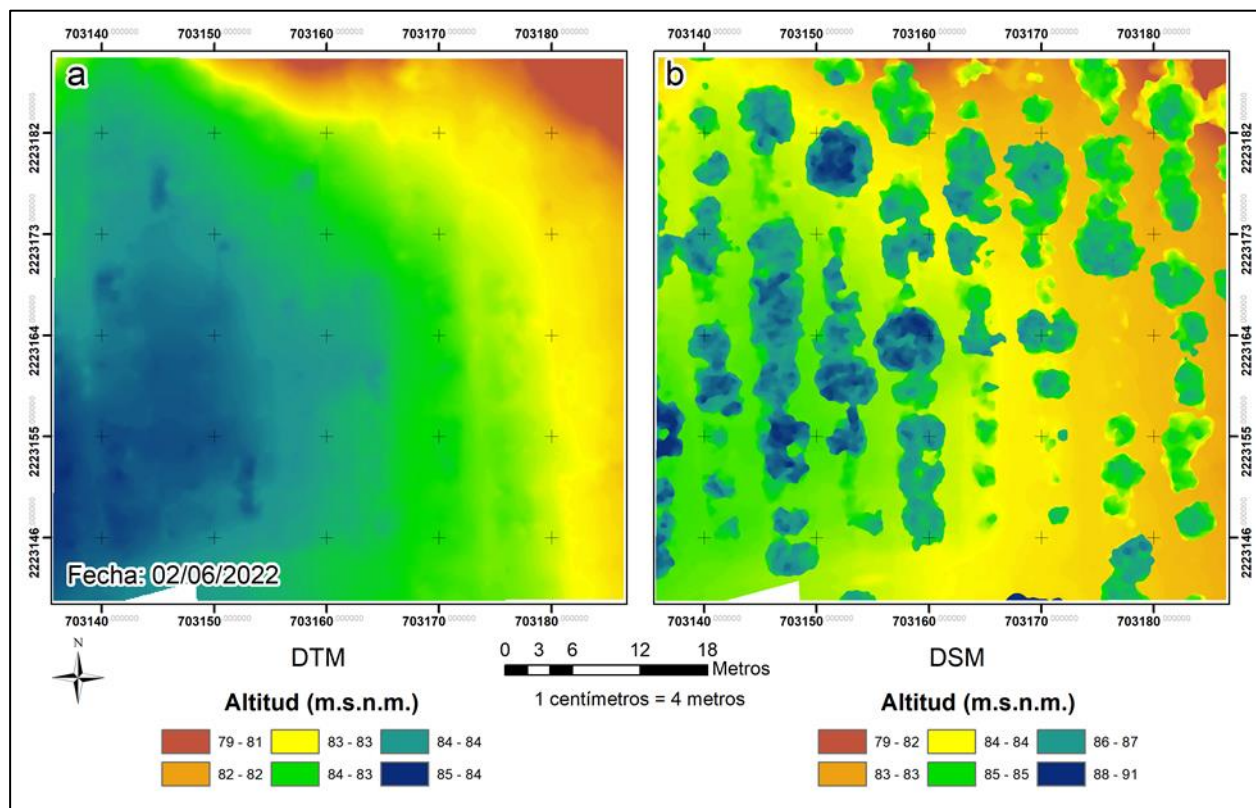


Figura 31. Obtención de DTM y DSM para el cultivo de lima 'Persa' en el rancho San Antonio de Martínez de la Torre, Veracruz.

6.4.2. Extracción de cobertura vegetal (Segmentación)

En la Figura 32 se muestra la extracción de la cobertura vegetal de árboles de lima 'Persa' en el área de estudio. En la (Figura. 32a) se muestra el ortomosaico y su comparación con la imagen segmentada de árboles de lima 'Persa' (Figura. 32b). Sin embargo, mediante el uso de SVM realiza una segmentación y extracción más detallada debido a los valores de entrada (media y SDT), así como el umbral estimado a partir de los valores (media, SDT, máx y min) que presenta el cultivo de lima 'Persa'.

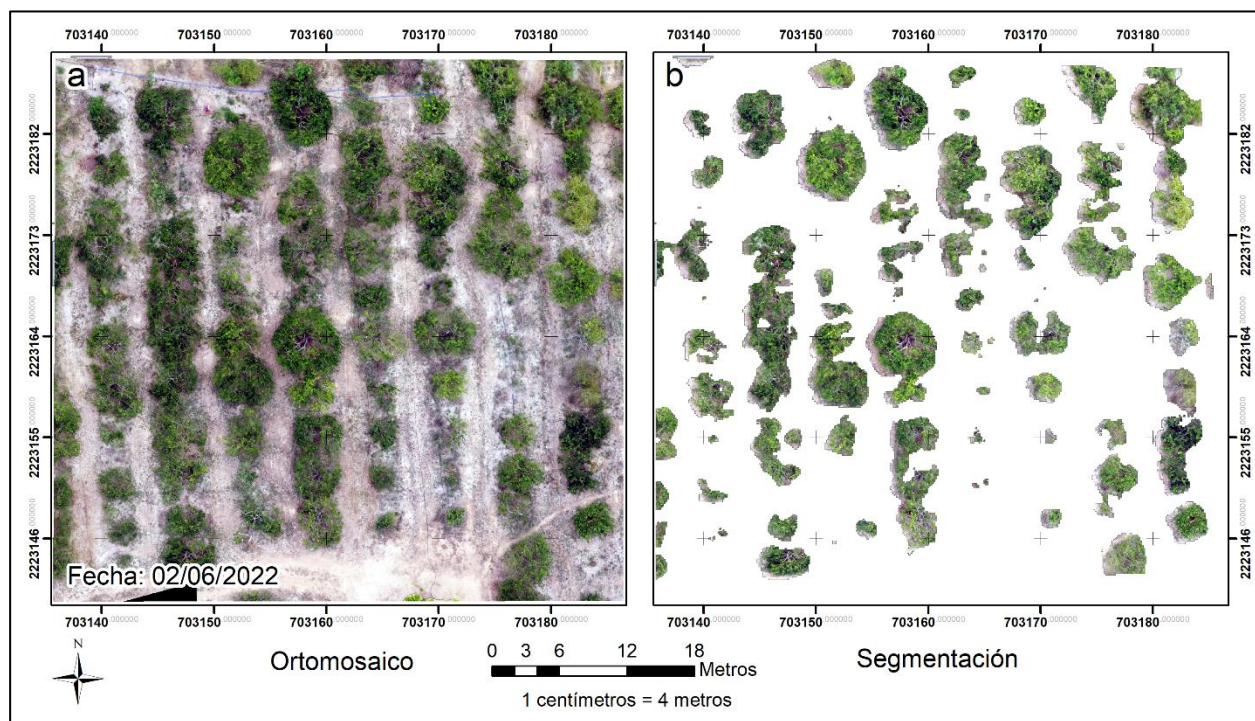


Figura 32. Extracción de cobertura vegetal en árboles de lima ‘persa’, a) Ortomosaico, b) extracción mediante algoritmo SVM.

6.4.3. Análisis de correlación para Índices espectrales

En la Figura 33 se muestra el resultado del análisis de correlación de 21 índices espectrales de vegetación. Se muestra en un rango de -1 a 1, donde los índices cercanos a 1 muestran mayor correlación entre ellos debido a que ambas variables evolucionan en la misma dirección (ExG, vNDVI, gmr, gmb, grr). Valores cercanos a 0 indica que no hay una relación lineal entre ellas, mientras que los IV con valores negativos cercanos a -1 significan mayor correlación pero su evolución se mueve en dirección opuesta (TGI con respecto a ExG, vNDVI, gmr, gmb, grr). En la parte superior derecha de la correlación se concentran los IV con mayor correlación. Mediante el análisis de correlación se seleccionaron los índices ExG, vNDVI y Gmb para estimar el estrés hídrico mediante imágenes RGB para el cultivo de lima 'Persa'.

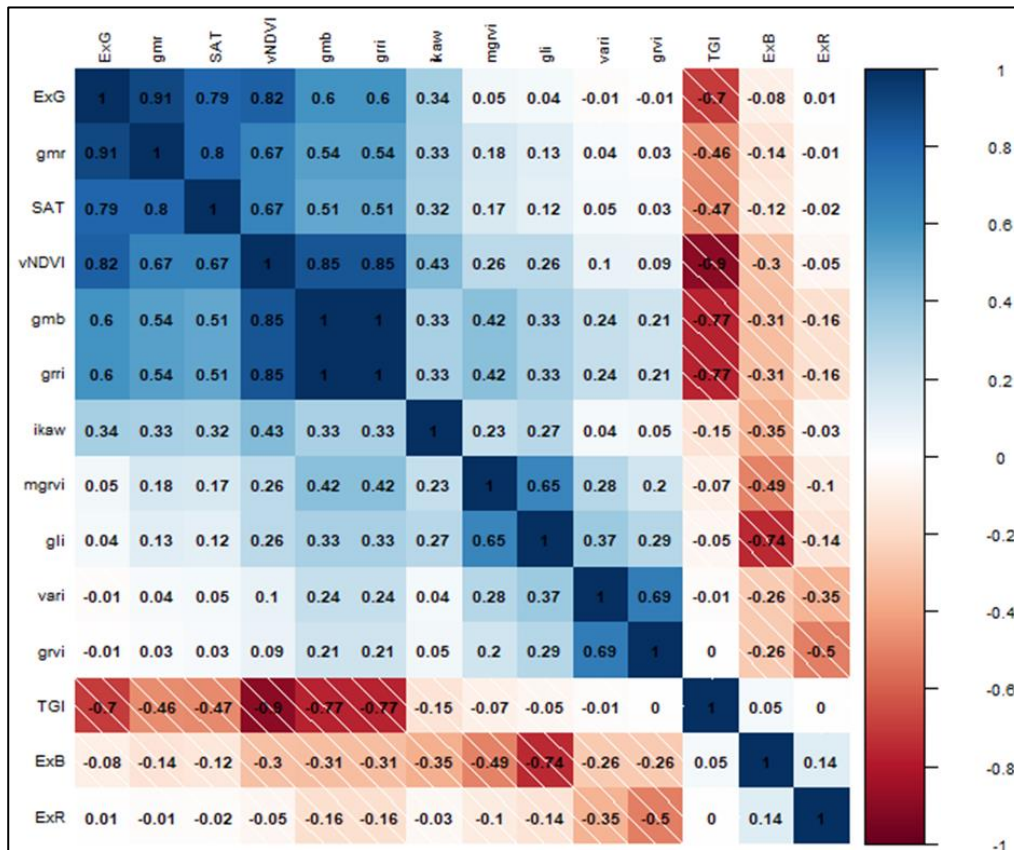


Figura 33. Análisis de correlación de índices espectrales de vegetación.

6.5. Conclusiones

El procesamiento fotogramétrico de imágenes obtenidas con dron mediante el software Pix4D, permite generar ortomosaico, DSM y DTM que ofrecen información no detectable a simple vista. Mediante el ortomosaico nos permite estimar índices espectrales de vegetación que se pueden correlacionar con el estrés hídrico, la diferencia del DSM y DTM nos permite estimar las alturas de los árboles sobre el terreno.

La extracción de cobertura mediante la reclasificación del DSM presenta errores en zonas con malezas con una altura mayor a 0.5 metros. Sin embargo, al mejorar este primer ortomosaico resultante de la extracción, mediante el software ecognition utilizando el algoritmo SVM se obtienen un mejor resultado debido a los valores (media, std) que se utilizan para estimar el umbral y que se disminuyen los errores con respecto a la similitud de maleza y cobertura de interés, mediante la primera extracción.

7. ESTIMACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DE LIMA 'PERSA' A PARTIR DE IMÁGENES OBTENIDAS DE DRONES PARA EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ.

7.1.Introducción

El mejoramiento en la gestión del agua, así como la programación adecuada del riego, son esenciales para aumentar la sostenibilidad de la agricultura de riego (Hsiao *et al.*, 2007, Padilla *et al.*, 2011, Consoli & Vanella 2014). La estimación precisa de la evapotranspiración (ET) y su distribución espacial dentro de cada parcela es crucial para lograr una agricultura sostenible (Er-Raki *et al.*, 2007, Consoli & Vanella 2014). Varias técnicas, como la covarianza de Foucault (EC), la relación de Bowen (BR) y los lisímetros ponderados proporcionan mediciones de ET, pero son costosas.

Uno de los métodos empíricos para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) que se destaca por su precisión es el método de Penman-Monteith modificado por la FAO (PMMF) (Allen *et al.*, 1998). Sin embargo, este método tiene limitaciones, ya que es más adecuado para regiones geográficas específicas y requiere una amplia gama de datos meteorológicos, una alternativa consiste en utilizar métodos empíricos menos complejos que se basan en variables meteorológicas más accesibles y extrapolar estos valores a áreas extensas mediante técnicas de interpolación espacial (Aragón-Hernández *et al.*, 2019; Greenough & Nelson, 2019).

Para la determinación de la evapotranspiración de cultivo (ET_c) se requiere estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c) Allen *et al.* (1998). El coeficiente de cultivo se define como la razón de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_o), el cual representa una integración de los efectos de las características que distinguen a un cultivo dado: altura del cultivo (afecta la aerodinámica resistencia y transferencia de vapor), albedo (afecta la radiación neta), resistencia del dosel (a la transferencia de vapor) y evaporación del suelo (Allen *et al.*, 1998).

El procesamiento de datos para la obtención de índices de vegetación (VI), ayudan en la caracterización cuantitativa de las cubiertas vegetales a partir de la información espectral registrada por satélite, sensores aéreos o espectro radiómetros de campo (Carpintero *et al.*, 2020). Los índices

están bien correlacionados con ciertas propiedades y parámetros biofísicos de la vegetación, como el índice de área foliar, la fracción de cobertura del suelo, la emisividad, el albedo o la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (Asrar *et al.*, 1985; Choudhury *et al.*, 1994; Carlson y Ripley, 1997; Glenn *et al.*, 2008). En este sentido, este trabajo tiene como objetivo determinar los requerimientos hídricos para el cultivo de lima 'Persa' mediante imágenes RGB obtenidas con un dron y la elaboración de un calendario de riego.

7.2. Materiales y métodos

7.2.1. Área de estudio

El experimento se realizó en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, en el rancho San Antonio características se describen en el capítulo 5.

7.2.2. Metodología

La Figura 34 muestra el flujo de procesos utilizados en la estimación de requerimientos hídricos en el cultivo de lima 'persa' mediante el uso de imágenes RGB tomadas con un dron. Esto incluye la toma de datos de planta, adquisición de imágenes, datos climáticos diarios (temperaturas, humedad relativa) y análisis de las características suelo. Así como el procesamiento de datos para la estimación de K_c mediante los dos métodos de referencia FAO-56 y K_c mediante imágenes obtenidas con dron, análisis comparativo y la estimación de ET_0 mediante el método Penman-Monteith para la obtención de mapas mensuales de ET_C y calendarización del riego.

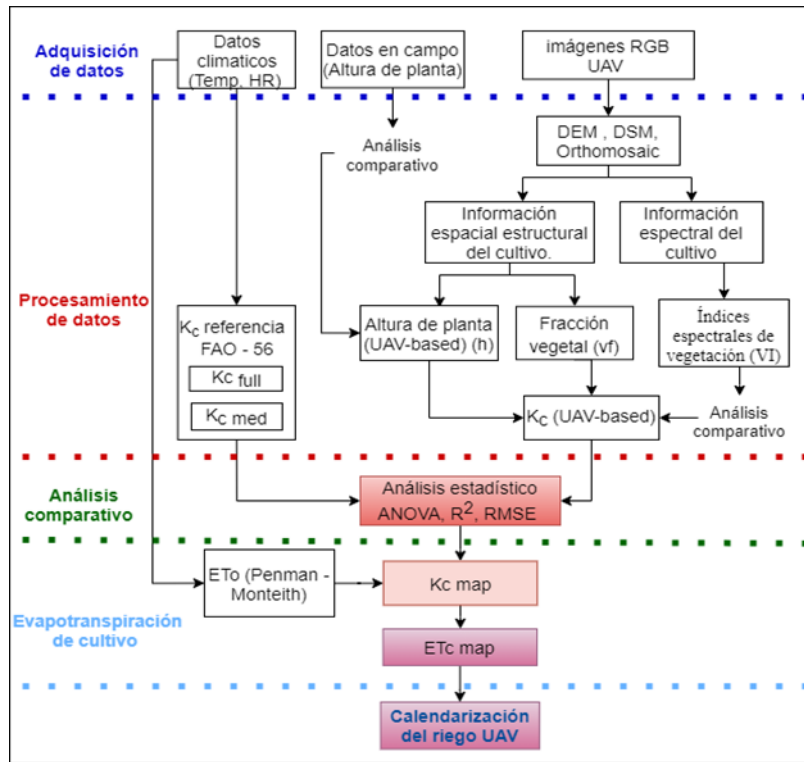


Figura 34. Flujograma de trabajo para la determinación de requerimientos hídricos para el cultivo de lima 'Persa'.

La evapotranspiración del cultivo se calculó a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo (K_c) (Allen *et al.*, 1998) (Ecuación 6):

$$ET_c = ET_o * K_c \quad \text{Ec. 6}$$

dónde: ET_c es la evapotranspiración del cultivo ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), K_c el coeficiente del cultivo (adimensional) y ET_o la evapotranspiración del cultivo de referencia ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$). La ET_o se estimó para la superficie de referencia mediante la ecuación de Penman – Monteith modificada por la FAO-56 (PMMF) para datos faltantes (Allen *et al.*, 1998) (ecuación 7):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ec. 7}$$

dónde: T_m , temperatura media ($^{\circ}\text{C}$); R_n , radiación neta ($\text{MJ}/\text{m}^2 \text{ día}$); G , flujo calórico ($\text{MJ}/\text{m}^2 \text{ día}$); γ , Constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); Δ , pendiente de la curva de tensión de vapor saturado ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); u_2 , velocidad del viento a 2 m de altura (m/s) se utilizó un valor de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ siendo del

promedio de 2000 estaciones meteorológicas en todo el mundo (Allen *et al.*, 1998) ; es – ea, déficit de tensión de vapor (kPa). Los detalles del cálculo de datos de radiación se describen en la estimación de ETo para datos faltantes de manual de FAO - 56 (Allen *et al.*, 1998).

7.2.3. Adquisición de datos

La adquisición de datos comprende la medición de alturas de árboles en la huerta, registro de datos meteorológicos y toma de fotografías aéreas con un dron.

Las alturas se midieron en 40 árboles escogidos al azar con una cinta métrica desde la base del árbol hasta la parte superior de la copa (Figura. 35a). La temperatura y humedad relativa se registró cada hora mediante un sensor HOBO MX2302 instalado a 2 m de altura en medio de la huerta (Figura. 35b), mientras la precipitación acumulada diaria se obtuvo de la plataforma (CHIRPS) (Funk *et al.*, 2014) todas las variables se registraron de abril 2022 a marzo 2023.

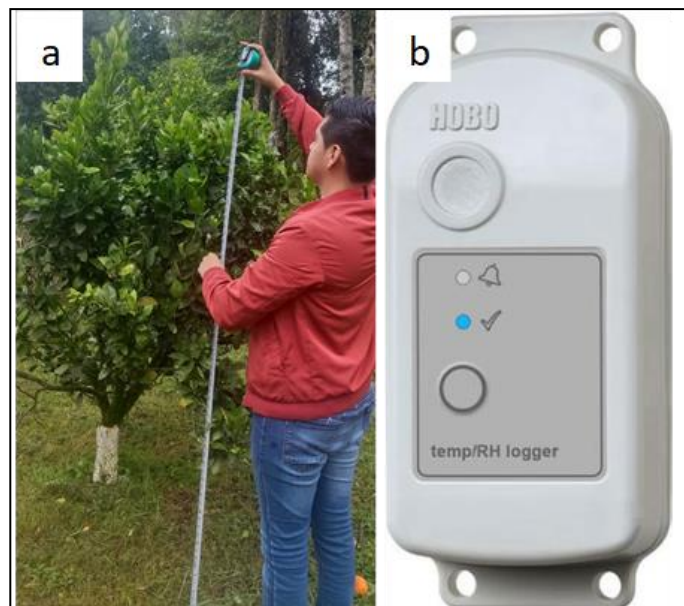


Figura 35. Adquisición de datos, a) medición de alturas de planta, b) sensor HOBO MX2302.

La adquisición de fotografías aéreas realizada mediante un dron DJI Mini SE y la planificación de los vuelos con el software Litchi (Beta) (VC Technology Ltd, 2023) se describe en el apartado 6.3.2 del capítulo 6.

7.2.4. Procesamiento de datos

El procesamiento de información consiste en cálculo de K_C de referencia, obtención de productos fotogramétricos (DTM, DSM, Ortomosaico), información espectral (cálculo de índices de vegetación, VI's), estructura espacial de cultivo (altura y fracción vegetal) y estimación de K_C mediante dron.

Estimación de K_C de referencia FAO-56

Los valores de K_C de referencia se obtuvieron según lo recomendado por (Allen *et al.*, 1998) de dos maneras: a) como el valor medio del coeficiente de cultivo ajustado por climatología calculado ($K_{C\ med}$) a partir de la ecuación 8 (Allen *et al.*, 1998):

$$K_{C\ med} = K_{cmed(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad \text{Ec. 8}$$

dónde: $K_{C\ med}$ es el valor medio del coeficiente de cultivo, $K_{cmed(Tab)}$ es el valor medio de k_c tabulado y recomendado por la FAO para cítricos (con una cobertura activa del 50% a una altura máxima de 3 m), u_2 es la velocidad del viento promedio diaria medida a 2 m de altura ($m \cdot s^{-1}$), HR_{min} es la humedad relativa promedio mínima (%), h es la altura de los árboles (m).

Mientras que el segundo método b) el K_C ajustado por condiciones climatológicas ($K_{C\ full}$) usando un factor de ajuste del control estomático (Fr) fue calculado mediante la ecuación 9 según Allen y Pereira (2009):

$$K_{C\ full} = Fr \left(\min(1.0 + 0.1h, 1.2) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

dónde: Fr [0–1] es un factor de ajuste relativo para el control estomático, h es la altura media del árbol (m), u_2 es la velocidad promedio mensual del viento ($m \cdot s^{-1}$) a 2 m y R_{Hmin} es la humedad relativa mínima promedio mensual (%).

El parámetro Fr aplica un ajuste a la baja ($Fr \leq 1,0$) si la vegetación exhibe más control estomático sobre la transpiración que el típico de la mayoría de los cultivos agrícolas anuales, una situación que es típica de los cítricos (Kriedemann y Barrs 1981). Allen y Pereira (2009) sugirieron el

siguiente cálculo de Fr para vegetación de cobertura total, basado en la ecuación de FAO Penman-Monteith y asumiendo condiciones de cobertura total:

$$Fr \approx \frac{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}{\Delta + \gamma \left(1 + 0.34u_2 \frac{r_i}{100}\right)} \quad \text{Ec. 10}$$

dónde: r_i es la resistencia media de la hoja para la vegetación en cuestión ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación versus temperatura del aire ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$). Para la mayoría de los cultivos agrícolas anuales, el valor de r_i es $100 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$, lo que hace que Fr sea 1. Allen y Pereira (2009) sugieren un valor de $420 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ para los períodos inicial y de mitad de temporada de cítricos.

Productos fotogramétricos

Los productos fotogramétricos (ortomosaicos, DSM y DTM) se obtuvieron mediante la adquisición RGB y su procesamiento en el software Pix4DMapper (Pix4D, 2023), la metodología que comprende en la alineación fotografías, optimización, creación de nube densa de puntos y construcción de DSM, DTM y ortomosaico se describieron en el apartado 6.3.3 del capítulo 6.

Estimación de la fracción vegetal (f_v)

El mapa segmentado de árboles de lima 'Persa' mediante el algoritmo SVM del software eCognition y sus características se describieron en el apartado 6.3.4 del capítulo 6. Posteriormente se separan las 3 clases: árboles de lima 'Persa', suelo y maleza, por lo que se asignaron valores de 1 a todos los pixeles que representan árboles de lima 'Persa' y 0 a todos los pixeles que representan al suelo y maleza. Para esta actividad se empleó la herramienta “reclasificar por tabla” del software Qgis versión 3.16.3 (QGIS.org, 2023).

Los valores de f_v para el área de estudio se obtuvieron mediante la siguiente ecuación (Marcial *et al.*, 2018):

$$f_v = \frac{NPveg}{NPT} * 100 \quad \text{Ec. 11}$$

dónde: NP_{veg} , es número de pixel de vegetación (árboles de lima 'Persa') de interés; NPT , es el número de pixel total del área de estudio.

Estimación de altura de planta (h)

En la Figura 36, se muestra el flujograma para la estimación de alturas de planta (AP) obtenidos con dron. Haciendo uso de los productos obtenidos en el apartado 6.3.3 del capítulo 6 (DTM, DSM).

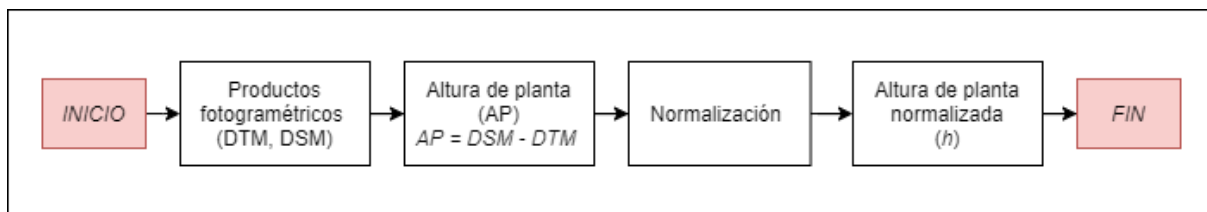


Figura 36. Flujograma de obtención de alturas de planta con el uso de dron.

El DSM considera la elevación de otras superficies además del suelo, edificios, puentes y árboles, mientras que el DEM considera únicamente la elevación del terreno (Zhou *et al.*, 2020). La altura de árboles (h) se puede obtener restando el DEM del DSM (Figura 37). La fórmula de cálculo se muestra en la Ecuación 12 (Cui *et al.*, 2011):

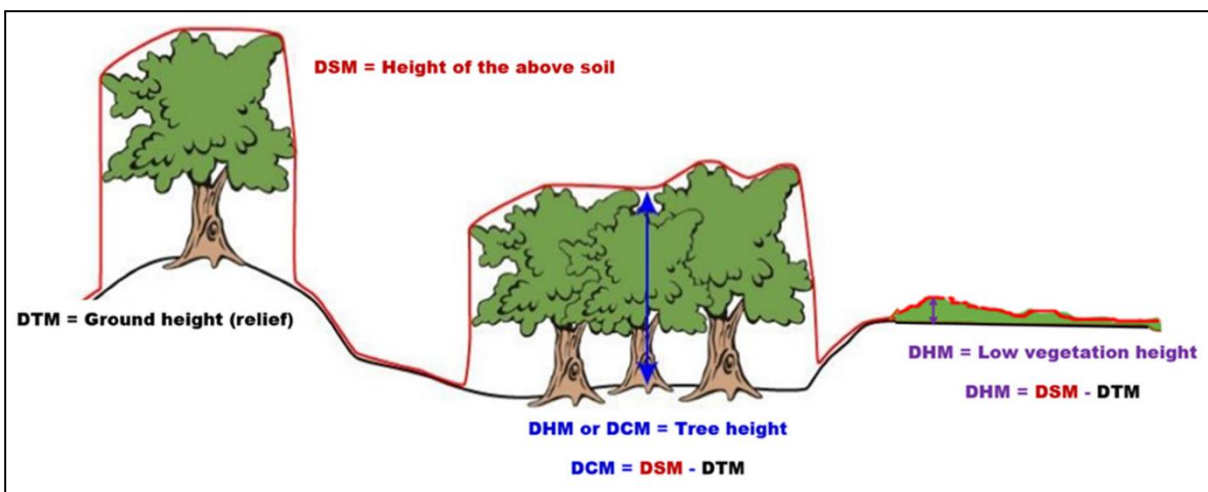


Figura 37. Descripción de modelos (DSM, DTM), (Ouattara *et al.* 2022).

$$h = norm(DSM - DTM) \quad \text{Ec.12}$$

dónde: h , es la altura de los árboles de lima ‘persa’ calculada como la diferencia normalizada DSM menos DTM en metros.

Cálculo y selección de índices de vegetación

El cálculo de los 24 de índices de vegetación se describe en el capítulo 4, mediante un análisis de correlación de seleccionaron los 3 índices (ExG, Gmb y vNDVI) de acuerdo a sus caracterizas en la detección de estrés hídrico que menciona la literatura.

Con el objetivo de comparar los índices de vegetación en una misma escala se realizó una normalización mediante la ecuación sugerida por (Ali *et al.*, 2014):

$$IVNi = \frac{IVi - IVmin}{IVmax - IVmin} \quad \text{Ec. 13}$$

dónde: $IVNi$ es el valor normalizado del índice espectral en el pixel i , IV_i es el valor del índice de vegetación según las ecuaciones 1 a 3, $IVmax$ e $IVmin$ son los valores máximo y mínimo respectivamente para cada índice de vegetación.

Estimación de K_c con dron (K_{cdron})

Varios trabajos reportan el uso de imágenes obtenidas con UAV para la estimación de valores de K_C en huertos frutícolas (Santos *et al.*, 2020; Niu *et al.* 2021; Garcia *et al.*, 2022), en estos trabajos la información que se utiliza se refiere a imágenes multiespectrales, térmicas y parámetros biofísicos (índice de área foliar, diámetro de copa y altura de planta). En este trabajo se propone usar fv , h e iv para la estimación de K_c de tal manera que la función queda según la ecuación 14.

$$K_{C\ UAV} = f(h, fv, iv) \quad \text{Ec.14}$$

dónde: h , altura de planta estimada a partir de imágenes UAV según la ecuación 4; fv fracción vegetal estimada según la ecuación 5 e iv son los índices de vegetación resultado del análisis de correlación.

7.2.5. Análisis comparativo

El análisis estadístico consistió en un análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba Tukey ($1 - \alpha > 0.95$) (Tukey, 1949). Los estadísticos de prueba considerados para el análisis fueron el coeficiente de determinación (R^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RCME) y el error medio (EM), los cuales se calcularon mediante las Ecuaciones 15 a 17, respectivamente (Pearson, 1909; Willmott *et al.*, 1985).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})(t_i - \bar{t})]^2}{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2][\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2]} \quad \text{Ec. 15}$$

$$RCME = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 16}$$

$$EM = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)}{N} \right) \quad \text{Ec. 17}$$

dónde: a_i es el valor estimado por el método empírico, t_i es el valor obtenido con el método de referencia, \bar{a} es el promedio de las estimaciones con el método empírico, \bar{t} es el promedio de las observaciones del método de referencia y N es el número total de observaciones.

7.2.6. Calendarización del riego con el uso de drones

Acorde con la ecuación del balance de agua en el suelo, el contenido de agua se estimó como se muestra en la siguiente ecuación (Silva, 2001):

$$\Delta H = \text{entradas} - \text{salidas} = (L_{i-1} + P_e) - (ET_c + PP) \quad \text{Ec. 18}$$

dónde: ΔH = Es el cambio de humedad en términos de lámina de riego; L_{i-1} = humedad inicial (mm), P_e = precipitación efectiva (mm), ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm); PP = percolación (mm).

Para iniciar con el balance hídrico (BHC) se requiere determinar el inicio del periodo de riego (fecha) y estimar L_{i-1} (se consideró como el 85% de θ_{CC}). En las siguientes ecuaciones se muestran C.C y P.M.P expresados en lámina (mm):

$$\theta_{CC} = \left(\frac{C.C.}{100} \right) * Da * z \quad \text{Ec. 19}$$

$$\theta_{PMP} = \left(\frac{P.M.P.}{100} \right) * Da * z \quad \text{Ec. 20}$$

dónde: θ_{CC} : Es la capacidad de campo (C.C.) expresado en lámina (mm), θ_{PMP} : Es el punto de marchites permanente (P.M.P.) expresado en lámina (mm), Da : es la densidad aparente, z : es la profundidad radicular del cultivo (mm).

Este es el punto de partida para iniciar el BHC, que posteriormente acumula continuamente la pérdida de agua por evapotranspiración del cultivo (ETc) y PP de la fecha anterior, y se va restando la cantidad de precipitación efectiva (Pe) (Servín *et al.*, 2017).

El riego tiene que aplicarse cuando se alcance un punto crítico (θ_c) (ecuación 21); se debe regar y regresar al suelo la cantidad de agua que previamente se perdió debido a la evapotranspiración (Servín *et al.*, 2017).

$$\theta_c = \theta_{CC} - (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) * UR \quad \text{Ec. 21}$$

$$UR = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$$

dónde: θ_c : punto crítico (mm), UR : es el umbral de riego (%).

7.3.Resultados y discusión

7.3.1. Datos climáticos y evapotranspiración de referencia

En la Figura 39 se muestran los valores mensuales de temperatura media y humedad relativa media. La temperatura media máxima se presentó en el mes de mayo del 2022 con 28.9 °C, mientras que la temperatura media mínima en diciembre de 2022 con 20.6 °C. Los valores de temperatura

aumentaron de abril a mayo de 2022 debido a las bajas precipitaciones; sin embargo, en el mes de junio hubo una disminución de temperatura debido a la precipitación. El mes con menor humedad relativa promedio fue abril de 2022 con 77%, mientras que en el mes de noviembre de 2022 se presentó la mayor humedad relativa con 90.5 % (Figura. 38).

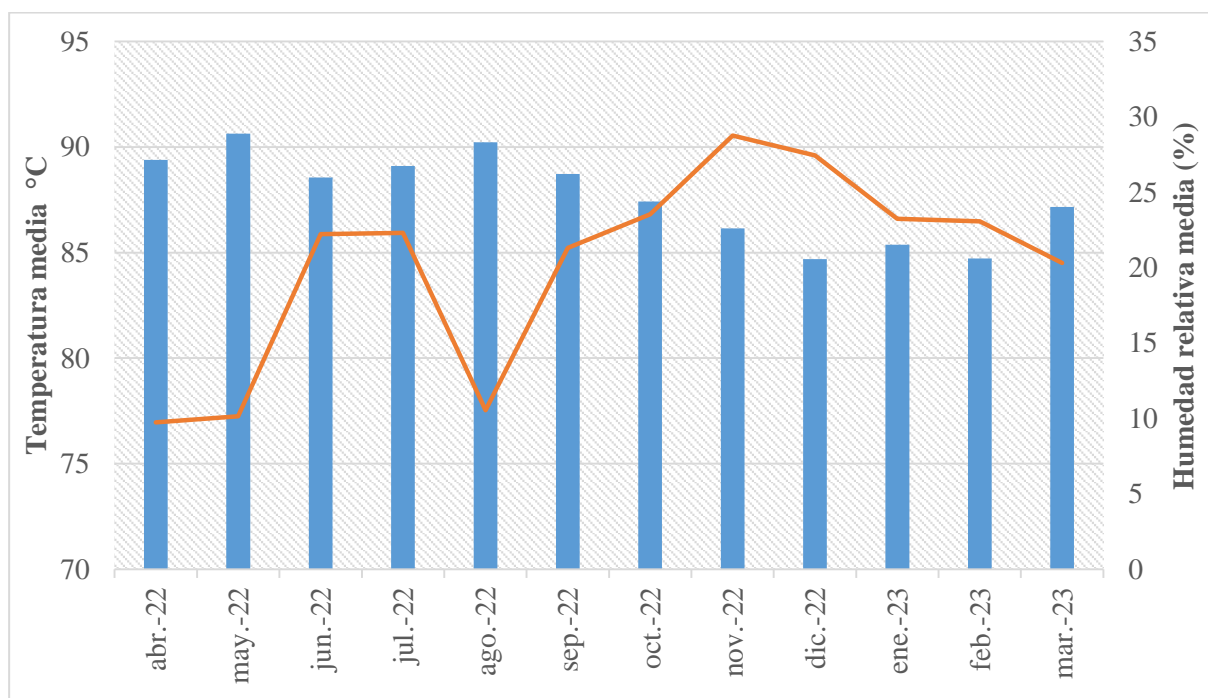


Figura 38. Temperatura media y humedad relativa media mensual obtenida a partir del sensor HOBO MX2302.

Evapotranspiración de referencia y precipitaciones

La evapotranspiración de referencia mediante el método PMMF para los meses de abril el 2022 a marzo de 2023, así como los valores de precipitación mensual con observaciones de satélite se presentan en la Figura 39. Los valores de ET_0 se encuentran en un valor promedio mensual de $123 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ y una desviación estándar de $54.2 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$. En el mes de marzo de 2023 se presentó el valor mínimo de ET_0 con $57.1 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, mientras que en el mes de agosto de 2022 la máxima ET_0 con $217.5 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$.

La precipitación obtenida con observaciones de satélites se encuentra en un promedio mensual de $9 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ y desviación estándar de $60.5 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$. En el mes de mayo de 2022 se presentó el valor mínimo con $16.5 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, mientras que en el mes de septiembre de 2022 la máxima precipitación fue de $219.8 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$. La precipitación esta correlacionada con la ETo, se puede apreciar el aumento que ocurre en la ETo de abril-2022 al mes de agosto de 2022, posteriormente inicia un descenso de la ETo en consecuencia a la precipitación de septiembre de 2022, los valores de ETo vuelven a presentar un aumento en el mes de noviembre con $186.8 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ y una menor precipitación con $77.8 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$.

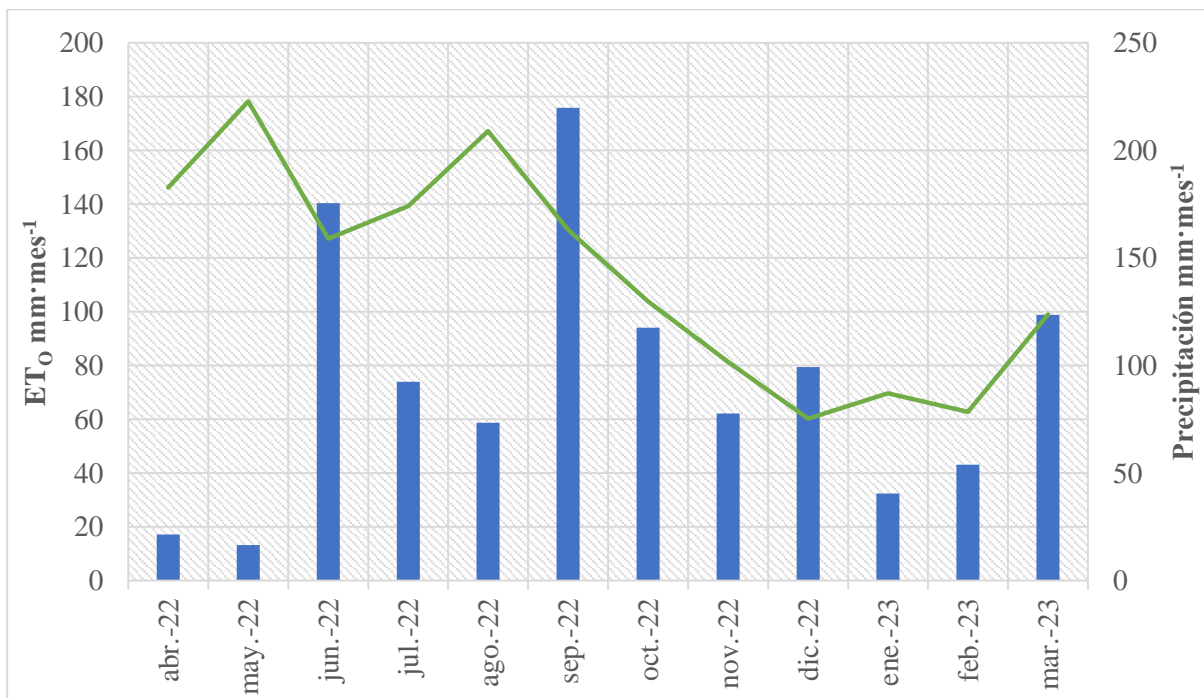


Figura 39. Evapotranspiración de referencia mensual por el método PMMF y precipitación mensual con observaciones de satélite.

7.3.2. Kc de referencia FAO-56

En el (Cuadro 18) se muestran la comparación de medias y estadísticos de prueba para los métodos de Kc empíricos con dron y los dos métodos de referencia FAO-56. Los métodos Nfh y Nh presentaron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) con valores de media de 0.34 y 0.30 respectivamente,

con respecto a el método Gfh con una media de 0.05. El método que presentó el mejor estadístico de prueba con respecto al método de referencia (K_{c_full}) fue Nh con una R^2 de 0.94, RCME de 0.10 y EM de -0.44, mientras que para el método de referencia K_{c_med} , el método Nh presentó los mejores estadísticos de prueba con R^2 de 0.90, RCME de 0.09 y EM de -0.42. La comparación de los métodos empíricos con el método de referencia (K_{c_full}) da un mejor resultado en el ajuste en los modelos (Taylor *et al.*, 2015) debido al parámetro Fr sugerido por (Allen y Pereira, 2009). Por este motivo se utilizará el método K_{c_full} como referencia para la comparación de Kc estimado con dron.

Cuadro 18. Comparación de medias de Tukey para los métodos de Kc con dron y métodos de referencia FAO-56.

<i>Método</i>	<i>Media</i>	<i>Kc_full</i>			<i>Kc_med</i>		
		<i>R²</i>	<i>RCME</i>	<i>EM</i>	<i>R²</i>	<i>RCME</i>	<i>EM</i>
Nf	0.34 a	0.02	0.08	-0.39	0.01	0.07	-0.38
Nh	0.30 b	0.94	0.10	-0.44	0.90	0.09	-0.42
Ef	0.21 c	0.02	0.14	-0.53	0.03	0.13	-0.51
Eh	0.18 d	0.83	0.16	-0.56	0.79	0.15	-0.54
Gf	0.14 e	0.001	0.18	-0.60	0.02	0.17	-0.58
Nfh	0.13 e	0.94	0.18	-0.60	0.9	0.18	-0.59
Gh	0.12 e	0.88	0.19	-0.62	0.84	0.18	-0.60
Efh	0.08 f	0.79	0.22	-0.66	0.79	0.21	-0.64
Gfh	0.05 g	0.84	0.23	-0.68	0.83	0.22	-0.67

Medidas con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). R^2 , coeficiente de determinación; RCME, la raíz cuadrada del error cuadrático medio; EM, el error medio.

7.3.3. Información estructural y espectral del cultivo

Las alturas estimadas para el cultivo de lima Persa se compararon con las alturas correspondientes medidas in situ. Se utilizaron 40 plantas medidas al azar para evaluar la precisión de las alturas estimadas con dron (Figura. 40). La relación entra las alturas medidas y las alturas estimadas, presentó una R^2 de 0.96, así como una RCME de 0.0037 m. Lo que muestra una alta correlación en la estimación con dron (Su *et al.*, 2019; Hassan *et al.*, 2019).

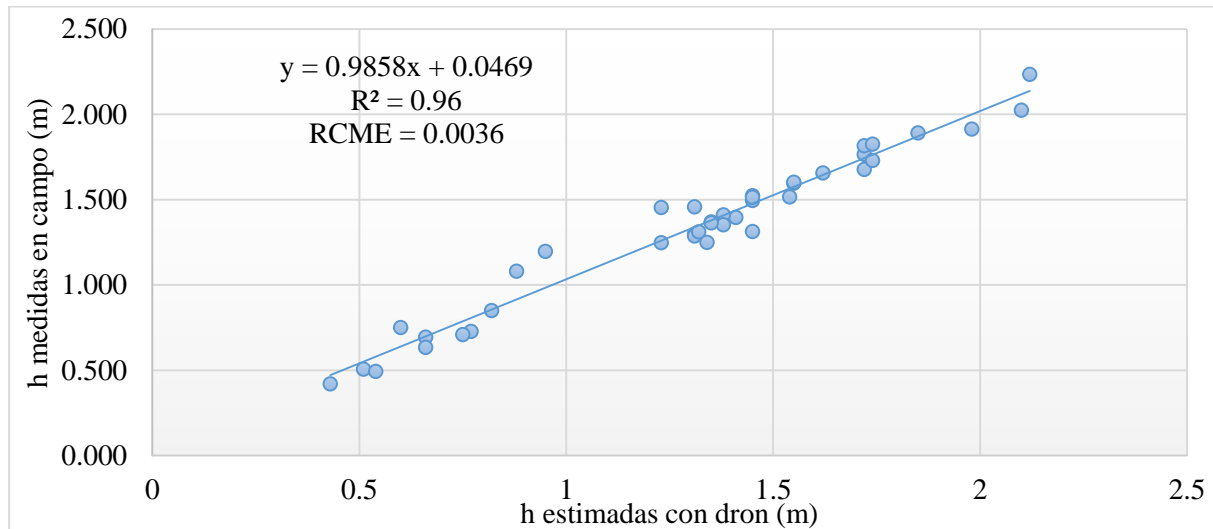


Figura 40. Altura de plantación estimada con mediciones en campo y alturas de planta obtenidos con dron.

Información espectral

En la figura 41 se muestra el análisis de correlación para los principales índices de vegetación estimados para estrés hídrico. Como se observa, el método ExG tiene una correlación lineal con el método Gmr de 0.93, mientras que vNDVI mostró una mejor correlación lineal con ExG de 0.81 pero con una mayor dispersión de los datos. Por el contrario, Gmb presentó la menor correlación con respecto a los métodos Sat, vNDVI, ExG y Gmr con valores de 0.37, 0.64, 0.39 y 0.50 respectivamente. De esta manera, los índices de vegetación seleccionados para la estimación de Kc con dron son vNDVI, ExG y Gmr.

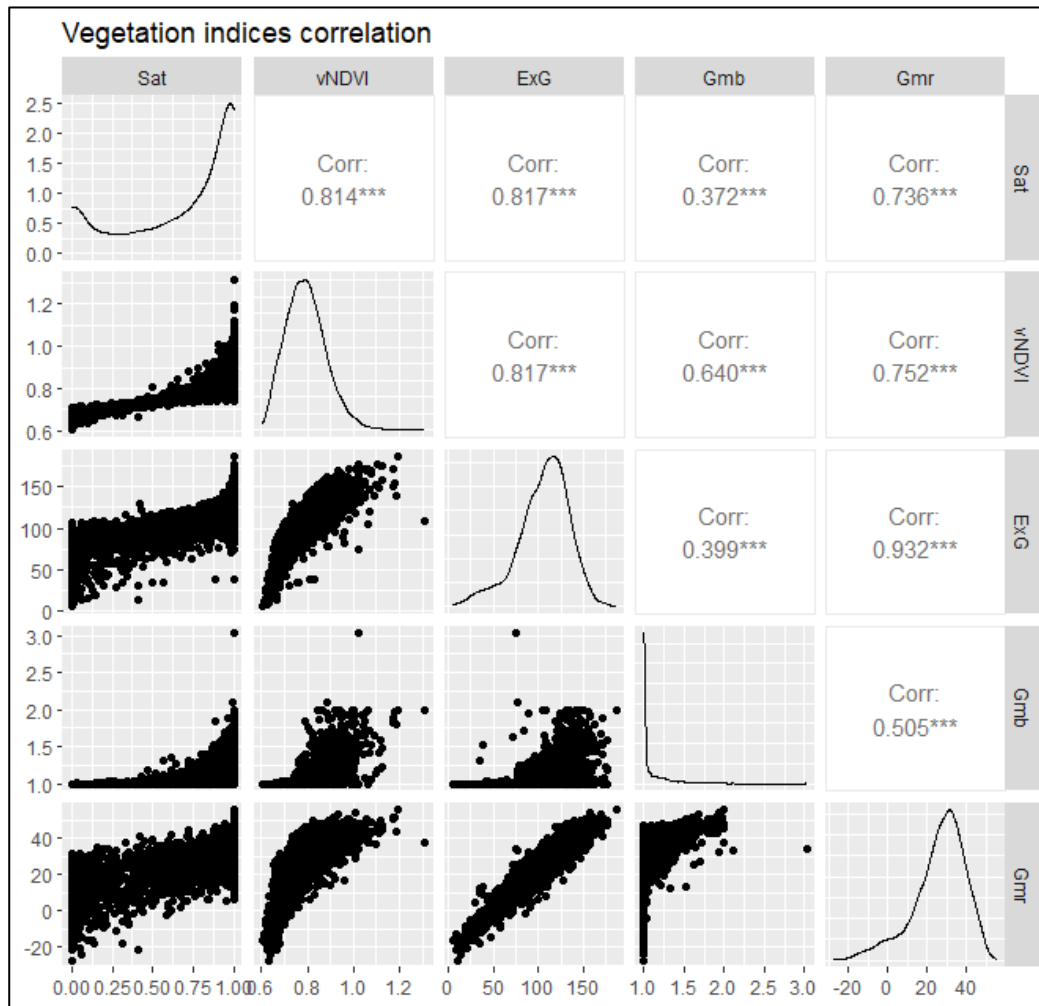


Figura 41. Correlación y selección de los principales índices de vegetación para estrés hídrico.

7.3.4. Kc mediante drones

Las combinaciones propuestas de información estructural y espectral para la estimación de kc con imágenes UAV se dividen en tres grupos (cuadro 19): Kc en función de fv y h, Kc en función de fv y por último Kc en función de h. De esta manera es posible saber que índice de vegetación combinado con la información estructural obtenida con dron presenta la mejor de estimación de Kc.

Cuadro 19. Coeficientes de cultivo obtenidos con dron.

Método	Función	Método	Función
Efh	$Kc = f(ExG, fv, h)$	Nf	$Kc = f(vNDVI, fv)$
Gfh	$Kc = f(Gmr, fv, h)$	Eh	$Kc = f(ExG, h)$
Nfh	$Kc = f(vNDVI, fv, h)$	Gh	$Kc = f(Gmr, h)$
Ef	$Kc = f(ExG, fv)$	Nh	$Kc = f(vNDVI, h)$
Gf	$Kc = f(Gmr, fv)$		

dónde: ExG es el índice de vegetación (exceso de verde); Gmb es el índice de vegetación (Diferencia entre verde y azul); vNDVI es el índice de vegetación (visible Índice de vegetación de diferencia normalizada); fv es el factor de vegetal del cultivo y h es la altura de planta con valores normalizados.

El análisis de los parámetros estadísticos (media, desviación estándar, cuartiles) se estimó utilizando los valores promedios (abril, septiembre y diciembre) de los métodos de Kc estimado con dron, con respecto al método de referencia Kc_full para poder estudiar su distribución de frecuencias (Figura 42). El diagrama de cajas muestra los nueve métodos estimados con dron, los cuales presentan una media que oscila de 0.03 a 0.30 y una desviación estándar entre 0.02 a 0.09. El método Gfh presentó la menor dispersión en los datos entre 0.005 a 0.09, mientras que el método Nh la mayor dispersión en los datos con valores que van de 0.06 a 0.55.

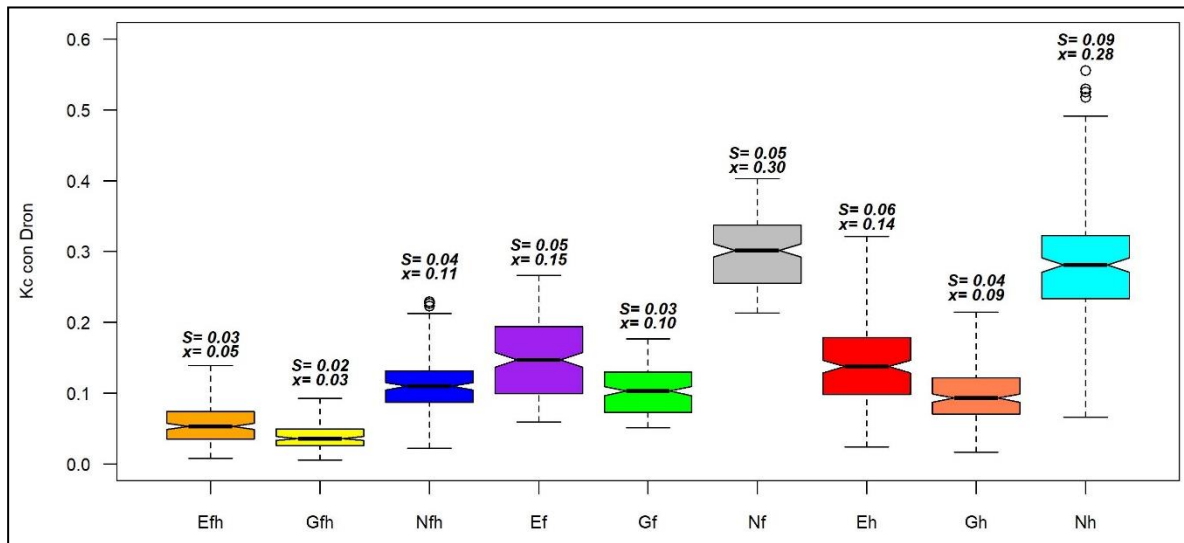


Figura 42. Diagrama de cajas para valores de Kc estimados a partir de métodos empíricos con dron.

La estimación de Kc de referencia (Eh, Gh, Nh) en función del índice de vegetación y altura de planta, muestra un mejor ajuste de R^2 con respecto al método de referencia con 0.9, 0.72 y 0.65 respectivamente, el índice vNDVI combinado con el modelo de alturas de planta obtenidos con dron (h) presentó el mejor ajuste con respecto al método de referencia FAO-56 (K_{cfull}) debido a que el método de referencia hace uso de valores obtenidos en campo de altura de planta, datos climáticos y características del cultivo (Fr).

Los métodos de Kc empíricos (Efh, Gfh, Nfh) en función de los índices de vegetación, fracción vegetal y altura de planta, muestran una regresión lineal con el método de referencia K_{cfull} , donde el método Nfh muestra mayor R^2 con 0.84 y el método Efh menor R^2 con 0.53 (Figura.43). Los métodos (Ef, Gf y Nf) obtuvieron mayor dispersión en los valores con respecto al método de referencia K_{cfull} ; estos valores de Kc en función del índice de vegetación y el porcentaje de fracción vegetal presentan los valores más bajos de R^2 , con 0.04, 0.05 y 0.08 respectivamente

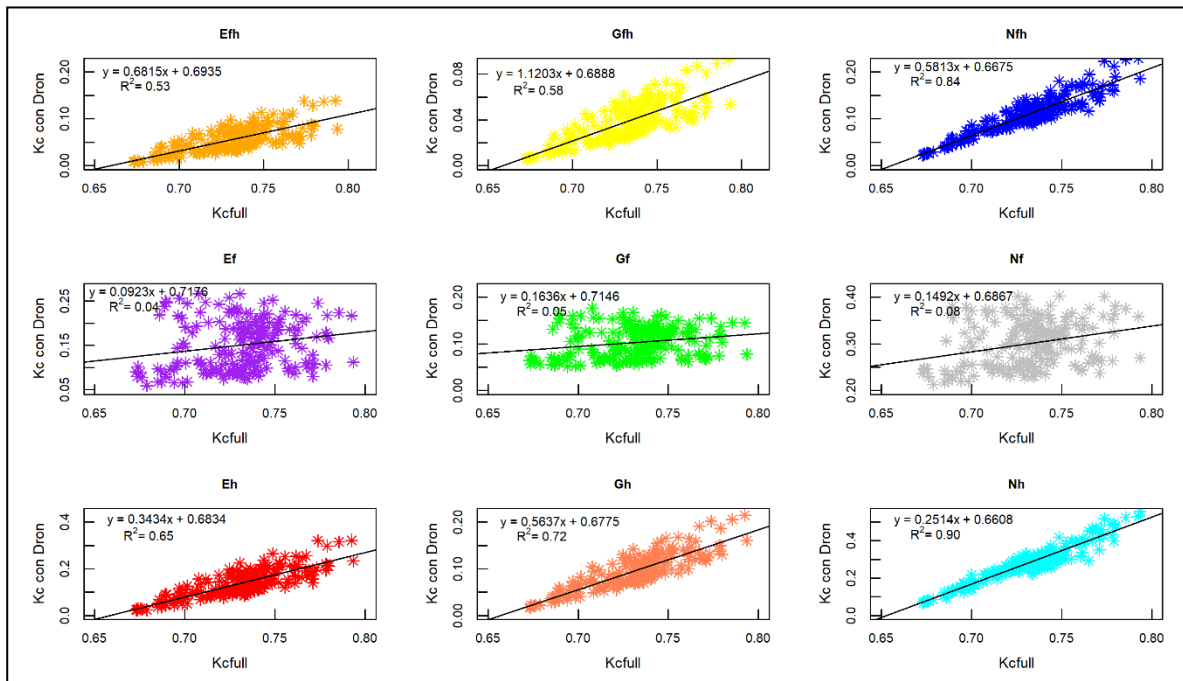


Figura 43. Regresión lineal de valores de Kc obtenidos a partir de imágenes de drones comparados con valores de referencia FAO -56 (Kc full).

En la Figura 44 se muestran los valores mensuales de Kc obtenidos mediante el método de referencia Nh. Los valores de Kc se encuentran en un rango de 0.2 a 1.3 para los doce meses del año. En el mes de abril se presentaron los valores mínimos de Kc con 0.12 y una desviación estándar de 0.18 en árboles con una altura menos a 0.75 metros. Así mismo, en este mes se presentaron los valores máximos de Kc con un valor de 1.33 en la zona sur y sureste del área de estudio con alturas de árboles mayores a 3 metros. En los meses de septiembre y diciembre se presentaron los rangos más bajos de valores de Kc con 0.29 a 0.86 y 0.29 a 0.88 respectivamente, con una desviación estándar de 0.16 y 0.16 para los meses respectivos. Se presenta una variabilidad espacial dentro de la huerta, donde es posible observar que Kc varía conforme al desarrollo vegetativo del cultivo, teniendo los valores máximos en octubre y los mínimos en abril, coincidiendo con las etapas fenológicas de maduración y reproducción. Como se puede observar, el método Nh es el más cercano al método de referencia Kc full, por lo que es el utilizado para el cálculo de ETC.

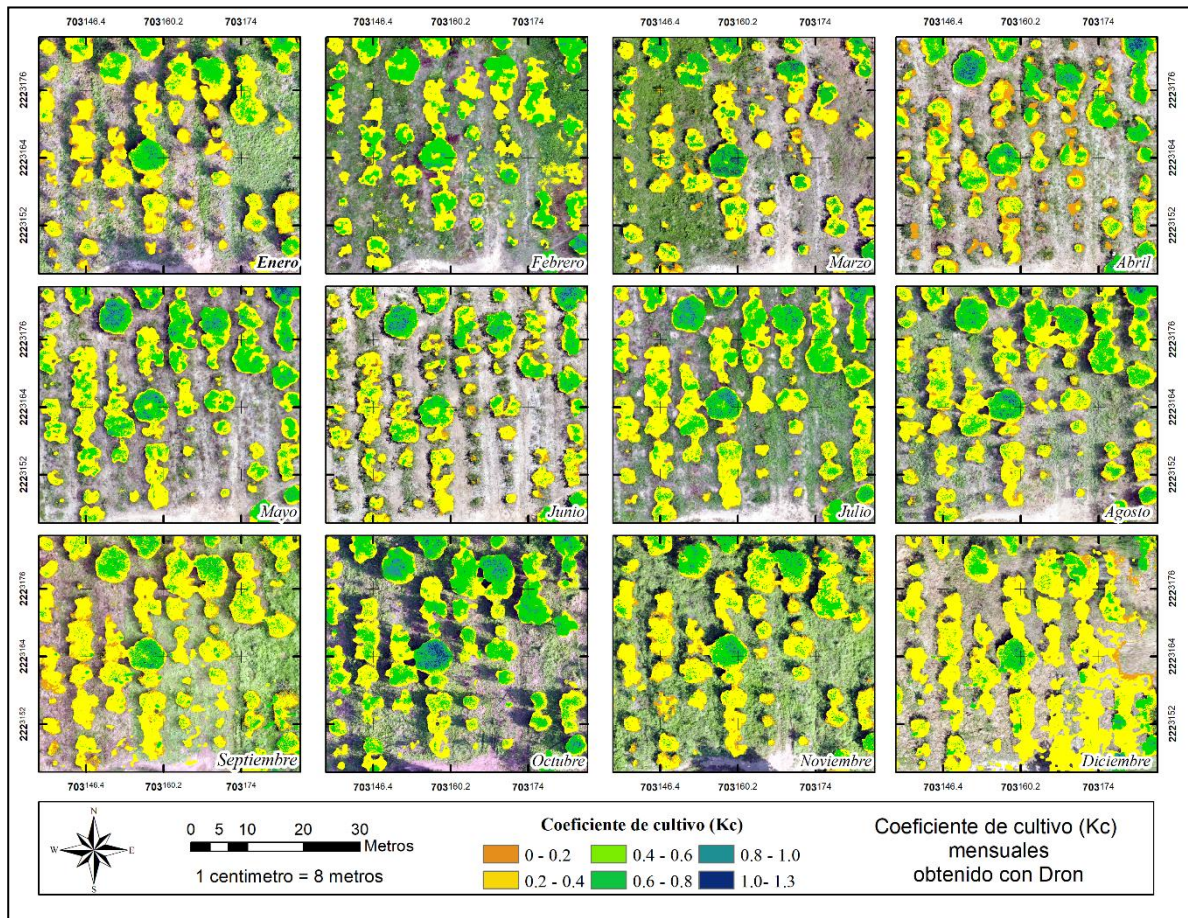


Figura 44. Distribución espacial del coeficiente de cultivo mediante el método (Nh) para el cultivo de lima 'Persa'.

7.3.5. Análisis espacio temporal de ETC

En la Figura 45 se muestra el mapa de la distribución espacio temporal de la evapotranspiración de cultivo (ETc) en lima Persa. Los valores se encuentran en un rango de 10 a 170 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$. En el mes de enero se encuentra en un rango de 10 a 107 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ con una desviación estándar de 16.1 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$, que posteriormente comienza a descender hasta el mes de marzo, llegando a valores de 15.6 a 42 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$. De los meses de abril a agosto comienza un aumento en la ETc con rangos que van de 3.8 a 88 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ y elevándose a valores de 52.5 a 170 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ respectivamente, con desviación estándar de 11.7 y 40.1 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ para cada mes. Posteriormente comienza un

descenso en los meses de septiembre y aumenta al mes de diciembre, con un rango de valores de 31 a 90 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ y 50 a 120 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ respectivamente.

En el mes de agosto se presentó la mayor ETc con un valor de 170 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ para árboles con una altura mayor de 3.5 m, el cual corresponde a la etapa de maduración del fruto de lima 'Persa'. En esta etapa se necesita cubrir las necesidades hídricas del cultivo para el llenado del fruto. Mientras que en el mes de diciembre se presenta una menor ETc debido a las precipitaciones, el cultivo está en la etapa de crecimiento vegetativo y comenzando con la diferenciación floral.

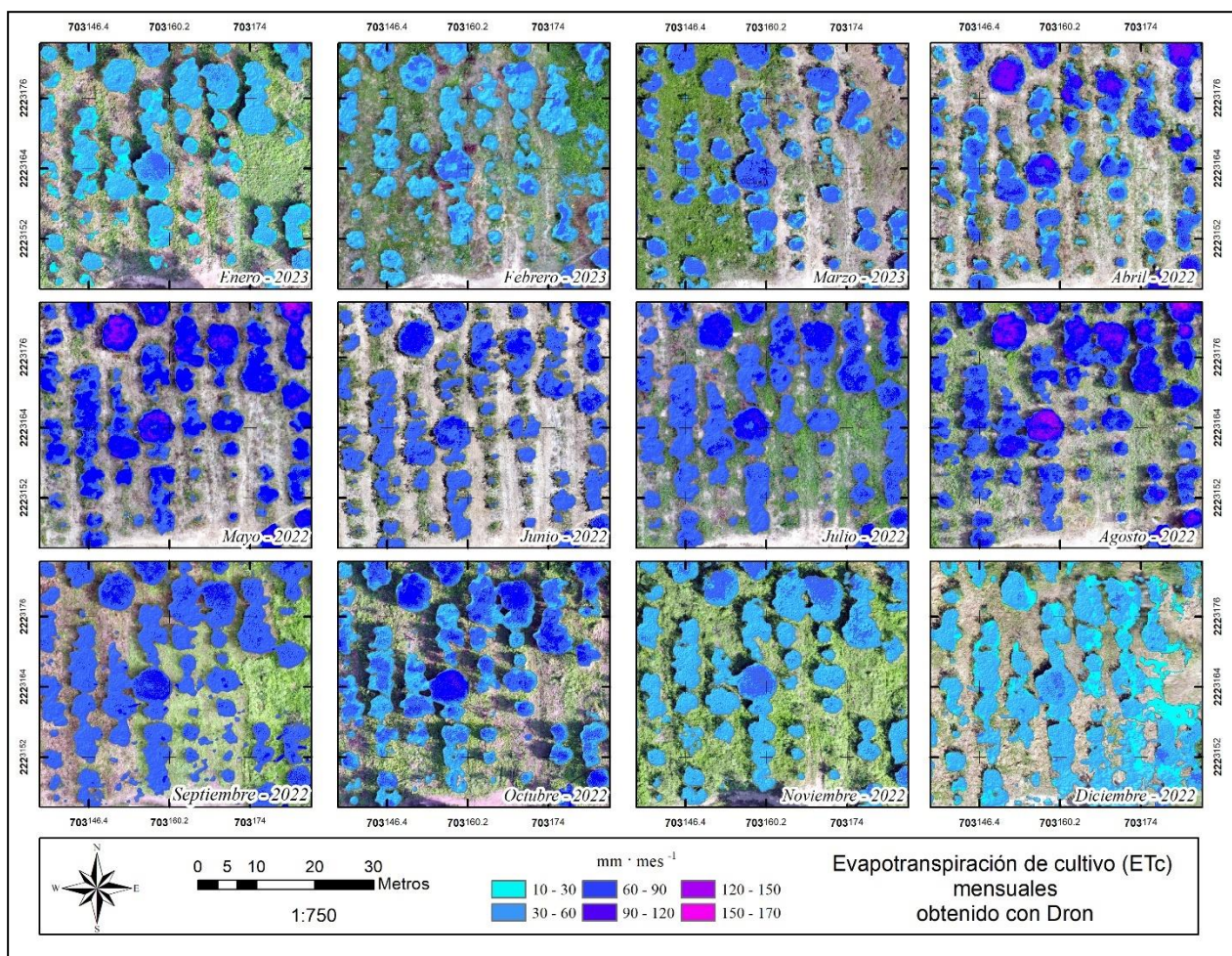


Figura 45. Distribución espacial de la evapotranspiración de cultivo (ETc) mediante el método (Nh) para el cultivo de lima 'Persa'

En la Figura 46 se muestra un diagrama de cajas de la distribución de la ETc (Nh) mensual. El mes con mejor ETc es marzo con un promedio de 20.1 mm·mes⁻¹ y desviación estándar (S) de 6.7 mm·mes⁻¹, con un valor mínimo de 9.3 mm·mes⁻¹ y máximo de 42 mm·mes⁻¹. En el mes de agosto se presentaron los valores más altos de ETc, con un promedio de 77.9 mm·mes⁻¹ y S de 27 mm·mes⁻¹, con un rango que va desde 36.7 a 262.7 mm·mes⁻¹. Se puede apreciar que los valores de ETc van en aumento de los meses de marzo a agosto, sin embargo, disminuye en el mes de septiembre, esto debido a las características climáticas. Posteriormente vuelve a aumentar a presentar su comportamiento normal (bimodal) de octubre al mes de febrero, con promedios de 66.4 a 27.8 mm·mes⁻¹.

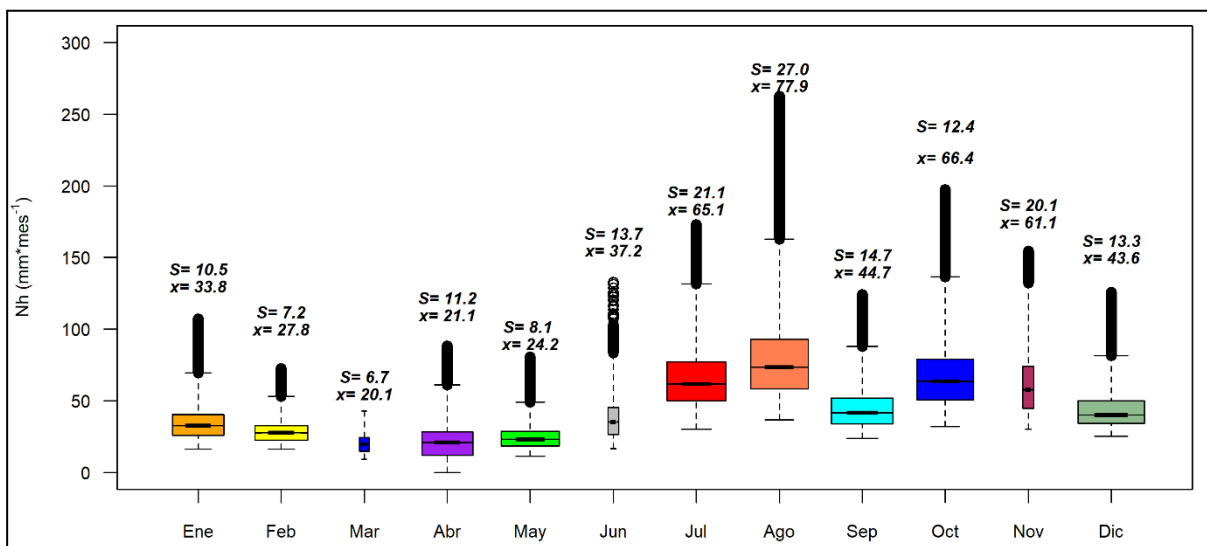


Figura 46. Diagrama de cajas de ETc (Nh) mensual.

7.3.6. Calendarización del riego

En el cuadro 20 se muestra la calendarización de requerimientos hídricos para el cultivo de lima 'Persa'; para una profundidad de raíz de 60 cm, se puede almacenar alrededor de 346.5 mm de agua, que corresponden al contenido de humedad a capacidad de campo. El contenido de humedad inicial (Li) es de 300 mm para el día uno, tal valor se tomó como 85% de CC. El riego se tiene que aplicar cuando el contenido de humedad alcance un valor de Lf = 276 mm. De esta manera, se muestra en el siguiente cuadro que se necesitaron aplicar 5 riegos para los meses de abril – agosto con una

lámina de riego (Lr) de 145, 120, 15, 90 y 125 mm, los cuales se pueden dividir en 2 aplicaciones mensuales cada 15 días. El mes con mayor ETc fue mayo con 169 mm, mientras que en el mes de junio se presentó una mayor precipitación (105 mm), lo que disminuyó la aplicación de riego a 15 mm.

Cuadro 20. Calendarización de requerimientos hídricos para el cultivo de lima 'Persa'

Mes	Balance de humedad mensual											
	Abr-22	May-22	Jun-22	Jul-22	Ago-22	Sep-22	Oct-22	Nov-22	Dic-22	Ene-23	Feb-23	Mar-23
Li (mm)	300.0	346.5	342.7	344.6	350.3	345.4	395.4	382.8	382.6	346.5	396.0	416.5
ETc (mm)	132.9	169.6	118.2	102.5	144.0	99.2	91.2	62.7	42.7	50.5	45.6	74.1
PP (mm)	34.4	45.8	105.0	18.2	14.1	149.1	78.6	62.4	186.9	99.9	66.1	84.5
Lr (mm)	145	120	15	90	125	0	0	0	0	0	0	0
Pr (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lf (mm)	346.5	342.7	344.6	350.3	345.4	395.4	382.8	382.6	526.8	396.0	416.5	426.9

dónde: Li es lámina inicial, ETc es la evapotranspiración de cultivo, PP es la precipitación efectiva, LR es la lámina de riego requerida, Pr es la percolación y Lf es la lámina final.

En la Figura 47 se muestra el requerimiento de riego mensual estimados a partir de imágenes obtenidas con dron. Para los meses de enero a marzo de 2023 no se requirió la aplicación de riego, debido que la ETc fue menor (50, 45 y 74 mm) que la precipitación efectiva (99.9, 66.1 y 84.5 mm), lo que provocó que se cubrieran las necesidades hídricas en esos meses. Se observa que del mes de abril al mes de agosto se requiere la aplicación de riego; en abril se estimó una lámina promedio de 64.2 mm, un valor mínimo de 12 mm que se requiere en la zona sur y suroeste en árboles con una altura menor a 1 metro, mientras que el valor máximo es de 115 mm para los árboles en la zona centro, sur y sureste, con una altura mayor a 2.5 metros y mayor volumen de copa. En el mes de mayo se inició con la aplicación de tratamientos de riego (capítulo 5), el valor promedio es de 26.3 mm, el valor mínimo es de 15 mm en la zona sur y suroeste en los tratamientos con aplicación de riego. Sin embargo, los valores más altos con una máxima de 115 mm en los árboles de la zona sur con una altura mayor a 2.5 m; además, se puede apreciar que en la zona este para el tratamiento T4 (capítulo 5) los árboles necesitan una mayor cantidad de riego (con una lámina mayor a 30 mm).

7.4. Conclusiones

De manera tradicional, el valor del coeficiente de cultivo (K_c) se deriva de tablas proporcionadas por la FAO 56, diseñadas para cultivos sin estrés hídrico, considerando condiciones óptimas de altura de planta y una gestión agronómica adecuada en zonas con clima subhúmedo. En este contexto, el empleo de variables estimadas a través de drones, como las alturas de las plantas y los índices de vegetación, brinda la oportunidad de mejorar la estimación del K_c . Esto se logra mediante un análisis cuantitativo de las particularidades de cada árbol dentro de la parcela, lo que a su vez permite calcular un valor de K_c que varía en función de las alturas de los árboles y de los indicadores de estrés hídrico obtenidos a partir de los índices de vegetación.

La determinación de la evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) resulta fundamental para calcular las necesidades de agua en el cultivo de lima 'Persa'. Cuando se realiza un análisis que abarca tanto el espacio como el tiempo en relación con la E_{Tc} , se obtiene un conocimiento más detallado de las demandas hídricas individuales de cada planta. Esta información es esencial para asegurarse de que se suministra la cantidad precisa de agua a cada cultivo, que puede variar entre en este estudio de 20 y 200 $\text{mm} \cdot \text{mes}^{-1}$. Al mejorar la programación de riegos de esta manera, se promueve una gestión eficiente de los recursos hídricos, lo que se traduce en beneficios tanto para la producción de lima 'Persa' como para la conservación de agua.

8. CONCLUSIONES GENERALES

Martínez de la Torre, Veracruz, se destaca como un centro agrícola clave con una amplia gama de cultivos y ciclos agrícolas. La producción agrícola anual supera las 28 mil toneladas de productos, generando un valor económico de aproximadamente 2.3 mil millones de pesos. El cultivo de lima 'Persa' es fundamental en la economía local debido a su capacidad de cosecha múltiple. La gestión adecuada de los recursos hídricos es esencial para mantener la productividad y promover la sostenibilidad en esta región, donde la mayoría de las tierras se dedican a la agricultura temporal. El peso fresco de los frutos de lima 'Persa' se vio afectado por la aplicación de intervalos de riego en el estudio. En particular, se observaron diferencias significativas en el peso de los frutos en la primera fecha de riego, donde los tratamientos T2, T3 y T4 difirieron significativamente de T1. Además, en las fechas posteriores a los intervalos de riego, T1 mostró diferencias significativas en comparación con T4 en todas las fechas evaluadas. Estos hallazgos destacan la influencia de la gestión del riego en el tamaño y peso de los frutos de lima 'Persa'.

La obtención de información espacial de alta resolución mediante un dron DJI mini SE equipado con una cámara RGB con Sensor CMOS de 1/2.3", es eficiente debido a que puede proporcionando información espacio temporal de grandes extensiones en poco tiempo. La utilización de software y algoritmos de aprendizaje supervisado ayudan a extraer información más detallada del cultivo lima 'Persa' y excluir valores de suelo y malezas. Las imágenes RGB proporcionada con un dron DJI mini SE, hacen posible calcular los requerimientos de riego y la elaboración de calendarios de riegos para el cultivo de lima 'Persa', siendo una herramienta que puede satisfacer las necesidades del cultivo, que dependerá de su edad, altura, volumen de copa, clima.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulridha, J., Ampatzidis, Y., Ehsani, R., & de Castro, A. I. (2018). Evaluating the performance of spectral features and multivariable analysis tools to detect laurel wilt disease and nutritional deficiency in avocado. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 203-211.
- Agusti M. 2010. Fruticultura. Mundi-Prensa. España. 507.
- Ahmad, I. S., & Reid, J. F. (1996). Evaluation of colour representations for maize images. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(3), 185-195.
- Alexandris, S., Kerkides, P., & Liakatas, A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the “Copais” approach. *Agricultural Water Management*, 82(3), 371-386. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.08.001>
- Ali, P. J. M., Faraj, R. H., Koya, E., Ali, P. J. M., & Faraj, R. H. (2014). Data normalization and standardization: a technical report. *Mach Learn Tech Rep*, 1(1), 1-6.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Almaguer-Vargas, G., Espinoza-Espinoza, J. R., & Quirós-García, J. L. (2011). Desfasamiento de cosecha de limón persa. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17(3), 197-205.
- Almaguer-Vargas, G., Espinoza-Espinoza, J. R., & Quirós-García, J. L. (2011). Desfasamiento de cosecha de limón persa. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17(3), 197-205.
- Ambriz Cervantes, R., Ariza Flores, R., Alía Tejacal, I., Michel Aceves, A. C., Barrios Ayala, A., & Otero Sánchez, M. A. (2018). Effect of banding and biostimulants in the flowering, production and quality of Persian lime (*Citrus Latifolia* Tan.) in winter. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(4), 711-722.
- AMBRIZ-CERVANTES, R., R. Ariza-Flores, M.E. Ovando-Cruz, I. Alía-Tejacal. 2019. Importancia de los portainjertos en la producción de cítricos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional

- Pacífico Sur. Campo Experimental Zacatepec. Zacatepec, Morelos, México, Folleto para productor Núm. 73. 11 p.
- Ampatzidis, Y., Partel, V., Meyering, B., & Albrecht, U. (2019). Citrus rootstock evaluation utilizing UAV-based remote sensing and artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*, *164*, 104900.
- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *11*(3), 138-146.
- Aparicio-Durán, L., Gmitter Jr, FG, Arjona-López, JM, Calero-Velázquez, R., Hervalejo, Á., & Arenas-Arenas, FJ (2021). El estrés hídrico influye en tres nuevos y prometedores portainjertos de cítricos tolerantes al HLB. *Horticulturae*, *7* (10), 336.
- Apolo-Apolo, O. E., Pérez-Ruiz, M., Martínez-Guanter, J., & Valente, J. (2020). A cloud-based environment for generating yield estimation maps from apple orchards using UAV imagery and a deep learning technique. *Frontiers in plant science*, *11*, 1086.
- Aragón-Hernández, J. L., Aguilar-Martínez, G. A., Velázquez-Ríos, U., Jiménez-Magaña, M. R., & Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *20*(2), 1-15. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2019.20n2.023>
- ARÉVALO R, P. A., PARRA-CORONADO, A. L. F. O. N. S. O., & ORDUZ-RODRÍGUEZ, J. O. (2016). Postharvest physicochemical characterization of different materials of Tahiti acid lime (*Citrus latifolia* Tanaka) for exports. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *10*(2), 241-251.
- Bai, L., Shi, C., Li, L., Yang, Y., & Wu, J. (2018). Accuracy of CHIRPS satellite-rainfall products over mainland China. *Remote Sensing*, *10*(3), 362.
- Bautista, F., Bautista, D. y Delgado-Carranza, C. (2009). Calibración de las ecuaciones de Hargreaves y Thornthwaite para estimar la evapotranspiración potencial en climas tropicales semiáridos y subhúmedos para aplicaciones regionales. *Atmósfera*, *22* (4), 331-348.
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., ... & Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared

- vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79-87.
- Bernardo, S., A.A. Soares, e E. C. Mantovani. (2009). *Manual de Irrigação*. 8^a. ed. Imprensa Universitária. Viçosa/MG, 355 p.
- Borges, A. C., & Mendiondo, E. M. (2007). Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11, 293-300.
- Bradford, K. J., & Hsiao, T. C. (1982). Physiological responses to moderate water stress. *Physiological plant ecology II: water relations and carbon assimilation*, 263-324.
- Caballero, M., Caballero, H., Cobeña, G., & Solórzano, C. (2019). Reproductive development of lemon (*Citrus aurantifolia* Swingle) under different soil moisture levels. *Peruvian Journal of Agronomy*, 3(1), 6-15.
- Carpintero, E., Mateos, L., Andreu, A., & González-Dugo, M. P. (2020). Effect of the differences in spectral response of Mediterranean tree canopies on the estimation of evapotranspiration using vegetation index-based crop coefficients. *Agricultural Water Management*, 238, 106201.
- Castel, J. R., & Buj, A. (1990). Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation science*, 11, 121-127.
- Cervantes-Osornio, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Ojeda-Bustamante, W. (2012). Radiación global diaria estimada con métodos convencionales y redes neuronales artificiales en el distrito de riego 075. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 4(2), 55-60. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2012.09.008>
- Chao, H., & Chen, Y. (2012). *Remote sensing and actuation using unmanned vehicles* (198 pp.). Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), S. M. N. (SMN). (2019, September). Información Estadística Climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), S. M. N. (SMN). (2020, enero). Monitor de Sequía en México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

- Cong, P., Zhou, J., Li, S., Lv, K., & Feng, H. (2022). Citrus Tree Crown Segmentation of Orchard Spraying Robot Based on RGB-D Image and Improved Mask R-CNN. *Applied Sciences*, 13(1), 164.
- Consoli, S., & Vanella, D. (2014). Mapping crop evapotranspiration by integrating vegetation indices into a soil water balance model. *Agricultural Water Management*, 143, 71-81.
- Costa, L., Nunes, L., & Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105334.
- Costa-Filho, E., Chávez, J. L., & Comas, L. (2020). Determining maize water stress through a remote sensing-based surface energy balance approach. *Irrigation Science*, 1-18.
- Cruden, B. A., Prabhu, D., & Martinez, R. (2012). Absolute radiation measurement in venus and mars entry conditions. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 49(6), 1069-1079.
- Cui, Y., Zhao, K., Fan, W., & Xu, X. (2011). Retrieving crop fractional cover and LAI based on airborne Lidar data. *Yaogan Xuebao- Journal of Remote Sensing*, 15(6), 1276-1288.
- Curran, P. J. (1985). *Principles of Remote Sensing* (1st ed.). Hong Kong: Longman Group Limited.
- DadrasJavan, F., Samadzadegan, F., Pourazar, S. H. S., & Fazeli, H. (2019). UAV-based multispectral imagery for fast Citrus Greening detection. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 126(4), 307-318.
- Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., & Ceccato, P. (2018). Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 292-312.
- Djaman, K., Irmak, S., Sall, M., Sow, A., & Kabenge, I. (2018). Comparison of sum-of-hourly and daily time step standardized ASCE Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1-2), 533-543. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2291-6>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. Irrigation and drainage paper, 33, 257.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 24. Land and Water Development Division, FAO, Rome, 144(1).

- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16, 33-45. <https://doi.org/10.1023/A:1015508322413>
- Enciso, J., Cholula, U., Masih, A., Chavez, J. L., Solorzano, J., & Laredo, A. (2021). Evaluating the Use of True Color Unmanned Aerial System images for Irrigation Scheduling in Citrus. In 6th Decennial National Irrigation Symposium, 6-8, December 2021, San Diego, California (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Fereres, E., Goldhamer, D. A., & Sadras, V. O. (2012). Yield response to water of fruit trees and vines: guidelines. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, (66), 246-497.
- Fisher, D. K., & Pringle III, H. C. (2013). Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural Sciences*, 2013.
- Fournier, L. A., & Di Stéfano, J. F. (2004). Variaciones climáticas entre 1988 y 2001, y sus posibles efectos sobre la fenología de varias especies leñosas y el manejo de un cafetal con sombra en Ciudad Colón de Mora, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 101-120.
- Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, J.D., Romero, B.E., Husak, G.J., Michaelsen, J.C., and Verdin, A.P., 2014, A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p. <http://pubs.usgs.gov/ds/832/>
- Galindo, A., Collado-González, J., Griñán, I., Corell, M., Centeno, A., Martín-Palomo, M. J., ... & Pérez-López, D. (2018). Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agricultural water management*, 202, 311-324.
- García-Tejero, I., Romero-Vicente, R., Jiménez-Bocanegra, J. A., Martínez-García, G., Durán-Zuazo, V. H., & Muriel-Fernández, J. L. (2010). Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality, and water productivity. *Agricultural Water Management*, 97(5), 689–699. doi:10.1016/j.agwat.2009.12.012
- García-Vasquez, A. C., Mokari, E., Samani, Z., & Fernald, A. (2022). Using UAV-thermal imaging to calculate crop water use and irrigation efficiency in a flood-irrigated pecan orchard. *Agricultural Water Management*, 272, 107824.

- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote sensing of Environment*, 80(1), 76-87.
- Gobron, N., Pinty, B., Verstraete, M. M., & Widlowski, J. L. (2000). Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: Design, performance, and applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6), 2489-2505.
- Gómez-Candón, D., Virlet, N., Labbé, S., Jolivot, A., & Regnard, J. L. (2016). Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration. *Precision agriculture*, 17(6), 786-800.
- González Piqueras, J. (2006). Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental.
- González, A. Z., Delgado, M. Á. G., Meza, B. I. C., & Rodríguez, H. R. (2007). Tensión de humedad del suelo y rendimiento de fruto en limón italiano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 295-303.
- González, J. (2006). Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental (Doctoral dissertation, phd thesis. Universidad de Valencia, Valencia, Spain).
- Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P. J., & Fereres, E. (2014). Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. *Agricultural and forest meteorology*, 198, 94-104.
- Greenough, PG y Nelson, EL (2019). Más allá del mapeo: un caso a favor del análisis geoespacial en la salud humanitaria. *Conflicto y Salud* , 13 (1), 50. <https://doi.org/10.1186/s13031-019-0234-9>
- Guerra, D. D., Grajales, L. C., & Rojas, L. R. (2015). Efecto del riego y la fertilización sobre el rendimiento y la calidad de la fruta de lima ácida Tahití *Citrus latifolia* Tanaka (Rutaceae). *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 87-93.
- Guijarro, M., Pajares, G., Riomoros, I., Herrera, P. J., Burgos-Artizzu, X. P., & Ribeiro, A. (2011). Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(1), 75-83.

- Hafeez, M., Gulshan, A. B., Basit, A., Chattha, Z. A., Khan, A. A., Majeed, M. A., & Tahira, F. (2020). Penman and Thornthwaite Equations for Estimating Reference Evapotranspiration Under Semi-Arid Environment. *Journal of Plant Sciences*, 8(5), 146-151.
- Han, L., Yang, G., Dai, H., Xu, B., Yang, H., Feng, H., ... & Yang, X. (2019). Modeling maize above-ground biomass based on machine learning approaches using UAV remote-sensing data. *Plant Methods*, 15(1), 1-19.
- Han, M., Zhang, H. H., DeJonge, K. C., Comas, L. H., Gleason, S. (2018). Comparison of three crop water stress index models with sap flow measurements in maize. *Agric. Water Manage.* 203, 366–375. doi: 10.1016/j.agwat.2018.02.030
- Han, W., Li, G., Yuan, M., Zhang, L., & Shi, Z. (2017). Extraction method of maize planting information based on UAV remote sensing technology. *Trans. Chin. Soc. Agricultural Machinery*, 48, 139-147.
- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., ... & Tejero, J. A. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51-61.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hassan, M. A., Yang, M., Fu, L., Rasheed, A., Zheng, B., Xia, X., ... & He, Z. (2019). Accuracy assessment of plant height using an unmanned aerial vehicle for quantitative genomic analysis in bread wheat. *Plant Methods*, 15(1), 1-12.
- Hernández, C., & Olvera, J. C. (2010). Impacto de la tecnología regional en la producción agroindustrial: el caso del limón. In XIV Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas. Monterrey.
- Hijmans R (2022). *_raster: Geographic Data Analysis and Modeling_*. R package version 3.6-11, <<https://CRAN.R-project.org/package=raster>>.
- Hounam C. E., 1971. Problems of evaporation assessment in the water balance. Report on WMO/ IHP Projects No. 13, World Meteorological Organization. Geneva, 80 pp.
- Hsiao, T. C., Steduto, P., & Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation science*, 25, 209-231.

- Huang, T., Huang, Y., Dan, LU y Yaoxin, LIU (2022). Efectos del riego inteligente sobre las características fotosintéticas de las hojas de cítricos y la calidad de los frutos. *Biocología Agrícola* (2164-4993) , 11 (4).
- Hunt Jr, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S., Perry, E. M., & Akhmedov, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International journal of applied earth observation and Geoinformation*, 21, 103-112.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2017). AGENDA TECNICA AGRICOLA VERACRUZ. https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/_Content?%2f%2f=AT
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2019, September). Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automáticas INIFAP. <https://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Estaciones/MapaEstaciones>
- Itier, B., Maraux, F., Ruelle, P., & Deumier, J. M. (1996). Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. In ICID FAO workshop on irrigation scheduling, Rome, ITA, 12-13 September 1995 (pp. 19-32).
- Jintasuttisak, T., Edirisinghe, E., & Elbattay, A. (2022). Deep neural network based date palm tree detection in drone imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106560.
- Johnson, L. F., & Trout, T. J. (2012). Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*, 4(2), 439-455.
- Kawashima, S., & Nakatani, M. (1998). An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera. *Annals of Botany*, 81(1), 49-54.
- Khan, Z., Rahimi-Eichi, V., Haefele, S., Garnett, T., & Miklavcic, S. J. (2018). Estimation of vegetation indices for high-throughput phenotyping of wheat using aerial imaging. *Plant methods*, 14(1), 1-11.
- Kong, J., Hu, Y., Yang, L., Shan, Z., & Wang, Y. (2019). Estimation of evapotranspiration for the blown-sand region in the Ordos basin based on the SEBAL model. *International Journal of Remote Sensing*, 40(5-6), 1945-1965.
- Kriedemann, P. E., & Barrs, H. D. (1981). Citrus orchards. Water deficits and plant growth, 6, 325-417.

- Kussul, N., Lavreniuk, M., Skakun, S., & Shelestov, A. (2017). Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(5), 778-782.
- Kyrkou, C., Timotheou, S., Kolios, P., Theocharides, T., & Panayiotou, C. G. (2018, January). Optimized vision-directed deployment of UAVs for rapid traffic monitoring. In *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)* (pp. 1-6). IEEE.
- Lavado, W., Lhomme, J., Labat, D., Loup Guyot, J., & Boulet, G. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO Penman - Monteith) con limitados datos climáticos en la Cuenca Andina Amazónica Peruana. *Revista Peruana Geo – Atmosférica*, 4, 34-36. https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper3.pdf
- Levy, Y., Bielorai, H., & Shalhevet, J. (1978). Long-term Effects of Different Irrigation Regimes on Grapefruit Tree Development and Yield1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 103(5), 680-683.
- Li, Q., Wang, C., Zhang, B., & Lu, L. (2015). Object-based crop classification with Landsat-MODIS enhanced time-series data. *Remote Sensing*, 7(12), 16091-16107.
- Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., & Zhao, W. (2016). Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators*, 67, 637-648.
- Lima, R. S. N., García-Tejero, I., Lopes, T. S., Costa, J. M., Vaz, M., Durán-Zuazo, V. H.,... & Campostrini, E. (2016). Linking thermal imaging to physiological indicators in Carica papaya L. under different watering regimes. *Agricultural Water Management*, 164, 148-157.
- Malmström, V. H. (1969). A new approach to the classification of climate. *Journal of Geography*, 68(6), 351-357. <https://doi.org/10.1080/00221346908981131>
- Manzanilla-Ramírez, M. A., Velázquez-Monreal, J. J., Bermúdez-Guzmán, M. J., García-Mariscal, K. P., Orozco-Santos, M. y Robles-González, M. M. 2018. Manejo integral del cultivo de limón mexicano en un escenario de alta incidencia de HLB. Folleto para productores No. 20 SAGARPA-INIFAP- CIRPAC, Campo Experimental Tecomán. Tecomán, Colima, México. 26 p.

- MAOTANI, T., MACHIDA, Y., & YAMATSU, K. (1977). Studies on Leaf Water Stress in Fruit Trees VI. Effect of Leaf Water Potential on Growth of Satsuma Mandarin (*Citrus unshiu* MARC.) Trees. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 45(4), 329-334.
- Marcial-Pablo, M. D. J., Gonzalez-Sanchez, A., Jimenez-Jimenez, S. I., Ontiveros-Capurata, R. E., & Ojeda-Bustamante, W. (2019). Estimation of vegetation fraction using RGB and multispectral images from UAV. *International journal of remote sensing*, 40(2), 420-438.
- Mateo, A., Baraldi, R., Berton, A., Cesaraccio, C., Di Gennaro, SF, Duce, P., ... & Zaldei, A. (2016, octubre). Combinación de métodos de detección proximal y remota para mapear las condiciones de estrés hídrico de la vid. En *Simposio internacional sobre la detección del estado del agua en plantas: métodos y aplicaciones en ciencias hortícolas 1197* (págs. 69-76).
- Mateus Cagua, D. M., & Ordúz Rodríguez, J. O. (2012). Generalidades de los cítricos y recomendaciones agronómicas para su cultivo en Colombia. Corporación Universitaria Lasallista.
- Mattar, C., Franch, B., Sobrino, JA, Corbari, CHIARA, Jiménez-Muñoz, JC, Olivera-Guerra, L., ... & Mancini, MARCO (2014). Impactos del albedo de banda ancha en la evapotranspiración real estimada por el modelo S-SEBI en un área agrícola. *Teledetección del medio ambiente* , 147 , 23-42.
- Mendiburu F (2021). *_agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research_*. R package version 1.3-5, <<https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>.
- Meyer, G. E., Hindman, T. W., & Laksmi, K. (1999, January). Machine vision detection parameters for plant species identification. In *Precision agriculture and biological quality* (Vol. 3543, pp. 327-335). SPIE.
- Modica, G., Messina, G., De Luca, G., Fiozzo, V., & Praticò, S. (2020). Monitoring the vegetation vigor in heterogeneous citrus and olive orchards. A multiscale object-based approach to extract trees' crowns from UAV multispectral imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105500.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van-Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed

- simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- Murugan, D., Garg, A., & Singh, D. (2017). Development of an adaptive approach for precision agriculture monitoring with drone and satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12), 5322-5328.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6, 1-15.
- Niu, H., Zhao, T., Wei, J., Wang, D., & Chen, Y. (2021, April). Reliable tree-level evapotranspiration estimation of pomegranate trees using lysimeter and UAV multispectral imagery. In 2021 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech) (pp. 1-6). IEEE.
- Niu, Y., Zhang, L., Zhang, H., Han, W., & Peng, X. (2019). Estimating above-ground biomass of maize using features derived from UAV-based RGB imagery. *Remote Sensing*, 11(11), 1261.
- Ojeda-Bustamante, W., González-Sánchez, A., Mauricio-Pérez, A., & Flores-Velázquez, J. (2017). Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4), 157-166.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Slack, D. C. , & Carrillo, M. (2004). Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*, 53(3), 251-261.
- Ontiveros Capurata, R. E. (2020). Sensores remotos en la agricultura: Evolución y tendencias. Tercer Seminario Temático “La geomática aplicada a la Agricultura de Riego”. 12 de noviembre de 2020. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMIIR). México. 35pp.
- Orduz-Rodríguez, J. O., & Fischer, G. (2007). Balance hídrico e influencia del estrés hídrico en la inducción y desarrollo floral de la mandarina 'Arrayana' en el piedemonte llanero de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 25(2), 255-263.
- Ouattara, T. A., Sokeng, V. C. J., Zo-Bi, I. C., Kouamé, K. F., Grinand, C., & Vaudry, R. (2022). Detection of forest tree losses in cote d'ivoire using drone aerial images. *Drones*, 6(4), 83.

- Padilla, F. L. M., González-Dugo, M. P., Gavilán, P., & Domínguez, J. (2011). Integration of vegetation indices into a water balance model to estimate evapotranspiration of wheat and corn. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1213-1225.
- Park, S., Ryu, D., Fuentes, S., Chung, H., Hernández-Montes, E., & O'Connell, M. (2017). Adaptive estimation of crop water stress in nectarine and peach orchards using high-resolution imagery from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 9(8), 828.
- Pearson, K. (1909). Determination of the coefficient of correlation. *Science*, 30(757), 23-25.
- PENMAN, H.I. (1956). Evaporation: an introductory survey. Netherlands. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, v.4, p.9-29.
- Peña-Barragán, J. M., Ngugi, M. K., Plant, R. E., & Six, J. (2011). Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1301-1316.
- Pérez-Pérez, J. G., Romero, P., Navarro, J. M., & Botía, P. (2008). Response of sweet orange cv 'Lane late' to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. *Irrigation Science*, 26(5), 415-425.
- Pérez-Pérez, J. G., Romero, P., Navarro, J. M., & Botía, P. (2008). Response of sweet orange cv 'Lane late' to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. *Irrigation Science*, 26(5), 415-425.
- Petach, A. R., Toomey, M., Aubrecht, D. M., & Richardson, A. D. (2014). Monitoring vegetation phenology using an infrared-enabled security camera. *Agricultural and forest meteorology*, 195, 143-151.
- Petrides, P., Kyrkou, C., Kolios, P., Theocharides, T., & Panayiotou, C. (2017, June). Towards a holistic performance evaluation framework for drone-based object detection. In *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1785-1793). IEEE.
- Pix4D. (2017, 03 03). pix4d. Obtenido de Soporte: <https://support.pix4d.com/hc/enus/articles/202560579-How-to-automatically-generate-a-Digital-Terrain-Model-DTM-#gsc.tab=0>
- QGIS.org, 2023. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>

- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rahim, H. R. B. A., Lokman, M. Q. B., Harun, S. W., Hornyak, G. L., Sterckx, K., Mohammed, W. S., & Dutta, J. (2016). Applied light-side coupling with optimized spiral-patterned zinc oxide nanorod coatings for multiple optical channel alcohol vapor sensing. *Journal of Nanophotonics*, 10(3), 036009.
- Rana, G., Katerji, N., & de Lorenzi, F. (2005). Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128(3-4), 199-209.
- Rivera-Cabrera, F., Ponce-Valadez, M., Sanchez, F., Villegas-Monter, A., & Perez-Flores, L. (2010). Acid limes. A review. *Fresh produce*, 4(1), 116-122.
- Rivera-Hernández, B., Garruña-Hernández, R., Santamaría-Basulto, F., Andrade-Torres, J. L., Carrillo-Ávila, E., & Andueza-Noh, R. H. (2020). Lime yield (*Citrus× latifolia* Tanaka ex Q. Jiménez) and fruit quality in winter season from orchards maintained with different soil moisture tension. *Agroproductividad*, 13(2).
- Rocuzzo, G., Stagno, F., Ferlito, F., Intrigliolo, F., Cirelli, GL y Consoli, S. (agosto de 2014). Riego deficitario para mejorar la calidad del fruto de la naranja 'Tarocco'. En XXIX Congreso Internacional de Horticultura sobre Horticultura: Sosteniendo vidas, medios de vida y paisajes (IHC2014): 1112 (págs. 179-186).
- Rodríguez-Gamir, J., Primo-Millo, E., Forner, J. B., & Forner-Giner, M. A. (2010). Citrus rootstock responses to water stress. *Scientia Horticulturae*, 126(2), 95-102.
- Rodríguez-Gamir, J., Primo-Millo, E., Forner, J. B., & Forner-Giner, M. A. (2010). Citrus rootstock responses to water stress. *Scientia Horticulturae*, 126(2), 95-102.
- Roger S. Bivand, Edzer Pebesma, Virgilio Gomez-Rubio, 2013. Applied spatial data analysis with R, Second edition. Springer, NY. <https://asdar-book.org/>
- Rosa, R. D., Paredes, P., Rodrigues, G. C., Fernando, R. M., Alves, I., Pereira, L. S., & Allen, R. G. (2012). Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. *Agricultural Water Management*, 103, 62-77.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., & Verma, S. B. (1983). Evaporation and evapotranspiration. *Microclimate-The Biological Environment*, 209-287.

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In. Proceedings 3rd Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium, Vol. 1, pp. 309–317. Washington, DC, USA: NASA SP-351, NASA.
- SAGARPA. 2004. PC-012-2004. Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad selecta en limón Persa. Consultado en: www.méxicocalidadsuprema.org/assets/galeria/PC_012_2004_Limon_persa.pdf
- Sancho-Adamson, M., Trillas, M. I., Bort, J., Fernandez-Gallego, J. A., & Romanyà, J. (2019). Use of RGB vegetation indexes in assessing early effects of Verticillium wilt of olive in asymptomatic plants in high and low fertility scenarios. *Remote Sensing*, 11(6), 607.
- Santos, L.; Ferraz, G.; Diotto, A.; Barbosa, B.; Maciel, D.; Andrade, M.; Ferraz, P.; Rossi, G. Coffee crop coefficient prediction as a function of biophysical variables identified from RGB UAS images. *Agron. Res.* 2020, 18, 1463–1471.
- Sarron, J., Malézieux, É., Sané, C. A. B., & Faye, É. (2018). Mango yield mapping at the orchard scale based on tree structure and land cover assessed by UAV. *Remote Sensing*, 10(12), 1900.
- Saxton, K.; Rawls, W.; Romberger, J. S. and Papendick, R. I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1031-1036.
- Schenk, T. (2005). Introduction to photogrammetry. The Ohio State University, Columbus, 106, 2005.
- Schoofs, H., Delalieux, S., Deckers, T., & Bylemans, D. (2020). Fire Blight Monitoring in Pear Orchards by Unmanned Airborne Vehicles (UAV) Systems Carrying Spectral Sensors. *Agronomy*, 10(5), 615.
- Servín Palestina, M., Tijerina Chávez, L., Medina García, G., Palacios Velez, O., & Flores Magdaleno, H. (2017). Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(2), 423-430.
- Shao, G., Han, W., Zhang, H., Liu, S., Wang, Y., Zhang, L. y Cui, X. (2021). Mapeo del coeficiente Kc del cultivo de maíz utilizando un algoritmo de bosque aleatorio basado en el índice de área foliar y los índices de vegetación multiespectral basados en UAV. *Gestión del agua agrícola*, 252, 106906.

- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference* (pp. 517-524). <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- SIAP, Servicio de Información y Estadística agroalimentaria y pesquera, 2022: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- SIAP, Servicio de Información y Estadística agroalimentaria y pesquera, 2017: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- SIAP, Servicio de Información y Estadística agroalimentaria y pesquera, 2020: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- SIAP, Servicio de Información y Estadística agroalimentaria y pesquera, 2017: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- Silva, B. B. D., Mercante, E., Boas, M. A. V., Wrublack, S. C., & Oldoni, L. V. (2018). Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. *Revista Ciência Agronômica*, 49(2), 221-227.
- Silva, T. T., Guerra, H. O., Silva, B. B. D., Santos, C. L., Guimarães, J. P., & Santos, J. S. D. (2021). Evapotranspiration of banana using the SEBAL algorithm in an irrigated perimeter from the Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(3), 149-155.
- Silva, V. M. A. 2001. *Meteorología e climatología*. Brasilia: INMET, Gráfica y Editora Pax.
- Su, W., Zhang, M., Bian, D., Liu, Z., Huang, J., Wang, W., ... & Guo, H. (2019). Phenotyping of corn plants using unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Remote Sensing*, 11(17), 2021.
- Sumesh, K. C., Ninsawat, S., & Som-ard, J. (2021). Integration of RGB-based vegetation index, crop surface model and object-based image analysis approach for sugarcane yield estimation using unmanned aerial vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105903.

- Swiader, J. M., & Moore, A. (2002). SPAD-chlorophyll response to nitrogen fertilization and evaluation of nitrogen status in dryland and irrigated pumpkins. *Journal of plant nutrition*, 25(5), 1089-1100.
- Tabari, H. (2010). Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, 24(10), 2311-2337. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9553-8>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (No. Ed. 6). Sinauer Associates Incorporated.
- Tang, J., Han, W., & Zhang, L. (2019). UAV multispectral imagery combined with the FAO-56 dual approach for maize evapotranspiration mapping in the north China Plain. *Remote Sensing*, 11(21), 2519.
- Taylor, N. J., Annandale, J. G., Vahrmeijer, J. T., Ibraimo, N. A., Mahohoma, W., Gush, M. B., & Allen, R. G. (2015, June). Modelling water use of subtropical fruit crops: The challenges. In X International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management 1160 (pp. 277-284).
- Taylor, N. J., Mahohoma, W., Vahrmeijer, J. T., Gush, M. B., Allen, R. G., & Annandale, J. G. (2015). Crop coefficient approaches based on fixed estimates of leaf resistance are not appropriate for estimating water use of citrus. *Irrigation Science*, 33, 153-166.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 5594. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., de Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104-113.
- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36.
- Trimble Germany GmbH (2023). Trimble Documentation eCognition Developer 10.1 User Guide; Trimble Germany GmbH: Munich, Germany.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

- Tudela, D., & Primo-Millo, E. (1992). 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid transported from roots to shoots promotes leaf abscission in Cleopatra mandarin (*Citrus reshni* Hort. ex Tan.) seedlings rehydrated after water stress. *Plant Physiology*, *100*(1), 131-137.
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 99-114.
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, *12*, 13-49.
- Unger, D., Kulhavy, D., Busch-Peterson, K., & Hung, I. (2016). Integrating faculty led service learning training to quantify height of natural resources from a spatial science perspective. United States Department of Agriculture [USDA]. (2017). Gain Report of Global Agricultural Information Network: México, Citrus Annual.
- USGS. (2018b). Landsat Data Access Portals. Recuperado el 1 de enero de 2018, a partir de <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/data-tools>
- Vaux Jr, H. J., & Pruitt, W. O. (1983). Crop-water production functions. In *Advances in irrigation* (Vol. 2, pp. 61-97). Elsevier.
- VC Technology Ltd. (2023). Litchi for DJI Drones (4.26.2-g) [Aplicación móvil]. Google Play. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.aryuthere.visionplus&hl=es_MX&gl=US&pli=1
- Vélez, J. E., Álvarez-Herrera, J. G., & Alvarado-Sanabria, O. H. (2012). Water stress on citric fruit (*Citrus* spp.): a review. *Orinoquia*, *16*(2), 32-39.
- Villalobos, F. J., Testi, L., & Moreno-Perez, M. F. (2009). Evaporation and canopy conductance of citrus orchards. *Agricultural Water Management*, *96*(4), 565-573.
- Villalobos, F. J., Testi, L., Orgaz, F., García-Tejera, O., Lopez-Bernal, A., González-Dugo, M. V., ... & Fereres, E. (2013). Modelling canopy conductance and transpiration of fruit trees in Mediterranean areas: A simplified approach. *Agricultural and forest meteorology*, *171*, 93-103.
- Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C., & Strauss, P. (2018). Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study. *Remote Sensing*, *10*(9), 1396.

- Wagner, M., Laborem, G., Marín, C., Medina, G., & Rangel, L. (2002). Efecto de diferentes patrones de cítricas e intervalos de riego sobre la calidad y producción de la naranja Valencia. *Bioagro*, 14(2), 71-76.
- Wang, X., Kang, Q., Chen, X., Fu, Q., & Wang, P. (2020). A Temperature-Domain SEBAL Model Based on a Wind Speed-Independent Theoretical Trapezoidal Space Between Fractional Vegetation Coverage and Land Surface Temperature. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., ... & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 8995-9005.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995). Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, 38(1), 259-269.
- Xu, C. Y., & Chen, D. (2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(18), 3717-3734.
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2000). Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological processes*, 14(2), 339-349.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017.
- Yildirim, B., T. Yesiloglu., M. Incesu., M. Kamiloglu., B. Cimen, and S. Tamer. 2012. Effects of 2,4-DP (2,4dichlorophenoxypropionic acid) plant growth regulator on fruit size and yield of Valencia oranges (*Citrus sinensis* Osb.). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 40(1):55-64. DOI: 10.1080/01140671.2011.604091.
- Yilmaz, B., Çimen, B., Yesiloglu, T., Incesu, M., Kamiloglu, M. U., & Yilmaz, M. (2018). Effects of 2, 4-DP-P (2, 4-Dichlorophenoxypropionic Acid-P) Plant Growth Regulator on Fruit

- Size and Yield of Star Ruby Grapefruit (*Citrus paradisi* Osb.). *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 6(9), 1279-1284.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.
- Zhang, J., Hu, J., Lian, J., Fan, Z., Ouyang, X., & Ye, W. (2016). Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 198, 60-69.
- Zhang, L., Niu, Y., Zhang, H., Han, W., Li, G., Tang, J., & Peng, X. (2019). Maize canopy temperature extracted from UAV thermal and RGB imagery and its application in water stress monitoring. *Frontiers in plant science*, 10, 1270.
- Zhang, L., Zhang, H., Han, W., Niu, Y., Chávez, J. L., & Ma, W. (2022). Effects of image spatial resolution and statistical scale on water stress estimation performance of MGDEXG: A new crop water stress indicator derived from RGB images. *Agricultural Water Management*, 264, 107506.
- Zhang, P., Yi, S., Liu, Y., He, S., Xie, R., Zheng, Y., ... & Deng, L. (2016). Evaluation of spraying effect using small unmanned aerial vehicle (UAV) in citrus orchard. *Journal of Fruit Science*, 33(1), 34-42.
- Zhang, Y., Han, W., Niu, X., & Li, G. (2019). Maize Crop Coefficient Estimated from UAV-Measured Multispectral Vegetation Indices. *Sensors*, 19(23), 5250.
- Zhao, W., Du, S., & Emery, W. J. (2017). Object-based convolutional neural network for high-resolution imagery classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(7), 3386-3396.
- Zhou, L., Gu, X., Cheng, S., Yang, G., Shu, M., & Sun, Q. (2020). Analysis of plant height changes of lodged maize using UAV-LiDAR data. *Agriculture*, 10(5), 146.
- Zhu, W., Sun, Z., Peng, J., Huang, Y., Li, J., Zhang, J., ... & Liao, X. (2019). Estimating maize above-ground biomass using 3D point clouds of multi-source unmanned aerial vehicle data at multi-spatial scales. *Remote Sensing*, 11(22), 2678.

ANEXOS

Cuadro 21. Estimación de requerimientos hídricos diarios.

Día	Balance de humedad diario													
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
Li (mm)	31 0	30 5	300. 2	295. 3	290. 4	335. 5	330. 6	325. 7	320. 8	315. 9	311. 0	306. 1	301. 2	296 .3
ETc (mm)	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
PP (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.4
Riego (mm)	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Pr (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lf (mm)	30 5	30 0	295. 3	290. 4	335. 5	330. 6	325. 7	320. 8	315. 9	311. 0	306. 1	301. 2	296. 3	345 .8

105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
345. 8	340.9	336. 0	331. 1	326. 2	321. 3	316. 4	311. 5	313. 2	308. 3	303. 4	298. 5	303. 9	299. 0	294.1
4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
0	0	0	0	0	0	0	6.6	0	0	0	10.3	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
340. 9	336.0	331. 1	326. 2	321. 3	316. 4	311. 5	313. 2	308. 3	303. 4	298. 5	303. 9	299. 0	294. 1	349.2

120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134
349. 2	344. 3	338. 5	332. 7	326. 9	321. 1	315. 3	309. 5	303. 7	297. 9	292. 1	286. 3	293. 0	287. 2	281. 4
4.9	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.5	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
344. 3	338. 5	332. 7	326. 9	321. 1	315. 3	309. 5	303. 7	297. 9	292. 1	286. 3	293. 0	287. 2	281. 4	345. 6