

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**ANÁLISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES AÉREAS DE
UNA PARCELA DE CULTIVO DE PALTA**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autor: Bach. Miguel Ángel Castillo Guevara

Asesor: Ing. Roger Jesús Coaquira Castillo

CUSCO –PERÚ

2019

PRESENTACIÓN

El presente trabajo centra su estudio en el campo de la agricultura de precisión y el uso de los UAV (vehículos aéreos no tripulados) y cámaras multiespectrales, por lo tanto cabe destacar tres aspectos importantes: primero, la agricultura es una actividad propia de la región del Cusco y se cuenta con un crecimiento agrícola en el valle de Limatambo y las zonas aledañas, donde el cultivo de palta es importante para el comercio a nivel de exportación e importación, como segundo aspecto, los métodos actuales de análisis de cultivo en nuestra región no utilizan herramientas tecnológicas, los agricultores, en su mayoría micro productores, no son capacitados en el uso de tecnologías para la mejora de sus cultivos, estas prácticas conllevarían a una mejora en la producción y reducción de costos operativos, y finalmente el tercer aspecto es sobre el uso adecuado del recurso hídrico, que trae consigo mejora al cultivo y gestión en costo para el productor, esta es la motivación por la cual se realizó la presente tesis.

Con el fin de conseguir este objetivo, el presente trabajo se ha estructurado en seis capítulos además de las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el capítulo I, se describe la situación problemática, se define el problema y se trazan los objetivos general y específicos, se realiza un breve estudio sobre los productos comerciales y soluciones existentes, además de publicaciones científicas relacionadas al tema; se abarca también los justificantes de la investigación y la metodología que utilizaremos para resolver el problema planteado, y se concluye argumentando la viabilidad de la investigación.

En el capítulo II, se presenta el Marco teórico, donde se detalló tres aspectos importantes dentro de la investigación, se inició por el espécimen del cultivo a estudiar, la persea americana o llamada comúnmente palta, detallando su importancia y su reacción en cuanto al estrés hídrico, continuando con las herramientas tecnológicas usadas, el UAV y la cámara multiespectral, precisando sus especificaciones técnicas y como tercer aspecto el procesamiento de imágenes, en la cual se especifican los conceptos previos del mismo y acotamos datos importantes para el desarrollo de la investigación.

En el capítulo III, se basa en la adquisición de datos, comenzando por la secuencia de vuelo, los factores pertenecientes a la zona que se sobrevoló, la programación de vuelo, los parámetros de vuelo, tanto del UAV, como de la cámara multiespectral, el mapa de

vuelo en el terreno de estudio y termina con la muestra de los datos adquiridos en los vuelos a diferentes alturas.

En el capítulo IV, centra su atención en el procesamiento digital de imágenes de los datos adquiridos, con la elaboración del algoritmo utilizado, en el cual se detalló paso a paso cuales fueron los métodos usados, comenzando con el filtrado de imágenes, el cálculo del índice de vegetación, el método de segmentación, la clasificación de objetos y los resultados contenidos en una tabla.

En el capítulo V, se realizó una validación del código utilizado con muestras de hojas que fueron sometidas a estrés hídrico fuera del palto, también se especifica la correlación agronómica, en la cual se describe la apreciación del especialista agrónomo, que estuvo presente en todo el tiempo de estudio y el método de validación que es una comparación cualitativa del algoritmo desarrollado y el software comercial Pix4D (que usamos en tiempo de prueba) y validar los resultados obtenidos.

En el capítulo VI y último, se presentan el presupuesto y costo usado en el presente trabajo detallando minuciosamente los costos de equipos, movilidad, viáticos, etc.

AGRADECIMIENTO

Me faltarían páginas para expresar el agradecimiento a todas las personas involucradas en la realización de este trabajo, pero merecen mi reconocimiento mis padres que con su esfuerzo me ayudaron a terminar mi carrera profesional y me otorgaron la fuerza para no decaer cuando había complicaciones y situaciones imposibles.

Debo agradecer a Dios y a la Virgen, por no dejarme nunca, por guiar mi vida en la senda correcta; agradecer al Toñito que intercede por mí. Agradezco a mi mamita Susana que nunca deja de creer en mí, a mis hermanos que siempre me enorgullecen.

Quisiera también expresar mi más sincero agradecimiento a mi querido docente el ing. Roger Coaquira, el cual no solo me ha guiado como asesor sino como amigo. Por su paciencia, perseverancia y palabras de aliento en cada etapa del desarrollo de esta investigación.

A todos mis docentes de la facultad que con su sabiduría, conocimiento y apoyo me motivaron a desarrollarme como persona y profesional.

A mi familia, que son parte importante en mi vida, fortalecen mi vida y son el cimiento y motivación para seguir adelante.

Por otro lado, un agradecimiento especial a mis amigos, Aleli, por brindarme su amistad y conocimiento en el área biológica, por compartir conmigo esta experiencia, gracias por abrirme la puerta de tu terreno donde realice la investigación, gracias por tu amistad. A Rony, gracias por tu amistad y tú apoyo en la realización de la investigación.

Agradezco a todos que me brindan su amistad y apoyo, gracias por estar ahí.

DEDICATORIA

Dedico este esfuerzo a mi madre querida, porque ella estuvo siempre conmigo de inicio a fin, en las buenas y en las malas, por haberme dado la vida, por confiar en mí y no abandonarme en ningún momento, porque mi madrecita y mis hermanos son mi soporte.

Miguel Angel Castillo Guevara

RESUMEN

El presente estudio desarrolló un método de procesamiento de imágenes multiespectrales de bajo coste para analizar automáticamente el estrés hídrico de un cultivo de palta, utilizando nuevas tecnologías, como son UAV (vehículo aéreo no tripulado) y la cámara multiespectral.

Para ello se realizó un estudio de procesamiento digital, a partir de las imágenes aéreas tomadas con una cámara multiespectral montada sobre un UAV, en un terreno de cultivo de palta, que fue sometido a estrés hídrico durante 4 semanas, la toma de imágenes fue realizada semana tras semana, durante la temporada de sequía (mayo, junio, julio y agosto) de la localidad (Mollepata, Cusco) en la cual se encuentra la parcela, del 19 de mayo del 2019 hasta el 26 de junio del mismo año.

El procesamiento digital de imágenes fue implementado, utilizando el software Matlab, este método está integrado por el pre procesamiento; análisis del índice de vegetación NDVI; segmentación por multiumbralización del método de Otsu; clasificación de objetos y evaluación de resultado. Los resultados obtenidos se presentan en un cuadro en el cual se diferencian los objetos de la parcela y la clasificación del cultivo por semanas sin riego.

Los resultados permitieron estudiar el comportamiento del cultivo de palta cuando es sometido a estrés hídrico por medio de las imágenes aéreas multiespectrales. Finalmente, se correlacionaron los resultados con la apreciación de un especialista en agricultura y se realizó una comparación cualitativa del método desarrollado con el software comercial Pix4D, como método de validación. De esta forma se considera una buena estrategia el análisis por imágenes multiespectrales aéreas del estrés hídrico del cultivo de palta, para optimizar el uso de los recursos hídricos.

Palabra claves: UAV, cámara multiespectral, cultivo de palta, estrés hídrico, Matlab, índice de vegetación NDVI, método de Otsu, Pix4D.

ABSTRACT

This research developed a low-cost multispectral image processing method to automatically analyze the water stress of a avocado crop, using new technologies, such as UAV (unmanned aerial vehicle) and the multispectral camera.

For this, a digital processing study was carried out, from the aerial images taken with a multispectral camera mounted on a UAV, in a avocado cultivation land, which was subjected to water stress for 4 weeks, the image was taken week after week, during the dry season (May, June, July and August) of the town (Mollepata, Cusco) in which the plot is located, from May 19, 2019 until June 26 of the same year.

Digital image processing was implemented, using Matlab software, this method is integrated by preprocessing; NDVI vegetation index analysis; segmentation by multithresholding of the Otsu method; Object classification and result evaluation. The results obtained are presented in a table in which the objects of the plot are differentiated and the crop classification by weeks without irrigation.

The results allowed to study the behavior of the avocado crop when it is subjected to water stress by means of multispectral aerial images. Finally, the results were correlated with the assessment of an agricultural specialist and a qualitative comparison of the method developed with the commercial software Pix4D was performed, as a validation method. In this way the analysis by aerial multispectral images of the water stress of avocado cultivation is considered a good strategy, to optimize the use of water resources.

Keywords: UAV, multispectral camera, avocado cultivation, water stress, Matlab, NDVI vegetation index, Otsu method, Pix4D.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii

CAPITULO I

ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1. Situación problemática.	1
1.2. Definición del problema.	2
1.2.1. Árbol del problema.....	2
1.2.2. Problema general	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Estado del arte.	4
1.4.1. Productos y soluciones existentes	4
1.4.2. Publicaciones científicas/ingenieriles.....	6
1.5. Justificación.	7
1.6. Descripción de la solución propuesta.	8
1.6.1. Descripción.....	8
1.6.2. Metodología de diseño e implementación.....	9
1.7. Viabilidad.	12
1.7.1. Viabilidad técnica.....	12
1.7.2. Viabilidad económica.....	13
1.7.3. Viabilidad social.....	13
1.7.4. Viabilidad operativa	13

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Aspectos generales del estudio de la palta.....	14
2.1.1. Palta.	14
2.1.2. Importancia.....	15
2.1.2.1. Importancia social y económica.....	15
2.1.2.2. Importancia nutritiva.....	16
2.1.2.3. Importancia ecológica.....	17
2.1.3. Estrés hídrico en la palta.....	17
2.2. Vehículos aéreos no tripulados (VANT).....	19
2.2.1. Definición.....	19
2.2.2. Ventajas y limitaciones.....	20
2.3. Descripción de los componentes utilizados.....	21
2.3.1. UAV DJI Matrice 600 Pro.....	21
2.3.2. Cámara multiespectral Parrot Sequoia	22
2.4. Parámetros de vuelo.....	24
2.5. Solapamiento de imágenes	25
2.6. Procesamiento digital de imágenes.	26
2.6.1. Conceptos previos.	27
2.6.1.1. Imagen digital	27
2.6.1.2. Pixel.	27
2.6.1.3. Imagen multiespectral	28
2.6.1.4. Formato TIF	30
2.6.2. Modelos de color.	31
2.6.2.1. Modelo de color RGB	31
2.6.2.2. Modelo de color HSV.	31
2.6.2.3. Modelo de color YCbCr.....	32

2.6.3. Ventajas del filtrado de imágenes.....	33
2.7. Programas de procesamiento.....	34
2.7.1. Matlab.....	34
2.7.2. Agisoft Photoscan.....	35

CAPITULO III

ADQUISICIÓN DE DATOS

3.1. Secuencia de vuelo.....	37
3.1.1. Factores pertenecientes a la zona a sobrevolar.....	37
3.2. Programación de vuelo.....	40
3.2.1. Configuración de parrot sequoia.....	40
3.2.2. Parámetros de vuelo.....	44
3.2.2.1. Parámetros de vuelo – Matrice 600 DJI.....	44
3.2.2.2. Parámetros de vuelo – Parrot Sequoia.....	45
3.3. Mapa de vuelo.....	47
3.4. Datos adquiridos (imágenes tomadas).....	50

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

4.1. Pre procesamiento de imágenes.....	59
4.2. Filtrado de imágenes.....	59
4.2.1. Filtro de la mediana.....	59
4.2.2. Filtro Gaussiano.....	63
4.2.3. Filtro de la media.....	63
4.2.4. Ecuilización por histograma.....	66
4.3. Índices de vegetación.....	70
4.4. Segmentación.....	74
4.4.1. Método de Otsu.....	74
4.4.2. Umbralización.....	75

4.4.3. Multiumbralización.....	77
4.4.4. Prueba del método de segmentación con índice NDVI (imágenes).....	78
4.4.5. Prueba del método de segmentación con índice NDWI (imágenes).....	89
4.4.6. Segmentación por el método de K means.....	99
4.5. Extracción de características (clasificación).....	107
4.5.1. Tablas de clasificación.....	109
4.6. Resultados.....	114
4.6.1. Resultados de clasificación.....	114
4.6.1.1. Tabla de resultados.....	114
4.6.1.2. Curva de resultados en función al índice NDVI y estrés hídrico (expresado en número de días).....	115
4.6.2. Resultados a partir de la linealización de la curva.....	116
4.6.3. Interpretación de los resultados:.....	116

CAPITULO V

MÉTODO DE VALIDACIÓN.

5.1. Prueba del algoritmo con hojas de palto sometidas a estrés hídrico fuera del palto.....	118
5.2. Correlación agronómica.....	123
5.3. Método de validación.....	126
5.4. Análisis del método de validación.....	132

CAPITULO VI

COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

6.1. Costo de implementación.....	134
6.2. Resumen de coste total.....	135
CONCLUSIONES.....	136
RECOMENDACIONES.....	138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
ANEXOS.....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Árbol del problema	2
Figura 2: Mapa conceptual de la metodología de procesamiento de imágenes.....	9
Figura 3: Tabla de datos nutricionales de la palta.	16
Figura 4: Drones y agricultura. Los beneficios de utilizar RPAS.	20
Figura 5: UAV DJI Matrice 600 Pro	22
Figura 6: Cuerpo del sensor Parrot Sequoia.	23
Figura 7: Sensor de sol del sensor Parrot Sequoia, fuente:	24
Figura 8: Diseño geométrico del vuelo fotográfico.....	25
Figura 9 . Ejemplo de Ortofoto en la cual se observa varias fotos sobrepuestas y se unen para formar una más grande.....	26
Figura 10: Pixel en una imagen digital.....	28
Figura 11: Bandas multiespectral de captura del Parrot Sequoia,	28
Figura 12: Bandas multiespectral de captura del Parrot Sequoia	30
Figura 13: Modelo RGB	31
Figura 14: Modelo HSV.	32
Figura 15: Imagen satelital del campo a estudiar.	38
Figura 16: Interfaz del parrot sequoia.....	41
Figura 17: Opción “Status” de Parrot Sequoia.	41
Figura 18: Opción “Gallery” de Parrot Sequoia.	42
Figura 19: Opción “Settings” de Parrot Sequoia.	42
Figura 20: Aplicación DJI GO, en estado de vuelo.....	44
Figura 21: Mapa de vuelo.....	47
Figura 22: Incidencia de la luz solar en la superficie del terreno de estudio.....	48
Figura 23: Funcionamiento de la cámara multiespectral Parrot Sequoia.	49
Figura 24: Imagen del cálculo de parámetros por intervalo de lapso de tiempo.	50
Figura 25: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 19 de mayo del 2019.....	51
Figura 26: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 26 de mayo del 2019.....	51
Figura 27: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 02 de junio del 2019.	52

Figura 28: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 09 de junio del 2019.	52
Figura 29: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 16 de junio del 2019.	53
Figura 30: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 19 de mayo del 2019.	53
Figura 31: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 26 de mayo del 2019.	54
Figura 32: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 02 de junio del 2019.	54
Figura 33: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 09 de junio del 2019.	55
Figura 34: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 16 de junio del 2019.	55
Figura 35: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 19 de mayo del 2019.	56
Figura 36: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 26 de mayo del 2019.	57
Figura 37: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 02 de junio del 2019.	57
Figura 38: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 09 de junio del 2019.	58
Figura 39: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 16 de junio del 2019.	58
Figura 40: Ejemplo de filtro de la mediana.	60
Figura 41: Diagrama de flujo del filtro de la mediana.	61
Figura 42 Imagen en la banda green (verde) 19 de mayo del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.	64
Figura 43 Acercamiento de imagen en la banda green (verde) 19 de mayo del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.	64

Figura 44 Imagen en la banda green (verde) 16 de junio del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.....	65
Figura 45 Imagen en la banda green (verde) 16 de junio del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.....	65
Figura 46: Ejemplo de ecualización por histograma.	67
Figura 47: Índice NDVI en función a plantas.	72
Figura 48: Cálculo del índice NDVI, En la parte superior se aprecian las imágenes en banda NIR y RED, y en la parte inferior la imagen del índice NDVI.	73
Figura 49: Ejemplo de umbralización por el método de Otsu.	76
Figura 50: Índice NDVI 1, segmentado por 4 clases y coloreado.....	79
Figura 51: Índice NDVI 1, segmentado por 6 clases y coloreado.....	79
Figura 52: Índice NDVI 1, segmentado por 12 clases y coloreado.....	80
Figura 53: Índice NDVI 2, segmentado por 4 clases y coloreado.....	80
Figura 54: Índice NDVI 2, segmentado por 6 clases y coloreado.....	81
Figura 55: Índice NDVI 2, segmentado por 12 clases y coloreado.....	81
Figura 56: Índice NDVI 3, segmentado por 4 clases y coloreado.....	82
Figura 57: Índice NDVI 3, segmentado por 6 clases y coloreado.....	82
Figura 58: Índice NDVI 3, segmentado por 12 clases y coloreado.....	83
Figura 59: Índice NDVI 4, segmentado por 4 clases y coloreado.....	83
Figura 60: Índice NDVI 4, segmentado por 6 clases y coloreado.....	84
Figura 61: Índice NDVI 4, segmentado por 12 clases y coloreado.....	84
Figura 62: Índice NDVI 5, segmentado por 4 clases y coloreado.....	85
Figura 63: Índice NDVI 5, segmentado por 6 clases y coloreado.....	85
Figura 64: Índice NDVI 5, segmentado por 12 clases y coloreado.....	86
Figura 65: Índice NDWI 1, segmentado por 4 clases y coloreado.....	89
Figura 66: Índice NDWI 1, segmentado por 6 clases y coloreado.....	89
Figura 67: Índice NDWI 1, segmentado por 12 clases y coloreado.....	90
Figura 68: Índice NDWI 2, segmentado por 4 clases y coloreado.....	90
Figura 69: Índice NDWI 2, segmentado por 6 clases y coloreado.....	91
Figura 70: Índice NDWI 2, segmentado por 12 clases y coloreado.....	91

Figura 71: Índice NDWI 3, segmentado por 4 clases y coloreado.....	92
Figura 72: Índice NDWI 3, segmentado por 6 clases y coloreado.....	92
Figura 73: Índice NDWI 3, segmentado por 12 clases y coloreado.....	93
Figura 74: Índice NDWI 4, segmentado por 4 clases y coloreado.....	93
Figura 75: Índice NDWI 4, segmentado por 6 clases y coloreado.....	94
Figura 76: Índice NDWI 4, segmentado por 12 clases y coloreado.....	94
Figura 77: Índice NDWI 5, segmentado por 4 clases y coloreado.....	95
Figura 78: Índice NDWI 5, segmentado por 6 clases y coloreado.....	95
Figura 79: Índice NDWI 5, segmentado por 12 clases y coloreado.....	96
Figura 80 Ejemplo de aplicación de K means en python.....	99
Figura 81: Índice NDVI 1, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.....	100
Figura 82: Índice NDVI 2, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.....	100
Figura 83: Índice NDVI 3, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.....	101
Figura 84: Índice NDVI 4, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.....	101
Figura 85: Índice NDVI 5, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.....	102
Figura 86: Histograma NDVI 1, 12 contenedores.....	102
Figura 87: Histograma NDVI 2, 12 contenedores.....	103
Figura 88: Histograma NDVI 3, 12 contenedores.....	103
Figura 89: Histograma NDVI 4, 12 contenedores.....	104
Figura 90: Histograma NDVI 5, 12 contenedores.....	104
Figura 91: Aplicación “color threshold”.....	107
Figura 92: Cargar imagen en solo thresholder.....	108
Figura 93: Imagen segmentada en la aplicación, y con el modelo HSV.....	109
Figura 94: Imagen de clasificación.....	110
Figura 95: Imagen de clasificación.....	111
Figura 96: Imagen de clasificación.....	112
Figura 97: Imagen de clasificación.....	113
Figura 98: Imagen de clasificación.....	114
Figura 99: Gráfica de la función linealizada del estrés hídrico en función al índice NDVI.....	115
Figura 100. Imagen de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.....	119

Figura 101. Imagen en banda roja (RED) de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.....	120
Figura 102. Imagen en banda infrarroja (NIR) de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.....	120
Figura 103. Imagen con el índice NDVI de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.....	121
Figura 104. Imagen coloreada por clases a partir del índice NDVI de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.....	122
Figura 105: Transectación de toda parcela de cultivo de palta en la semana 0.....	123
Figura 106: Transectación de parcela de cultivo de palta para la semana 0.....	124
Figura 107: Transectación de parcela de cultivo de palta para la semana 3.....	124
Figura 108: Observación de terreno de parcela de cultivo de palta para la semana 4 sin riego.....	125
Figura 109: Observación de estado de las hojas del palto del cultivo en la semana 4 sin riego.....	125
Figura 110: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 19 de mayo del 2019.....	127
Figura 111: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 19 de mayo del 2019.....	127
Figura 112: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 26 de mayo del 2019.....	128
Figura 113: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 26 de mayo del 2019.....	128
Figura 114: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 02 de junio del 2019.....	129

Figura 115: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 02 de junio del 2019.....	129
Figura 116: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 09 de junio del 2019.....	130
Figura 117: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 09 de junio del 2019.....	130
Figura 118: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 16 de junio del 2019.....	131
Figura 119: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 16 de junio del 2019.....	131
Figura 120: Rango de índice de sequía combinado.....	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Condiciones meteorológicas del mes de mayo y junio del 2019 se resalta la columna de las precipitaciones en donde se muestra que hubo 0 mm en precipitaciones y las filas de las fechas en las cuales adquirimos los datos a procesar.	39
Tabla 2: Equipos disponibles del laboratorio de Robótica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco y equipo móvil perteneciente al tesista.	39
Tabla 3: Tabla referente a la altura y la resolución en tierra (cm/px) de la cámara multiespectral Parrot Sequoia.....	43
Tabla 4: Tabla lapso de tiempo entre toma de imágenes y altura de la cámara multiespectral Parrot Sequoia.....	44
Tabla 5: Tabla de 4 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.	86
Tabla 6: Tabla de 6 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.	87
Tabla 7: Tabla de 12 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.	88
Tabla 8: Tabla de 4 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.	96
Tabla 9: Tabla de 6 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.	97
Tabla 10: Tabla de 12 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.	98
Tabla 11: Tabla con valores del límite superior máximo, mínimo y mediano del histograma por el método de Otsu, y de los valores de los centroides de la segmentación por el método de K-means.....	105
Tabla 12: Tabla de error porcentual del valor del centroide con respecto al valor medio del histograma.	105
Tabla 13: Tabla de error porcentual del valor medio del histograma con respecto al centroide.	106
Tabla 14: Clasificación de imagen segmentada de 1 semana sin riego.....	109
Tabla 15: Clasificación de imagen segmentada de 2 semanas sin riego.	110
Tabla 16: Clasificación de imagen segmentada de 3 semanas sin riego.	111
Tabla 17: Clasificación de imagen segmentada de 4 semanas sin riego.	112
Tabla 18: Clasificación de imagen segmentada de 5 semanas sin riego.	113
Tabla 19: Tabla de clasificación de resultados.....	114
Tabla 20: Tabla de clasificación de resultados por la curva linealizada.	116
Cuadro 21: Cuadro de imágenes tomadas el 23 de octubre del 2019, de hojas sometidas a estrés hídrico por 7 días de un palto.	119

Tabla 22: Resultados por clases de la segmentación en las hojas sometidas a estrés hídrico. Se añadió el valor RGB por clase.	122
Tabla 23: Tabla de análisis del software comercial Pix4D y el algoritmo desarrollado, Fuente: elaboración propia.	133
Tabla 24: Tabla de costos de implementación del estudio realizado., Fuente: elaboración propia.	134
Tabla 25: Tabla de resumen de costo total del estudio realizado.	135

CAPITULO I

ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1. Situación problemática.

- Existe un déficit al momento de realizar análisis a campo abierto de cultivo de palta, esto es debido a que el análisis se realiza con un personal a pie, además este análisis debe ser permanente, si deseamos mejorar la calidad del producto.
- Para poder realizar un análisis de un cultivo se requiere de un personal capacitado en la identificación de índice foliar, detección de plagas, detección de malas hierbas, información de biomasa, estrés hídrico.
- En el caso de grandes áreas de cultivo se requerirá mayor personal y el tiempo de análisis será mayor. El ahorro que genera el uso de las tecnologías de agricultura de precisión, disminuye hasta un 40% de la cantidad de fertilizante usado, aproximadamente \$ 37.5 (dólares) por hectárea, aproximadamente.
- Existe poca eficiencia en el uso de abonos, por la demora que produce el análisis del campo de cultivo, además que el tratamiento diferenciado del terreno genera beneficios rentables al productor.
- Se requiere mayor eficiencia en el uso de insecticidas en las zonas adecuadas, porque el exceso de uso de estos tiene un efecto adverso en contra del medio ambiente.
- El uso de los drones y las cámaras multiespectrales en la agricultura se denomina herramientas de la agricultura de precisión y viene siendo una solución a los problemas de los agricultores, pues estos equipos cumplen la función de optimizar el análisis de los cultivos, sin embargo, se requiere un

análisis de procesamiento digital de imágenes para determinar el estado de producción de un campo de cultivo.

- Ineficiente método de valoración agronómica a campo abierto de cultivo de palta en la región Cusco por parte de los productores.

1.2. Definición del problema.

1.2.1. Árbol del problema

Se presenta el árbol del problema en la figura 1.1, en la cual se especifican las causas primarias, causas secundarias, consecuencias principales, consecuencias secundarias asociadas al problema principal.

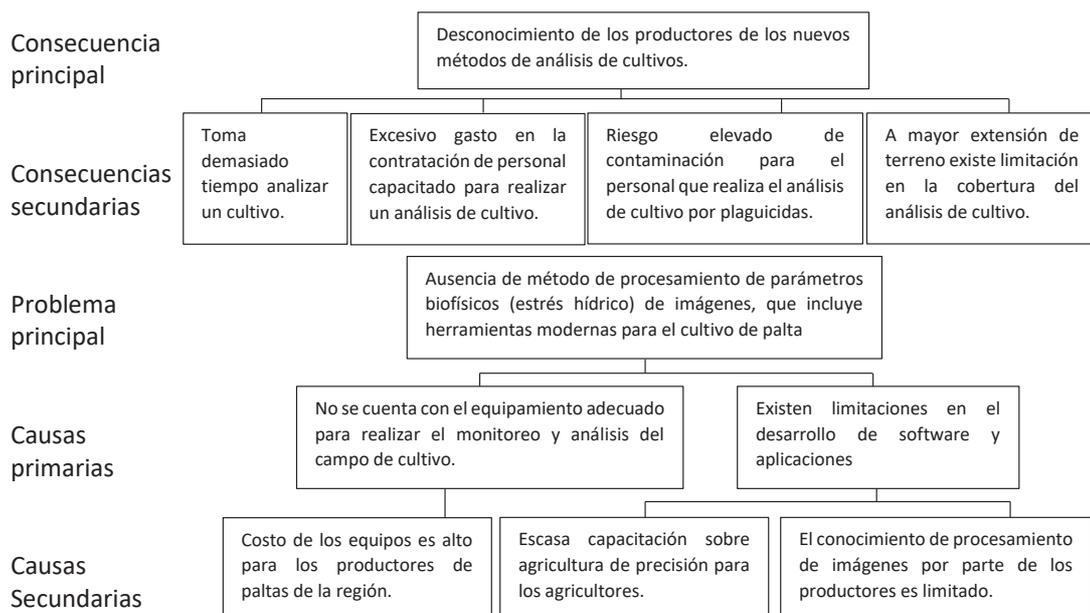


Figura 1: Árbol del problema

Fuente: elaboración propia

1.2.2. Problema general

Se define como problema general a: “Ausencia de método de procesamiento de parámetros biofísicos (estrés hídrico) de imágenes, que incluye herramientas modernas para el cultivo de palta”.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar el procesamiento digital de imágenes aéreas para el análisis automatizado del estrés hídrico del cultivo de palta.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Adquirir datos por medio de secuencias de vuelo del UAV.
- Desarrollar un algoritmo de procesamiento digital de imágenes aéreas para analizar el estrés hídrico.
- Correlacionar los resultados del procesamiento de imágenes con una valoración agronómica en el terreno.

1.4. Estado del arte.

1.4.1. Productos y soluciones existentes

Plan de vuelo

Para realizar el plan de vuelo existen dos soluciones, una es forma automática y la otra es de forma manual, en el presente documento se presentan algunas alternativas principales de softwares para el control de los UAV, los cuales son:

- **Emotion 2:** Es un software de gestión de vuelo de la empresa “senseFly” del grupo “Parrot Group” principalmente para operar el drone “eBee”, genera un plan de vuelo manual y automático para operar UAV.

Fuente: <https://www.sensefly.com/software/emotion/>

- **MissionPlanner:** Es un software desarrollado para Windows para poder realizar la configuración de los equipos y seleccionar el plan de vuelo, para este fin utiliza el Google Maps/ Bings entre otros para el plan de vuelo. Es compatible con los UAV “DJI Phantom 4”, “MicroPilot”, “Ardupilot”, “Microdrones” y otros.

Fuente: <http://ardupilot.org/planner/>

- **DJI Ground control:** Software de la empresa “DJI” cuenta con características de la estación de tierra, es intuitiva y usa Google Maps 3D para control de vuelo automático y manual, además que controla variables físicas (velocidad de vuelo, altura, etc.) a tiempo real }

Fuente: <https://www.dji.com/pc-ground-station>

Procesamiento de imágenes

Para este proceso se cuenta con diferentes softwares comerciales dedicados a la fotogrametría, mapeo y procesamiento de imágenes, estos softwares utilizan imágenes RGB y multiespectrales. Y las procesan de acuerdo a la necesidad del usuario; se presentan algunas alternativas principales de softwares, los cuales son:

- **PIX4D:** Es un software de que utiliza la fotogrametría y algoritmos de visión por computadora para procesar los estados de cultivo, mapeo y diseño 3D, se ha utilizado el software para mapear diferentes locaciones en el mundo. Es compatible con Windows, con servicios cloud (nube) y aplicaciones móviles.

Fuente: <https://www.pix4d.com/>

- **Posflight Terra 3D:** Es un software profesional que procesa las imágenes aéreas en mapas 2D y modelos 3D con una precisión centimétrica, cuenta con herramientas para editar líneas de unión y brillo de imagen, así como la verificación del solapamiento de imágenes.

Fuente: <https://www.precisionfarmingdealer.com/keywords/1139-postflight-terra-3d-photogrammetry-software>

- **Agisoft Photoscan:** Herramienta profesional para fotogrametría, se cuenta con la versión estándar y pro, este software es usada principalmente por arqueólogos y compañías de UAV, compatible con Windows, MacOS y Linux.

Fuente: <https://www.agisoft.com/>

- **QGIS:** Es un sistema de información geográfica de código libre, cuenta con un complemento de procesamiento de imágenes, es compatible con las

plataformas Linux, MacOS, Windows y Android, permite manejar formatos raster y vectoriales.

Fuente: <https://qgis.org/es/site/>

1.4.2. Publicaciones científicas/ingenieriles.

En el siguiente ítem se detallan algunos estudios que sirven como antecedentes del proceso del diseño del algoritmo de análisis de imágenes multiespectrales de cultivo de palta, en torno a lo que falta desarrollar en cuanto a la problemática planteada y de esta forma evitar duplicar esfuerzos.

(C. Portero, 2015) Incorporación de imágenes aéreas en el manejo del cultivo del maíz; C. Portero, M. Mercadel, P. Salas; Universidad de Zaragoza (2015): El artículo detalla la importancia de la incorporación de imágenes aéreas para el manejo del cultivo de maíz, detallando propuestas de cómo aplicarlas en un cultivo de maíz.

(Aventín, 2017) Utilización de sensores multiespectrales e hiperespectrales embarcados en RPAS con el objetivo de dosificar abonos en cultivos, Pedro Caldentey Aventín, Universidad politécnica de Catalunya (2017): En esta tesis el autor detalla que el estudio realizado es en vías de dosificar el abono en determinados campos de cultivo, con el uso de los VANT, cámaras multiespectrales e hiperespectrales, relacionando la disposición foliar y la luz reflejada de la vegetación.

(García-Cervigón, 2015) Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión, Díaz García-Cervigón, Juan José, Universidad Complutense de Madrid (2015): En esta tesis el autor realiza un estudio

usando UAS para demostrar la importancia de la incorporación de estos equipos en la agricultura de precisión, y realiza el estudio de los diferentes parámetros que implica un estudio de un campo de cultivo tales como NDVI, GNDVI, RVI, GV.

(Aja, 2017) Análisis de imágenes multiespectrales aéreas de vegetación, Sara Trueba Aja, Universidad de Cantabria (2015): En esta tesis la autora realiza un análisis en los cultivos, aplicando mediciones para detectar enfermedades en la vegetación utilizando técnicas de medición de NDVI usando UAVs y cámaras multiespectrales, se llegó a la identificación de enfermedades en cultivos y bosques.

1.5. Justificación.

El presente trabajo se justifica a nivel de ingeniería electrónica pues se estudiará minuciosamente el procesamiento de imágenes que es parte del plan curricular de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.

También se justifica a nivel interdisciplinario pues el presente proyecto está relacionado estrechamente con la biología y la agronomía.

Y a nivel social, pues el presente proyecto aportará una herramienta para el monitoreo de cultivo de palta, mejorando el tiempo de valoración agronómica del cultivo.

Con el tratamiento diferenciado, el presente trabajo permitirá a los productores de cultivo de palta de la región del Cusco, que tengan un mejor monitoreo de sus cultivos y mejoren el uso del recurso hídrico.

1.6. Descripción de la solución propuesta.

1.6.1. Descripción

a) Establecer las especificaciones técnicas para la toma de datos

Se analizarán las opciones técnicas más apropiadas para obtener los datos (imágenes).

b) Adquisición de datos por medio de una secuencia de vuelo

Se debe considerar una secuencia de vuelo por puntos de referencia en el campo de cultivo de palta seleccionado, para la captura de datos, considerando los parámetros necesarios para la toma de imágenes.

c) Desarrollo de algoritmo de procesamiento de imágenes

a. Pre procesado de imágenes

A la imagen capturada, se le realizará un pre-procesamiento y corrección de imágenes.

b. Procesamiento de imágenes

A la imagen pre-procesada y corregida, se le realizarán etapas de procesamiento de imágenes que deben de tener el siguiente orden, segmentación, descripción, y clasificación.

c. Validación y resultado

Con la valoración agronómica (clasificación) se realizará el proceso de validación y verificación de resultados.

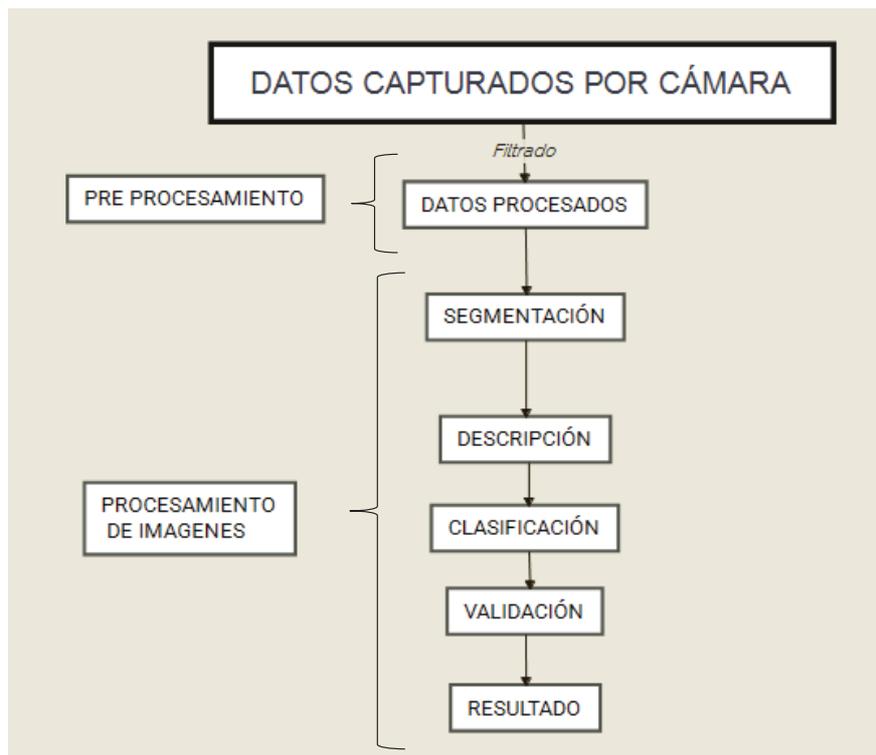


Figura 2: Mapa conceptual de la metodología de procesamiento de imágenes.

Fuente: elaboración propia.

1.6.2. Metodología de diseño e implementación.

A continuación, se detallan las etapas de la metodología de diseño e implementación del análisis de imágenes aéreas multiespectral en una parcela de cultivo de palta:

Etapas 1: Proceso de acoplamiento del drone con la cámara multiespectral

Para este proceso se diseña un soporte (gimbal) de la cámara multiespectral que cumpla con la función de llevar la cámara multiespectral y a su vez deba reducir la vibración propia del vuelo, además se deberá colocar un regulador de tensión para el funcionamiento eléctrico de la cámara multiespectral.

Etapa 2: Planeamiento de vuelo

Haciendo uso del software proporcionado por la cámara multiespectral Parrot Sequoia, se calculan los parámetros principales de vuelo como la velocidad del dron, altura de vuelo y porcentaje de traslape en las fotografías, etc.

Se utiliza el software DJI GO para operar el dron y se cumplen con los parámetros previamente calculados.

Etapa 3: Adquisición de imágenes

Después del cálculo de parámetros se utiliza el software DJI GO para operar el dron y se inicia el vuelo. La cámara multiespectral montada en el UAV se configura previamente para la toma de imágenes en las diferentes bandas espectrales que son rojo, red-edge, infrarojo cercano (nir), verde y RGB, de acuerdo a los parámetros calculados.

Estos datos serán adquiridos durante cinco semanas cada domingo, desde el 19 de mayo del 2019 hasta el 16 de junio del 2019, pues en esta época el terreno se encuentra en temporada de sequía que será corroborado por el reporte del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) y a su vez será sometido a estrés hídrico (no se efectuará ningún riego) durante 4 semanas, para generar este estudio.

Etapa 4: Pre- procesamiento de imágenes

Al término de vuelo, las imágenes adquiridas son descargadas de la memoria de la cámara multiespectral y almacenadas en una base de datos, para iniciar con el pre procesamiento, que detalla la unión de fotos (solapamiento) con

un software aplicado y después son sometidos al inicio del procesamiento de imágenes utilizando el software Matlab, se inicia con la exportación de las fotos a analizar y se aplica el proceso de filtrado, usando las técnicas del filtro de la mediana y la ecualización por histograma.

Etapas 5: Cálculo de índice de vegetación en las imágenes

Después de haber filtrado las imágenes se aplicará la fórmula del índice NDVI usando las imágenes espectrales NIR (infrarojo cercano) y RED (rojo), este índice indica el comportamiento de la vegetación.

Etapas 4: Segmentación usando el método de multiumbralización de Otsu.

Al tener la imagen de la parcela expresada en índice NDVI, se aplica la segmentación basada en el método de Otsu aplicada en el software Matlab, segmentando la imagen con valores numéricos.

Etapas 5: Clasificación (extracción de características).

Con los valores obtenidos se efectuará la clasificación de las imágenes en función al índice NDVI por cada semana, distinguiendo en cada clase las características de las imágenes.

Etapas 6: Correlación agronómica.

En esta etapa se muestran los resultados en comparación con un software comercial en su versión de prueba (PIX4D), dentro de esta etapa el especialista en agronomía, comenta su apreciación, concluyendo con una discusión sobre los resultados.

1.7. Viabilidad.

Se considera que el tema de estudio es viable, pues los componentes necesarios (sensores, UAV, software de procesamiento de imágenes) son comerciales, y se cuenta con ellos pues son parte de un proyecto de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la UNSAAC y no se contempla ninguna inconveniencia para el desarrollo del tema.

1.7.1. Viabilidad técnica.

El proyecto es técnicamente viable por los siguientes justificantes:

- Se cuenta con el conocimiento en el área pues dentro del plan curricular de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad, se llevan los cursos de procesamiento de imágenes.
- En el laboratorio de Robótica donde se realiza el estudio, se cuenta con los equipos (computadoras) para poder desarrollar algoritmos de alta carga computacional, y estos equipos a su vez que cuentan con los softwares necesarios para poder realizar el procesamiento de imágenes.
- Se cuenta con las herramientas necesarias para desarrollar el presente proyecto estas herramientas son cámaras multiespectrales, computadoras, y UAV a disposición para realizar las pruebas correspondientes.
- Se cuenta con experiencia en el desarrollo de algoritmos en programas de procesamiento de imágenes como Matlab.
- Se estableció el contacto con un productor de palta del distrito de Mollepata que accedió al estudio en su terreno, además del sometimiento de estrés hídrico durante cinco semanas para el estudio, se podrá realizar los

viajes al terreno de estudio pues no se encuentra muy lejos de la ciudad del Cusco, para la obtención de las imágenes que luego procesaremos.

- El software de procesamiento Matlab es compatible con el sistema operativo Windows.

1.7.2. Viabilidad económica.

El proyecto es económicamente viable pues se cuenta con el equipamiento necesario tanto software y hardware para poder realizar el proyecto.

Se genera el gasto en los viajes interprovinciales desde la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco al terreno de estudio en Mollepata, este viaje será dentro de la región del Cusco, se debe de considerar el gasto de traslado de equipos (UAV y cámara multiespectral).

También debe ser considerado los gastos probables en cuanto al mantenimiento de los equipos (hardware) y sus repuestos de ser necesarios.

1.7.3. Viabilidad social.

El proyecto es socialmente viable pues implica una reducción al gasto del monitoreo de sus cultivos, pues se reducirá el tiempo de estudio de sus cultivos, acelerando la labor del profesional que desee realizar el estudio sobre el cultivo de palta en cuanto al índice de estrés hídrico.

1.7.4. Viabilidad operativa

El proyecto es viable operativamente pues cumplirá con la estimación del índice de estrés hídrico (parámetros biofísicos), como primer parámetro en cuanto al estudio del cultivo de palta en la región Cusco.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Aspectos generales del estudio de la palta.

2.1.1. Palta.

La palta o comúnmente llamado aguacate es el fruto del árbol del mismo nombre, tiene forma de pera, y en su interior contiene una única semilla redondeada de color claro, de 2 a 4 cm de longitud, que aparece recubierta de una delgada capa leñosa de color marrón.

La palta es originaria de México, Colombia y Venezuela. Los antiguos aztecas lo llamaban ahuacatl (testículo), ya que se le consideraba como un fruto afrodisíaco.

Y los primeros españoles que llegaron a América lo bautizaron con el nombre de «pera de las Indias», por su semejanza externa con las peras españolas.

Las variedades que más se comercializan son: Hass (la más conocida y comercializada; de pequeño tamaño, rugoso y de piel oscura y pulpa amarilla), Bacon (la variedad más temprana, de color verde brillante), Cocktail o dátil (alargado y sin hueso central, de sabor fino y delicado), Fuerte (en forma de pera sin brillo y de piel fina, áspera y sabor exquisito, con un peso aproximado de 250 g) y, por último, la variedad Pinkerton (alargado y con forma de pera, de piel rugosa y sabor agradable).

2.1.2. Importancia.

2.1.2.1. Importancia social y económica.

En el 2018, el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) dio a conocer que el 2017 el Perú exportó 247 mil toneladas de palta, - principalmente variedad Hass - lo que representó un incremento de 27% a lo registrado en el 2016, y **convirtió a nuestro país en el segundo productor mundial de palta.**

Son seis los países (Holanda, Estados Unidos, España, Inglaterra, China y Chile) los que adquirieron el 95% del valor exportado de palta peruana durante el 2017. Por otro lado, la producción nacional de palta superó en el 2017 las 470 mil toneladas, que significó un incremento de 3.4% respecto a lo producido en el 2016, siendo los departamentos de La Libertad, Lima, Ica y Junín los que explican el 80% de la producción nacional.

En el distrito de Limatambo y Mollepata de la provincia de Cusco, se continúa experimentando un crecimiento exponencial en la producción de palta, según el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA). Una evidencia de ello son 1,073 toneladas certificadas por el SENASA para el envío al mercado europeo, asiático y norteamericano.

El SENASA recordó que anteriormente la actividad agroexportadora de palta era mínima en relación a la actual, pero siempre mostró un acelerado crecimiento, según los registros de la institución.

La certificación fitosanitaria del lugar de producción otorgado por la autoridad en sanidad agraria, permite garantizar que la exportación de la palta cumpla con la normativa internacional y los requisitos fitosanitarios exigidos por los países importadores, como son España, Holanda, Suiza, China, Estados Unidos y Canadá.

2.1.2.2. Importancia nutritiva.

La palta se ha convertido en un alimento muy popular entre las personas que buscan un estilo de vida saludable. Se suele etiquetarla como “súper alimento”, esto debido a los beneficios para la salud.

En la siguiente tabla se ven los datos nutricionales de este fruto:

TABLA DE DATOS NUTRICIONALES					
Aguacate Fresco (5 oz. tamaño mediano)	1 porción de aguacate Aprox. 1/5 de aguacate 1 oz. (30g)	% Valor Diario	1.25 porción Aprox ¼ de aguacate 1.25 oz. (37.5g)	2.5 porc. Aprox ½ aguacate 2.5 oz. (75g)	5 porciones Aprox 1 aguacate entero 5 oz. (150g)
Calorías	50		60	130	250
Grasas Totales (g)	4.5	7% DV	6	12	23
Grasas Saturadas (g)	0.5	3% DV	1	2	3
Grasas Trans (g)	0.0		0	0	0
Grasas Poliinsaturadas (g)	0.5		1	1	3
Grasas Monoinsaturadas (g)	3.0		4	7	15
Colesterol (mg)	0.0	0% DV	0	0	0
Sodio (mg)	0.0	0% DV	0	5	10
Potasio (mg)	150.0	4% DV	190	380	760
Total Carbohidratos (g)	3.0	1% DV	3	6	13
Fibra Dietética (g)	2.0	8% DV	3	5	10
Azúcares (g)	0.0		0	0	0
Proteínas (g)	0.0		1	1	3
VITAMINAS					
Folato (mcg o Áµg)	27	6% DV	33.8	67.5	135
Niacina (mg)	0.6	2% DV	0.7	1.4	2.9
Ácido Pantoténico (mg)	0.4	4% DV	0.5	1.1	2.2
Riboflavina (mg)	0.0	4% DV	0.1	0.1	0.2
Vitamina A (IU)	44	1% DV	55	110	220
Vitamina B6 (mg)	0.1	4% DV	0.1	0.2	0.4
Vitamina C (mg)	2.5	4% DV	3.3	6.5	13
Vitamina E (IU)	0.9	4% DV	1.1	2.2	4.4
MINERALES					
Calcio (mg)	4	0% DV	5	10	20
Cobre (mg)	0.1	2% DV	0.1	0.1	0.3
Hierro (mg)	0.2	2% DV	0.2	0.5	0.9
Magnesio (mg)	9	2% DV	11.3	22.5	45
Manganeso (mg)	0.0	2% DV	0.1	0.1	0.2
Fósforo (mg)	16	2% DV	20	40	80
Zinc (mg)	0.2	0% DV	0.3	0.5	1.0

Figura 3: Tabla de datos nutricionales de la palta.

Fuente: <https://imgbin.com/png/dpTm6Wjh/nutrient-hass-avocado-nutrition-facts-label-calorie-png>

2.1.2.3. Importancia ecológica

Las características agroecológicas de la costa peruana, valles interandinos y ceja de selva, ofrecen excelentes condiciones para la producción de la palta; **es posible producir todo el año**, siendo una ventaja competitiva que la mayor concentración de cosechas coincide con la ventana de exportación a países del hemisferio norte. Nuestros productores serán más competitivos en la medida que **hagan uso de los paquetes tecnológicos validados**, las buenas prácticas agrícolas, bajen costos de producción a través de la asociatividad y con ello logren la apertura de nuevos mercados, así como consolidarse en los ya ganados.

(Ministerio de agricultura del Perú, 2008)

2.1.3. Estrés hídrico en la palta

El riego se puede utilizar para controlar el crecimiento vegetativo tanto de árboles jóvenes como adultos, al sufrir déficit hídrico y sobre riego afecta el rendimiento del crecimiento del palto. Un programa bien planeado de riego ayuda a controlar el tamaño de los árboles.

“En palto el tamaño de fruta tiene una significativa importancia económica y este parámetro es principalmente afectado por rendimiento (Adato y Levinson, 1988; Michelakis et al., 1993) y número de frutos en el árbol. Sin embargo, el tamaño de fruta también se puede afectar con el manejo del riego (Ferreyra et al 2012). Cualquier estrés hídrico puede afectar el tamaño de la fruta, principalmente en los primeros 120 días después de plena flor, cuando se define el número de células del fruto (Cowan et al 1997) y queda definido casi totalmente el crecimiento ecuatorial del fruto.

La cantidad de aceite es afectada principalmente por el rendimiento y el tamaño de la fruta de modo que, a mayor tamaño de fruto, mayor contenido de aceite. Como el riego afecta el tamaño de la fruta es difícil evaluar el efecto de esta práctica en el contenido de aceite. No obstante, en fruta uniformemente clasificada según tamaño se pudo observar que intervalos de riego cortos y cargas de agua altas aumentan el contenido de aceite (Lahav y Kalmar, 1977).

No hay información respecto al efecto del riego de invierno sobre el rendimiento, sin embargo, en periodos de sequía, cuando las temperaturas son relativamente altas, el crecimiento de la fruta se reducirá si no se aplica agua. El estrés hídrico en otoño, que se utiliza para mejorar la inducción floral en limones, no sería eficaz en paltos (Lahav y Kalmar, 1983).” (INIA, 2017)

Los requerimientos hídricos del palto: Es un árbol perenne, por lo cual consume agua todo el año siguiendo la curva de demanda hídrica de la zona de cultivo.

El riego adecuado es esencial para el crecimiento del palto, pues el efecto no se limita a la calidad de la fruta antes de la cosecha sino también en el periodo de desarrollo del fruto

Podemos citar también en el estudio de (El estrés hídrico y su influencia sobre la maduración y calidad de fruto de aguacate variedad Hass), que es un tipo de palto similar al estudiado en este estudio, que los frutos de palto provenientes de árboles regados al 50 % y riego normal, durante un periodo de 6 meses, mostraron resultados que por **el agobio del sometimiento a**

estrés hídrico sufrieron manifestaciones de desórdenes fisiológicos que repercuten en la calidad y el acorte de vida útil post cosecha. (Lopez, Cajuste, & Morales, 2010)

2.2. Vehículos aéreos no tripulados (VANT).

2.2.1. Definición.

Como su nombre indica son aeronaves pilotadas por medio de un control remoto a distancia. Su tamaño puede variar de acuerdo al uso que se le pretenda dar, pues existen equipos que caben en la palma de la mano de una persona, así como los que cuentan con el tamaño de una avioneta comercial (como los Predator de las fuerzas armadas de los EE.UU.).

El sistema principal de propulsión que utiliza es por medio de hélices impulsadas por motores eléctricos que son alimentados por baterías internas. Son conocidos popularmente con el nombre de dron, debido al sonido que emiten cuando son usados. Pero el término correcto es VANT por Vehículo Aéreo No Tripulado.

Existen diferencias remarcadas en los tipos de drones, existen los drones de combate (uso militar), uso comercial y uso profesional. Estos equipos pueden portar sensores variados como cámaras de alta resolución, sensores térmicos de gases, multiespectrales y radar, baterías de mayor rendimiento y rutinas avanzadas de vuelo. Dependiendo del uso a dar, puede llegar a ser más costoso. (PITRA(Programa de infraestructura de transporte), 2017)



Figura 4: Drones y agricultura. Los beneficios de utilizar RPAS.

Fuente: <http://www.acgdrone.com/drones-y-agricultura-los-beneficios-de-utilizar-rpas/>

“Los UAV están siendo los preferidos en cuanto al análisis en la agricultura pues estos están superando a los métodos de análisis tradicionales a pie, de satélites y aviones tripulados tal como se muestra en el siguiente cuadro donde se observan algunas comparativas entre aviones tripulados, satélites y UAV”.

2.2.2. Ventajas y limitaciones.

- Una ventaja de los UAV frente a los satélites es que estos tienen mayor facilidad en la toma de imágenes cercanas, pero como limitación frente a los mismos es la extensión que abarcan, pues los satélites abarcan mucho más espacio de estudio.
- Los UAV frente a los aviones y/o avionetas tienen menor costo en cuanto al combustible además no cuentan con un piloto, la ventaja frente a la avioneta es que el UAV puede ingresar a lugares inaccesibles para la avioneta, como inconveniente la cobertura de espacio es una desventaja.

- Se considera como ventaja el vuelo del dron cuando hay situaciones ambientales como cielo nublado o con ligera llovizna, el UAV puede adquirir imágenes en estas situaciones, mientras que las alternativas no pueden adquirir imágenes.
- Al volar a bajas altitudes, la resolución de la imagen tomada mejora considerablemente frente a los otros métodos de toma de datos.
- En cuanto a las desventajas, el tiempo de vuelo, la fuente de energía, el peso y las dimensiones del equipo (UAV) podrían ser un inconveniente para esta solución.
- Una desventaja es que los UAV deben adquirir mayores imágenes para cubrir superficies iguales a las tomas de satélites o avionetas.
- Los UAV con una secuencia de vuelo automático, no tiene capacidad de reacción por lo tanto si ocurren situaciones u obstáculos inesperados, se tendría el riesgo de dañar el equipo.
- Una desventaja propia de los UAV es que puede perder de la señal de radio, el equipo puede sufrir de interferencia y perder la comunicación con el dron y dañar el equipo a falta de control. (Morales Luna, 2017).

2.3. Descripción de los componentes utilizados.

2.3.1. UAV DJI Matrice 600 Pro

Es un hexacoptero (UAV de seis hélices), se detalla a continuación las características técnicas más relevantes para este estudio:

- Máxima carga útil: 6 Kg
- Tiempo de vuelo máximo: sin carga (35 mins) con carga (16 mins)
- Dimensiones: 620 mm x 320 mm x 505 mm

- Batería: LiPo 6S, Voltaje 22.8 V, Capacidad 5700 mAh.
- Frecuencia de operación: 5.725 GHz a 5.825 GHz,
2.400 GHz a 2.483 GHz
- Máxima distancia de operación: sin interferencia u obstáculos (5 km)
Con interferencia u obstáculos (3.5 km)
- Velocidad máxima de 18 m/s (sin viento)
- Resistencia al viento máximo de 8 m/s de viento.
- Capacidad de control manual 5 km (con línea de vista).



Figura 5: UAV DJI Matrice 600 Pro

Fuente: <https://www.dji.com/matrice600/info>

2.3.2. Cámara multispectral Parrot Sequoia

La cámara que se utilizó para el presente estudio es la cámara multispectral Parrot Sequoia, la cámara multispectral se divide en cuerpo y sensor de sol, algunas de las características técnicas más relevantes de cada componente son las siguientes:

- Cuerpo del sensor:
 - 4 cámaras espectrales, 1.2 Mpx 10 bits obturador global.
 - Cámara RGB 16 Mpx.
 - Configuración por Wifi.
 - IMU + magnetómetro.
 - Capacidad de 64 GB.
 - Consumo de energía 5W (12 W pico).
 - Masa 72 g.



Figura 6: Cuerpo del sensor Parrot Sequoia.

Fuente: <https://www.parrot.com/es>

- Sensor de sol:
 - 4 sensores espectrales con los mismos filtros del cuerpo.
 - GPS.
 - IMU+ magnetómetro.
 - Tarjeta SD.

- 1W
- Masa 35 g.

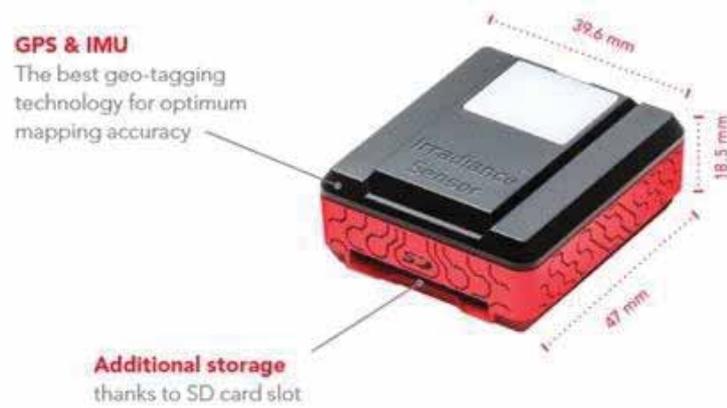


Figura 7: Sensor de sol del sensor Parrot Sequoia, fuente:

Fuente: <https://www.parrot.com/es>

2.4. Parámetros de vuelo

La condición fundamental de toda planificación de vuelo, es la obtención adecuada cobertura fotográfica, con el mínimo de fotografías, esto significa que toda la superficie debe aparecer en las zonas de superposición tanto de fotografías adyacentes de un recorrido como en las áreas superpuestas de recorridos vecinos.

Diseño geométrico del vuelo fotográfico.

Para la planeación de vuelo se puede establecer la relación por triángulos semejantes, que existe entre el espacio imagen y el espacio objeto. Considerando el caso ideal (cuando el terreno es llano y la fotografía es perfectamente vertical).

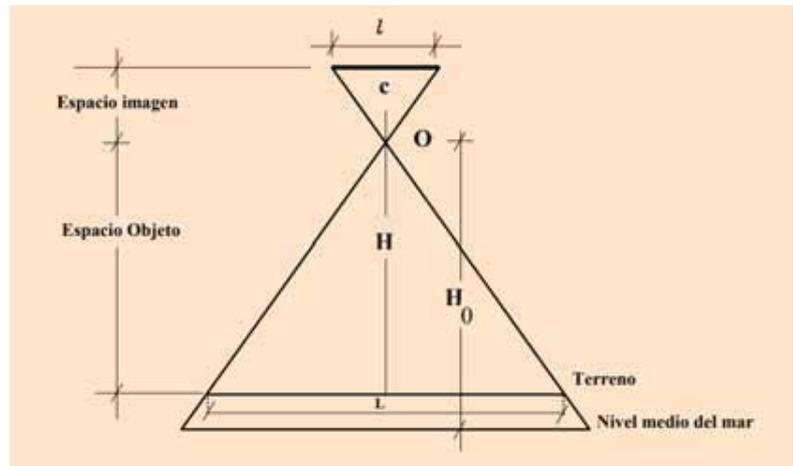


Figura 8: Diseño geométrico del vuelo fotográfico.

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Solapamiento de imágenes

Ortofoto: Es una imagen satelital o fotografía aérea que se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas, que han sido corregidas geoméricamente para presentar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva, de modo que parecen haber sido tomadas desde arriba verticalmente a una distancia infinita.

Se usan principalmente en los sistemas de información geográfica (SIG), Un ejemplo son las imágenes del Google Earth.

Se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas, que han sido corregidas.

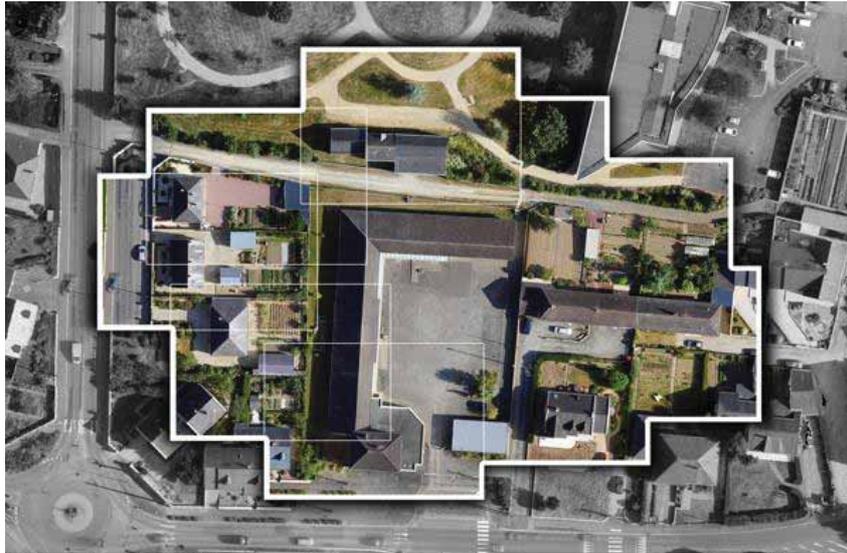


Figura 9 . Ejemplo de Ortofoto en la cual se observa varias fotos sobrepuestas y se unen para formar una más grande.

Fuente: <http://www.heliceo.com/es/servicios-dron/misiones/>

2.6. Procesamiento digital de imágenes.

El procesamiento de imágenes ha sido y es parte del ser humano, pues reconocemos patrones, imágenes, colores en un rango limitado de imagen y colores.

A lo largo de la historia de la humanidad ha evolucionado en el análisis de las imágenes. Hoy en día se realiza el procesamiento incluso con bandas que no podemos observar a simple vista usando softwares especializados en la computadora, por eso aseveramos que el procesamiento de imágenes cuenta con herramientas para su uso y análisis, así mismo de las aplicaciones que puede tener, pues el reconocimiento de imágenes se puede aplicar en agricultura, personas, reconocimiento de patrones y realzamos que las aplicaciones son ilimitadas en esta rama.

Entonces podemos concluir que el procesamiento de imágenes es el conjunto de técnicas matemáticas para el diseño y formulación de los operadores necesarios en

una o varias tareas específicas de realce de patrones, reconocimiento de patrones, ya sean espectrales o espaciales. (Cuevas, Zaldivar, Perez, & RaMa, 2010).

2.6.1. Conceptos previos.

2.6.1.1. Imagen digital

La imagen digital puede ser definida como una función bidimensional " $f(x, y)$ " donde x e y son coordenadas espaciales y la amplitud de f en cada par de coordenadas (x, y) es llamada "intensidad" o "nivel de gris" de la imagen sobre ese punto. Cuando x , y y los valores de f son discretos y finitos, tenemos una "*imagen digital*".

La imagen digital la componen un número finito de elementos y cada elemento cuenta con un sitio y valor asignado, llamados píxeles.

Un parámetro importante de la imagen digital es la resolución, que es la cantidad de píxeles que contiene una imagen, la calidad de la imagen depende de la resolución. (Aguirre Dobernack, 2013)

2.6.1.2. Pixel.

EL pixel es la unidad mínima de visualización o menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital. Si aplicamos el acercamiento a una imagen digital cualquiera podremos observar que está conformada por una rejilla de puntos llamados píxeles. Los dispositivos de captura de imagen (cámaras digitales, escáneres, etc.) capturan las imágenes en forma de cuadrícula de píxeles.

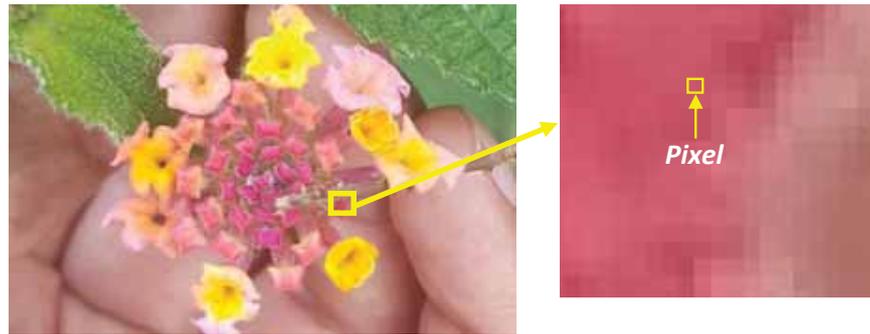


Figura 10: Pixel en una imagen digital.

Fuente: elaboración propia.

2.6.1.3. Imagen multiespectral

La imagen multiespectral es la captura de imagen en rango de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético. Esta imagen aporta información de otras bandas que están fuera del espectro visible. Solo pueden ser capturadas con aditamentos especiales destinados a este objetivo.

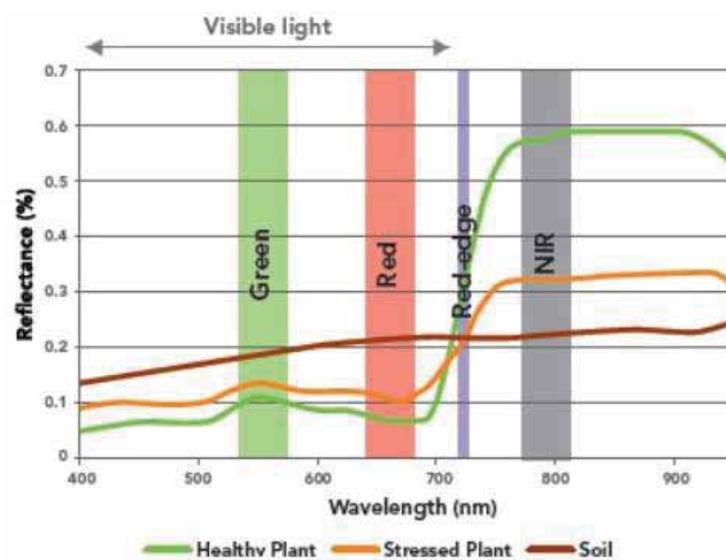


Figura 11: Bandas multiespectral de captura del Parrot Sequoia,

Fuente: <https://tecnitop.com/es/analizamos-la-camara-con-sensor-multiespectral-sequoia/>

- Espectro visible (0,4 - 0,7 μm): Es la región del espectro electromagnético que el ojo humano puede percibir, en este proyecto se usa la banda roja y la banda verde, usando la cámara multiespectral, pues la mayor parte de la radiación incidente se absorbe por parte de los pigmentos de las hojas, mientras que solo el 10% se refleja. Las clorofilas, carotenoides y antocianinas, cuentan con una fuerte absorción en el rojo y el azul, son responsables de la mayoría de la reflectancia. La disminución en los pigmentos y la concentración de nutrientes aumenta la reflectancia en las regiones del rojo y el azul y la disminuye en el verde.
- Infrarrojo cercano (NIR) (0,7 - 1,2 μm): En esta banda se observa que existe una alta reflectancia de las hojas, causada por la estructura interna de la hoja. El 50% de la radiación incidente es reflejada cuando la vegetación es sana, caso contrario cuando la absorción es baja. La caída de las hojas reduce la reflectancia en el NIR.

Por último, la cámara multiespectral evalúa la información espectral de los objetos en varias bandas de ondas relativamente amplias. La cámara Parrot Sequoia captura datos en RGB y las bandas verde, rojo, infrarrojo cercano y rojo fuerte. (Aja, 2017)



Figura 12: Bandas multispectral de captura del Parrot Sequoia

Fuente: manual de Parrot Sequoia.

2.6.1.4. Formato TIF

El formato TIF o TIFF (del inglés Tagged Image File Format, formato de archivo de imágenes con etiquetas) es un formato de archivo para almacenar imágenes de mapa de bits.

El formato TIFF es un formato de gráficos antiguo que permite almacenar imágenes de mapas de bits (raster) muy grandes (más de 4 GB comprimidos) sin pérdida de calidad y sin considerar las plataformas o periféricos utilizados (mapa de bits independiente del dispositivo, conocido como DIB). Permite almacenar imágenes en blanco y negro, en colores verdaderos (hasta 32 bits por píxel) y también indexar imágenes utilizando una paleta. Además de esto, el formato TIF permite que se utilicen varios espacios de color: RGB (rojo, verde, azul), CMYK (cian, magenta, amarillo, negro).

2.6.2. Modelos de color.

Un modelo de color establece un conjunto de colores primarios a partir de los cuales, por medio de combinaciones, se pueden obtener otros colores hasta cubrir todo el espectro visible.

2.6.2.1. Modelo de color RGB

El modelo de color RGB (del inglés Red, Green, Blue; rojo, verde y azul) es uno de los más utilizados por los sistemas informáticos para crear y reproducir los colores en monitores y pantallas. El modelo RGB se representa por la mezcla de los colores: Rojo, Verde y Azul. Este modelo está basado en la llamada “síntesis aditiva” donde los colores son sumados entre sí para conseguir distintos colores, incluyendo el negro y blanco. (Aguirre Dobernack, 2013)

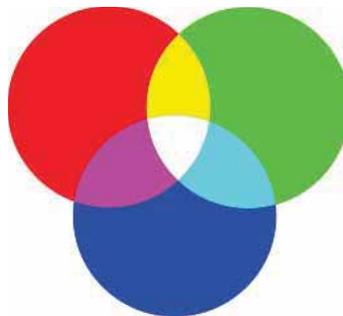


Figura 13: Modelo RGB

Fuente: https://www.ecured.cu/Modelo_RGB

2.6.2.2. Modelo de color HSV.

El modelo HSV (del inglés Hue, Saturation, Value; tono, saturación y valor) añade la saturación, el valor y el tono para conseguir colores, es un sistema coordinado cilíndrico, y el subconjunto donde se define el

color es una pirámide de base hexagonal. En este modelo los colores más brillantes están contenidos en el área hexagonal. Para medir el tono, se usa el ángulo alrededor del eje S. El rojo se sitúa a 0°, el verde a los 120° y el azul a los 240°. Los colores complementarios se encuentran a 180° de su color primario. (Aguirre Dobernack, 2013)

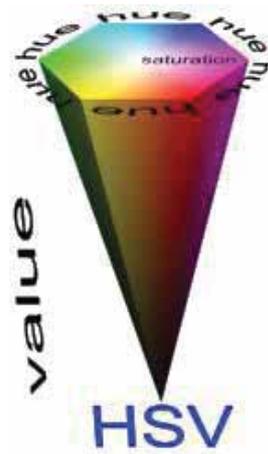


Figura 14: Modelo HSV.

Fuente: <http://mycreativdesign.blogspot.com/2011/05/modelo-hsl.html>

2.6.2.3. Modelo de color YCbCr

El modelo YCbCr es una codificación no lineal del modelo de color RGB, comúnmente usada por los estudios de televisión en Europa y en la compresión de imágenes. En este modelo, se consideran tres parámetros, que son la luminancia (Y) y dos valores diferentes de color (Cb y Cr) que son características del color. La luminancia es la cantidad lineal de luz. La luminancia aparece ponderada por la sensibilidad de la percepción humana con respecto al espectro visible y puede ser calculada como una suma ponderada de los componentes lineales del espacio de color RGB.

La obtención de este modelo de color se obtiene a partir del RGB y por las siguientes formulas:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

$$Cr = R - Y$$

$$Cb = B - Y$$

Siendo R, G y B los valores del color rojo, verde y azul respectivamente.

2.6.3. Ventajas del filtrado de imágenes.

Se detalla las ventajas más importantes del filtrado de imágenes y su importancia, las cuales son:

Corrección: Los equipos utilizados para la toma de datos pueden tener errores, ruidos o distorsiones. Es un proceso imprescindible eliminar o tratar estos, previo a su análisis y procesamiento.

Mejora: El siguiente paso después de la corrección es la mejora. Al tener la imagen corregida podemos hacerla más explícita a través de modificaciones. Es necesario preparar la imagen para poder analizarla, para poder identificar características, para ver propiedades de forma más clara, usando algoritmos para verlos de forma automática. Mejorando la imagen, mejoramos los procesos de “ver” la información que pretendemos obtener, de forma análoga sucede con un observador humano.

Extracción de información: Al tener las imágenes adquiridas en distintas bandas de una imagen, estas pueden emplearse para derivar otros nuevos, tales como variables de tipo físico o pertenencia a clases predefinidas que

pueden identificar los elementos presentes sobre el terreno. Estos procesos implican una interpretación de la imagen en cuestión.

Filtro de suavidad: Estas operaciones de suavizado se utilizan para disminuir los efectos negativos que se pueden presentar en una imagen digital como consecuencia de un sistema de muestreo pobre o del canal de transmisión como por ejemplo ruido.

2.7. Programas de procesamiento.

2.7.1. Matlab.

Matlab es un software de cálculo numérico y de visualización dentro del cual se puede distinguir el análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales y gráficos.

Su entorno es fácil de usar, dentro del cual se puede expresar de forma matemática problemas y soluciones. Originalmente Matlab fue desarrollado para proporcionar un acceso sencillo al software matricial de los proyectos LINPACK y EISPACK (ambos proyectos son lo más avanzado en programas de cálculo matricial). El software Matlab permite resolver muchos problemas numéricos en menos tiempo, a si los resolvemos en otros lenguajes como C o Basic.

En la educación el Matlab se ha convertido en una herramienta de enseñanza para cursos de algebra lineal; en la industria, se usa para investigación y para resolver problemas de ingeniería y aplicaciones en matemática, existe un gran énfasis en aplicaciones de control y procesamiento de señales.

El software Matlab también contribuye con soluciones específicas llamadas TOOLBOXES, que ayudan a los usuarios a solucionar problemas particulares, cabe destacar los procesos siguientes:

- Procesamiento de señales
- Diseño de sistemas de control
- Simulación de sistemas dinámicos
- Identificación de sistemas
- Redes neuronales y otros.

2.7.2. Agisoft Photoscan.

Este es un software autónomo que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales 3D.

Se usa en aplicaciones SIG, documentación de patrimonio cultural y producción de efectos visuales, de igual forma para mediciones indirectas de objetos de diversas escalas.

Este software es de interfaz amigable pues puede ser manejado por novatos en el campo de la fotogrametría y tiene mucho que ofrecer a un especialista que puede usar esta herramienta y ajustarlo al flujo de trabajo de las tareas que requiera y con los diferentes tipos de datos.

Algunas de las principales funcionalidades del software son:

- Exportación de ortofotos georreferenciadas, compatibles con las herramientas SIG, formatos GeoTIFF, archivos KML para la localización en Google Earth.

- Procesamiento de imágenes multispectrales, procesado en RGB, NIR, imágenes térmicas y multispectrales.
- Generación de ortofotos multicanal para el cálculo de índices de vegetación y su exportado.

CAPITULO III

ADQUISICIÓN DE DATOS

3.1. Secuencia de vuelo.

3.1.1. Factores pertenecientes a la zona a sobrevolar.

La planificación de vuelo depende de los siguientes factores:

a) Factores pertenecientes a la zona a sobrevolar:

1. **Uso de la fotografía aérea:** Estudio del índice de estrés hídrico del cultivo de palta.

2. Límites y ubicación de la zona.

Datos generales

Ubicación:

- Coordenadas : 13°31'18.1"S 72°31'40.0"W
- Coordenadas GPS : -13.521689, -72.527788
- Distrito : Mollepata.
- Provincia : Anta.
- Departamento : Cusco.

Medidas:

- Perímetro : 122.25 m
- Área total : 634.22 m²
- Altitud : 2510 msnm.

Mapa perimétrico y área del predio:



Figura 15: Imagen satelital del campo a estudiar.

Fuente: Google Earth.

3. Condiciones meteorológicas y época del año.

Se descargaron las condiciones meteorológicas del mes de Mayo y Junio del 2019 de la localidad de Mollepata, rescatado de la página del SENAMHI Perú.

Fecha	Máx./Mín.	Precip.	Nieve	Previsión	Máx./Mín. media
do. 19/05	22°/2°	0 MM	0 CM		20°/3°
lu. 20/05	21°/1°	0 MM	0 CM		20°/2°
ma. 21/05	20°/1°	0 MM	0 CM		20°/2°
mi. 22/05	19°/4°	0 MM	0 CM		20°/2°
ju. 23/05	21°/3°	0 MM	0 CM		20°/2°
vi. 24/05	21°/1°	0 MM	0 CM		20°/2°
sá. 25/05	21°/3°	0 MM	0 CM		20°/2°
do. 26/05	22°/3°	1 MM	0 CM		20°/2°
lu. 27/05	23°/1°	0 MM	0 CM		20°/2°
ma. 28/05	22°/2°	0 MM	0 CM		20°/2°
mi. 29/05	22°/2°	0 MM	0 CM		20°/2°
ju. 30/05	23°/1°	0 MM	0 CM		20°/2°
vi. 31/05	23°/2°	0 MM	0 CM		20°/2°
sá. 01/06	21°/0°	0 MM	0 CM		20°/2°
do. 02/06	23°/2°	0 MM	0 CM		20°/2°

lu. 03/06	21°/3°	0 MM	0 CM		20°/1°
ma. 04/06	21°/3°	0 MM	0 CM		20°/1°
mi. 05/06	20°/1°	0 MM	0 CM		20°/1°
ju. 06/06	21°/-2°	0 MM	0 CM		20°/1°
vi. 07/06	21°/-3°	0 MM	0 CM		20°/1°
sá. 08/06	22°/-1°	0 MM	0 CM		20°/1°
do. 09/06	22°/3°	0 MM	0 CM		20°/1°
lu. 10/06	22°/2°	0 MM	0 CM		19°/1°
ma. 11/06	22°/2°	0 MM	0 CM		19°/1°
mi. 12/06	22°/2°	0 MM	0 CM		19°/1°
ju. 13/06	23°/2°	0 MM	0 CM		19°/1°
vi. 14/06	23°/3°	0 MM	0 CM		19°/1°
sá. 15/06	22°/2°	0 MM	0 CM		19°/1°
do. 16/06	15°/7°	0 MM	0 CM		19°/1°

Tabla 1: Condiciones meteorológicas del mes de mayo y junio del 2019 se resalta la columna de las precipitaciones en donde se muestra que hubo 0 mm en precipitaciones y las filas de las fechas en las cuales adquirimos los datos a procesar.

Fuente: <https://www.accuweather.com/es/pe/mollepata/262841/june-weather/262841?monyr=6/1/2019&view=table>

2. Factores pertenecientes a la organización ejecutora:

1. Equipo disponible (avión, cámara, material sensible).

Nro.	Descripción	Marca	Modelo
01	Drone DJI Matrice 600	DJI	Matrice 600.
02	Cámara multiespectral Parrot Sequoia	Parrot Sequoia	Cámara multiespectral 4 bandas.
03	Gimbal (soporte de la cámara para acople con el drone)	-	Impreso en 3D, con partes de material en acrílico.
04	Computadora Optiplex 7050	DELL	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador i7-7700. • RAM 16 GB. • Disco duro de 2 TB. • SO: Windows 10, 64 bits • Pantalla de 14".
05	Equipo móvil	Samsung	Galaxy S7 – edge.

Tabla 2: Equipos disponibles del laboratorio de Robótica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco y equipo móvil perteneciente al tesista.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Programación de vuelo.

3.2.1. Configuración de Parrot Sequoia

La configuración se realiza por medio de una conexión Wi-fi, que por defecto esta activa cuando se conecta la cámara a una fuente de alimentación, se puede configurar desde un ordenador, un teléfono móvil o una tableta en nuestro caso se conecta por medio del ordenador. Para realizar las configuraciones debemos seguir estos pasos:

- 1- Se conecta el puerto USB del sensor multiespectral a un dron o a una batería USB.
> Sequoia se enciende automáticamente.
- 2- Se asegura de que la conexión Wi-Fi aparezca en la lista de redes Wi-Fi disponibles.
- 3- Se conecta a la red Wi-Fi: Sequoia_6012.
- 4- Abra su navegador web. En la barra de dirección, introduzca la siguiente dirección: 192.168.47.1
> Se abrirá la interfaz HTML de configuración de Sequoia.
- 5- Ahora configura usando la interfaz de configuración de sequoia

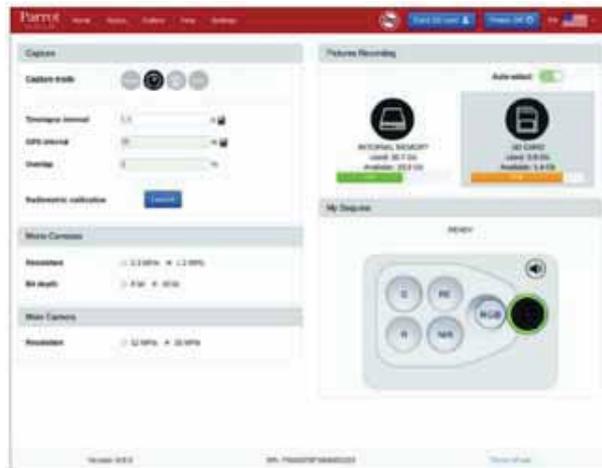


Figura 16: Interfaz del parrot sequoia.

Fuente: configuración Parrot Sequoia

Donde se tiene como botones principales “Home”, “Status”, “Gallery”, “Help”, “Settings”

- Home: En esta pantalla se puede configurar el modo de captura, el modo de las cámaras, observar la memoria interna y memoria SD, así como también el botón de inicio de captura de imágenes.

- Status: En esta pantalla observa a tiempo real el estado de la cámara multispectral Parrot Sequoia.



Figura 17: Opción “Status” de Parrot Sequoia.

Fuente: configuración Parrot Sequoia

- Gallery: En esta opción se puede observar las imágenes tomadas por la cámara y almacenadas en la memoria interna o en la memoria SD de la cámara.

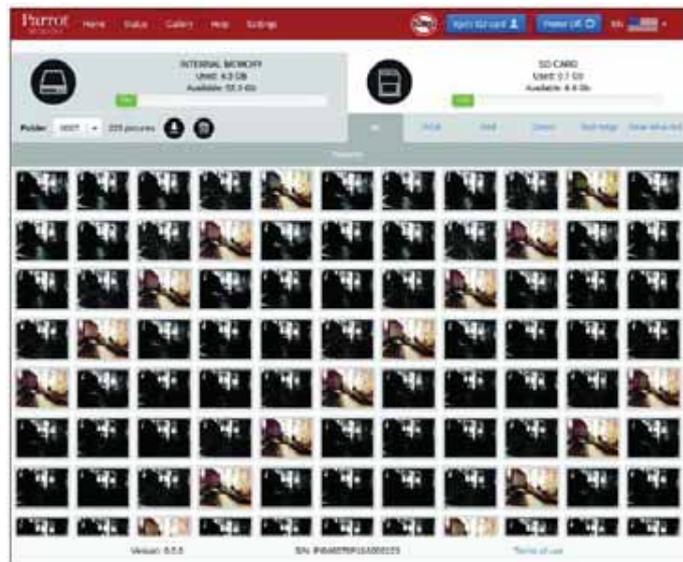


Figura 18: Opción “Gallery” de Parrot Sequoia.

Fuente: configuración Parrot Sequoia

- Help: Es la pantalla de ayuda del parrot Sequoia.
- Settings: Es la pantalla donde se puede realizar configuraciones de la cámara multiespectral, como son el nombre de la red Wifi, “forzar calibración”, “Actualizar parrot sequoia” y finalmente “Restaurar valores de fábrica”.

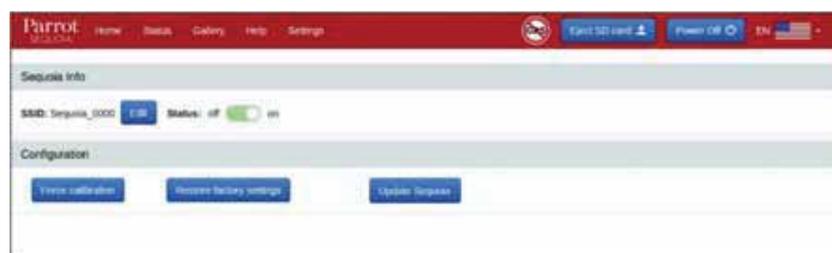


Figura 19: Opción “Settings” de Parrot Sequoia.

Fuente: configuración Parrot Sequoia

La configuración de vuelo del UAV DJI Matrice 600, se establece con la configuración de parámetros de la cámara Parrot Sequoia. Debido a esto se debe tener clara la teoría en cuanto a la resolución de capturas. Para lo cual se utiliza la siguiente tabla (tomada del manual de uso del parrot sequoia) para determinar la altura de vuelo de con la resolución deseada.

Altura (m)	Resolución en tierra (cm/px)	
	Monocromo	RGB
30	3,7	0,8
40	4,9	1,1
50	6,2	1,4
60	7,4	1,6
70	8,6	1,9
80	9,9	2,2
90	11,1	2,4
100	12,4	2,7
110	13,6	2,9
120	14,8	3,3
130	16,1	3,5
140	17,3	3,7
150	18,6	4,1

Tabla 3: Tabla referente a la altura y la resolución en tierra (cm/px) de la cámara multispectral Parrot Sequoia.

Fuente: manual Parrot Sequoia.

Activación de los sensores.

Para la toma de imágenes debe existir un lapso de tiempo entre capturas, para conocer el lapso de toma de imágenes se debe tomar en cuenta el cuadro en función a la altura de vuelo.

Altura (m)	Tiempo entre las capturas			
	5 m/s	10 m/s	13 m/s	20 m/s
30	1,1	0,5	0,4	0,3
40	1,4	0,7	0,5	0,4
50	1,8	0,9	0,7	0,5
60	2,2	1,1	0,8	0,6
70	2,6	1,3	1,0	0,7
80	2,9	1,4	1,1	0,74
90	3,3	1,6	1,2	0,8
100	3,7	1,8	1,4	0,9
110	4,1	2,1	1,6	1,0
120	4,4	2,2	1,7	1,1
130	4,8	2,4	1,9	1,2
140	5,2	2,6	2,0	1,3
150	5,6	2,8	2,2	1,4

Tabla 4: Tabla lapso de tiempo entre toma de imágenes y altura de la cámara multispectral Parrot Sequoia.

Fuente: manual Parrot Sequoia.

3.2.2. Parámetros de vuelo.

3.2.2.1. Parámetros de vuelo – Matrice 600 DJI

Se utilizó un programa de vuelo de programación de vuelo manual, pues no se cuenta con un programa especializado para el vuelo automático, se utilizó la aplicación Android DJI GO, dentro de un equipo móvil, en donde se puede visualizar la trayectoria por medio de mapa GPS.

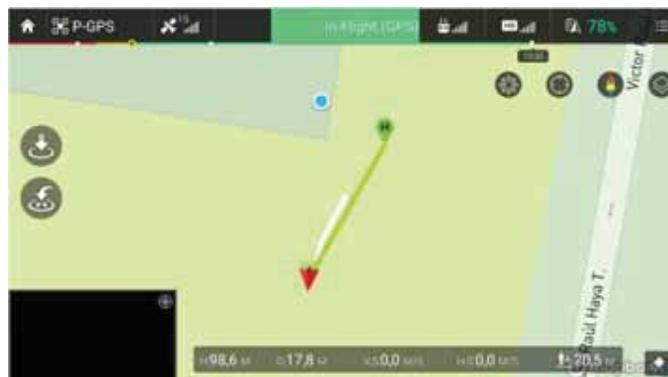


Figura 20: Aplicación DJI GO, en estado de vuelo.

Fuente: DJI GO app.

La aplicación para Android “DJI GO” cuenta también con algunos parámetros importantes para poder llevar a cabo el vuelo, parámetros que son visualizados en su pantalla de inicio, entre los cuales destacan:

- Estado de batería: muestra la cantidad de energía que le queda a la batería en %.
- Tiempo de vuelo: muestra el tiempo de vuelo.
- Altura de vuelo (H): muestra la altura de vuelo a tiempo real.
- Velocidad vertical (V.S.): muestra la velocidad vertical, ya sea en subida o en bajada.
- Velocidad horizontal (H.S.): muestra la velocidad horizontal, en cualquier dirección.

3.2.2.2. Parámetros de vuelo – Parrot Sequoia

Se utiliza los parámetros del Parrot Sequoia para la toma de datos y se realizó el cálculo de los parámetros de la cámara multiespectral.

El equipo Parrot Sequoia cuenta con una herramienta (calculadora), para la toma de datos, esta herramienta tiene dos opciones:

- a) **Cálculo automático del intervalo de lapso de tiempo:** donde se consideran como constantes los siguientes parámetros:
 - Velocidad de vuelo (m/s): velocidad con la cual el UAV debe de ser maniobrado.
 - Altura (m): altura del UAV para realizar la toma de imagen.
 - Traslape requerido (%): espacio entre imagen e imagen para no perder detalles sobre la misma.

Y genera como variables dependientes a los siguientes parámetros:

- Tiempo entre captura de imagen a imagen (s).
- Espacio entre toma y toma de imagen (m).
- Espacio requerido en la memoria interna de la cámara por hectárea en MB.

b) **Cálculo automático de la distancia GPS:** donde se consideran como constantes los siguientes parámetros:

- Altura (m): altura del UAV para realizar la toma de imagen.
- Traslape requerido (%): espacio entre imagen e imagen para no perder detalles sobre la misma.

Y genera como variables dependientes a los siguientes parámetros:

- Distancia de captura entre toma y toma de imagen.
- Espacio entre toma y toma de imagen.
- Espacio requerido en la memoria por hectárea en MB.

3.3. Mapa de vuelo.

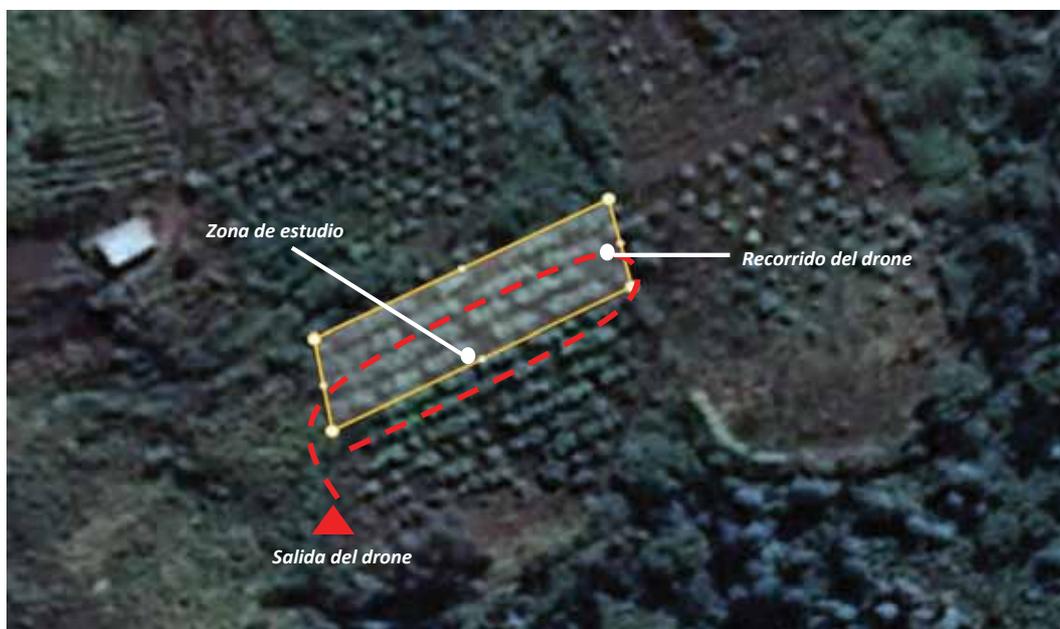
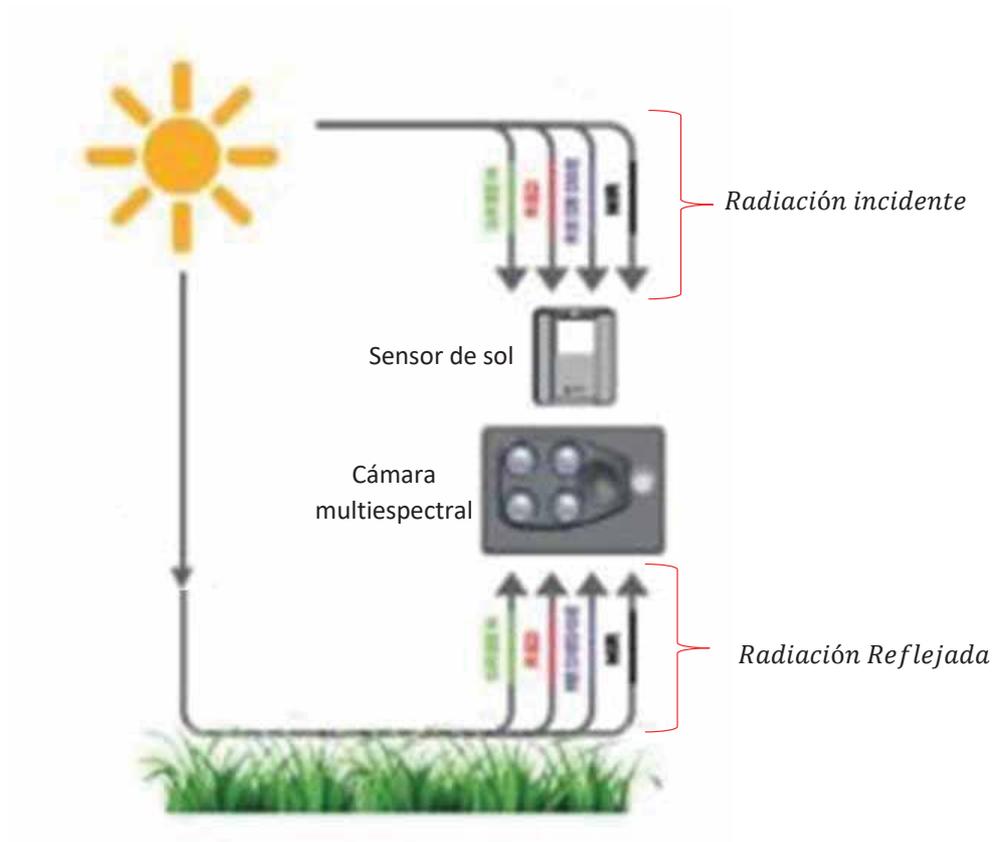


Figura 21: Mapa de vuelo.

Fuente: elaboración propia.

Funcionamiento de la cámara multispectral Parrot Sequoia:

$$\text{Reflectancia } (\lambda_1) = \frac{\text{Radiación Reflejada } (\lambda_1)}{\text{Radiación incidente } (\lambda_1)}$$

Figura 23: Funcionamiento de la cámara multispectral Parrot Sequoia.

Fuente: elaboración propia

3.4. Datos adquiridos (imágenes tomadas).

Para hallar los parámetros de vuelo se utiliza el cálculo de “*modo de intervalo de tiempo*”, a continuación, se detallan los pasos a seguir para establecerlos:

1.- Se selecciona el “*modo de intervalo de tiempo*” en configuración de la cámara.

2.- Se hace un clic sobre el símbolo  para el cálculo de parámetros.

3.- Se colocan las variables elegidas, en nuestro caso, por ejemplo:

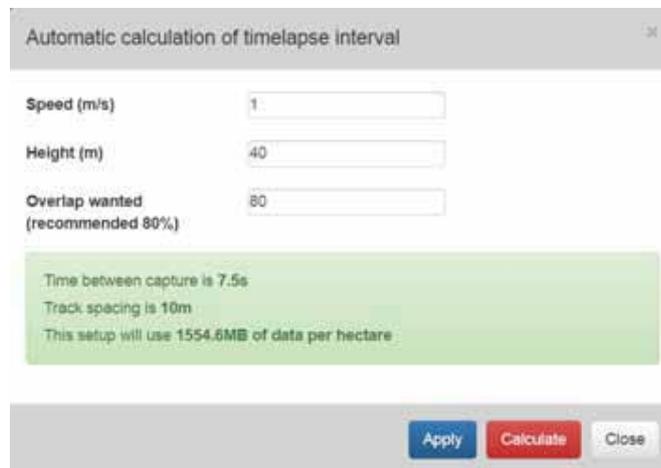


Figura 24: Imagen del cálculo de parámetros por intervalo de lapso de tiempo.

Fuente: Parrot Sequoia configuración.

4.- Se hace clic en “*Calculate*” para el cálculo de los parámetros y finalmente en “*Apply*” que colocara los parámetros para el vuelo.

a) Parámetros a altura de vuelo = 50 m

Velocidad (m/s)	1 m/s
Altura (m)	50 m
Traslape requerido (%)	80 %
Tiempo entre captura (s)	9.3 s
Espacio entre capturas (m)	12.5 m
Espacio en MB por hectárea	994.9 MB

Imagen capturada:

Figura 25: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 19 de mayo del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 26: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 26 de mayo del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 27: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 02 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 28: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 09 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 29: Dato adquirido a 50 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 16 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia

b) Parámetros a altura de vuelo = 70 m (análogamente se repiten los procedimientos de la toma de datos de la parte a)

Velocidad (m/s)	1 m/s
Altura (m)	70 m
Traslape requerido (%)	80 %
Tiempo entre captura (s)	13.1 s
Espacio entre capturas (m)	17.5 m
Espacio en MB por hectárea	507.6 MB

Imagen capturada:



Figura 30: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 19 de mayo del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 31: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 26 de mayo del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia.



Figura 32: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 02 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 33: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 09 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia.



Figura 34: Dato adquirido a 70 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 16 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia

c) Parámetros a altura de vuelo = 100 m (análogamente se repiten los procedimientos de la toma de datos de la parte a)

Velocidad (m/s)	1 m/s
Altura (m)	100 m
Traslape requerido (%)	80 %
Tiempo entre captura (s)	18.7 s
Espacio entre capturas (m)	24.9 m
Espacio en MB por hectárea	248.7 MB

Imagen capturada:



Figura 35: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 19 de mayo del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 36: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 26 de mayo del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 37: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 02 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 38: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 09 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia



Figura 39: Dato adquirido a 100 m de altura por la cámara Parrot Sequoia, fecha: 16 de junio del 2019.

Fuente: Galería de Parrot Sequoia

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

4.1. Pre procesamiento de imágenes

a) Importar la imagen a Matlab

Los datos adquiridos se encuentran en el formato GeoTIF por lo cual se debe de usar una función adecuada para la exportación al software de procesamiento.

Función “*imread*”: Es una función de Matlab que permite leer un archivo de imagen, en nuestro caso, los archivos de imágenes tomadas en extensión GeoTIF.

4.2. Filtrado de imágenes.

4.2.1. Filtro de la mediana

Se debe tener especial cuidado al momento de filtrar pues los filtros de suavizado lineales o filtros pasa bajo tienden a difuminar los ejes de las imágenes a causa de las altas frecuencias y son atenuados. La preservación y posible realce de detalles son muy importantes al filtrar. Cuando el objetivo es más la reducción de ruido que el difuminado, usar el filtro de la mediana es una posibilidad alternativa.

El filtro de la mediana se usa para eliminar el ruido en la imagen, el filtro de la mediana revisa cada pixel y lo reemplaza por la mediana de los pixeles vecinos. Se calcula ordenando los valores de los pixeles vecinos en orden y seleccionado el que queda en medio. Este filtro genera un efecto de suavizado en la imagen, pertenece al tipo de filtro estadístico, no lineal. (Cuevas, Zaldivar, Perez, & RaMa, 2010).

Considerando $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son datos de una muestra ordenada en orden creciente, la mediana quedaría definida como:

$$M_e = \frac{x_{n+1}}{2} \quad (4.1)$$

Si n es impar será M_e , la observación central de los valores, una vez que éstos han sido ordenados en orden creciente o decreciente. Si n es par será el promedio aritmético de las dos observaciones centrales, esto es:

$$M_e = \frac{\frac{x_n}{2} + \frac{x_{n+1}}{2}}{2} \quad (4.2)$$

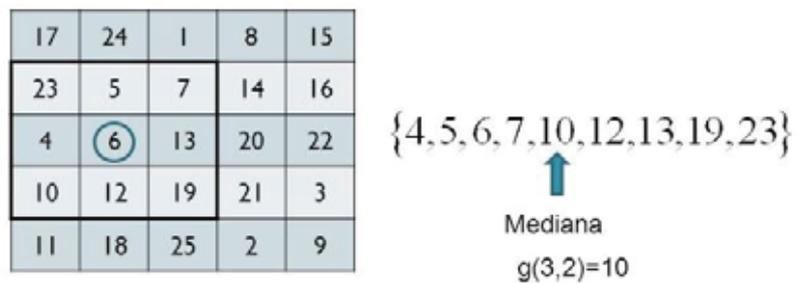


Figura 40: Ejemplo de filtro de la mediana.

Fuente: <https://slideplayer.es/slide/3421896/>

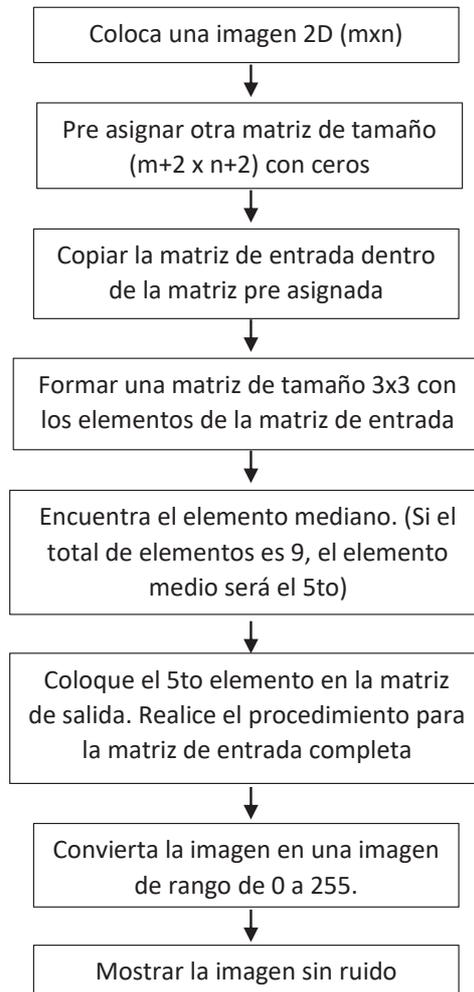
Diagrama de flujo:

Figura 41: Diagrama de flujo del filtro de la mediana.

Fuente: <https://www.imageprocessing.com/2011/03/matlab-program-2d-median-filtering-for.html>

Código de Matlab:

```

% Leer la imagen de pingüino
P=imread('penguins.jpg');
title('Imagen con ruido de sal y pimienta');
figure,imshow(P);

%Colocar alrededor de la matriz ceros
modifyP = zeros(size(P)+2);
Q = zeros(size(P));

%Copiar la matriz original con la matriz de relleno
for x = 1 : size(P,1)

```

```

        for y = 1 : size(P,2)
            modifyP (x+1,y+1) = P(x,y);
        end
    end
end
% Dejamos el arreglo y almacenamos los valores de la matriz
3x3
% Luego se ordena y encontramos el valor medio

for I = 1 : size(modifyP,1)-2
    for j = 1 : size(modifyP,2)-2
        window = zeros(9,1);
        inc = 1;
        for x = 1:3
            for y = 1:3
                window(inc) = modifyP(i+x-1,j+y-1);
                inc = inc+1;
            end
        end

        media = sort(window);
        %Ubicamos el elemento medio en la matriz Q
        Q(i,j) = media(5);

    end
end
end
% Convertimos la matriz a imagen con un rango de 0 a 255
Q = uint8(Q);
title ('Imagen despues del filtro de la mediana');
figure , imshow(Q);

```

Aplicación del filtro de la mediana en el estudio:

```
im_nir5 = imread('IMG_190616_135515_0025_NIR.tif'); % lectura de la
imagen en banda NIR
```

```
n5 = imrotate(im_nir5,9.4,'bilinear','crop');% Para la clasificación se realiza
la rotación de la imagen, [J = imrotate(I,angle,method,bbox)], donde I es la
imagen leída 'im_nir5', '9.4' el ángulo de inclinación, 'bilinear' el método
de interpolación, 'crop' el cuadro delimitador que define el tamaño de la
imagen.
```

```
rec_nir5=imcrop(n5,[376 484 260 477]); % para la clasificación se recorta
la imagen, [J = imcrop(I,rect)] recorta la imagen según donde I es la imagen
a recortar y rect son en términos de coordenadas espaciales rect[xmin ymin
width height] La imagen recortada incluye todos los píxeles de la imagen de
entrada que están completamente encerrados por el rectángulo.
```

```
fotonir5 = medfilt2(rec_nir5); %filtro de la mediana
```

4.2.2. Filtro Gaussiano

Promedia diferentes pesos los valores vecinos a ambos lados de dicho punto. Determina los bordes, sirve para emborronar imágenes y reduce el ruido gaussiano (produce pequeñas variaciones en la imagen, ruido en la digitalización), sirve para emborronar imágenes.

Utiliza la función Gaussiana:

$$G(x, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.3)$$

4.2.3. Filtro de la media

Evalúa el promedio de los valores de pixeles de una matriz, el resultado de este promedio sustituye el valor del pixel central de esta. Después de realizar este filtrado los bordes se hacen borrosos.

Ejemplo 01: En el presente ejemplo se somete a la imagen 39 de banda verde (a) de fecha 19 de mayo del 2019 a los filtros suavizantes de mediana (b), Gauss (c) y media (d). En la figura se observan las imágenes, pero no se muestra ningún cambio aparente, se realizó un acercamiento en la figura 40 y se evidencia los resultados en donde la mediana (b), se observa una mejora en cuanto al ruido, en (c) se observa que se mantiene el ruido y en la (d) se difuminan los bordes de la plantación.

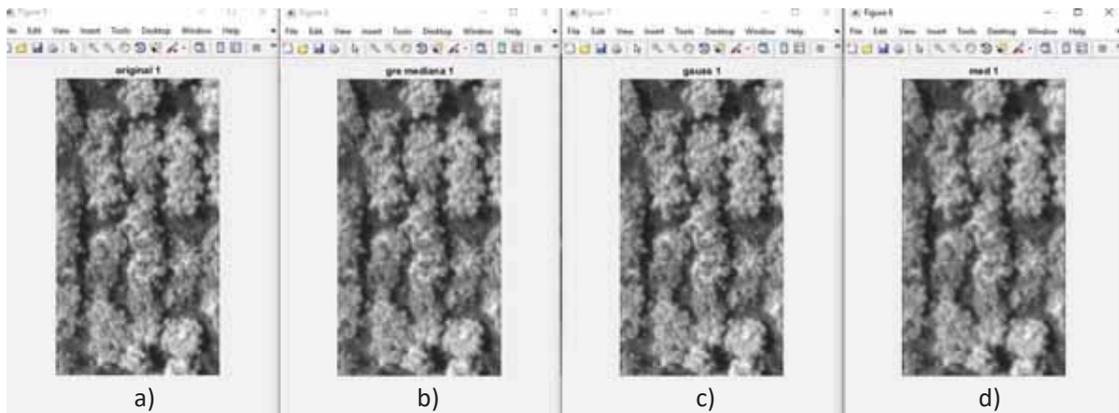


Figura 42 Imagen en la banda green (verde) 19 de mayo del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.

Fuente: elaboración propia.

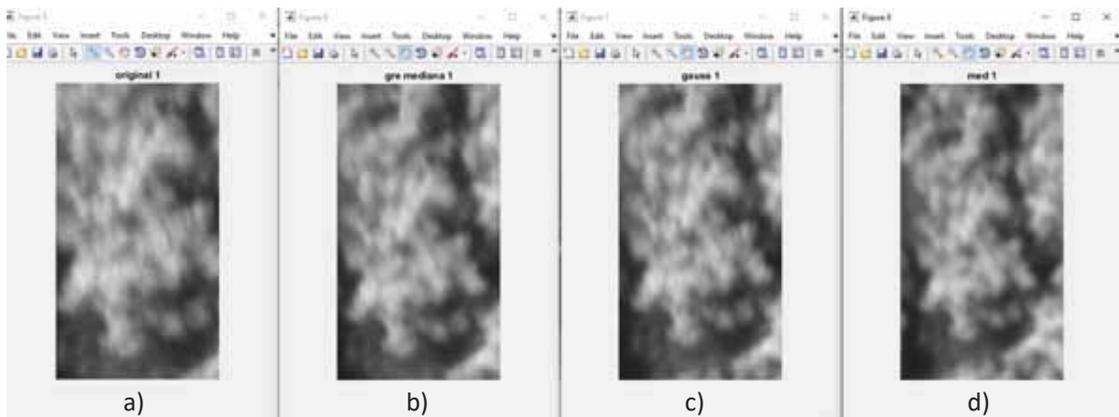


Figura 43 Acercamiento de imagen en la banda green (verde) 19 de mayo del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.

Fuente: elaboración propia.

Ejemplo 02: Análogamente al ejemplo 01 se evidencian las mismas características y resultados del ejemplo 01, en las figuras 41 y 42. Y se comprueba que el mejor método de filtrado usado para este estudio es el filtro no lineal de la mediana.

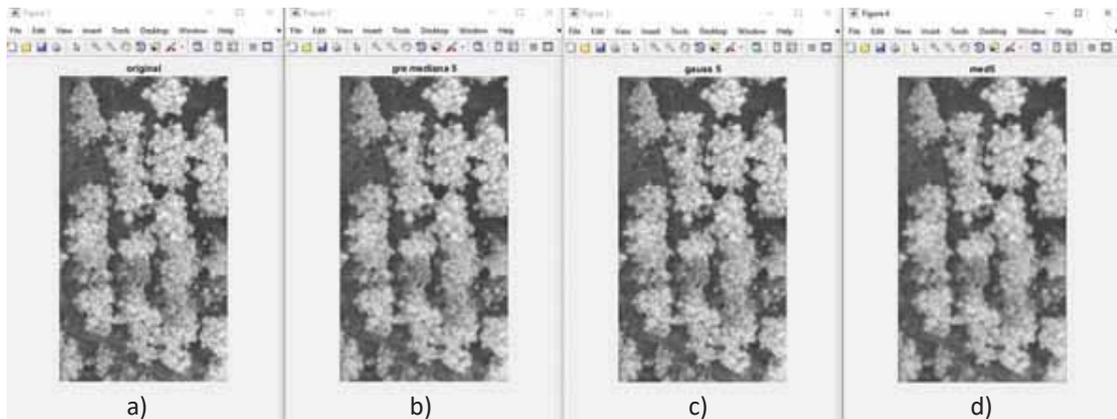


Figura 44 Imagen en la banda green (verde) 16 de junio del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.

Fuente: elaboración propia.

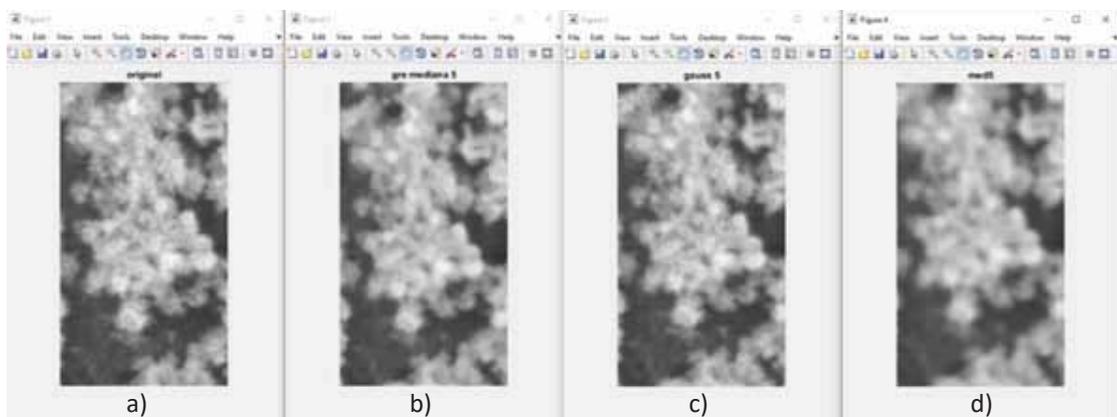


Figura 45 Imagen en la banda green (verde) 16 de junio del 2019; a) imagen banda verde original, b) imagen banda verde filtrado por método mediana, c) imagen banda verde filtrada por método de Gauss, d) imagen banda verde filtrada método de media.

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Ecuación por histograma

En cualquier función continua se pueden aplicar transformaciones para maximizar el proceso de explotación de información, estos procesos se pueden aplicar sobre información discreta. Estos procesos se pueden aplicar al uso de los histogramas, puede mejorar la imagen en varias etapas.

El proceso de ecualización de histograma, que es una técnica de pre procesamiento parte de la función de distribución de la imagen. Se define para variables aleatorias discretas, como la suma de probabilidades desde el inicio de la variable hasta un valor prefijado. Por lo tanto, la sumatoria de la función en todo el espectro de la variable aleatoria independiente es la unidad:

$$F(r) = \sum_{i=0}^r p(i) \quad (4.4)$$

$$F(I - 1) = \sum_{i=0}^{I-1} p(i) = 1 \quad (4.5)$$

En este caso, la probabilidad de la variable aleatoria corresponderá con la probabilidad de que aparezca el nivel gris i en la imagen. La función de distribución de una imagen estará determinada por el histograma acumulado relativizado por el tamaño de la imagen.

Sea $F(r)$ la función de distribución de una imagen cualquiera. Un histograma uniforme se caracterizará por tener:

$$F(r') = \sum_{i=0}^{r'} p(i) = (r' + 1) \frac{1}{I} \quad (4.6)$$

Siendo $F(r')$ la función de distribución uniforme. Para la ecualización del histograma se debe igualar las funciones de distribución que posee la imagen con la función de distribución deseada. Con esta relación se establece la función de transferencia del histograma, de r a r' :

$$F(r') = F(r) \Rightarrow (r' + 1) \frac{1}{I} = F(r) \Rightarrow r' = F(r) \cdot I - 1 \quad (4.7)$$

El carácter discreto de la variable supondrá una aproximación a una densidad uniforme. (Rafael C. Gonzales, 1996)

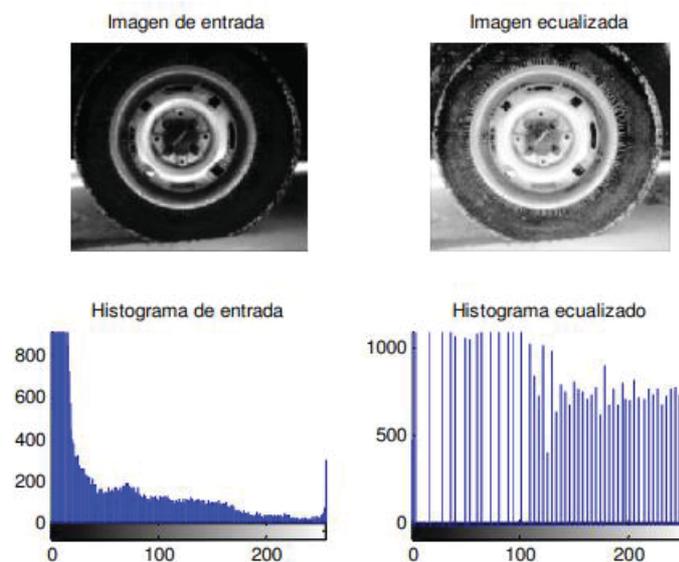


Figura 46: Ejemplo de ecualización por histograma.

Fuente: Help de Matlab. <https://slideplayer.es/slide/3421896/>

Pasos para realiza una ecualización de histograma:

Con la ecualización del histograma se mejora la imagen, esto se logra redistribuyendo los valores de gris de manera uniforme. Considerando valores que oscilan entre 0 y 255.

1. Encuentra el valor de la frecuencia de cada pixel

Considerando un matriz $A = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 5 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 4 \end{bmatrix}$ sin contenedores = 5.

El pixel de valor 1 ocurre 3 veces.

Análogamente el pixel de valor 2 ocurre 2 veces y continuamos.

2. Encuentra la probabilidad de cada frecuencia

La probabilidad de que ocurra el valor de pixel 1 = frecuencia (1) / N° de pixeles.

Ejemplo: 3/9

3. Encuentra el histograma acumulado de cada pixel:

Histograma acumulado de 1 = 3

Histograma acumulado de 2 = Histograma acumulado de 1 + Frecuencia de 2 = 5

Histograma acumulado de 3 = Histograma acumulado de 2 + frecuencia de 3 = 5+1 = 6

4. Encuentra la probabilidad de distribución acumulada (pda) de cada pixel:

pda de 1 = histograma acumulado de 1 / N° de pixeles = 3/9.

5. Calcule el valor final de cada pixel multiplicando pda con (número de valores); pda de 1 = (3/9)*(5) = 1.6667. Redondee el valor.

6. Ahora reemplace los valores finales: $\begin{bmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 5 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}$

El valor final para el pixel de valor 1 es 2. Se coloca en lugar de los valores 1 en la matriz.

Código de Matlab:

```

% LEER UNA IMAGEN 2D
A=imread('zebra.jpg');
title('IMAGE');
figure,imshow(A);
%
HIm=uint8(zeros(size(GIm,1),size(GIm,2)));
freq=zeros(256,1);
probf=zeros(256,1);
probc=zeros(256,1);
cum=zeros(256,1);
output=zeros(256,1);
%Cuenta la frecuencia con la que aparece cada pixel.
%La probabilidad de cada ocurrencia se calcula por probf.
for i=1:size(GIm,1)
    for j=1:size(GIm,2)
        value=GIm(i,j);
        freq(value+1)=freq(value+1)+1;
        probf(value+1)=freq(value+1)/numofpixels;
    end
end
sum=0;
no_bins=255;
%Se calcula la probabilidad de distribución acumulativa.
for i=1:size(probf)
    sum=sum+freq(i);
    cum(i)=sum;
    probc(i)=cum(i)/numofpixels;
    output(i)=round(probc(i)*no_bins);
end
for i=1:size(GIm,1)
    for j=1:size(GIm,2)
        HIm(i,j)=output(GIm(i,j)+1);
    end
end
figure,imshow(HIm);
title('Histogram equalization')

```

Aplicación de la ecualización por histograma, en el estudio:

```

im_nir5 = imread('IMG_190616_135515_0025_NIR.tif'); % lectura de la
imagen en banda NIR

n5 = imrotate(im_nir5,9.4,'bilinear','crop');% Rotación de la imagen

rec_nir5=imcrop(n5,[376 484 260 477]); %Recorte de la imagen

fotonir5 = medfilt2(mnir5); %filtro de la mediana

nir5 = histeq(fotonir5); % ecualización por histograma

```

4.3. Índices de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir vigor vegetal, biomasa. Los índices de vegetación usualmente son una combinación de las bandas espectrales, siendo el resultado de la suma, resta, multiplicación o división de varios valores espectrales, diseñados para producir un valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel.

Esto nos permite estimar y evaluar es estado de la salud de los cultivos, en base a la radiación q las plantas emiten o reflejan. Los valores más altos denotan mayo cantidad de vegetación saludable. Existen un grupo de índices que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basado en la interacción entra la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.

A continuación, se presentan algunos de los índices de vegetación más importantes y el índice que usaremos para el estudio de este proyecto:

Índice NDVI

Este es el índice que usaremos en el presente estudio, NDVI (del inglés Normalized Difference Vegetation Index, Índice Normalizado Diferencial de Vegetación). Este índice fue introducido inicialmente con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse et al., 1974).

El índice NDVI relaciona la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, para observar el comportamiento radiométrico de la vegetación, lo cual no permitirá hallar la vigorosidad de la planta.

Los valores numéricos del índice NDVI están asociados a la energía absorbida o reflejada por las plantas en el espectro electromagnético. La vegetación sana tiene como respuesta, un contraste claro entre el espectro visible, principalmente en la banda roja y el Infrarrojo cercano (NIR).

En tanto en el espectro visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor cantidad de la energía que reciben, en la banda NIR, las paredes de las células de las hojas, que contienen y se encuentran llenas de agua, reflejan una porción mayor de energía. **Como contrapunto, cuando la vegetación es sometida a algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por consecuencia la reflectividad disminuye en la banda NIR y aumenta en la banda Roja al tener menor absorción clorofílica.** Esta incompatibilidad nos permite separar con facilidad la vegetación sana de otras.

Para el cálculo del índice NDVI se usan dos bandas espectrales, la banda roja (RED) y la banda Infrarrojo cercano (NIR)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (4.8)$$

En la ecuación 4.8 usamos NIR como la reflectancia espectral de la banda infrarrojo cercano y RED la reflectancia en la banda roja. Esta fórmula muestra la relación entre el valor de reflectancia y estas bandas.

El índice NDVI fluctúa entre -1 y 1. Muchos estudios indican que los valores mayores a 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más aproximado a 1 sea el valor de NDVI, las condiciones de vegetación son mejores.

(García Cervigón, 2015)



Figura 47: Índice NDVI en función a plantas.

Fuente: <https://senterra.com/understanding-ndvi-plant-health/>

Índice NDWI

Este índice NDWI (del inglés Normalized Differential Water Index; Índice Diferencial de Agua Normalizado), nos sirve para identificar masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad por medio de imágenes espectrales. Con este índice podemos determinar el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en el suelo y delimitaciones de masas de agua como lagos y embalses.

Al igual que el índice de vegetación NDVI, los valores oscilan entre -1 y 1. Su fórmula es la siguiente:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (4.9)$$

Donde Green es la reflectancia espectral del canal verde y NIR es la reflectancia en el canal infrarrojo cercano.

Cálculo del índice NDVI, en el estudio, usando Matlab.

De la ecuación 4.8 se usa la fórmula:

```
NDVI5 = (nir5(:,:) - red5(:,:))./(nir5(:,:) +red5(:,:));% Calculo del índice NDVI usando NIR y RED en la toma 5
```

Aplicación del índice NDVI:

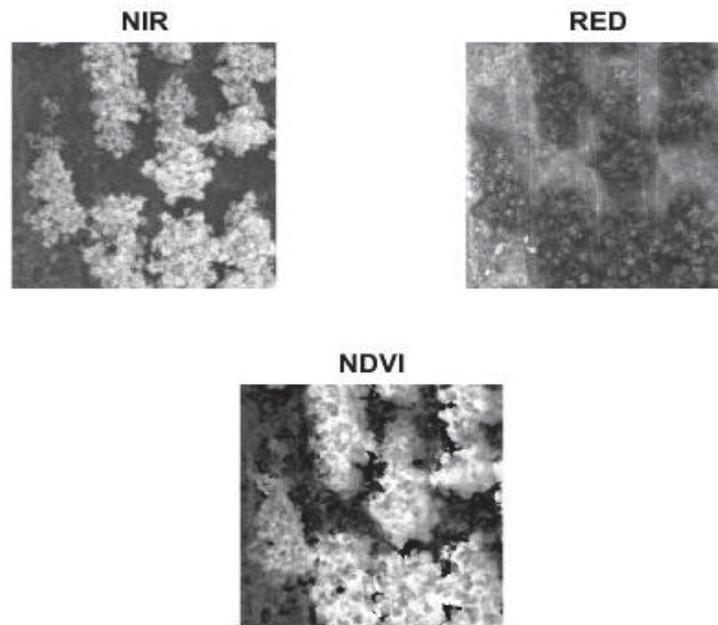


Figura 48: Cálculo del índice NDVI, En la parte superior se aprecian las imágenes en banda NIR y RED, y en la parte inferior la imagen del índice NDVI.

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del índice de vegetación NDVI en Matlab.

Matriz NIR:

$$NIR = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.3016 & \dots & 0.3175 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.3175 & \dots & 0.9841 \end{pmatrix} \end{pmatrix}_{262 \times 261}$$

Matriz RED:

$$RED = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,8413 & \dots & 0,5714 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0,9206 & \dots & 0,2698 \end{pmatrix} \end{pmatrix}_{262 \times 261}$$

Se aplica la ecuación (4.8) y se obtiene

Matriz NDVI:

$$NDVI = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} -0,4722 & \dots & -0,2857 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -0,4872 & \dots & 0,5696 \end{pmatrix} \end{pmatrix}_{262 \times 261}$$

4.4. Segmentación

La segmentación es un proceso con el cual la imagen es dividida en regiones con características similares, esta definición la da Mitiche y Ben (Mitiche & Ben Ayed, 2010). Por otro lado Saraf (Saraf, 2006) define la segmentación como el proceso de particionar una imagen en regiones no traslapadas. Estas regiones deben ser homogéneas en cuanto a los valores de sus intensidades y la unión de regiones no adyacentes también debe ser homogéneas.

Algunos métodos comúnmente utilizados en la segmentación de imágenes, son los siguientes:

- Umbralización: Clasifica un píxel dentro de dos clases, objeto a extraer o fondo de la imagen.
- Crecimiento de regiones: En este método de segmentación los píxeles son agrupados en regiones de acuerdo a su vecindad y similitud de intensidades.
- Agrupamiento (clustering): este método agrupa píxeles de acuerdo a la similitud de sus características.

4.4.1. Método de Otsu

En 1979 Nobuyuki Otsu creó este método para establecer un valor umbral t . Se trata de una técnica estadística que busca minimizar la varianza de cada objeto, tomando en cuenta los valores más dispersos que una imagen puede tener. Se busca que, entre los píxeles de un objeto, la varianza sea mínima, pero, al mismo tiempo, que esta dispersión sea mayor para diferenciar cada objeto del fondo de la imagen. A este método se le considera un umbral óptimo, pues su cálculo presenta mayor complejidad que el de los umbrales explicados anteriormente. Para establecer un umbral es necesario estudiar el

histograma, cuando se trata de una imagen en escala de grises, el histograma muestra dos picos: uno corresponde al objeto y el otro al fondo. De esta forma se hace la separación entre ambas clases. El resultado final es una imagen binaria. La principal desventaja encontrada en este método es que la umbralización es sensible al ruido y hay heterogeneidades en cuanto a la intensidad de los píxeles además de que es posible establecer únicamente dos clases en su forma más sencilla. (Avila Mora, 2014)

4.4.2. Umbralización

Esta técnica de segmentación es ampliamente usada en aplicaciones industriales. Esta técnica se usa cuando existe una diferencia marcada entre el fondo de la imagen y los objetos que se desean extraer. Los principios por el cual se rige este método es la similitud entre los píxeles pertenecientes a un objeto y la diferencia respecto al resto. Por lo tanto, la imagen a analizar debe de contar por un fondo uniforme y por objetos parecidos.

Al aplicar el umbral T , la imagen $f(x, y)$, quedara binarizada, etiquetando con “1” a los píxeles correspondientes al objeto y con “0” aquellos que son del fondo.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \leftrightarrow f(x, y) > T \\ 0 & \leftrightarrow f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (4.10)$$

En caso que los objetos sean oscuros respecto al fondo, la asignación de “1” y “0” sería a la inversa:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \leftrightarrow f(x, y) < T \\ 0 & \leftrightarrow f(x, y) \geq T \end{cases} \quad (4.11)$$

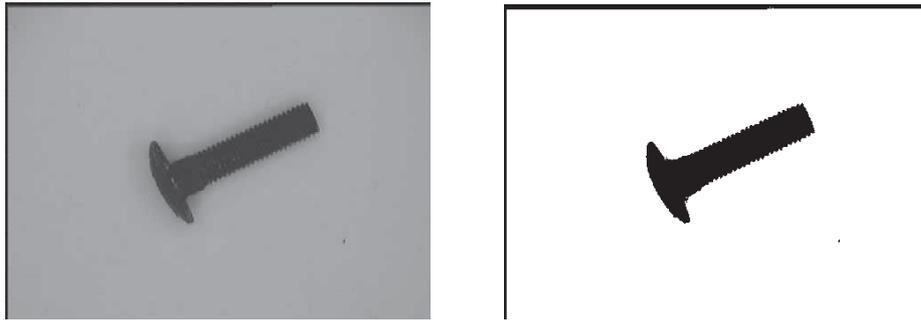


Figura 49: Ejemplo de umbralización por el método de Otsu.

Fuente: MÉTODO DE OTSU (Segmentación por umbralización), Iván López Espejo

La importancia del método de Otsu radica en que es automático, es decir, no necesita supervisión humana ni información previa de la imagen antes de su procesamiento.

Método de Otsu para un umbral óptimo

Para explicar la umbralización partimos de una imagen digital bidimensional con N píxeles y L posibles niveles, la probabilidad de ocurrencia de nivel de gris i en la imagen será:

$$p_i = \frac{f_i}{N} \quad (4.12)$$

Donde f_i es la frecuencia de repetición del nivel de gris, con $i=1,2,\dots, L$. Cuando binarizamos (umbralización de 2 niveles), los píxeles son divididos en 2 clases: C_1 , con niveles de gris $[1, \dots, t]$ y C_2 , con niveles de gris $[t + 1, \dots, L]$, entonces la distribución de probabilidad de niveles de gris para estas clases son:

$$C_1: \frac{p_1}{\omega_1(t)}, \dots, \frac{p_t}{\omega_1(t)} \quad (4.13)$$

$$C_2: \frac{p_{t+1}}{\omega_2(t)}, \frac{p_{t+2}}{\omega_2(t)}, \dots, \frac{p_L}{\omega_2(t)} \quad (4.14)$$

Donde:

$$\omega_1(t) = \sum_{i=1}^t p_i \quad y \quad \omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^L p_i \quad (4.15)$$

Para hallar la media para las clases C_1 y C_2 , la formula se define como:

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^t \frac{i \cdot p_i}{\omega_1(t)} \quad y \quad \mu_2 = \sum_{i=t+1}^L \frac{i \cdot p_i}{\omega_2(t)} \quad (4.15)$$

Siendo μ_T la intensidad media de toda la imagen, se demuestra que:

$$\omega_1 \cdot \mu_1 + \omega_2 \cdot \mu_2 = \mu_T \quad y \quad \omega_1 + \omega_2 = 1 \quad (4.17)$$

Utilizando el análisis discriminante, Otsu definió la varianza entre clases de una imagen umbralizada como:

$$\sigma_B^2 = \omega_1 \cdot (\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2 \cdot (\mu_2 - \mu_T)^2 \quad (4.18)$$

Para la binarización (umbralización de 2 niveles), el umbral óptimo t , se determina de tal manera que σ_B^2 sea máxima:

$$\mathbf{t^* = Max\{\sigma_B^2(t)\}} \quad (4.19)$$

Donde se debe de cumplir:

$$\mathbf{1 \leq t \leq L} \quad (4.20)$$

4.4.3. Multiumbralización.

El método de Otsu, funciona para múltiples umbrales. En el caso de existir M clases, existirán $M-1$ umbrales diferentes, generalizando el caso anterior (binarización), obtendremos un conjunto multinivel que maximice la varianza entre clases de la siguiente forma:

$$\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\} = \text{Max}_{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*} \{\sigma_B^2(t_1, t_2, \dots, t_{M-1})\} \quad (4.21)$$

$$1 \leq t_1 < \dots < t_{M-1} \leq L \quad (4.22)$$

Donde:

$$\sigma_B^2 = \sum_{k=1}^M \omega_k \cdot (\mu_k - \mu_T)^2 \quad (4.23)$$

Con:

$$\omega_k(t) = \sum_{i \in C_k} p_i \quad y \quad \mu_k = \sum_{i \in C_k} \frac{i \cdot p_i}{\omega_k} \quad (4.24)$$

Esta técnica es la que usaremos en este estudio

Comandos en Matlab.

```
Clase=12;
% Metodo de Otsu NDWI5
thresh_ndvi5a = multithresh(NDVI_5a,Clase); %multiumbralización con
12 clases para segmentar la imagen NDWI5_5a
seg_ndvi5a = imquantize(NDVI_5a,thresh_ndvi5a); %cuantifica la
imagen usando los niveles y valores de salida
RGB_ndvi5a = label2rgb(seg_ndvi5a); %color de la imagen segmentada
en RGB
figure;imshow(RGB_ndvi5a);title('RGB NDVI5 Segmented Image')
%Mostrar la imagen segmentada en varios colores.
```

4.4.4. Prueba del método de segmentación con índice NDVI (imágenes)

Por conveniencia elegimos las imágenes y realizamos un giro y recorte en la imagen para poder analizar solo los árboles de palto que fueron sometidos a estrés hídrico.

Elegimos segmentar la imagen por el método de Otsu, en 3 distintos niveles, el primero en 4 clases, el segundo en 6 clases y el ultimo en 12 clases, para observar cual es el mejor resultado para la clasificación.

Segmentación imagen 1 – 0 semanas sin riego (domingo 19 de mayo del 2019)

Número de clases: 4

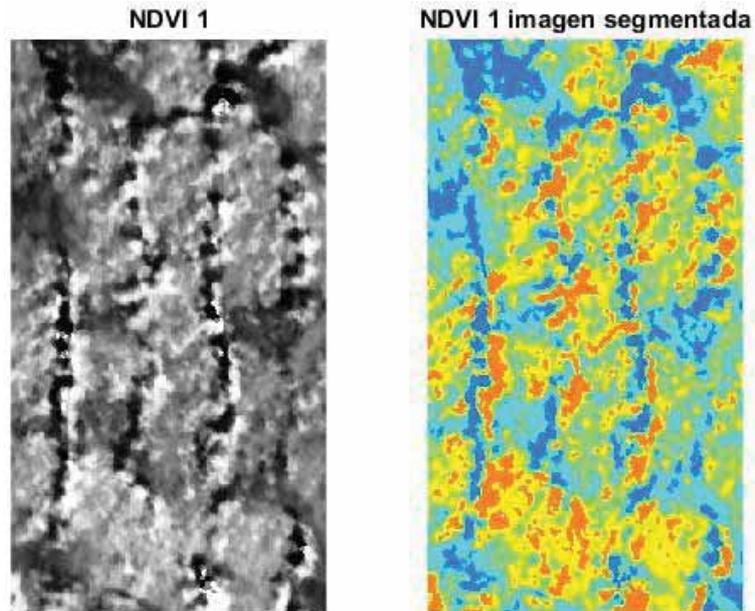


Figura 50: Índice NDVI 1, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 6

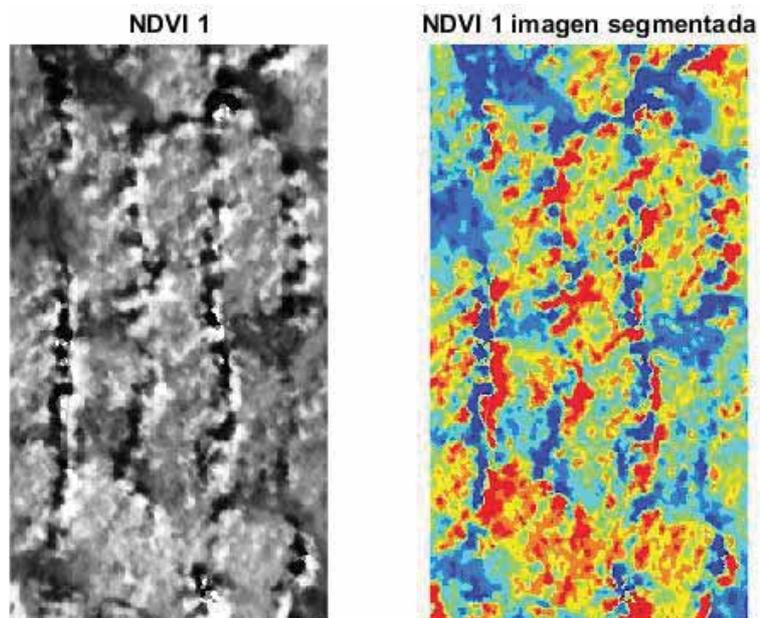


Figura 51: Índice NDVI 1, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

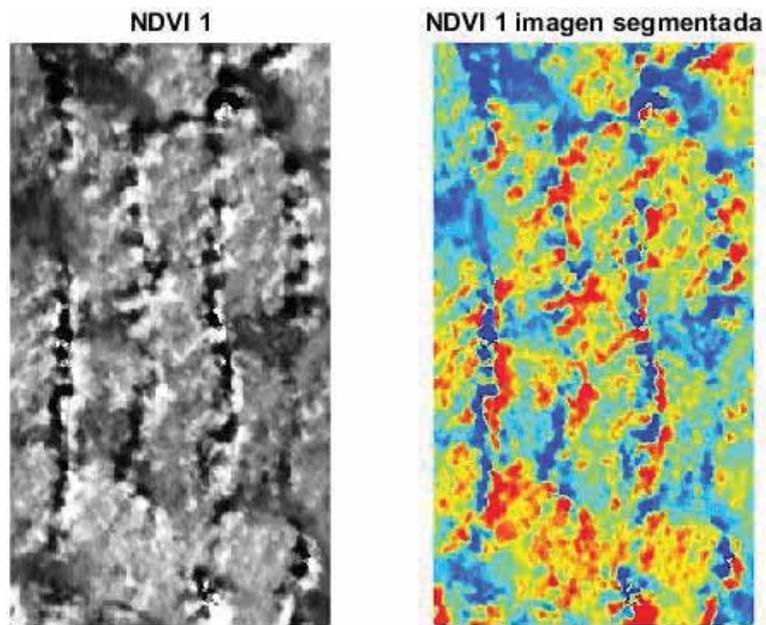


Figura 52: Índice NDVI 1, segmentado por 12 clases y coloreado

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Segmentación imagen 2 – 1 semana sin riego (domingo 26 de mayo del 2019)

Número de clases: 4

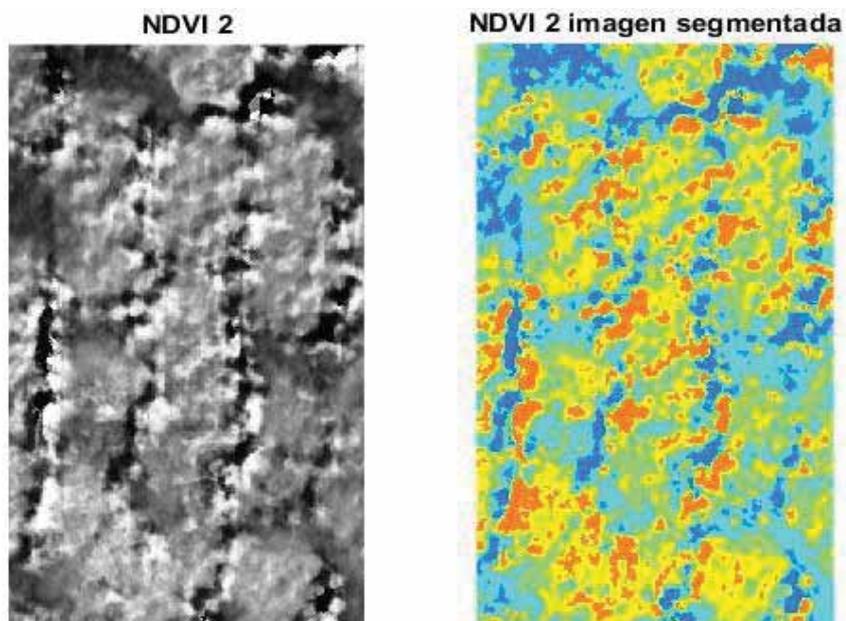


Figura 53: Índice NDVI 2, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 6

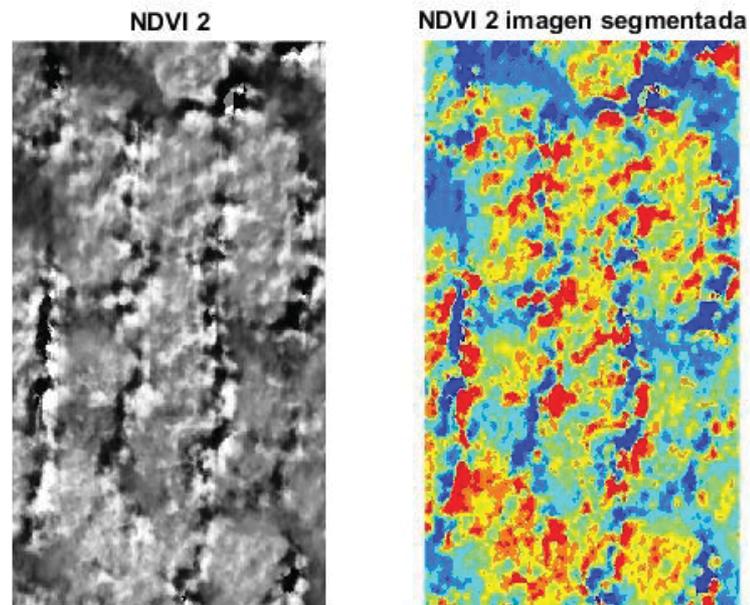


Figura 54: Índice NDVI 2, segmentado por 6 clases y coloreado

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

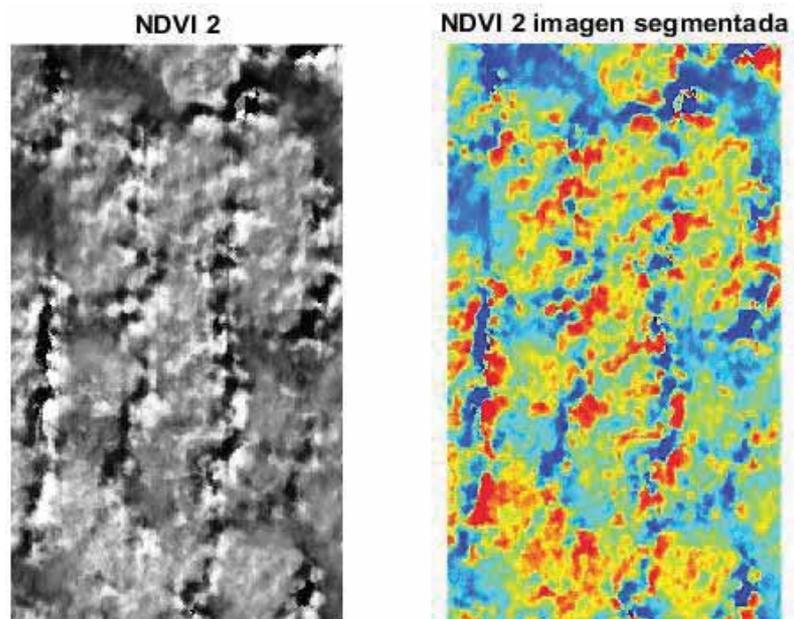


Figura 55: Índice NDVI 2, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

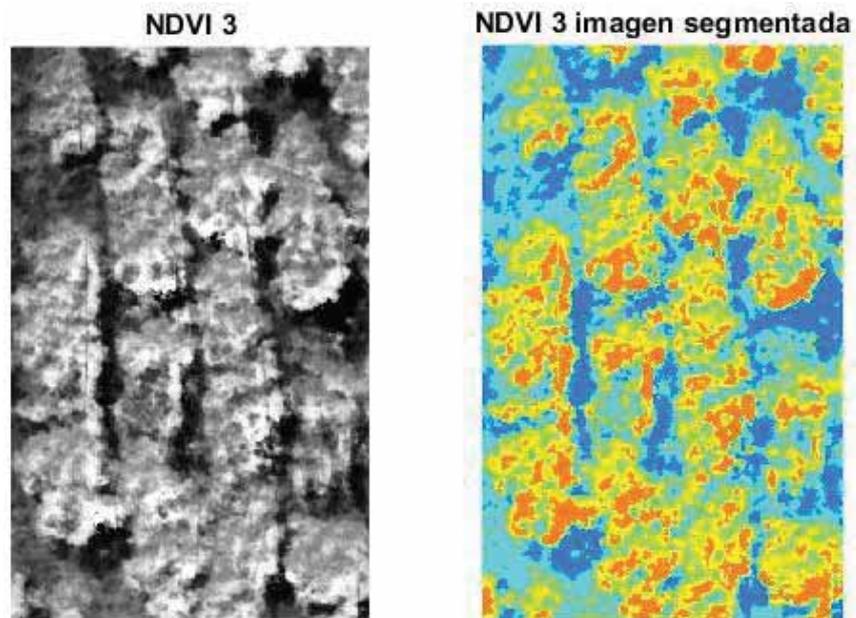
Segmentación imagen 3 – 2 semanas sin riego (domingo 02 de junio del 2019)**Número de clases: 4**

Figura 56: Índice NDVI 3, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

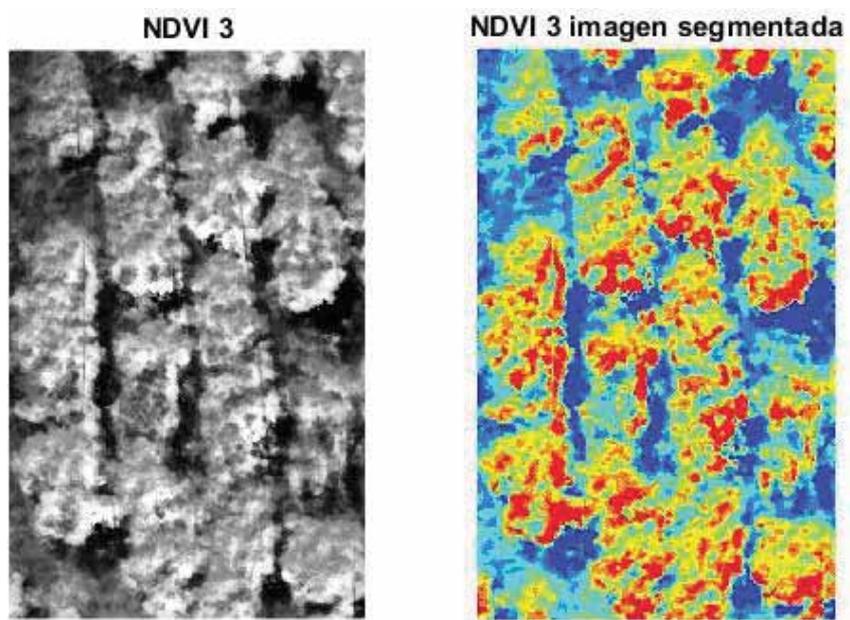
Número de clases: 6

Figura 57: Índice NDVI 3, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

NDVI 3



NDVI 3 imagen segmentada

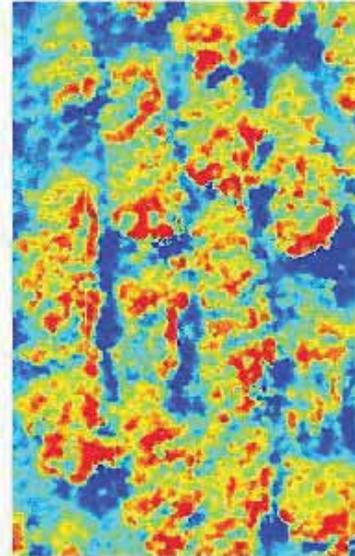


Figura 58: Índice NDVI 3, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Segmentación imagen 4 – 3 semanas sin riego (domingo 09 de junio del 2019)

Número de clases: 4

NDVI 4



NDVI 4 imagen segmentada

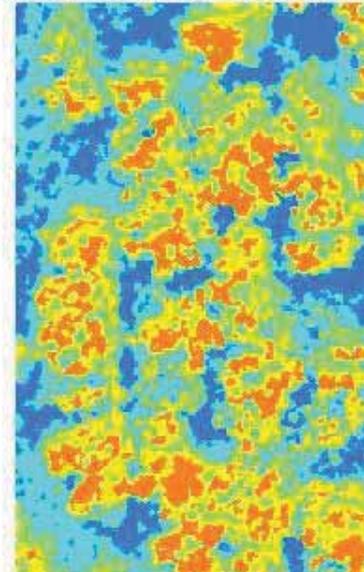


Figura 59: Índice NDVI 4, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 6

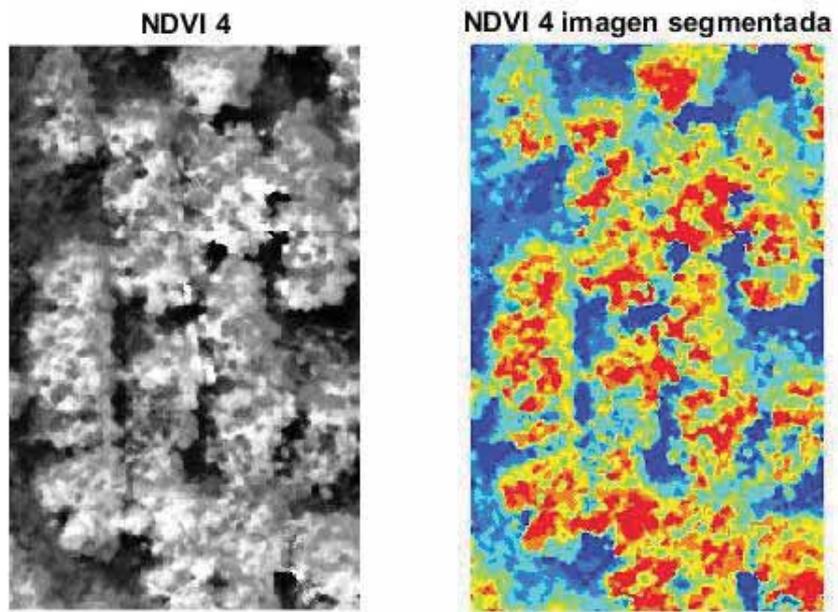


Figura 60: Índice NDVI 4, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

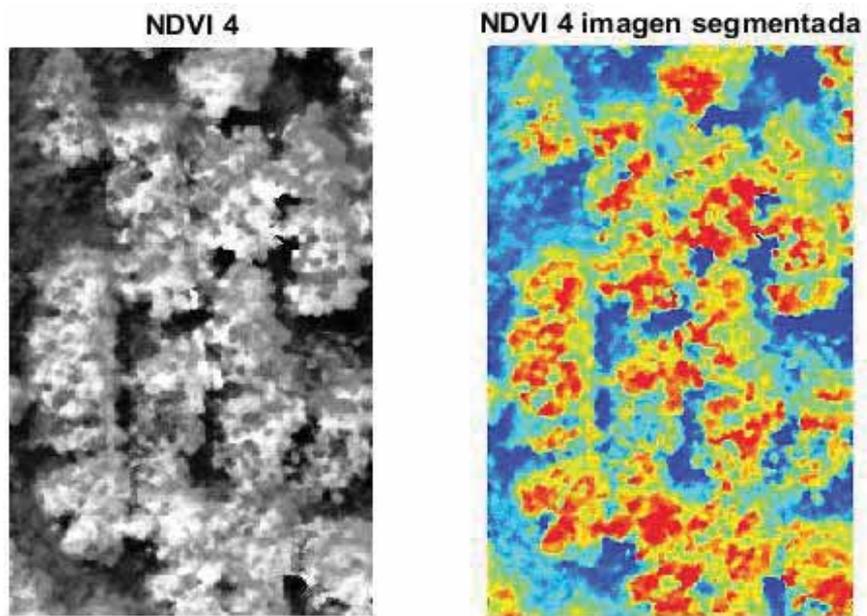


Figura 61: Índice NDVI 4, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

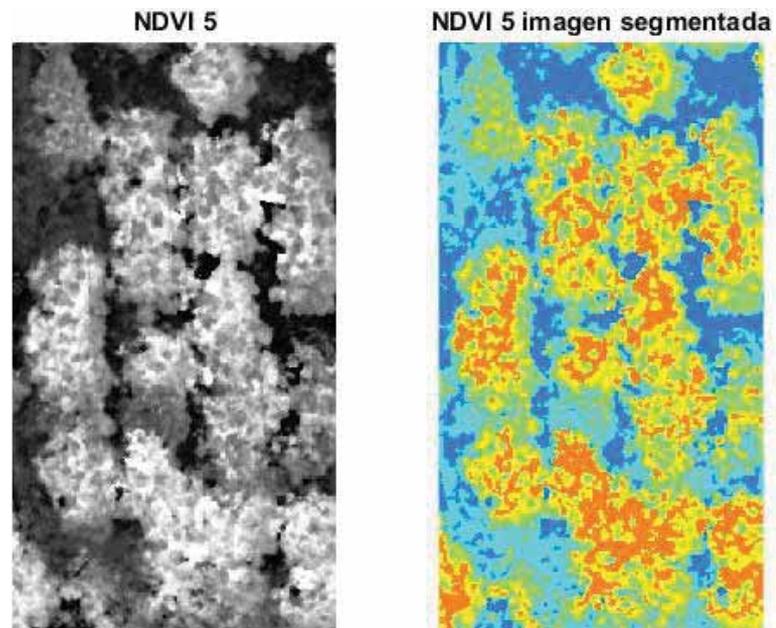
Segmentación imagen 5 – 4semanas sin riego (domingo 16 de junio del 2019)**Número de clases: 4**

Figura 62: Índice NDVI 5, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

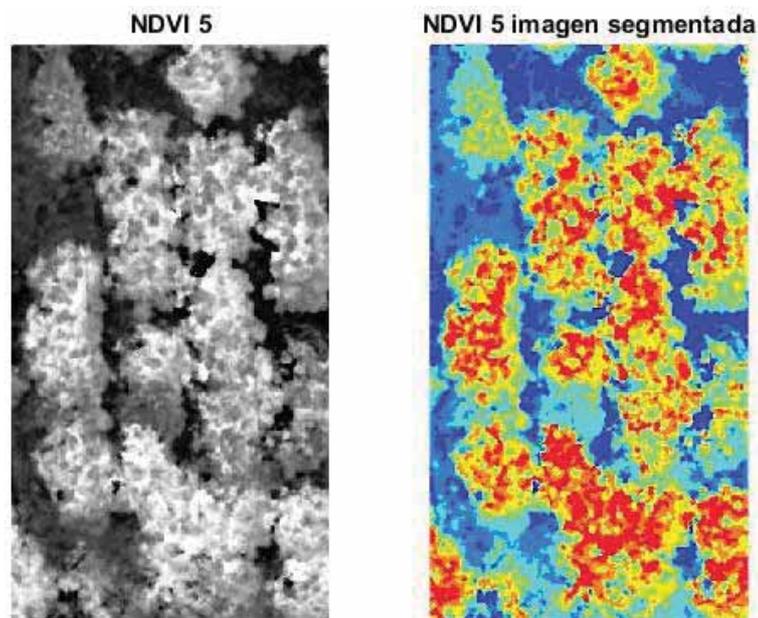
Número de clases: 6

Figura 63: Índice NDVI 5, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

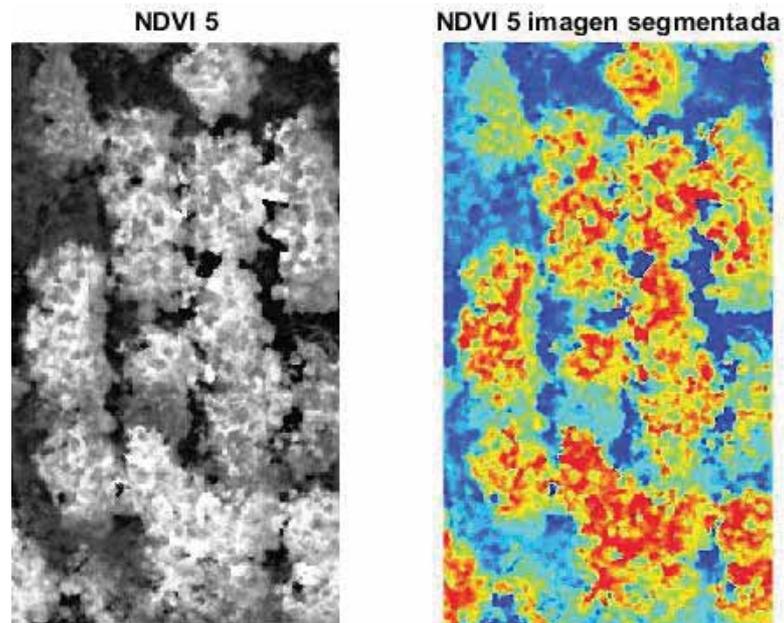


Figura 64: Índice NDVI 5, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3	Umbral 4
0 SinR	-0,545098039215686	-0,176470588235294	0,160784313725490	0,529411764705882
1 SinR	-0,552941176470588	-0,184313725490196	0,145098039215686	0,513725490196078
2 SinR	-0,560784313725490	-0,176470588235294	0,176470588235294	0,537254901960784
3 SinR	-0,584313725490196	-0,192156862745098	0,176470588235294	0,552941176470588
4 SinR	-0,592156862745098	-0,200000000000000	0,184313725490196	0,560784313725490

Tabla 5: Tabla de 4 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Umbral 1, Umbral 2, Umbral 3, Umbral 4: valores de los umbrales por el método de Otsu
- SinR: semana sin riego.

	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3	Umbral 4
0 SinR	-0,678431372549020	-0,388235294117647	-0,129411764705882	0,105882352941177
1 SinR	-0,686274509803922	-0,380392156862745	-0,121568627450980	0,113725490196078
2 SinR	-0,701960784313725	-0,403921568627451	-0,113725490196078	0,145098039215686
3 SinR	-0,694117647058824	-0,411764705882353	-0,129411764705882	0,129411764705882
4 SinR	-0,694117647058824	-0,403921568627451	-0,121568627450980	0,137254901960784
	Umbral 5	Umbral 6		
0 SinR	0,349019607843137	0,647058823529412		
1 SinR	0,356862745098039	0,639215686274510		
2 SinR	0,396078431372549	0,678431372549020		
3 SinR	0,388235294117647	0,678431372549020		
4 SinR	0,396078431372549	0,686274509803922		

Tabla 6: Tabla de 6 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Umbral 1, Umbral 2, Umbral 3, Umbral 4, Umbral 5 y Umbral 6: valores de los umbrales por el método de Otsu
- SinR: semana sin riego.

	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3	Umbral 4
0 SinR	-0,858823529411765	-0,670588235294118	-0,513725490196078	-0,356862745098039
1 SinR	-0,858823529411765	-0,670588235294118	-0,513725490196078	-0,356862745098039
2 SinR	-0,843137254901961	-0,678431372549020	-0,529411764705882	-0,380392156862745
3 SinR	-0,843137254901961	-0,678431372549020	-0,521568627450980	-0,372549019607843
4 SinR	-0,850980392156863	-0,686274509803922	-0,537254901960784	-0,372549019607843

	Umbral 5	Umbral 6	Umbral 7	Umbral 8
0 SinR	-0,207843137254902	-0,066666666666667	0,0745098039215686	0,207843137254902
1 SinR	-0,200000000000000	-0,058823529411765	0,0745098039215686	0,207843137254902
2 SinR	-0,223529411764706	-0,066666666666667	0,0823529411764705	0,223529411764706
3 SinR	-0,207843137254902	-0,058823529411765	0,0745098039215686	0,207843137254902
4 SinR	-0,210000000000000	-0,050980392156863	0,0901960784313725	0,223529411764706
	Umbral 9	Umbral 10	Umbral 11	Umbral 12
0 SinR	0,341176470588235	0,490196078431373	0,654901960784314	0,835294117647059
1 SinR	0,341176470588235	0,482352941176471	0,639215686274510	0,827450980392157
2 SinR	0,372549019607843	0,521568627450980	0,670588235294118	0,835294117647059
3 SinR	0,349019607843137	0,505882352941176	0,662745098039216	0,827450980392157
4 SinR	0,364705882352941	0,513725490196078	0,670588235294118	0,835294117647059

Tabla 7: Tabla de 12 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Umbral 1, Umbral 2, Umbral 3, Umbral 4, Umbral 5, Umbral 6, Umbral 7, Umbral 8, Umbral 9, Umbral 10, Umbral 11 y Umbral 12: valores de los umbrales por el método de Otsu
- SinR: semana sin riego.

4.4.5. Prueba del método de segmentación con índice NDWI (imágenes)

Segmentación imagen 1 – 0 semanas sin riego (domingo 19 de mayo del 2019)

Número de clases: 4

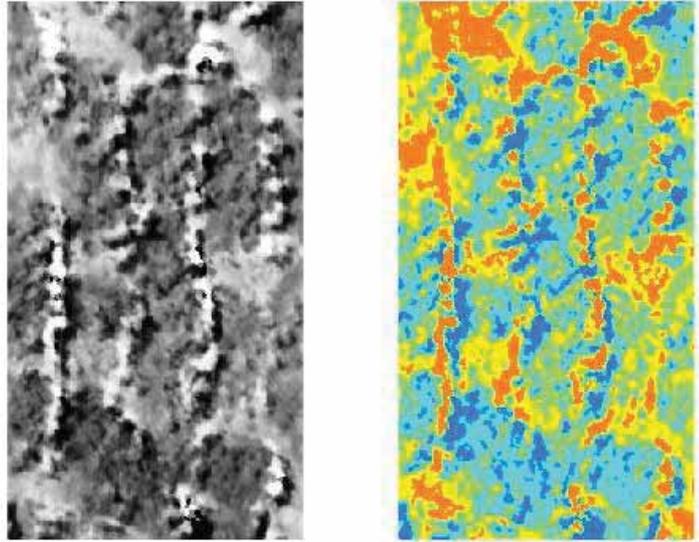


Figura 65: Índice NDWI 1, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 6

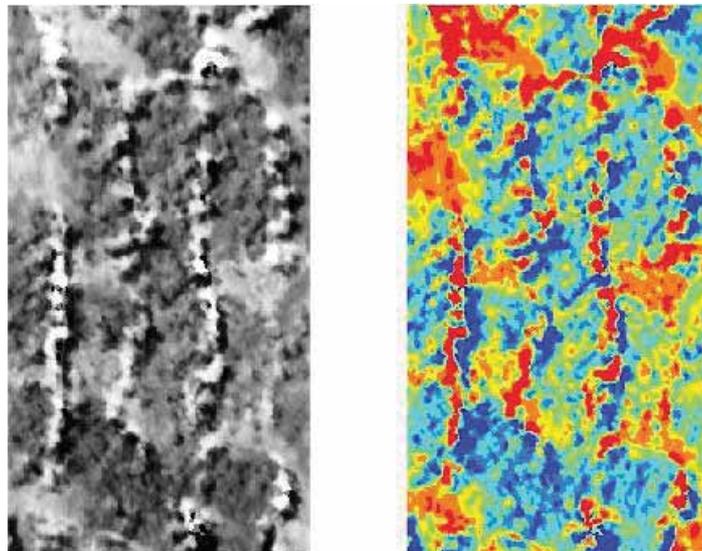


Figura 66: Índice NDWI 1, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

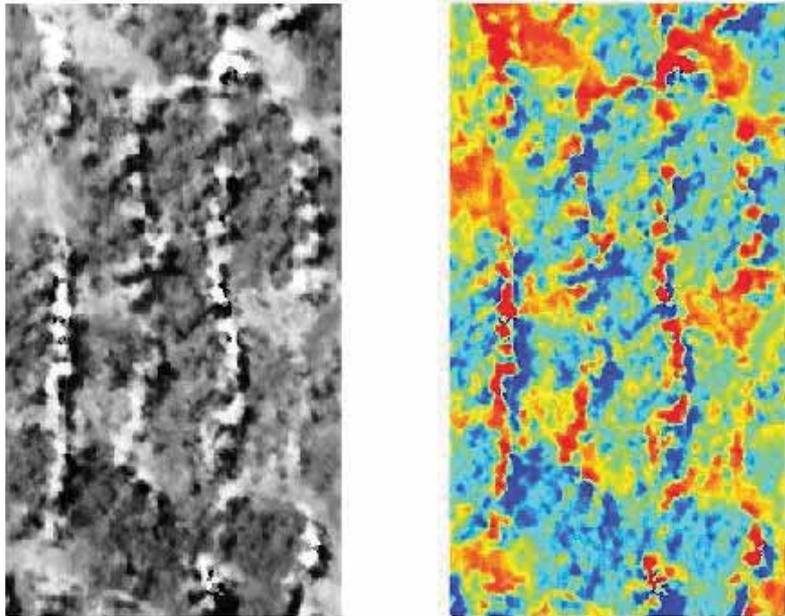


Figura 67: Índice NDWI 1, segmentado por 12 clases y coloreado

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Segmentación imagen 2 – 1 semana sin riego (domingo 26 de mayo del 2019)

Número de clases: 4

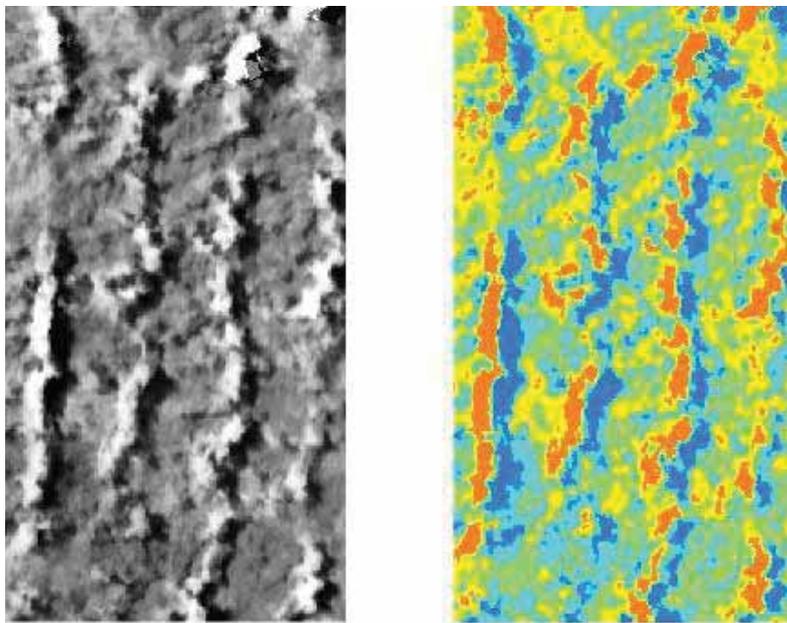


Figura 68: Índice NDWI 2, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 6

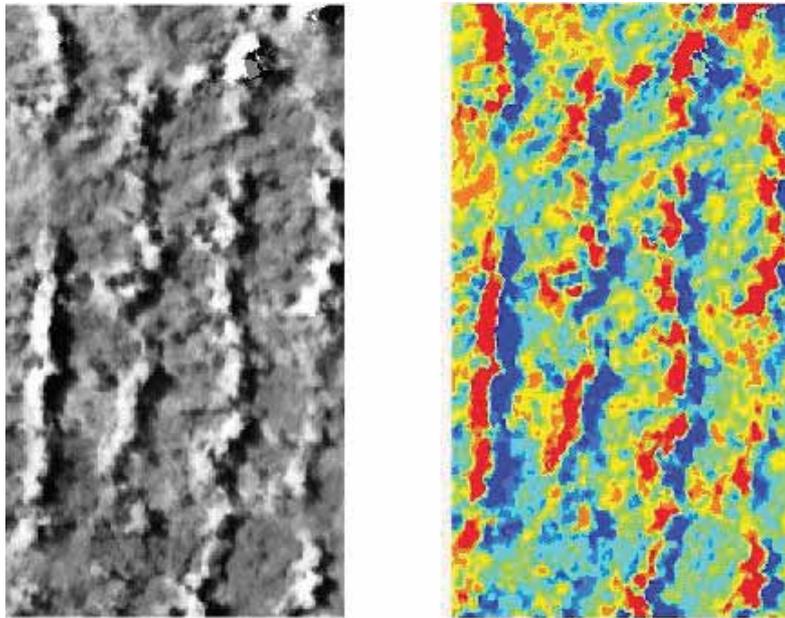


Figura 69: Índice NDWI 2, segmentado por 6 clases y coloreado

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

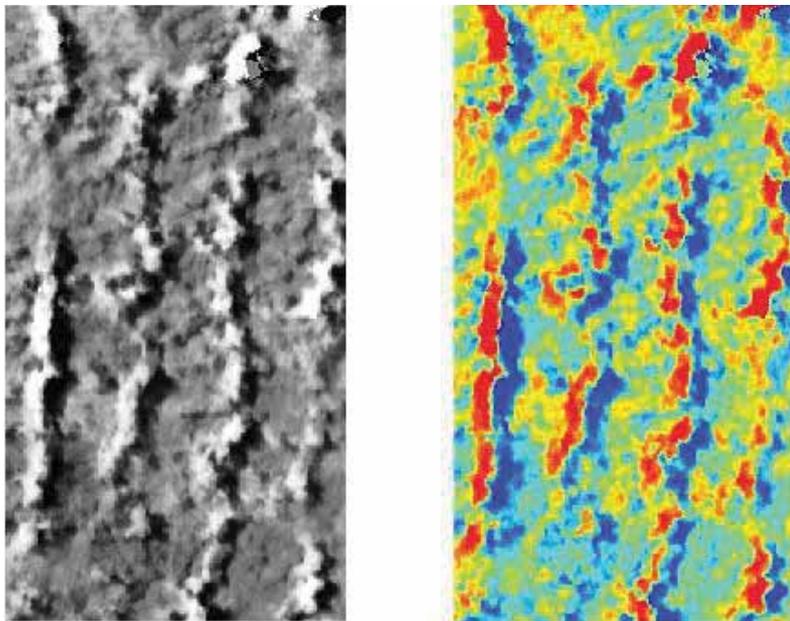


Figura 70: Índice NDWI 2, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

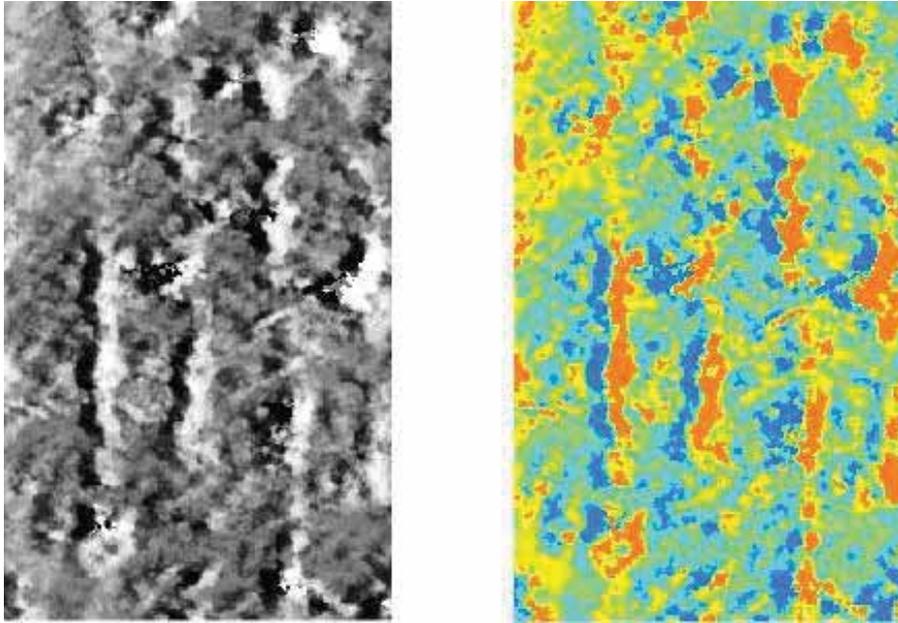
Segmentación imagen 3 – 2 semanas sin riego (domingo 02 de junio del 2019)**Número de clases: 4**

Figura 71: Índice NDWI 3, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

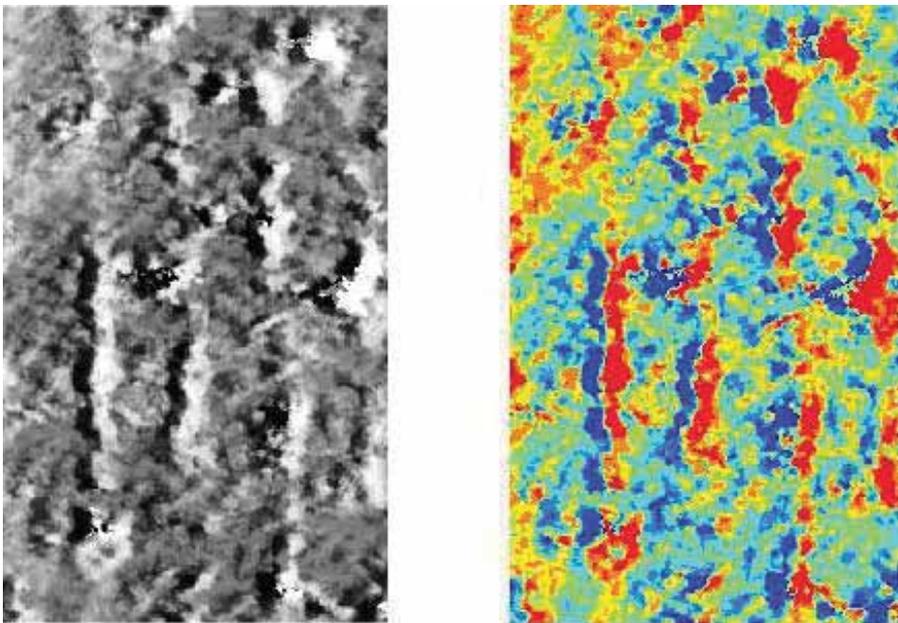
Número de clases: 6

Figura 72: Índice NDWI 3, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

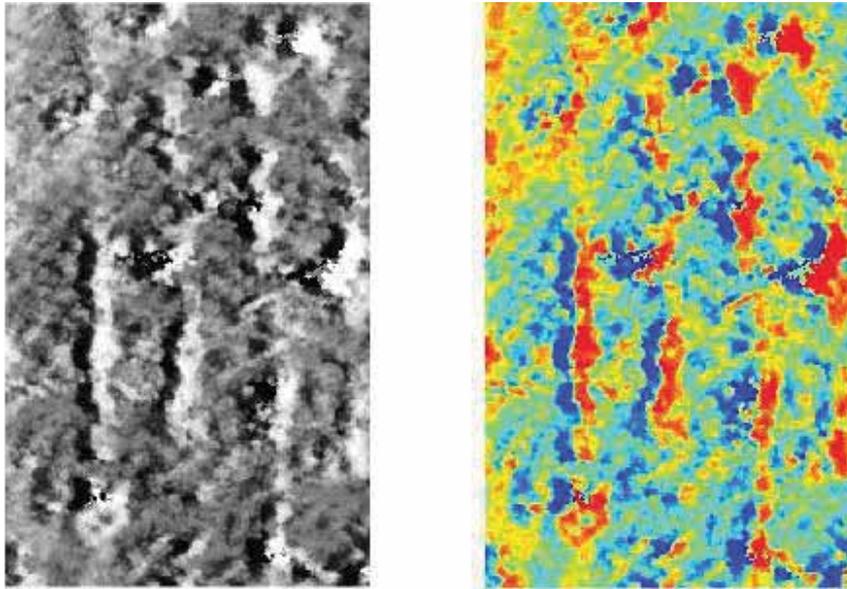


Figura 73: Índice NDWI 3, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Segmentación imagen 4 – 3 semanas sin riego (domingo 09 de junio del 2019)

Número de clases: 4

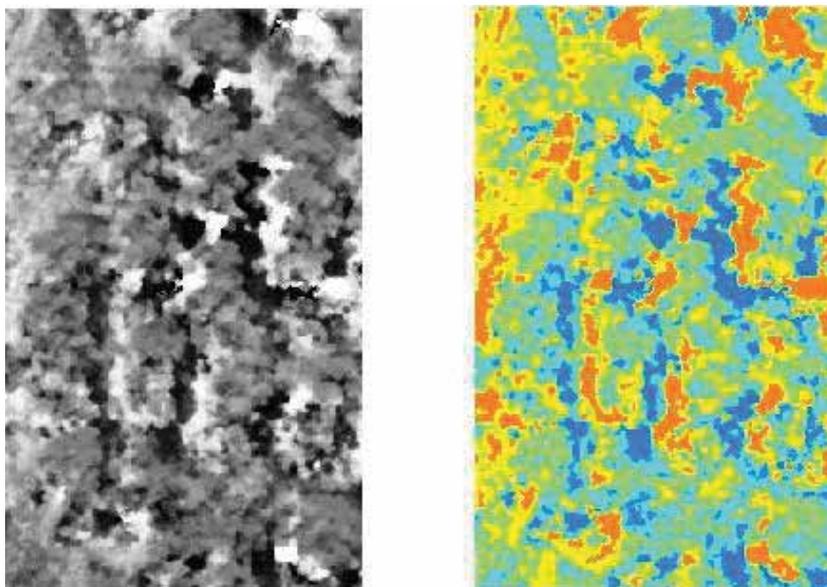


Figura 74: Índice NDWI 4, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 6

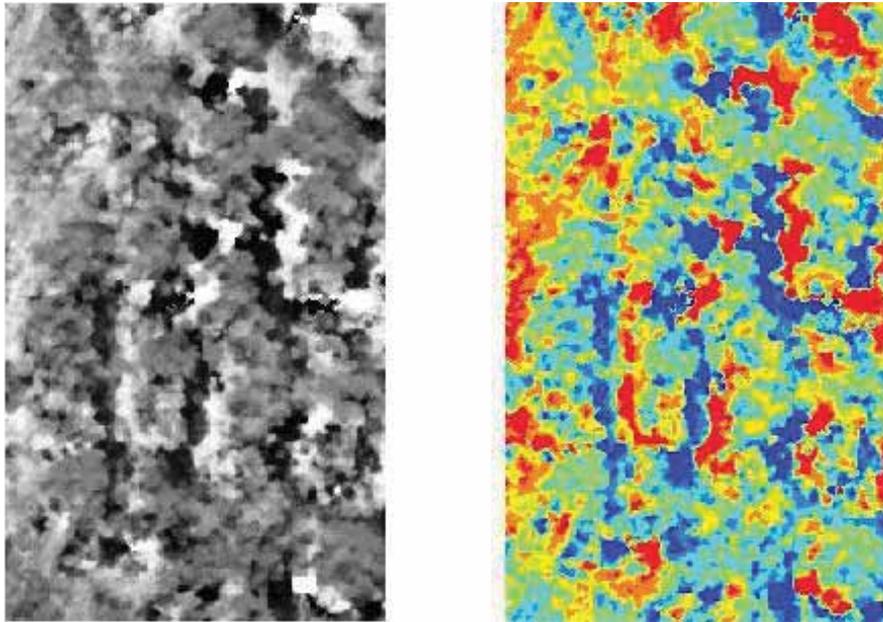


Figura 75: Índice NDWI 4, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

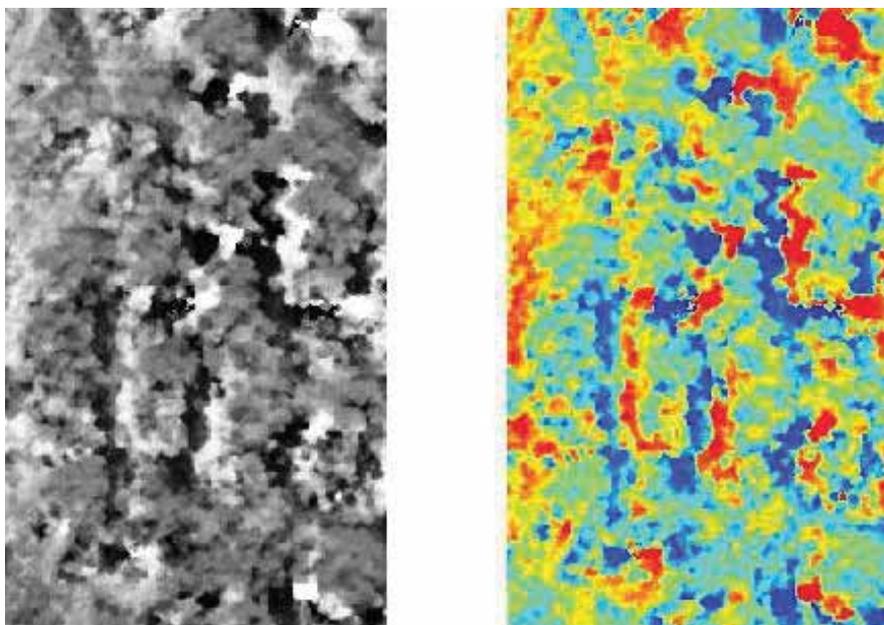


Figura 76: Índice NDWI 4, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

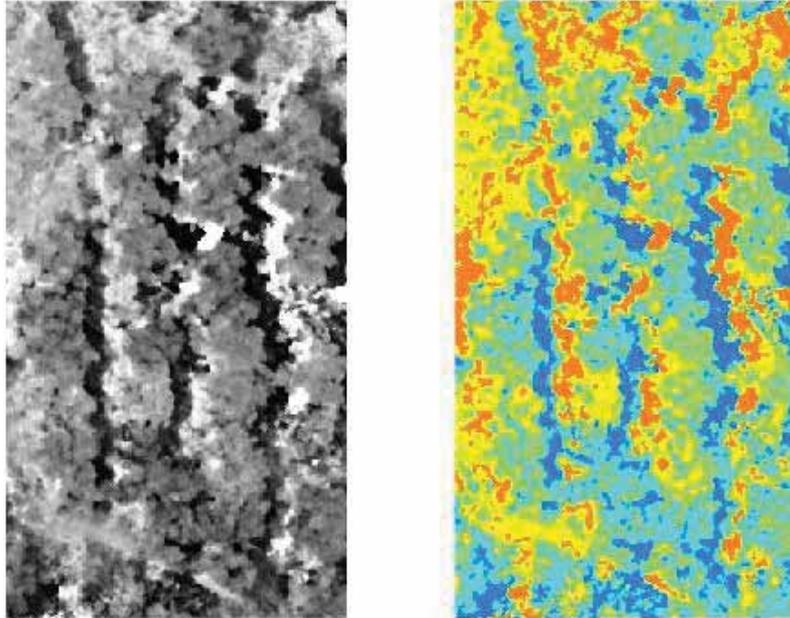
Segmentación imagen 5 – 4 semanas sin riego (domingo 16 de junio del 2019)**Número de clases: 4**

Figura 77: Índice NDWI 5, segmentado por 4 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

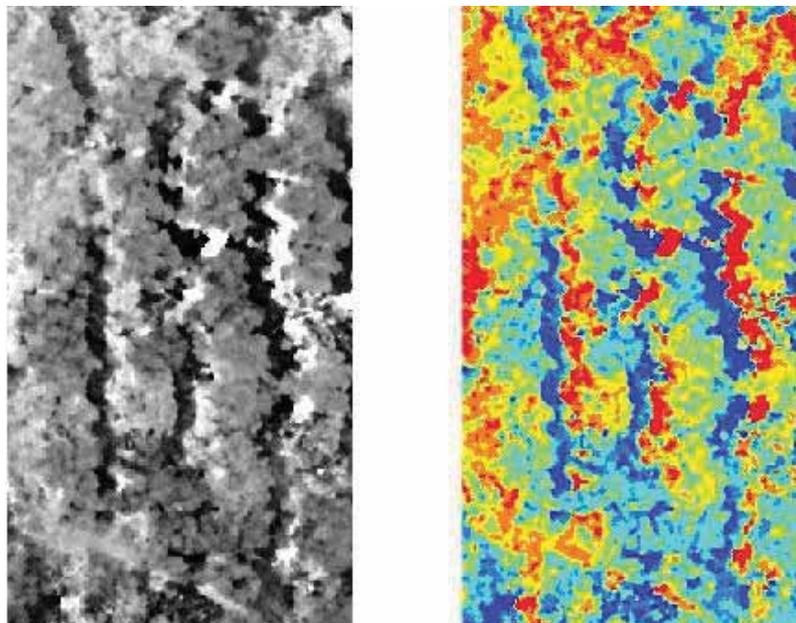
Número de clases: 6

Figura 78: Índice NDWI 5, segmentado por 6 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Número de clases: 12

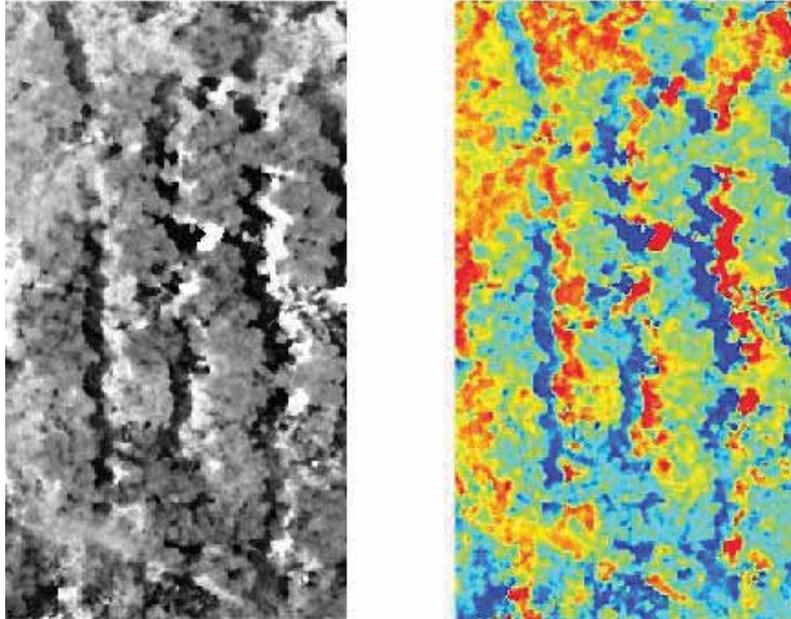


Figura 79: Índice NDWI 5, segmentado por 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3	Umbral 4
0 SinR	-0,545098039215686	-0,184313725490196	0,152941176470588	0,521568627450980
1 SinR	-0,552941176470588	-0,176470588235294	0,152941176470588	0,537254901960784
2 SinR	-0,552941176470588	-0,176470588235294	0,152941176470588	0,529411764705882
3 SinR	-0,552941176470588	-0,176470588235294	0,160784313725490	0,545098039215686
4 SinR	-0,552941176470588	-0,160784313725490	0,176470588235294	0,537254901960784

Tabla 8: Tabla de 4 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Umbral 1, Umbral 2, Umbral 3, Umbral 4: valores de los umbrales por el método de Otsu
- SinR: semana sin riego.

	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3	Umbral 4
0 SinR	-0,670588235294118	-0,380392156862745	-0,137254901960784	0,105882352941177
1 SinR	-0,678431372549020	-0,372549019607843	-0,121568627450980	0,105882352941177
2 SinR	-0,694117647058824	-0,388235294117647	-0,129411764705882	0,0980392156862746
3 SinR	-0,678431372549020	-0,380392156862745	-0,129411764705882	0,0980392156862746
4 SinR	-0,701960784313725	-0,388235294117647	-0,121568627450980	0,121568627450980
	Umbral 5	Umbral 6		
0 SinR	0,364705882352941	0,654901960784314		
1 SinR	0,356862745098039	0,662745098039216		
2 SinR	0,349019607843137	0,654901960784314		
3 SinR	0,349019607843137	0,654901960784314		
4 SinR	0,372549019607843	0,662745098039216		

Tabla 9: Tabla de 6 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Umbral 1, Umbral 2, Umbral 3, Umbral 4, Umbral 5 y Umbral 6: valores de los umbrales por el método de Otsu
- SinR: semana sin riego.

	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3	Umbral 4
0 SinR	-0,858823529411765	-0,678431372549020	-0,513725490196078	-0,356862745098039
1 SinR	-0,850980392156863	-0,686274509803922	-0,513725490196078	-0,349019607843137
2 SinR	-0,850980392156863	-0,686274509803922	-0,513725490196078	-0,356862745098039
3 SinR	-0,850980392156863	-0,686274509803922	-0,529411764705882	-0,356862745098039
4 SinR	-0,858823529411765	-0,686274509803922	-0,513725490196078	-0,349019607843137

	Umbral 5	Umbral 6	Umbral 7	Umbral 8
0 SinR	-0,207843137254902	-0,0666666666666667	0,0745098039215686	0,215686274509804
1 SinR	-0,192156862745098	-0,0588235294117647	0,0745098039215686	0,207843137254902
2 SinR	-0,207843137254902	-0,0666666666666667	0,0666666666666667	0,207843137254902
3 SinR	-0,2000000000000000	-0,0666666666666667	0,0666666666666667	0,215686274509804
4 SinR	-0,192156862745098	-0,0588235294117647	0,0745098039215686	0,207843137254902
	Umbral 9	Umbral 10	Umbral 11	Umbral 12
0 SinR	0,364705882352941	0,513725490196078	0,662745098039216	0,843137254901961
1 SinR	0,349019607843137	0,505882352941176	0,670588235294118	0,850980392156863
2 SinR	0,356862745098039	0,521568627450980	0,686274509803922	0,858823529411765
3 SinR	0,364705882352941	0,513725490196078	0,678431372549020	0,850980392156863
4 SinR	0,349019607843137	0,490196078431373	0,654901960784314	0,850980392156863

Tabla 10: Tabla de 12 clases de valores de umbrales por el método de Otsu.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Umbral 1, Umbral 2, Umbral 3, Umbral 4, Umbral 5, Umbral 6, Umbral 7, Umbral 8, Umbral 9, Umbral 10, Umbral 11 y Umbral 12: valores de los umbrales por el método de Otsu
- SinR: semana sin riego.

En las figuras y las tablas de los índices NDWI, se observó que no existe una variación significativa en los valores umbrales numéricos del índice NDWI semana a semana, **por lo tanto, la correspondencia entre el índice NDWI y el estrés hídrico no es significativa, por esta razón se descartó el uso del índice NDWI y usamos los valores del uso del NDVI.**

4.4.6. Segmentación por el método de K means

K means o clusterización es un algoritmo que agrupa objetos en k grupos basándose en sus características. El agrupamiento se realiza minimizando la suma de las distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o cluster. Usualmente se utiliza la distancia cuadrática. Este algoritmo consta de tres pasos:

- 1.- Inicialización, primero se selecciona el número de grupos, k, y se establecen k centroides en el espacio de los datos.
- 2.- Asignación de objetos a los centroides, a cada centroide se le asigna los objetos de los datos más cercanos.
- 3.- Actualización de centroides, se actualiza la posición del centroide de cada grupo tomando como nuevo centroide la posición del promedio de los objetos pertenecientes a dicho grupo.

Los pasos 2 y 3 se repetirán hasta que los centroides no se muevan, o se muevan por debajo de una distancia umbral en cada paso.

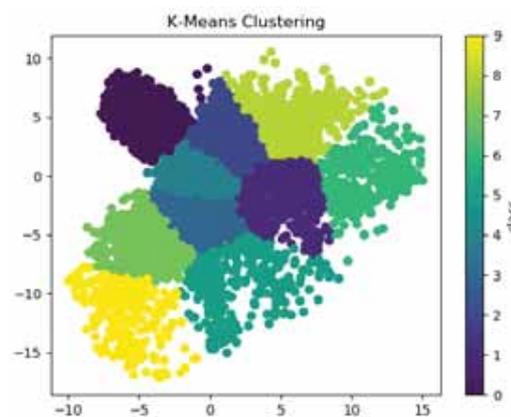


Figura 80 Ejemplo de aplicación de K means en python

Fuente: <https://stackoverflow.com/questions/52752836/organizing-clusters-in-k-means-clustering>

**Segmentación imagen 1 – 0 semanas sin riego (domingo 19 de mayo del 2019).
Número de clases: 12**

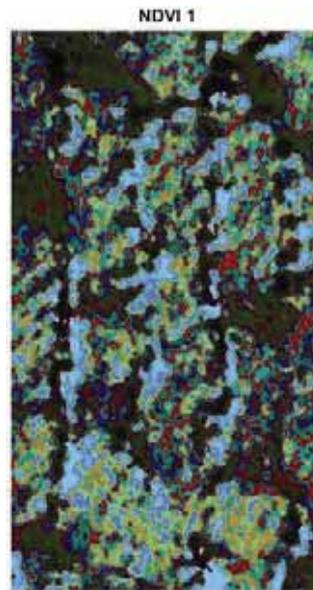


Figura 81: Índice NDVI 1, segmentado por k-means 12 clases y coloreado

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

**Segmentación imagen 2 – 1 semana sin riego (domingo 26 de mayo del 2019).
Número de clases: 12**

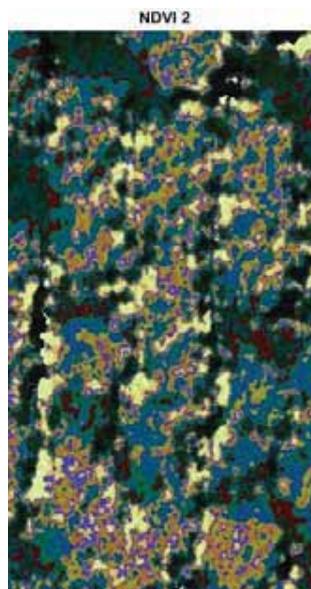


Figura 82: Índice NDVI 2, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Segmentación imagen 3 – 2 semanas sin riego (domingo 02 de junio del 2019).
Número de clases: 12

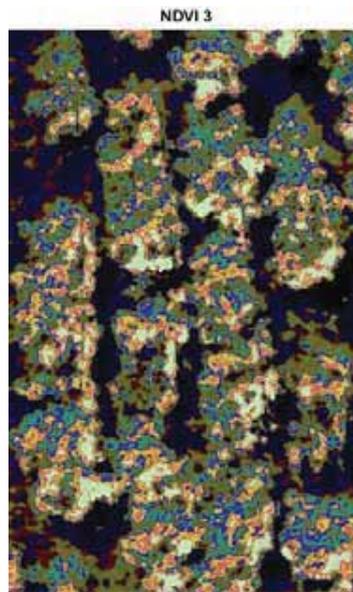


Figura 83: Índice NDVI 3, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Segmentación imagen 4 – 3 semanas sin riego (domingo 09 de junio del 2019).
Número de clases: 12

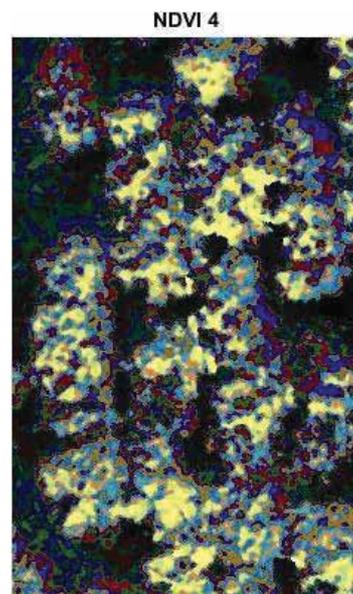


Figura 84: Índice NDVI 4, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Segmentación imagen 5 – 4 semanas sin riego (domingo 16 de junio del 2019).

Número de clases: 12

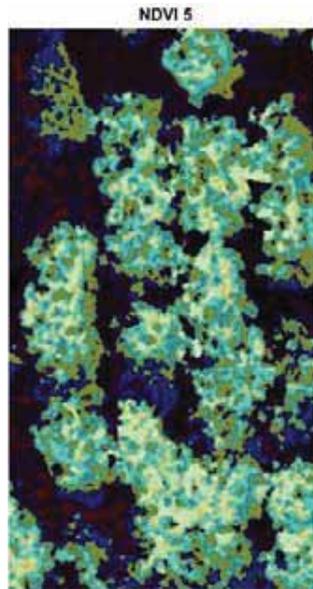


Figura 85: Índice NDVI 5, segmentado por k-means 12 clases y coloreado.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Histograma 1 – 0 semanas sin riego (domingo 19 de mayo del 2019). Número de contenedores: 13

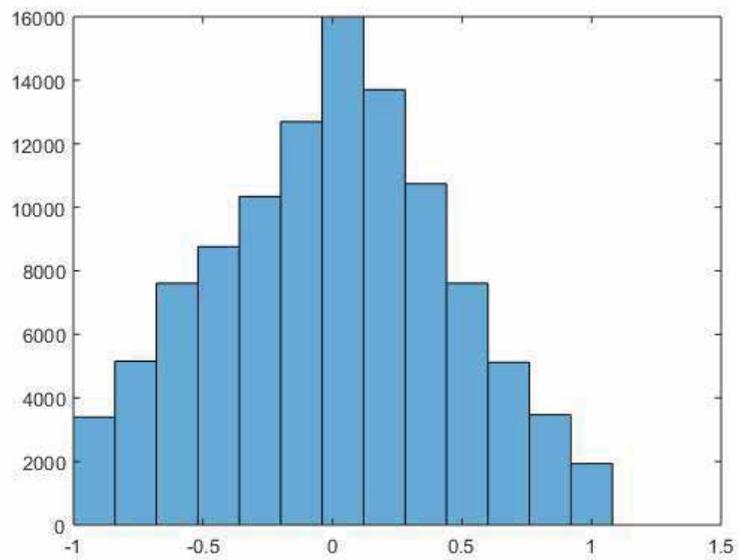


Figura 86: Histograma NDVI 1, 12 contenedores.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Histograma 2 – 1 semana sin riego (domingo 26 de mayo del 2019). Número de contenedores: 12

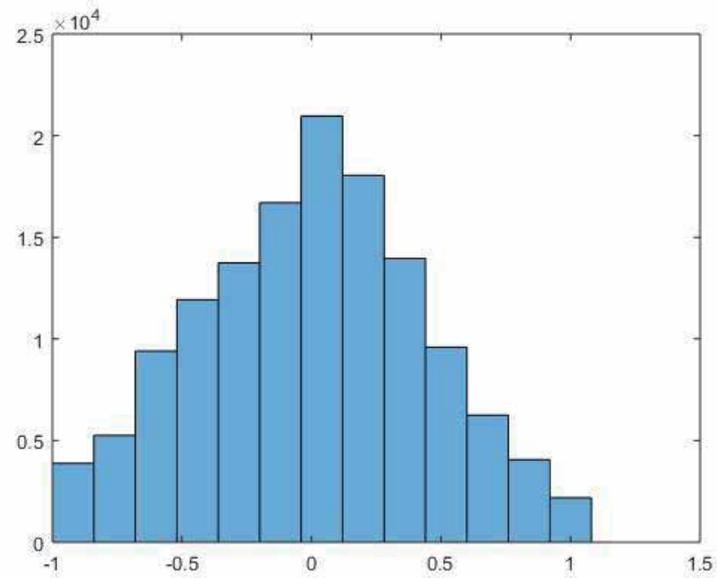


Figura 87: Histograma NDVI 2, 12 contenedores.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Histograma 3 – 2 semanas sin riego (domingo 02 de junio del 2019). Número de contenedores: 12

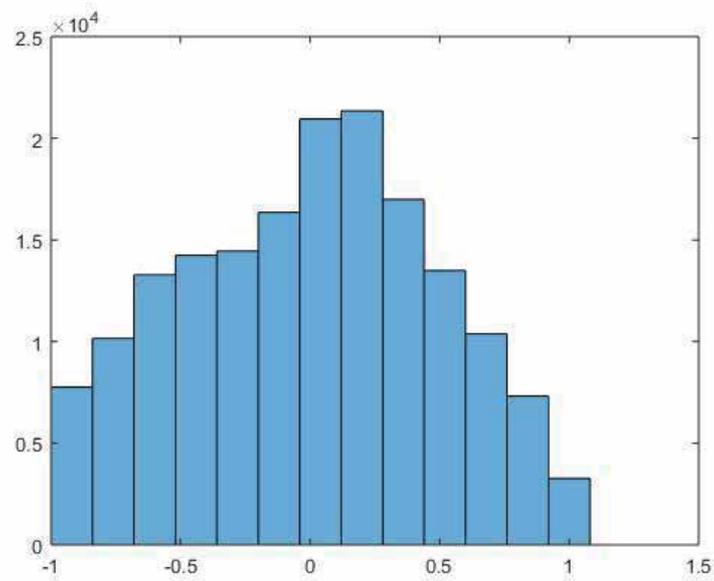


Figura 88: Histograma NDVI 3, 12 contenedores

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Histograma 4 – 3 semanas sin riego (domingo 09 de junio del 2019). Número de contenedores: 12

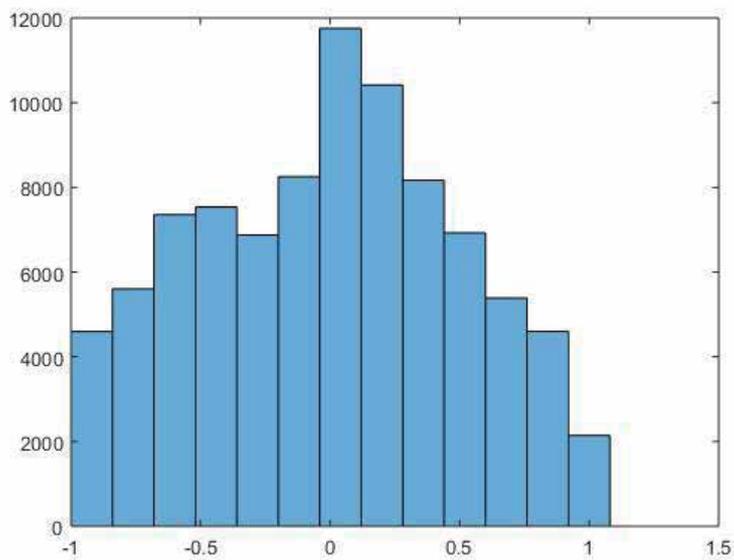


Figura 89: Histograma NDVI 4, 12 contenedores.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

Histograma 5 – 4 semanas sin riego (domingo 16 de junio del 2019). Número de contenedores: 12

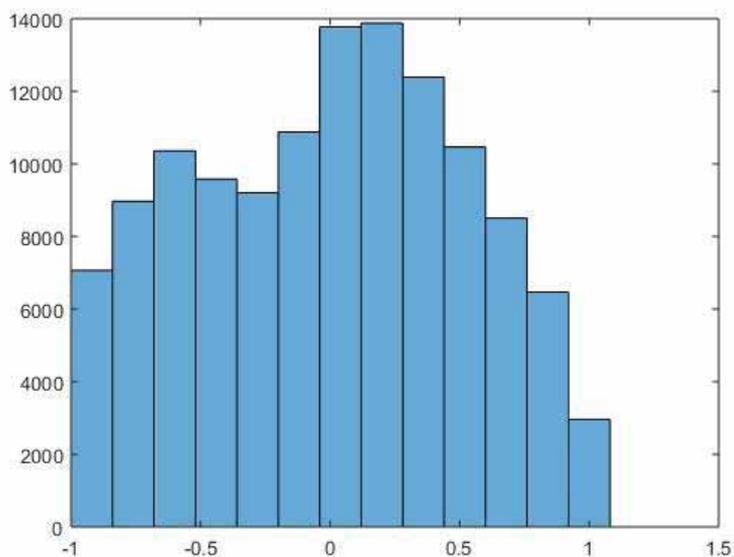


Figura 90: Histograma NDVI 5, 12 contenedores.

Fuente: Elaboración propia en Matlab.

	Histograma			Centroides				
	mín.	máx.	V medio	c 1	c 2	c 3	c 4	c 5
Clase 1	-1.00	-0.84	-0.92	-0.93	-0.94	-0.95	-0.92	-0.93
Clase 2	-0.84	-0.68	-0.76	-0.71	-0.71	-0.77	-0.75	-0.77
Clase 3	-0.68	-0.52	-0.60	-0.54	-0.53	-0.62	-0.59	-0.61
Clase 4	-0.52	-0.36	-0.44	-0.39	-0.38	-0.47	-0.44	-0.47
Clase 5	-0.36	-0.20	-0.28	-0.24	-0.22	-0.32	-0.28	-0.29
Clase 6	-0.20	-0.04	-0.12	-0.10	-0.08	-0.17	-0.12	-0.13
Clase 7	-0.04	0.12	0.04	0.00	0.00	-0.02	0.02	0.02
Clase 8	0.12	0.28	0.20	0.04	0.05	0.12	0.16	0.16
Clase 9	0.28	0.44	0.36	0.17	0.18	0.26	0.30	0.30
Clase 10	0.44	0.60	0.52	0.32	0.32	0.41	0.44	0.44
Clase 11	0.60	0.76	0.68	0.48	0.48	0.56	0.60	0.59
Clase 12	0.76	0.92	0.84	0.67	0.66	0.72	0.76	0.75
Clase 13	0.92	1.08	1.00	0.90	0.89	0.91	0.92	0.92

Tabla 11: Tabla con valores del límite superior máximo, mínimo y mediano del histograma por el método de Otsu, y de los valores de los centroides de la segmentación por el método de K-means.

Fuente: Elaboración propia

Tabla de error porcentual:

Error referente a Valor medio				
e1	e2	e3	e4	e5
0.65%	2.61%	3.04%	0.22%	1.41%
6.71%	6.32%	1.18%	1.32%	1.32%
10.00%	11.00%	2.83%	2.00%	2.17%
12.05%	14.55%	5.68%	0.45%	5.68%
15.00%	20.36%	13.21%	0.36%	3.21%
20.00%	31.67%	37.50%	2.50%	7.50%
100.00%	100.00%	145.00%	37.50%	57.50%
81.50%	77.00%	38.50%	20.50%	22.50%
51.94%	49.44%	26.67%	17.50%	17.78%
38.65%	38.08%	21.54%	14.81%	15.19%
29.26%	29.71%	18.09%	12.21%	13.09%
20.12%	20.95%	14.76%	9.76%	10.95%
10.00%	10.80%	9.30%	7.80%	8.00%

Tabla 12: Tabla de error porcentual del valor del centroide con respecto al valor medio del histograma.

Fuente: Elaboración propia

Error referente a Centroides				
e1	e2	e3	e4	e5
0.65%	2.54%	2.95%	0.22%	1.39%
7.19%	6.74%	1.17%	1.33%	1.30%
11.11%	12.36%	2.76%	2.04%	2.12%
13.70%	17.02%	5.38%	0.46%	5.38%
17.65%	25.56%	11.67%	0.36%	3.11%
25.00%	46.34%	27.27%	2.56%	6.98%
0.00%	0.00%	322.22%	60.00%	135.29%
440.54%	334.78%	62.60%	25.79%	29.03%
108.09%	97.80%	36.36%	21.21%	21.62%
63.01%	61.49%	27.45%	17.38%	17.91%
41.37%	42.26%	22.08%	13.90%	15.06%
25.19%	26.51%	17.32%	10.82%	12.30%
11.11%	12.11%	10.25%	8.46%	8.70%

Tabla 13: Tabla de error porcentual del valor medio del histograma con respecto al centroide.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se observan los valores mínimo y máximo de cada contenedor del histograma de las imágenes de índice NDVI, se usaron 13 contenedores y se halló el valor medio de cada contenedor, también se añadió los valores de los centroides por el método de segmentación de K-means.

En la tabla 12 se halló el error porcentual de los centroides respecto al valor medio del histograma de la misma imagen correspondiente a cada semana.

En la tabla 13 se halló el error porcentual del valor medio del histograma con respecto al valor del centroide de la misma imagen correspondiente a cada semana.

Se realizó esta comparación a fin de encontrar similitudes entre ambos métodos y alguna correspondencia. **Utilizaremos el método de Otsu para la clasificación, porque este método nos brinda resultados con mayor exactitud en cuanto al**

límite entre clases, en cambio el método de K-means nos brinda centroides, más no límites entre clases.

4.5. Extracción de características (clasificación)

Aplicación “Color Threshold” - Matlab

Para la clasificación se usa una aplicación de Matlab esta es “Color Threshold” (Umbral de una imagen de color), que es una aplicación que nos permite modificar las imágenes de color umbral mediante la manipulación de los componentes de color de estas imágenes, basándose en diferentes espacios de color.

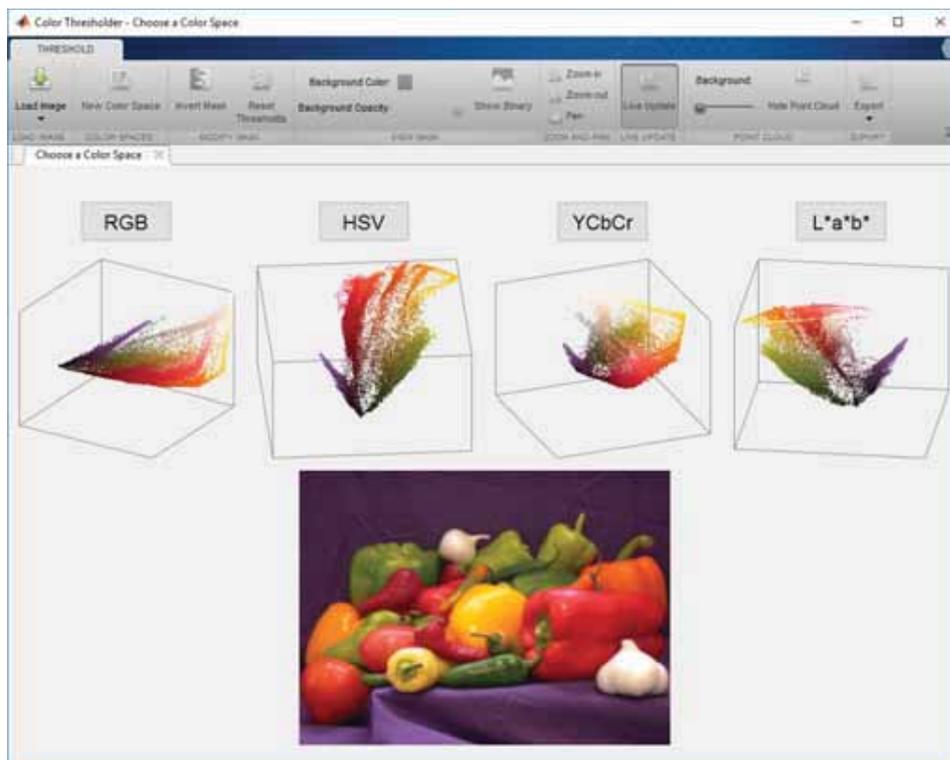


Figura 91: Aplicación “color threshold”

Fuente: Matlab.

Después de haber segmentado, la imagen utilizamos esta aplicación para separar las clases y poder clasificarlas.

1.- Primero abrimos la aplicación en el Matlab, e importamos nuestras imágenes segmentadas, haciendo clic en “load Image”>>”Load image From Workspace”

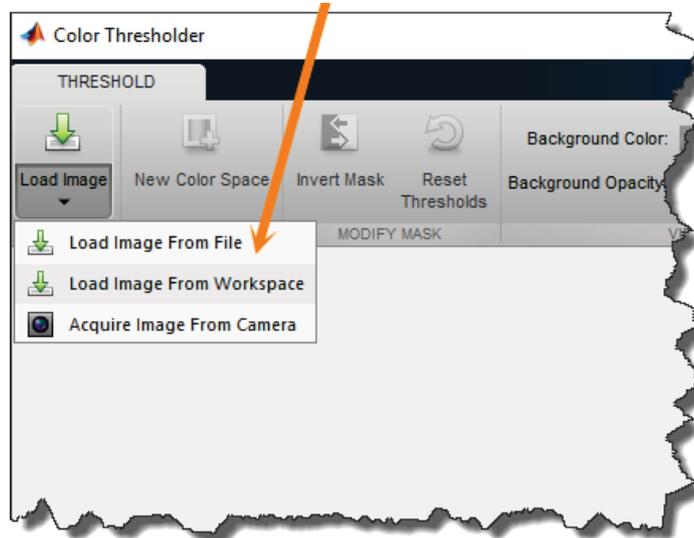


Figura 92: Cargar imagen en solo thresholder

Fuente: Help Matlab.

2.- Luego de cargar la imagen, se elige el modelo de color HSV, el marcador creará una imagen y nos dará los controles del modelo de color para este espacio de color. Tendremos la perrilla en doble dirección para el componente H (tono), que será la herramienta q nos ayude a seleccionar nuestros datos y realizar la clasificación, además se tienen dos controles deslizantes de los componentes S y V, pero en este estudio no se utilizan.

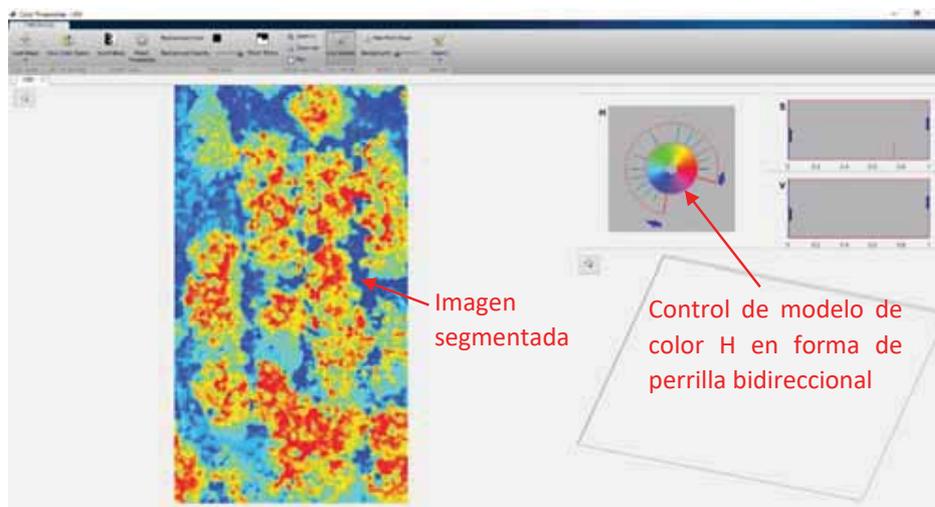


Figura 93: Imagen segmentada en la aplicación, y con el modelo HSV.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado este procedimiento, para realizar la clasificación, por conveniencia se usa la segmentación de 12 clases, pues se obtuvieron mejores resultados con esta segmentación.

4.5.1. Tablas de clasificación.

Clasificación 0 semana sin riego (domingo 19 de mayo del 2019)

Número de clases: 12

Clasificación	t (umbral)	Valor t
Sombra	1	-0,858823529411765
	2	-0,670588235294118
Suelo	3	-0,513725490196078
	4	-0,356862745098039
	5	-0,207843137254902
	6	-0,0666666666666667
Palto	7	0,0745098039215686
	8	0,207843137254902
	9	0,341176470588235
	10	0,490196078431373
	11	0,654901960784314
	12	0,835294117647059

Tabla 14: Clasificación de imagen segmentada de 1 semana sin riego.

Fuente: elaboración propia.

Valor umbral t con 0 semana sin riego = 0,0745098039215686

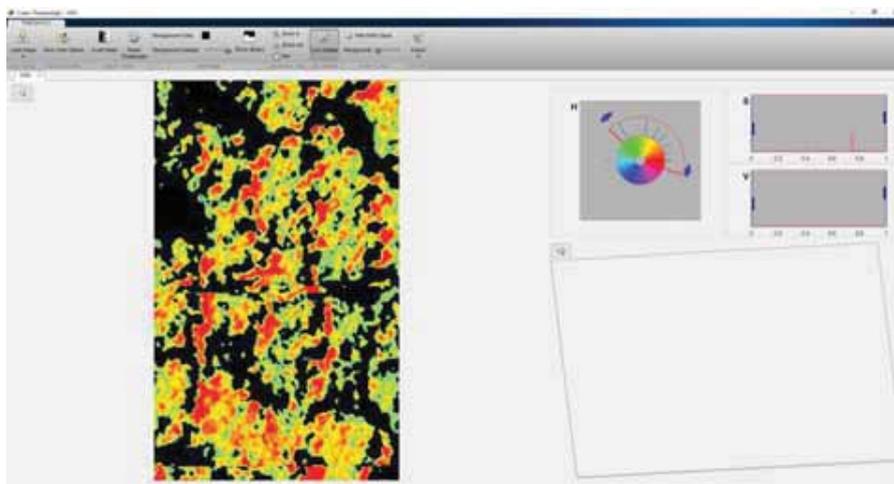


Figura 94: Imagen de clasificación.

Fuente: elaboración propia.

Clasificación 2 – 1 semana sin riego (domingo 26 de mayo del 2019)

Número de clases: 12

Clasificación	t (umbral)	Valor t
Sombra	1	-0,858823529411765
	2	-0,670588235294118
Suelo	3	-0,513725490196078
	4	-0,356862745098039
	5	-0,200000000000000
	6	-0,0588235294117647
Palto	7	0,0745098039215686
	8	0,207843137254902
	9	0,341176470588235
	10	0,482352941176471
	11	0,639215686274510
	12	0,827450980392157

Tabla 15: Clasificación de imagen segmentada de 2 semanas sin riego.

Fuente: elaboración propia

Valor umbral t con 1 semanas sin riego = 0,0745098039215686

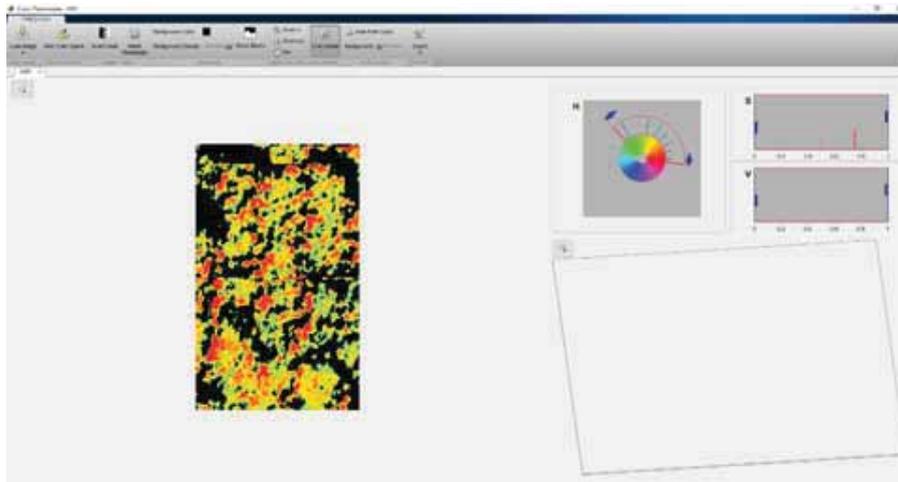


Figura 95: Imagen de clasificación.

Fuente: elaboración propia.

Clasificación 3 – 2 semanas sin riego (domingo 02 de junio del 2019)

Número de clases: 12

Clasificación	t (umbral)	Valor t
Sombra	1	-0,843137254901961
	2	-0,678431372549020
Suelo	3	-0,529411764705882
	4	-0,380392156862745
	5	-0,223529411764706
Palto	6	-0,066666666666667
	7	0,0823529411764705
	8	0,223529411764706
	9	0,372549019607843
	10	0,521568627450980
	11	0,670588235294118
	12	0,835294117647059

Tabla 16: Clasificación de imagen segmentada de 3 semanas sin riego.

Fuente: elaboración propia

Valor umbral t con 2 semanas sin riego = -0,066666666666667

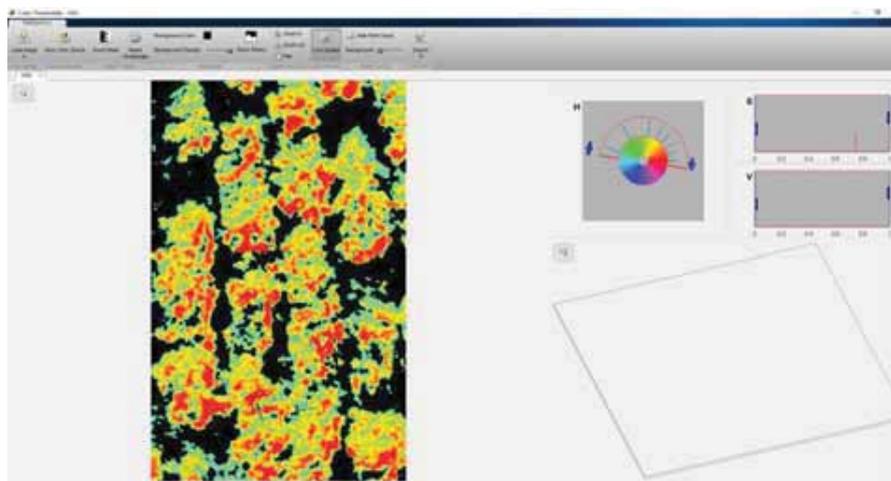


Figura 96: Imagen de clasificación.

Fuente: elaboración propia.

Clasificación 4 – 3 semanas sin riego (domingo 09 de junio del 2019)

Número de clases: 12

Clasificación	t (umbral)	Valor t
Sombra	1	-0,843137254901961
	2	-0,678431372549020
Suelo	3	-0,521568627450980
	4	-0,372549019607843
Palto	5	-0,207843137254902
	6	-0,0588235294117647
	7	0,0745098039215686
	8	0,207843137254902
	9	0,349019607843137
	10	0,505882352941176
	11	0,662745098039216
	12	0,827450980392157

Tabla 17: Clasificación de imagen segmentada de 4 semanas sin riego.

Fuente: elaboración propia.

Valor umbral t con 3 semanas sin riego = -0,207843137254902

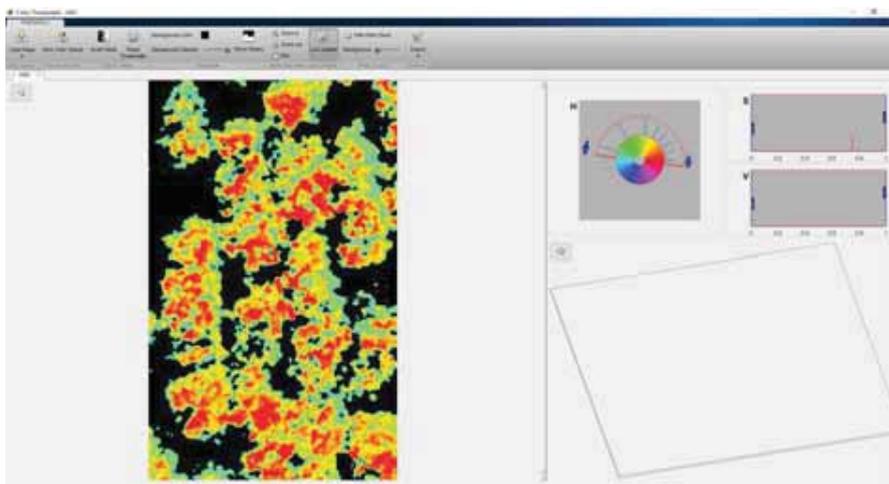


Figura 97: Imagen de clasificación.

Fuente: elaboración propia.

Clasificación 5 – 4 semanas sin riego (domingo 16 de junio del 2019)

Número de clases: 12

Clasificación	t (umbral)	Valor t
Sombra	1	-0,850980392156863
	2	-0,686274509803922
Suelo	3	-0,537254901960784
	4	-0,372549019607843
Palto	5	-0,210000000000000
	6	-0,0509803921568628
	7	0,0901960784313725
	8	0,223529411764706
	9	0,364705882352941
	10	0,513725490196078
	11	0,670588235294118
	12	0,835294117647059

Tabla 18: Clasificación de imagen segmentada de 5 semanas sin riego

Fuente: elaboración propia.

Valor umbral t con 4 semanas sin riego = $-0,210000000000000$

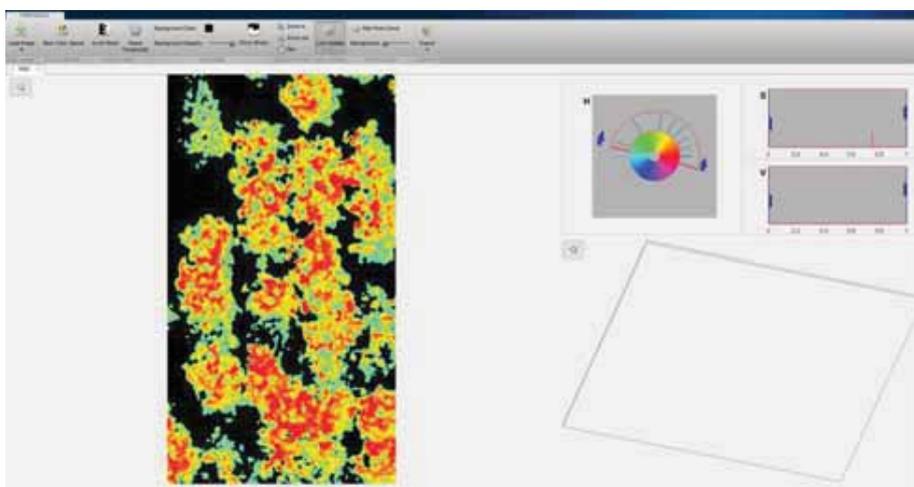


Figura 98: Imagen de clasificación.

Fuente: elaboración propia.

4.6. Resultados.

4.6.1. Resultados de clasificación.

4.6.1.1. Tabla de resultados

Clasificación		Clasificación agrícola	Umbral máximo
Sombra		-	-0,686274509803922
Suelo		-	-0,372549019607843
Palto	4 Semanas sin riego	Crítico	-0.210000000000000
	3 Semanas sin riego	Semi crítico	-0.207843137254902
	2 Semanas sin riego	Medio	-0.066666666666667
	1 Semanas sin riego	Semi óptimo	0.074509803921569
	0 Semanas sin riego	Óptimo	0.074509803921569

Tabla 19: Tabla de clasificación de resultados.

Fuente: elaboración propia.

4.6.1.2. Curva de resultados en función al índice NDVI y estrés hídrico (expresado en número de días).

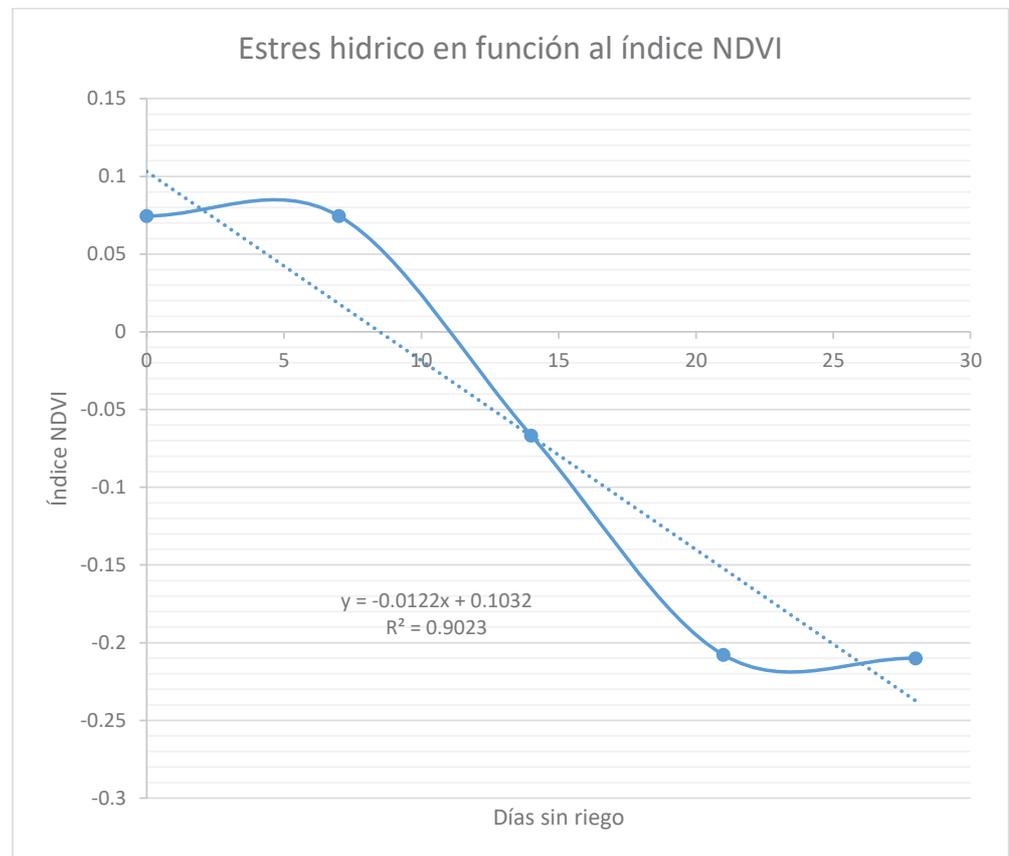


Figura 99: Gráfica de la función linealizada del estrés hídrico en función al índice NDVI.

Fuente: elaboración propia.

Ecuación de la curva linealizada:

$$NDVI = -0.0122 \left(\# \text{ días } \frac{S}{R} \right) + 0.1032 \quad (4.25)$$

$$R^2 = 0.9323 \quad (4.26)$$

4.6.2. Resultados a partir de la linealización de la curva.

Clasificación		Clasificación agrícola	Umbral máximo
Sombra		-	-0.686275
Suelo		-	-0.372549
Palto	5 Semanas sin riego	-	-0.323800
	4 Semanas sin riego	Crítico	-0.238400
	3 Semanas sin riego	Semi crítico	-0.153000
	2 Semanas sin riego	Medio	-0.067600
	1 Semanas sin riego	Semi óptimo	0.017800
	0 Semanas sin riego	Óptimo	0.103200

Tabla 20: Tabla de clasificación de resultados por la curva linealizada.

Fuente: elaboración propia.

4.6.3. Interpretación de los resultados:

Los resultados están estrechamente relacionados entre la segmentación y la clasificación. De acuerdo a las imágenes 48 a 62 de segmentación, se adquirieron 3 tablas con datos numéricos, la tabla 5 con segmentación de 4 clases, la tabla 6 con segmentación de 6 clases y la tabla 7 con segmentación de 12 clases.

De esta segmentación se obtuvieron imágenes RGB constituidos por grupos de datos, en las cuales se pueden diferenciar 3 grupos de información conocidos (sombra, suelo y palto), en este estudio se usa el valor umbral mínimo en el palto para observar su variación con respecto al sometimiento de estrés hídrico realizado, para realizar la clasificación, se usó la tabla de 12 clases, pues estos resultados nos generan mayor variación del estrés hídrico del palto. En caso este estudio fuera sobre clasificar la cobertura terrestre, sería más eficaz usar la tabla de 4 clases o la de 6. Al haber asignado la tabla de 12 clases la más eficiente para realizar la clasificación, continuamos con la clasificación.

La clasificación se logró mediante el análisis exhaustivo entre clases, para agrupar clases y clasificar los objetos presentes. Con este proceso se obtuvo tres clases de objetos identificados con diferentes valores y distinto color, cuyas tablas de clasificación se

muestran en las tablas 14, 15, 16, 17 y 18. Cada tabla muestra la clasificación por semana sin riego, comenzando con 0 semanas sin riego para la tabla 8, con 1 semana sin riego para la tabla 9 y así respectivamente hasta las 4 semanas sin riego para la tabla 12.

De las tablas 14, 15, 16, 17 y 18 se obtuvieron los valores mínimos del palto, que fueron agrupados en la tabla 19, donde se clasifican en tres objetos sombra, suelo y palto, en este último se realizó una clasificación de semanas sin riego de 0, 1, 2, 3 y 4 semanas sin riego, considerando como clasificación agrícola a 4 semanas sin riego como “crítico”, a 3 semanas sin riego como “semi crítico”, a 2 semanas sin riego como “medio”, a 1 semana sin riego como “semi óptimo”, a 0 semanas sin riego como “óptimo”. Con los cuales se realizó una linealización y se obtuvo la (ecuación 4.25) en función al índice NDVI y el número de días sin riego.

Usando la ecuación 4.25 se colocan los datos obtenidos para la palta dentro de la tabla 20, donde se realizó la clasificación, se desestimó la precisión de los datos de sombra y suelo, usando los mismos valores que en la tabla 19 y se reemplazaron los valores para linealizar la curva en la clasificación de estrés hídrico de la palta con 6 valores, en esta tabla se agrega el valor estimado de 5 semanas sin riego.

Se concluye con la tabla 20 como resultado del método estudiado, estos valores son los que usamos en el algoritmo de prueba, para poder realizar el análisis en las imágenes.

CAPITULO V

MÉTODO DE VALIDACIÓN.

5.1. Prueba del algoritmo con hojas de palto sometidas a estrés hídrico fuera del palto.

En ánimo de corroborar el funcionamiento del algoritmo se propuso realizar una experiencia tomando imágenes a hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto.

Procedimiento:

1.- Se recolectaron 6 hojas de un árbol de palto, una por día durante 6 días, desde el 17 de octubre del 2019 hasta el 23 de octubre del 2019.

Datos tomados:

Las imágenes fueron tomadas el 23 de octubre del 2019, a partir de estos datos se elaboró el siguiente cuadro:

Nro.	Fecha de recolección	Detalle al momento de la toma de datos	Imagen
1	17/10/2019	Hoja reseca sometida a estrés hídrico por 7 días fuera del palto.	
2	18/10/2019	Hoja reseca sometida a estrés hídrico por 6 días fuera del palto.	
3	19/10/2019	Hoja reseca sometida a estrés hídrico por 5 días fuera del palto.	
4	21/10/2019	Hoja reseca sometida a estrés hídrico por 3 días fuera del palto.	

5	22/10/2019	Hoja reseca sometida a estrés hídrico por 2 días fuera del palto.	
6	23/10/2019	Hoja reseca sometida a estrés hídrico por 1 día fuera del palto.	

Cuadro 21.- Cuadro de imágenes tomadas el 23 de octubre del 2019, de hojas sometidas a estrés hídrico por 7 días de un palto.

Fuente: Elaboración propia.

2.- Se colocaron las hojas resacas en una superficie uniforme y se realizó la captura de datos con la cámara multiespectral Parrot Sequoia.

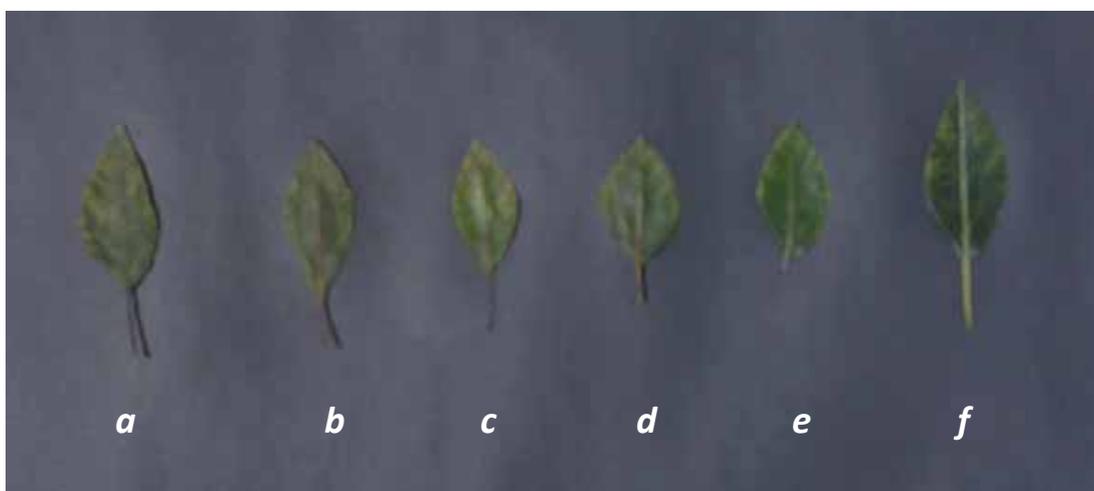


Figura 100. Imagen de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.

Fuente: Elaboración propia.

3.- Luego se usó el código del algoritmo desarrollado para observar el comportamiento de las hojas de palto con respecto al índice NDVI.

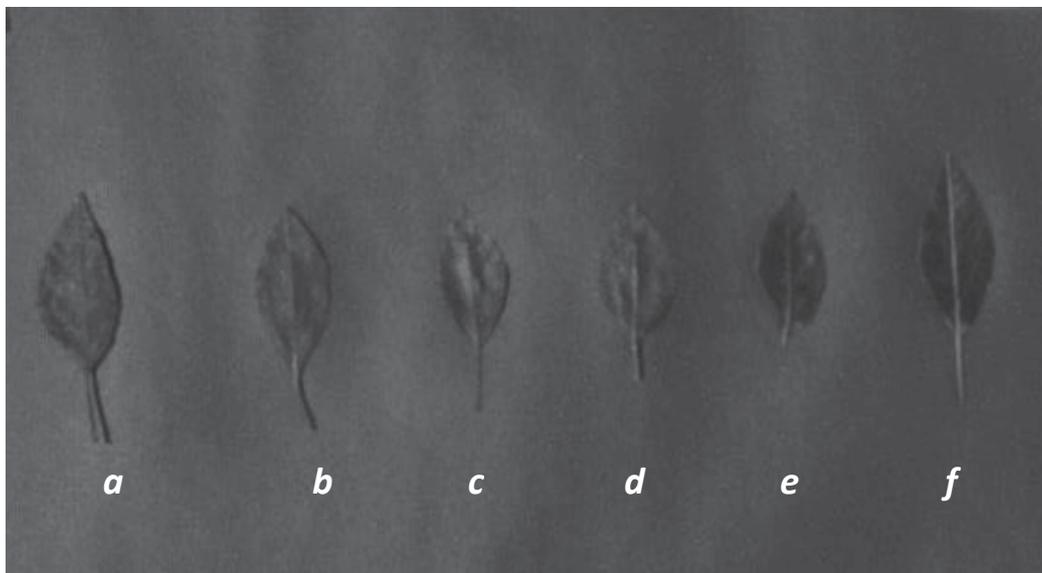


Figura 101. Imagen en banda roja (RED) de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.

Fuente: Elaboración propia.

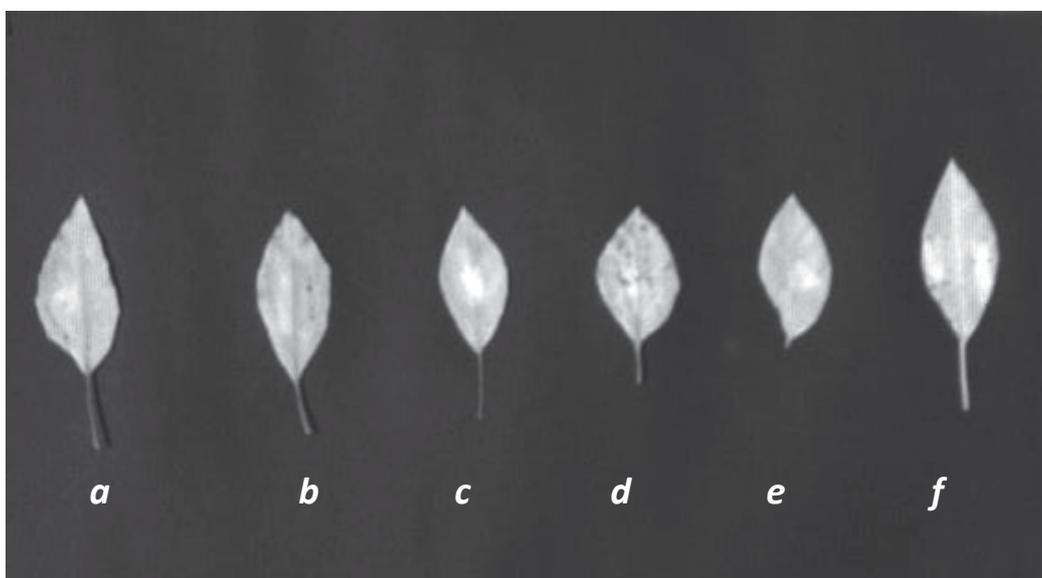


Figura 102. Imagen en banda infrarroja (NIR) de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.

Fuente: Elaboración propia.

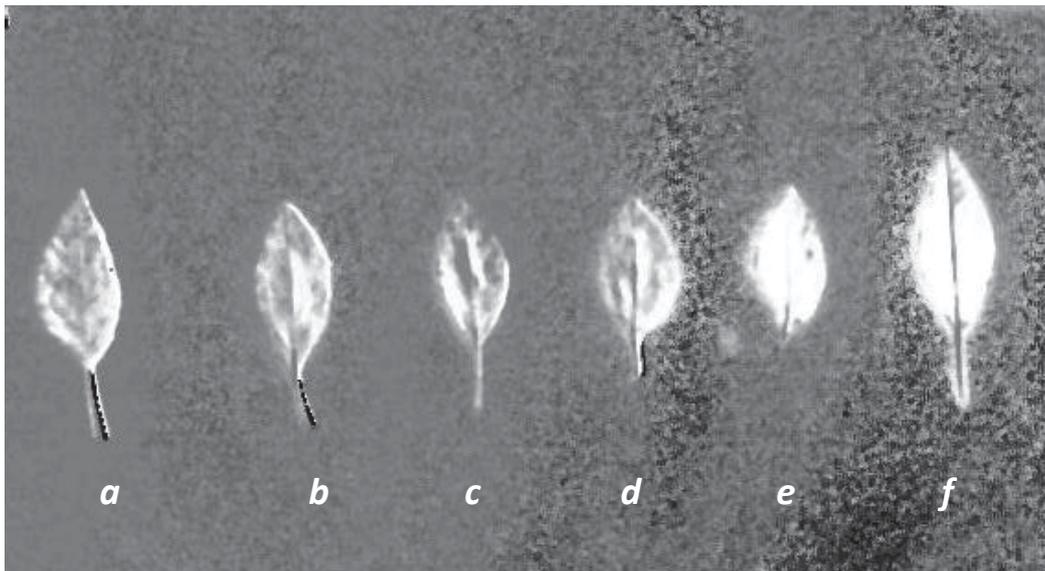


Figura 103. Imagen con el índice NDVI de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron resultados óptimos. Al realizar el coloreo por clases se observa la diferencia entre hojas, se realizó la segmentación por 12 umbrales por el método de Otsu, donde se observa que en la hoja “f” existe mayor concentración de color rojo que es el valor más próximo a 1 del índice NDVI que nos indica que existe mayor concentración de agua en una hoja recién sacada del palto a diferencia de la hoja “a” donde la concentración del color rojo se reduce significativamente. Y se concluye que el algoritmo desarrollado cumple con el análisis del estrés hídrico.

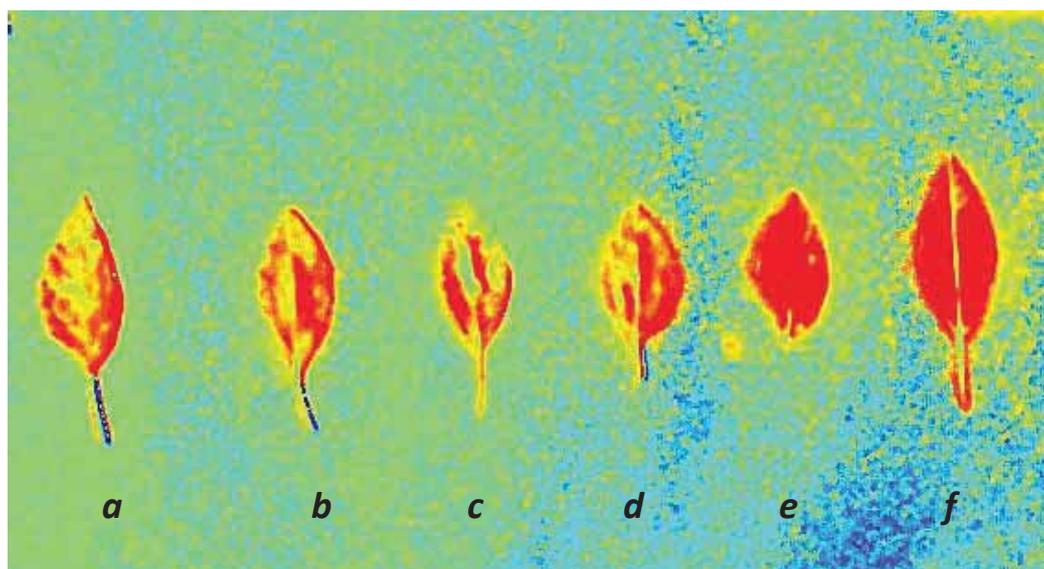


Figura 104. Imagen coloreada por clases a partir del índice NDVI de las 6 hojas sometidas a estrés hídrico fuera del palto. a) hoja reseca de 7 días, b) hoja reseca de 6 días, c) hoja reseca de 5 días, d) hoja reseca de 3 días, e) hoja reseca de 2 días, f) hoja reseca de 1 día.

Fuente: Elaboración propia.

Clases	Límite inferior	Límite superior	R	G	B	RGB
Clase 1	-1.0000	-0.8510	0	0	255	
Clase 2	-0.8510	-0.6784	0	64	255	
Clase 3	-0.6784	-0.5294	0	128	255	
Clase 4	-0.5294	-0.3333	0	191	255	
Clase 5	-0.3333	-0.1765	0	255	255	
Clase 6	-0.1765	-0.0824	64	255	191	
Clase 7	-0.0824	0.0118	128	255	128	
Clase 8	0.0118	0.1765	191	255	64	
Clase 9	0.1765	0.3412	255	255	0	
Clase 10	0.3412	0.5059	255	191	0	
Clase 11	0.5059	0.6627	255	128	0	
Clase 12	0.6627	0.8353	255	64	0	
Clase 13	0.8353	1.0000	255	0	0	

Tabla 22.- Resultados por clases de la segmentación en las hojas sometidas a estrés hídrico. Se añadió el valor RGB por clase.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Correlación agronómica

Apreciación del especialista agronómico.

El especialista realizó una verificación visual a la parcela de cultivo de palta, durante el tiempo de estudio (5 semanas).

Terminado este tiempo, dio su apreciación agronómica en cuanto al resultado y su interpretación con respecto al sometimiento del cultivo de la persea americana (palta) a estrés hídrico.

Como primer método de observación el especialista realizó una transectación del cultivo, que es un procedimiento, para diferenciar el área de estudio del resto del cultivo.

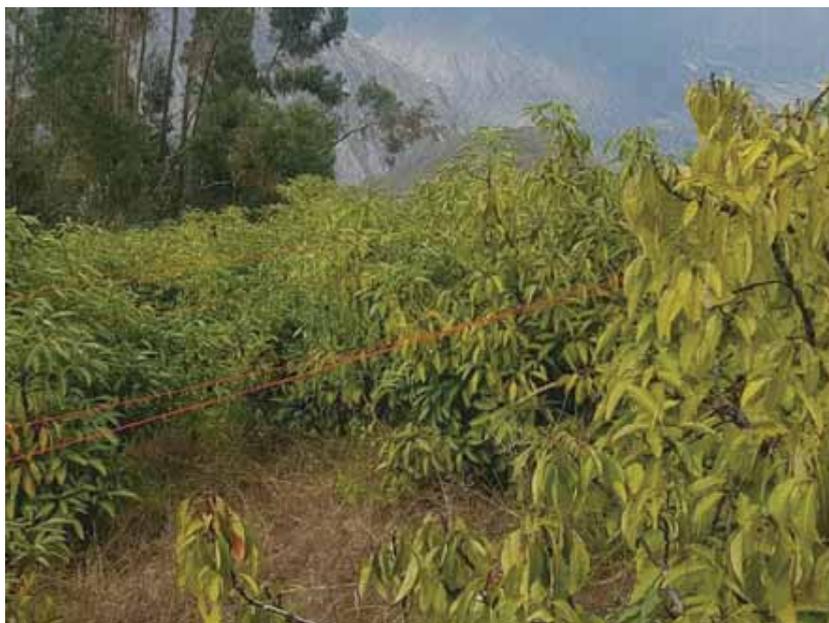


Figura 105: Transectación de toda parcela de cultivo de palta en la semana 0.

Fuente: foto tomada en parcela de estudio.



Figura 106: Transectación de parcela de cultivo de palta para la semana 0

Fuente: foto tomada en parcela de estudio.



Figura 107: Transectación de parcela de cultivo de palta para la semana 3.

Fuente: foto tomada en parcela de estudio.

Evaluación general del cultivo:

- En el cultivo de palta, no se observa falta de turgencia (abultado y firme), ni resequeidad en las hojas, durante el tiempo de estudio.
- En el suelo de cultivo, no existe pérdida de humedad, durante el tiempo de estudio.



Figura 108: Observación de terreno de parcela de cultivo de palta para la semana 4 sin riego.

Fuente: foto tomada en parcela de estudio.



Figura 109: Observación de estado de las hojas del palto del cultivo en la semana 4 sin riego.

Fuente: foto tomada en parcela de estudio.

Conclusiones del especialista:

- No se puede diferenciar a través de la observación directa (visión humana) las 5 categorías asignadas (crítica, semi crítica, media, semi óptima y óptima), se requiere observarla por medio del índice NDVI, la categorización se hace solo por la observación de las fotografías aéreas multiespectrales que deben ser sometidas a un procesamiento de imágenes.
- Aparentemente los plantones de palta, resisten al sometimiento de estrés hídrico a comparación de otros cultivos. A pesar de esto, las manifestaciones perjudiciales se observan durante la época de fructificación (formación del fruto).
- A raíz de este estudio, surge la necesidad del uso de análisis multiespectral, porque disipa las dudas de la observación directa.

5.3. Método de validación.

En el presente estudio se usa un software comercial para comparar los resultados obtenidos. Se usa el software PIX4D, en versión de prueba.

Comparación entre el algoritmo desarrollado y el software comercial PIX4D.

0 semanas sin riego (19 de mayo del 2019)

Imagen procesada con algoritmo desarrollado:

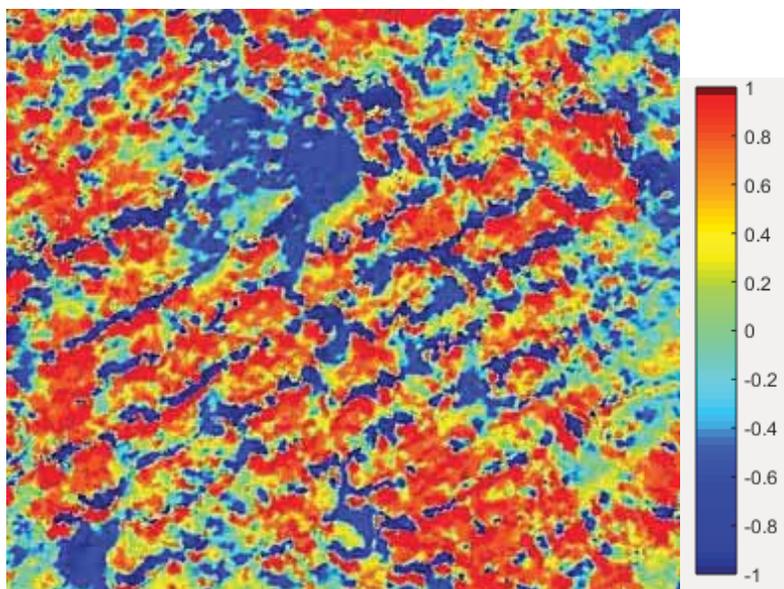


Figura 110: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 19 de mayo del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen procesada en software comercial pix4D:

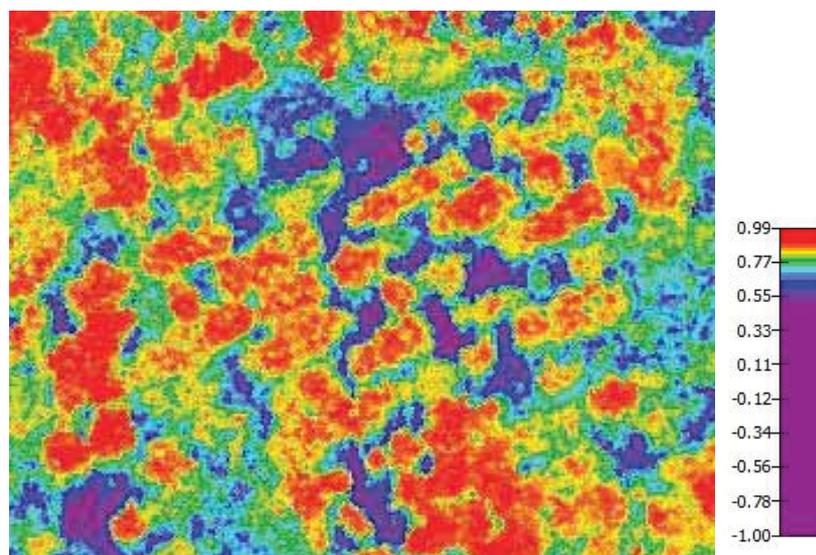


Figura 111: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 19 de mayo del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

1 semana sin riego (26 de mayo del 2019)

Imagen procesada con algoritmo desarrollado:

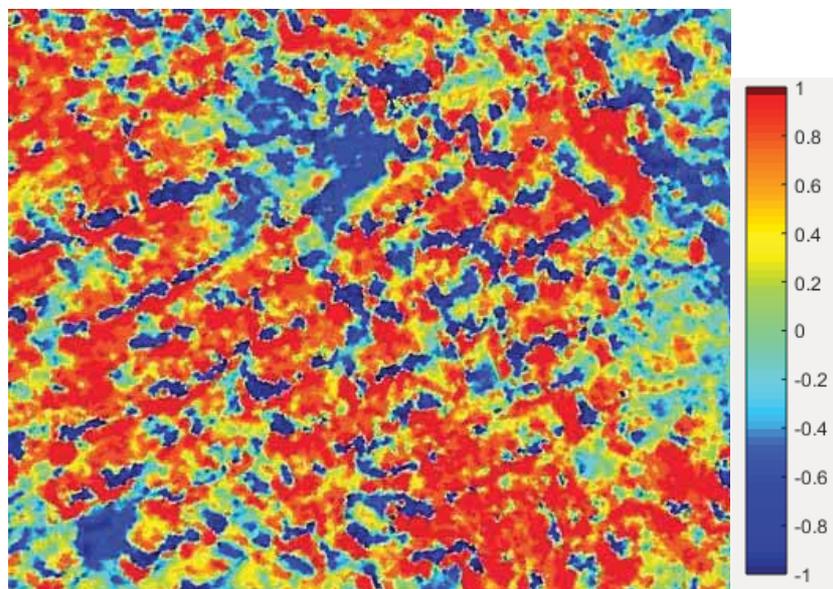


Figura 112: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 26 de mayo del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen procesada en software comercial pix4D:

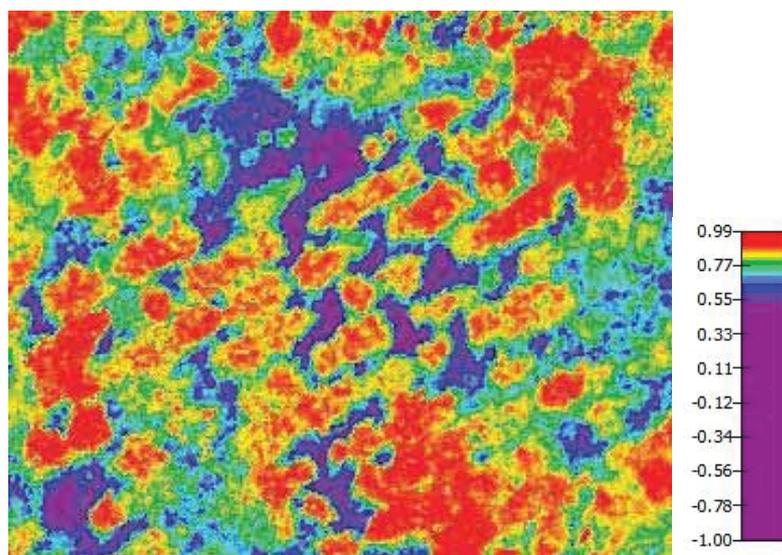


Figura 113: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 26 de mayo del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

2 semanas sin riego (02 de junio del 2019)

Imagen procesada con algoritmo desarrollado:

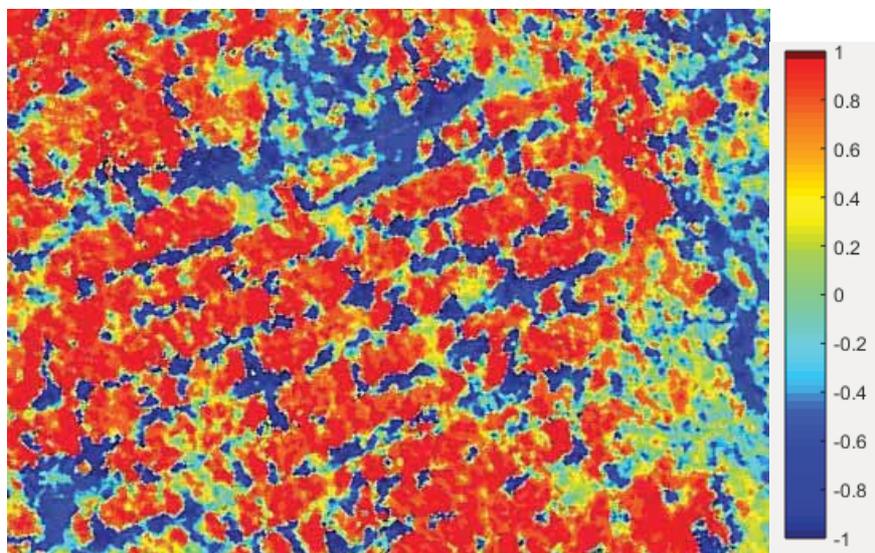


Figura 114: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 02 de junio del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen procesada en software comercial pix4D:

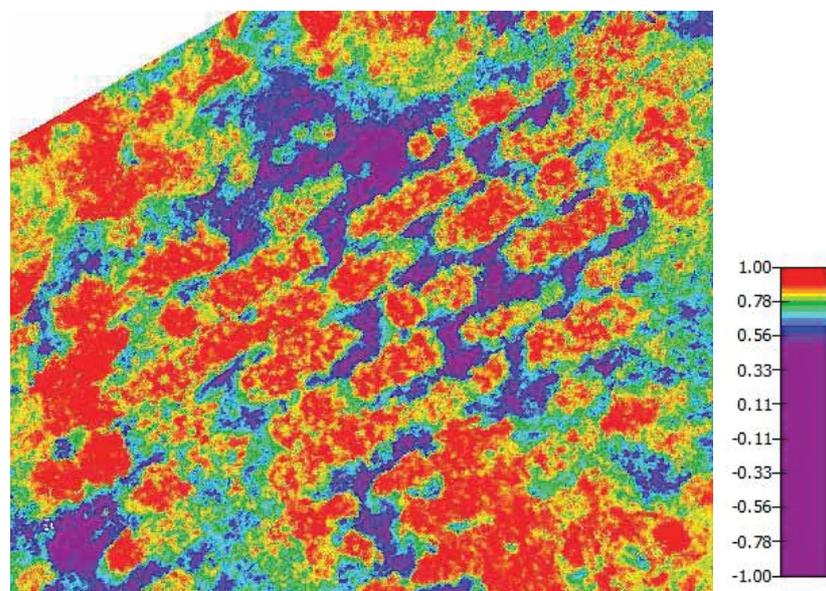


Figura 115: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 02 de junio del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

3 semanas sin riego (09 de junio del 2019)

Imagen procesada con algoritmo desarrollado

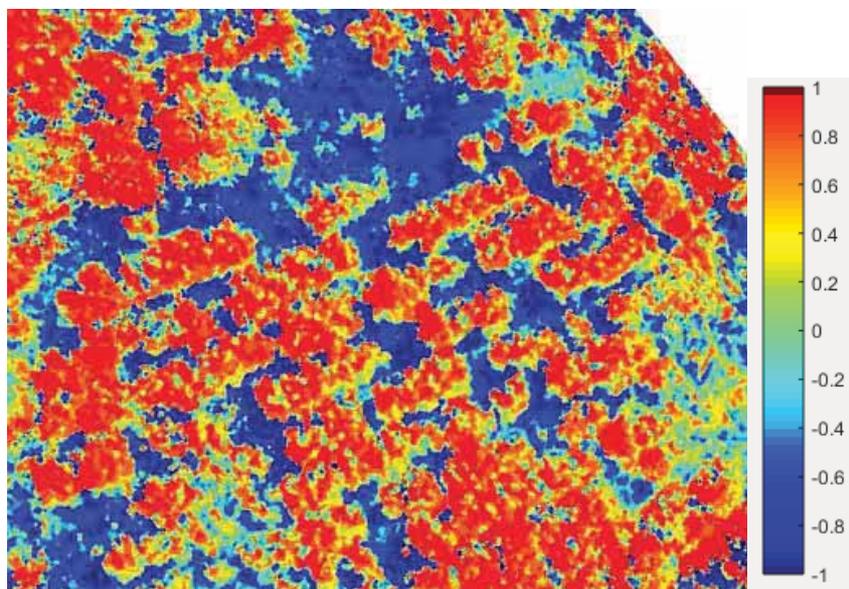


Figura 116: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 09 de junio del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen procesada en software comercial pix4D:

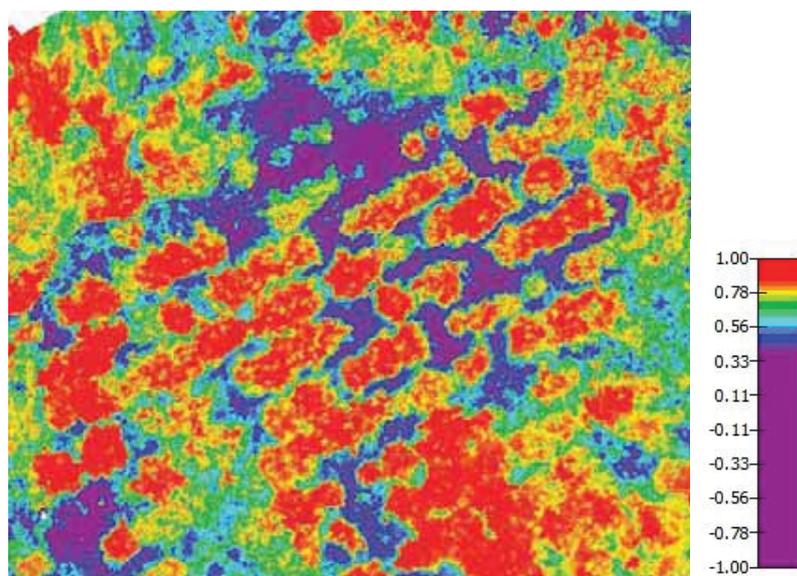


Figura 117: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 09 de junio del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

4 semanas sin riego (16 de junio del 2019)

Imagen procesada con algoritmo desarrollado:

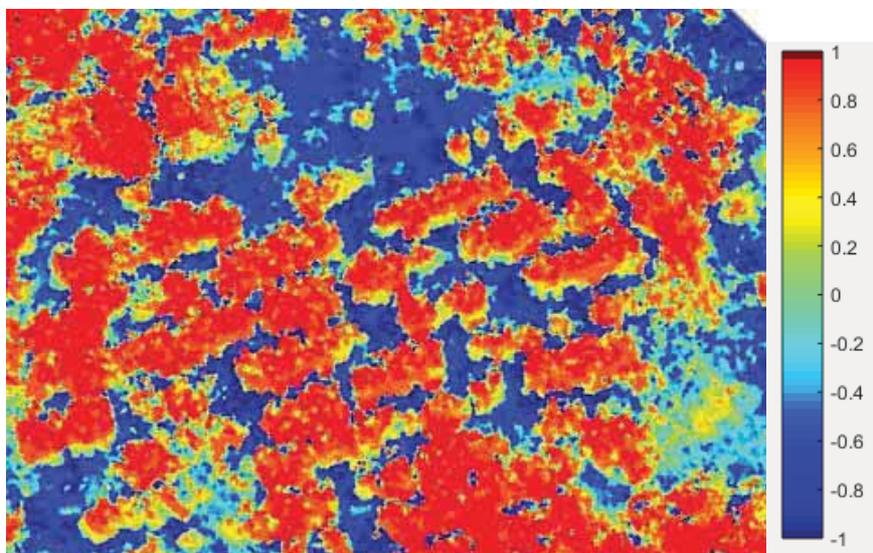


Figura 118: Imagen procesada con los datos de validación, fecha: 16 de junio del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen procesada en software comercial pix4D:

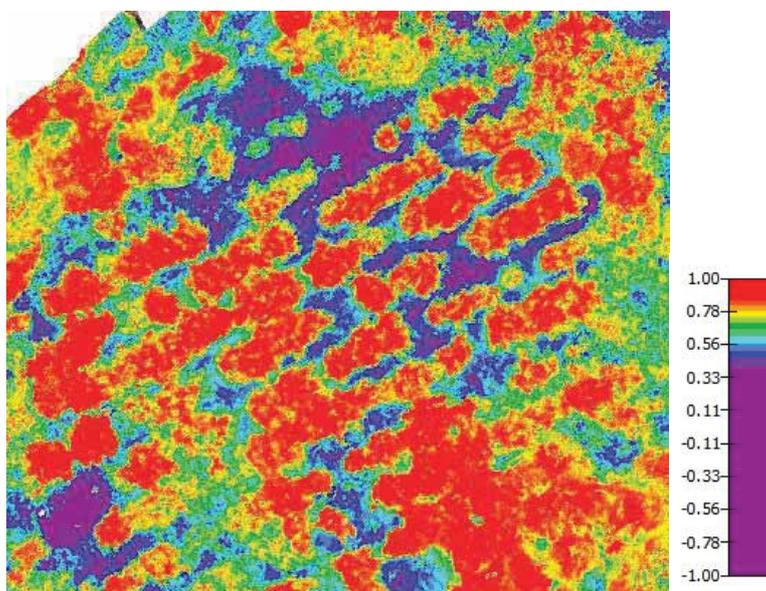


Figura 119: Procesamiento de imagen procesada con PIX4D, fecha: 16 de junio del 2019.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Análisis del método de validación.

De acuerdo al sistema de monitoreo de índice de sequía combinado del observatorio nacional de sequias del Perú, publicado por ANA (Autoridad Nacional de Agua), IGP (Instituto Geofísico del Perú) y el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), publica la tabla de “rango de índice de sequía combinado”, en donde indican que una **sequía agrícola en función al índice NDVI manifiesta valores menores a -0.2.**

Alerta	Condición de Sequía
Sequía Meteorológica	
1	Déficit en la precipitación (SPI < -1)
Sequía Agrícola	
2	Estrés hídrico en la vegetación (Anomalía de NDVI < -0.2)
Sequía Agrícola y Meteorológica	
3	SPI < - 1 y NDVI < -0.2

Figura 120: Rango de índice de sequía combinado.

Fuente:

<http://ons.snirh.gob.pe/Peru/maproom/Monitoring/Combined/Combined.html?T=Oct%202018>

- En el presente estudio los índices de NDVI varían, presentados de la siguiente forma:
 - o Los valores negativos inferiores a -0.3 a -1 representan las zonas de suelo y sombra.
 - o Los valores negativos entre -0.07 a -0.21 están asociados a la falta de riego del espécimen (de 2 a 4 semanas sin riego).
 - o Los valores más próximos a cero representan el estado semi óptimo del espécimen.
 - o A partir de 0.0745 se considera óptimo.

Análisis entre el software comercial “PIX4D” y algoritmo desarrollado:

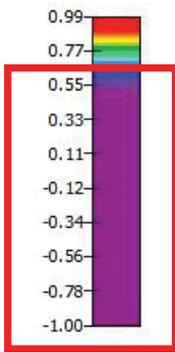
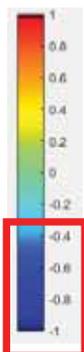
	PIX 4D	Algoritmo desarrollado
Valores de índice NDVI del suelo	<p>Los valores del índice del suelo son menores a 0.55</p> 	<p>Los valores del índice del suelo son menores a -0.3.</p> 
Observaciones del palto.	Se observa que el centro del palto es más próximo al valor 1 del índice NDVI.	
	Se manifiesta una deshidratación concéntrica desde los bordes al interior.	
	En los bordes exteriores, no cuenta con una parametrización exacta de los índices NDVI, ya que sus índices son positivos.	En los bordes exteriores los valores son negativos y positivos, valores más ajustados a la realidad.

Tabla 23: Tabla de análisis del software comercial Pix4D y el algoritmo desarrollado, Fuente: elaboración propia.

CAPITULO VI

COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

6.1 Costo de implementación.

En el presente capítulo se detallan los costos de los equipos utilizados, gastos de movilidad y viáticos para la toma de datos, materiales de oficina, referencia bibliográfica y horas hombre que fueron usados en el presente estudio.

N°	Ítem presupuestal	Clasificación	Cnd.	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
01	UAV Matrice 600 DJI pro	Equipos utilizados	1	S/. 30,000.00	S/. 30,000.00
02	Matrice (juego de 6 alerones)		6	S/. 120.00	S/. 720.00
03	Cámara multiespectral Parrot Sequoia		1	S/. 30,000.00	S/. 30,000.00
04	Cable tipo A tipo B		1	S/. 50.00	S/. 50.00
05	Gimbal (diseño)		1	S/. 200.00	S/. 200.00
06	Gimbal (impresión en 3D y envío de Lima)		1	S/. 300.00	S/. 300.00
07	Gimbal (impresión acrílico)		1	S/. 120.00	S/. 120.00
08	Gimbal (accesorios: pernos, soportes y correa)		1	S/. 50.00	S/. 50.00
09	Convertidor de voltaje DC-CD 3A LM2596		1	S/. 15.00	S/. 15.00
10	Accesorios y soldadura		1	S/. 20.00	S/. 20.00
11	Equipo móvil Samsung S7-Edge		1	S/. 2,000.00	S/. 2,000.00
12	Computadora Optiplex 7050		1	S/. 4,500.00	S/. 4,500.00
13	Softwares en versión de prueba		4	S/. -	S/. -
14	Pasajes (locales)	Gastos de movilidad y viáticos para toma de datos	6	S/. 64.00	S/. 384.00
15	Pasajes (interprovinciales)		6	S/. 120.00	S/. 720.00
16	Alimentación		6	S/. 120.00	S/. 720.00
17	Envío de materiales		6	S/. 20.00	S/. 120.00
18	Papel bond (500 hojas)	Materiales de oficina	3	S/. 18.00	S/. 54.00
19	Impresiones y copias)		1	S/. 200.00	S/. 200.00
20	Otros (lapiceros, lápices, plumones, etc.)		1	S/. 200.00	S/. 200.00
21	Libros	Referencia bibliográfica	5	S/. 200.00	S/. 1,000.00
22	Horas - hombre	Personal	2	S/. 1,000.00	S/. 2,000.00

Tabla 24: Tabla de costos de implementación del estudio realizado., Fuente: elaboración propia.

6.2 Resumen de coste total.

RESUMEN DE COSTO TOTAL	
CLASIFICACIÓN	COSTO
Equipos utilizados	S/. 67,975.00
Gastos de movilidad para toma de datos	S/. 1,944.00
Materiales de oficina	S/. 454.00
Referencia bibliográfica	S/. 1,000.00
Personal (horas-Hombre)	S/. 2,000.00
COSTO TOTAL	S/. 73,373.00

Tabla 25: Tabla de resumen de costo total del estudio realizado.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se logró realizar el análisis de estrés hídrico de cultivo de palta, por medio del procesamiento de imágenes aéreas multiespectrales en la localidad de Mollepata, utilizándose el índice de vegetación NDVI para tal fin.
2. La adquisición de datos por medio de secuencias de vuelo de UAV, fue satisfactoria. En el presente estudio se realizaron captura de datos a diferentes alturas, consiguiendo una amplia cantidad de datos, para realizar el análisis.
3. Se desarrolló un algoritmo de procesamiento de imágenes aéreas para el análisis de estrés hídrico del cultivo de palta, concluyendo que los filtros idóneos para este análisis son el filtro de la mediana y la ecualización por histograma. Se usó el índice de vegetación NDVI para diferenciar los valores numéricos del cultivo, para segmentar la imagen se utilizó el método de la multiumbralización de Otsu y también el método de K-means, ambos métodos permiten segmentar la imagen de manera óptima. Finalmente se realizó la clasificación usando los valores umbrales hallado en la segmentación usando el método de multiumbralización Otsu.
4. Existe una alta correlación cualitativa agronómica con el estudio realizado. El especialista agronómico observó en el cultivo, que no existe turgencia ni resequedad en las hojas del palto durante el tiempo de estudio; y esta afirmación se corrobora en el análisis de las imágenes multiespectrales al ser categorizado por el índice NDVI debido a que manifiesta estrés hídrico en los bordes de la plantación del palto.
5. De acuerdo al algoritmo desarrollado en el presente trabajo, los valores de índice NDVI varían desde -0.210 a 0.075, (tabla 4.9) con respecto al estrés hídrico en persea americana (palta) en la localidad de Mollepata.

6. El estrés hídrico se manifiesta en la persea americana (palta) de forma concéntrica (desde los bordes hacia el tallo). Es por eso que la clasificación que se realizó en función del índice NDVI manifiesta los más altos niveles de estrés hídrico en el borde del cultivo.
7. El proceso de adquisición de datos realizado en el presente estudio se comprueba que los costos, tiempo de preparación, planificación de vuelo y vuelo del UAV son más eficientes que los estudios de campo realizados sobre la misma extensión de área.
8. El algoritmo desarrollado permitirá verificar el estado del cultivo de palta en cuanto al estrés hídrico. Sin embargo, se debe resaltar que los índices pueden ser variables para otras especies de vegetación o cultivos distintos, pues se concluye por este estudio que la palta tiene un comportamiento único en cuanto a su alta resistencia al estrés hídrico.
9. Al momento de realizar el estudio se concluyó que existe mayor relación de correspondencia del estrés hídrico en la palta con el índice NDVI en comparación con el índice NDWI. Se realizó el análisis con diversas imágenes espectrales y diferentes índices, que sustentan esta conclusión en el presente estudio.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar un aplicativo de vuelo automático, para mejorar la toma de datos, no obstante, hay que considerar que el con el vuelo manual, se puede evadir obstáculos no previstos (vuelos de aves, arboles muy altos, etc.).
- Se debe tener especial cuidado al filtrar las imágenes multiespectrales o al momento de realizar el cálculo del índice de vegetación, pues si el filtro no es el adecuado, la imagen puede ser difuminada, perdiendo valores importantes para el análisis que desee realizar.
- Se recomienda realizar una correlación de los datos con la información de la evapotranspiración del lugar y una observación al microscopio de las estomas de las hojas del espécimen, con el fin de analizar estos datos a nivel biológico de conservación de agua del espécimen.
- El estudio sobre el estrés hídrico en el cultivo de la palta, puede ser mejorado con un estudio constante (con un terreno de evaluación anual), se recomienda realizar este estudio durante más tiempo y realizar el análisis multidisciplinariamente (con biólogos e ingeniero agrónomos).
- Este estudio, sirve de punto de inicio en cuanto al análisis de cultivos en la región de Cusco usando imágenes multiespectrales, utilizando estas tecnologías se puede estudiar diferentes índices de vegetación y otros parámetros biofísicos pertenecientes a los otros cultivos propios de la región, tales como quinua, maíz u otros.
- La técnica de adquisición de datos por medio de UAVs ofrece una alternativa más óptima en comparación con los métodos tradicionales (avioneta y satélite), considerando además la agreste geografía de la sierra peruana que en su mayoría se encuentra en pendiente.

- El uso de UAVs para estudio en el departamento de Cusco, puede ser complementado con otros equipos electrónicos como la cámara térmica, radares LIDAR o radares SAR y así obtener mejores resultados en cuanto al cultivo, en la región Cusco.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

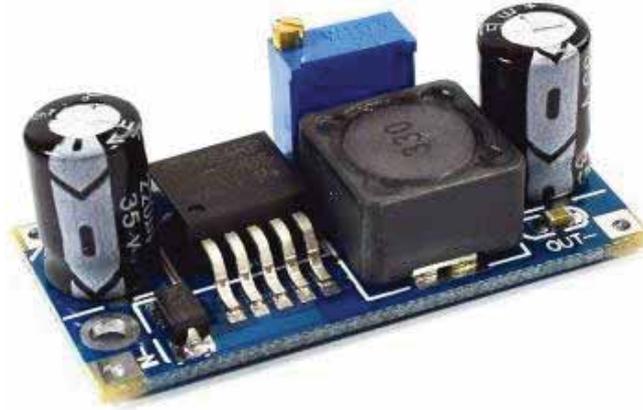
- INIA. (2017). *"Diez años de investigación en manejo del riego en palto"*. Lima.
- Ministerio de agricultura del Perú. (2008). *"Estudio de palta en el Perú y el Mundo"*.
Lima: Despacho Viceministerial – Dirección General de Información Agraria.
- Aguirre Dobernack, N. (2013). *"Implementación De Un Sistema De Detección De Señales De Tráfico Mediante Visión Artificial Basado En Fpga"*. Sevilla.
- Aja, S. T. (2017). *"Análisis de imágenes multiespectrales aéreas de vegetación"*.
Cantabria: Universidad De Cantabria.
- Aventín, P. C. (2017). *"Utilización de sensores multiespectrales e hiperespectrales embarcados en RPAS con el objetivo de dosificar abonos en cultivos"*. Barcelona:
Universidad Politecnica de Catalunya Barcelonatech.
- Avila Mora, I. M. (2014). *"Metodología basada en el analisis de intensidades en imagenes de resonancia magnetica para la deteccion de cicatrices en la corteza cerebral"*. Mexico: Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional Mexico, Distrito Federal.
- Cuevas, E., Zaldivar, D., Perez, M., & RaMa, A. (2010). *"Procesamiento digital de imágenes con MATLAB y Simulink"*.
- García Cervigón, J. J. (2015). *"Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes"*.
Madrid: Universidad Complutense De Madrid.
- J.W., R. (1974). *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*. Texas
EUA: Texas A&M University, College Station.

- Liria, B. (2015). " *Integración de sensores y uso de índices de vegetación para evaluar la producción en plantaciones de cítricos en Málaga Malaga*". Universidad de Malaga.
- Lopez, L., Cajuste, J. F., & Morales, E. (2010). " *El Estres Hidrico Y Su Influencia Sobre La Maduracion Y Calidad De Fruto De Aguacate Variedad Hass*".
- Mitiche, A., & Ben Ayed, I. (2010). " *Varitional and Level Set Methods in Image Segmentation. Springer Topics in Signal Processing*". Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Morales Luna, G. L. (2017). " *Desarrollo De Un Software De Teledección Orientado A La Identificación Y Medición Automática De Áreas De Plantaciones De Aguajales En La Amazonia Peruana Utilizando Imágenes Aéreas Adquiridas Vía Uav Y Algoritmos De Procesamiento Digital De Imágenes*". Lima: UNI.
- Peña Barragán, J. M. (2015). " *Aplicación de drones en la monitorización y protección del viñedo*". Madrid: Institute of Agricultural Sciences, CSIC.
- PITRA(Programa de infraestructura de transporte). (2017). " *Aéreos No Tripulados Del Lanammeucr: Una Herramienta Multidisciplinaria Adaptada Para Todo Tipo De Condiciones Al Servicio Del País*". Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Portero, C. M. (2015). " *Incorporación de imágenes aéreas en el manejo del cultivo del maíz*". Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Rafael C. Gonzales, R. e. (1996). *Tratamiento digital de imagenes*. En R. e. Rafael C. Gonzales,. EUA: Adiston. Wesley Iberoamericana S.A.
- Saraf, Y. (2006). *Algorithms for image segmentation*. Pilani Rajasthan: Birla Institute of Technology and Science, .

ANEXOS

ANEXO 01: DISEÑO DE ACOUPLE DE UAV MATRICE 600 CON CÁMARA MULTIESPECTRAL PARROT SEQUOIA

a) SUMINISTRO DE ENERGÍA.



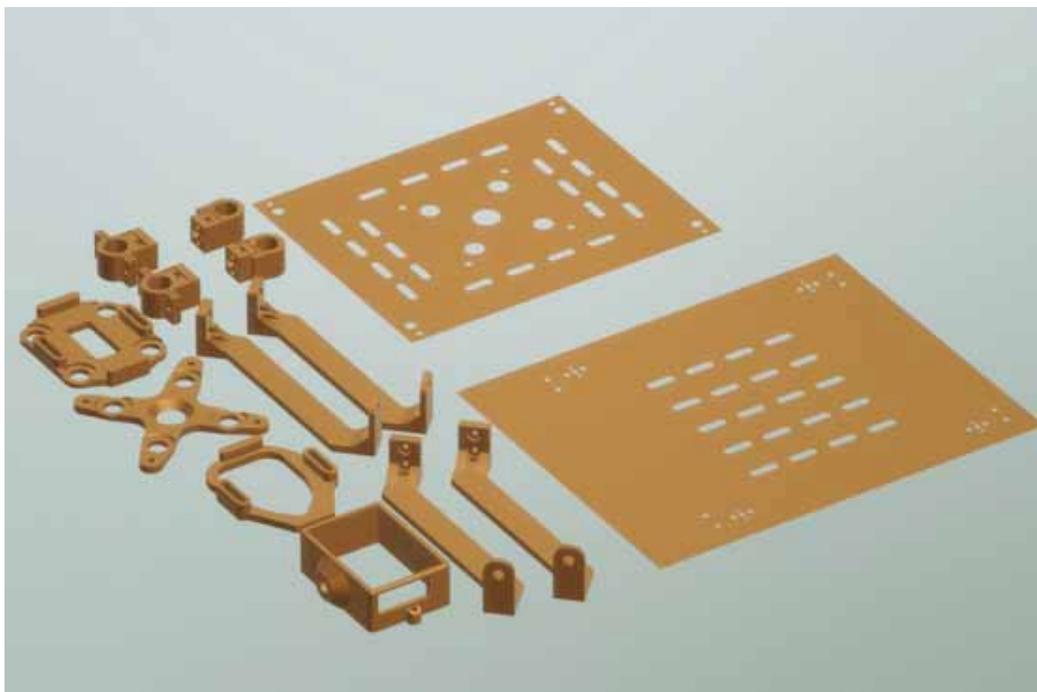
Convertidor Voltaje DC-DC Step-Down 3A LM2596

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

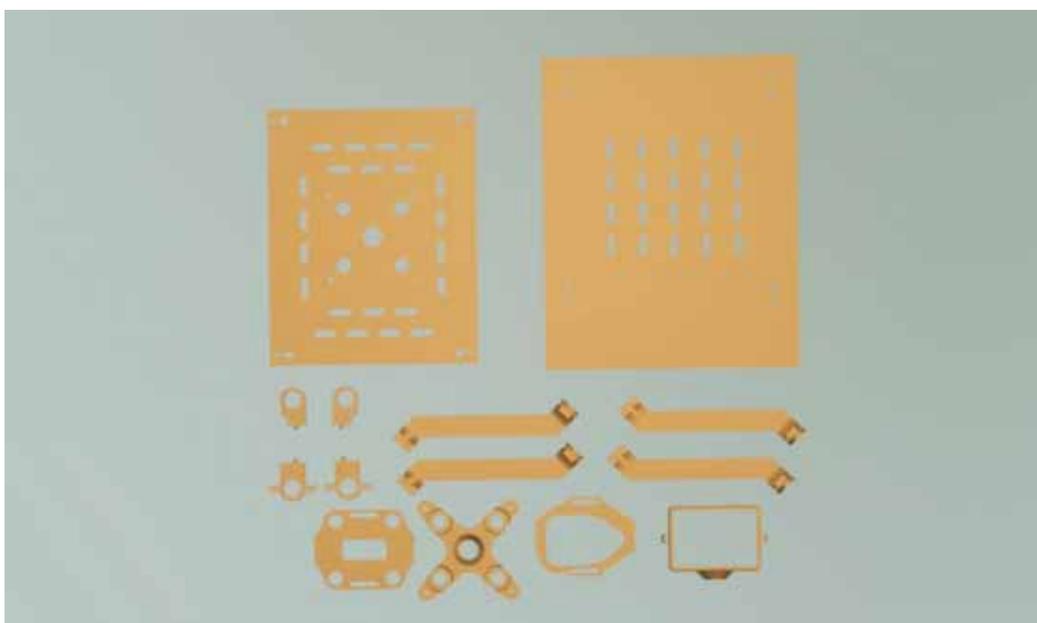
- Convertidor DC-DC Buck: LM2596
- Voltaje de entrada: 4.5V a 40V DC
- Voltaje de salida: 1.23V a 37V DC
- V. salida ajustable (el voltaje de entrada debe tener al menos 1.5V más que la salida).
- Corriente de Salida: máx. 3A, 2.5A recomendado (usar disipador para corrientes mayores a 2A).
- Potencia de salida: 25W
- Eficiencia de conversión: 92%
- Regulación de carga: $S(I) \leq 0.5\%$.
- Regulación de voltaje: $S(u) \leq 0.5\%$.

- Frecuencia de Trabajo: 150KHz
- Ripple en la salida: 30mV (máx.) 20M bandwidth
- Protección de sobre-temperatura: SI (apaga la salida)
- Protección de corto circuito: SI (hasta 5A)
- Protección limitadora de corriente: SI
- Protección frente a inversión de polaridad: NO
- Dimensiones: 43mm*21mm*13mm

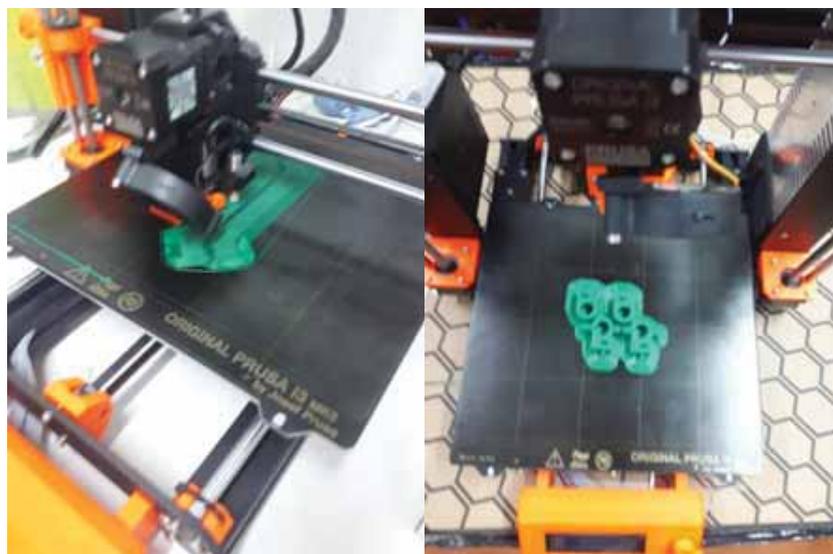
b) DISEÑO DE GIMBAL PARA SOPORTE DE CÁMARA.



Vista lateral del diseño 3D del gimbal para la cámara multispectral. Fuente: elaboración propia.



Vista frontal del diseño 3D del gimbal para la cámara multispectral. Fuente: elaboración propia.



Impresión del diseño 3D del gimbal para la cámara multiespectral. Fuente: elaboración propia.



Gimbal montado sobre el UAV sosteniendo la cámara multiespectral. Fuente: elaboración propia.

ANEXO 02: CÓDIGOS EN MATLAB:

a) CÓDIGO DE CLASIFICACIÓN

```

clc; clear all; close all;
Clase = 6;

%%Leer RED 5
im_red5 = imread('IMG_190616_135515_0025_RED.TIF');
r5 = imrotate(im_red5,9.4,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_red5=imcrop(r5,[376 484 260 477]);
%% Pre procesamiento
mred5 = histeq(rec_red5); % ecualización de histograma
fotored5 = medfilt2(mred5); % filtro de la mediana
red5=im2double(fotored5); % convierte a variable doble

%% Leer RED 4
im_red4=imread('IMG_190609_133304_0014_RED.TIF'); % leer imagen
r4 = imrotate(im_red4,20,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_red4=imcrop(r4,[536 336 233 382]);
%% Pre procesamiento
mred4 = histeq(rec_red4); % ecualización de histograma
fotored4 = medfilt2(mred4); % filtro de la mediana
red4=im2double(fotored4); % convierte a variable doble

%% Leer RED3
im_red3=imread('IMG_190603_144220_0006_RED.TIF'); % leer imagen
r3 = imrotate(im_red3,14,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_red3=imcrop(r3,[455 339 324 522]);
%% Pre procesamiento
mred3 = histeq(rec_red3); % ecualización de histograma
fotored3 = medfilt2(mred3); % filtro de la mediana
red3=im2double(fotored3); % convierte a variable doble

%% leer RED 2
im_red2=imread('IMG_190526_155343_0004_RED.TIF'); % leer imagen
r2 = imrotate(im_red2,169,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_red2=imcrop(r2,[480 367 272 497]);
%% Pre procesamiento
mred2 = histeq(rec_red2); % ecualización de histograma
fotored2 = medfilt2(mred2); % filtro de la mediana
red2=im2double(fotored2); % convierte a variable doble

%% Leer RED 1
im_red1=imread('IMG_190526_165032_0090_RED.TIF'); % leer imagen
r1 = imrotate(im_red1,178,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_red1=imcrop(r1,[640 474 240 441
%% Pre procesamiento
mred1 = histeq(rec_red1); % ecualización de histograma
fotored1 = medfilt2(mred1); % filtro de la mediana
red1=im2double(fotored1); % convierte a variable doble

%% Leer NIR 5
im_nir5 = imread('IMG_190616_135515_0025_NIR.tif'); % leer imagen
n5 = imrotate(im_nir5,9.4,'bilinear','crop');
rec_nir5=imcrop(n5,[376 484 260 477]);
%% Pre procesamiento
mnir5 = histeq(rec_nir5); % ecualización de histograma
fotonir5 = medfilt2(mnir5); % filtro de la mediana
nir5=im2double(fotonir5); % convierte a variable doble

```

```

%% Leer NIR 4
im_nir4=imread('IMG_190609_133304_0014_NIR.tif'); % leer imagen
n4 = imrotate(im_nir4,20,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_nir4=imcrop(n4,[536 336 233 382]);
%% Pre procesamiento
mnir4 = histeq(rec_nir4); % ecualización de histograma
fotonir4 = medfilt2(mnir4); % filtro de la mediana
nir4=im2double(fotonir4); % convierte a variable doble

%% Leer NIR 3
im_nir3=imread('IMG_190603_144220_0006_NIR.tif'); % leer imagen
n3 = imrotate(im_nir3,14,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_nir3=imcrop(n3,[455 339 324 522]);
%% Pre procesamiento
mnir3 = histeq(rec_nir3); % ecualización de histograma
fotonir3 = medfilt2(mnir3); % filtro de la mediana
nir3=im2double(fotonir3); % convierte a variable doble

%% Leer NIR 2
im_nir2=imread('IMG_190526_155343_0004_NIR.tif'); % leer imagen
n2 = imrotate(im_nir2,169,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_nir2=imcrop(n2,[480 367 272 497]);
%% Pre procesamiento
mnir2 = histeq(rec_nir2); % ecualización de histograma
fotonir2 = medfilt2(mnir2); % filtro de la mediana
nir2=im2double(fotonir2); % convierte a variable doble

%% Leer NIR 1
im_nir1=imread('IMG_190526_165032_0090_NIR.tif'); % leer imagen
n1 = imrotate(im_nir1,178,'bilinear','crop');%% ANGULO DE ROTACIÓN
rec_nir1=imcrop(n1,[640 474 240 441]);
%% Pre procesamiento
mnir1 = histeq(rec_nir1); % ecualización de histograma
fotonir1 = medfilt2(mnir1); % filtro de la mediana
nir1=im2double(fotonir1); % convierte a variable doble

%% cálculo de índice NDVI5
NDVI5 = (nir5(:, :) - red5(:, :))./(nir5(:, :) +red5(:, :));
%% Solucion de NaN valores
ind5=find(isnan(NDVI5));
NDVI5(ind5)=0;
figure
subplot(1,2,1);imshow(NDVI5,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI 5')
% Metodo de Otsu NDVI5
thresh_ndvi5a = multithresh(NDVI5,Clase);
seg_ndvi5a = imquantize(NDVI5,thresh_ndvi5a);
RGB_ndvi5a = label2rgb(seg_ndvi5a);
subplot(1,2,2); imshow(RGB_ndvi5a);title('NDVI 5 imagen segmentada')
%%
%% cálculo de índice NDVI4
NDVI4 = (nir4(:, :) - red4(:, :))./(nir4(:, :) +red4(:, :));
%% Solucion de NaN valores
ind4=find(isnan(NDVI4));
NDVI4(ind4)=0;
figure
subplot(1,2,1); imshow(NDVI4,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI 4')
% Método de Otsu NDVI4
thresh_ndvi4a = multithresh(NDVI4,Clase);
seg_ndvi4a = imquantize(NDVI4,thresh_ndvi4a);
RGB_ndvi4a = label2rgb(seg_ndvi4a);

```

```

subplot(1,2,2);imshow(RGB_ndvi4a);title('NDVI 4 imagen segmentada')

%% cálculo de índice NDVI3
NDVI3 = (nir3(:,:) - red3(:,:))./(nir3(:,:) +red3(:,:));
%% Solución de NaN valores
ind3=find(isnan(NDVI3));
NDVI3(ind3)=0;
figure
subplot(1,2,1);imshow(NDVI3,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI 3')
% Método de Otsu NDVI3
thresh_ndvi3a = multithresh(NDVI3,Clase);
seg_ndvi3a = imquantize(NDVI3,thresh_ndvi3a);
RGB_ndvi3a = label2rgb(seg_ndvi3a);
subplot(1,2,2);imshow(RGB_ndvi3a);title('NDVI 3 imagen segmentada')

%% cálculo de índice NDVI2
NDVI2 = (nir2(:,:) - red2(:,:))./(nir2(:,:) +red2(:,:));
%% Solución de NaN valores
ind2=find(isnan(NDVI2));
NDVI2(ind2)=0;
figure
subplot(1,2,1);imshow(NDVI2,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI 2')
% Método de Otsu NDVI2
thresh_ndvi2a = multithresh(NDVI2,Clase);
seg_ndvi2a = imquantize(NDVI2,thresh_ndvi2a);
RGB_ndvi2a = label2rgb(seg_ndvi2a);
subplot(1,2,2);imshow(RGB_ndvi2a);title('NDVI 2 imagen segmentada')

%% cálculo de índice NDVI1
NDVI1 = (nir1(:,:) - red1(:,:))./(nir1(:,:) +red1(:,:));
%% Solucion de NaN valores
ind1=find(isnan(NDVI1));
NDVI1(ind1)=0;
figure
subplot(1,2,1);imshow(NDVI1,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI 1')
% Método de Otsu NDVI1
thresh_ndvila = multithresh(NDVI1,Clase);
seg_ndwila = imquantize(NDVI1,thresh_ndvila);
RGB_ndvila = label2rgb(seg_ndwila);
subplot(1,2,2);imshow(RGB_ndvila);title('NDVI 1 imagen segmentada')

```

b) ALGORITMO DE PRUEBA.

```

%% Código para evaluar imagen 5
clc; clear all; close all;
%% Leer NIR 5
im_nir5 = imread('IMG_190616_135515_0025_NIR.tif'); % leer imagen
%% Pre procesamiento
mnir5 = histeq(im_nir5);
fotonir5 = medfilt2(mnir5);
nir5=im2double(fotonir5);
%% Leer RED 5
im_red5 = imread('IMG_190616_135515_0025_RED.TIF'); % leer imagen
mred5 = histeq(im_red5);
fotored5 = medfilt2(mred5);
red5=im2double(fotored5);
%% cálculo de índice NDVI5
NDVI5 = (nir5(:,:) - red5(:,:))./(nir5(:,:) +red5(:,:));
%% Solución de NaN valores
ind5=find(isnan(NDVI5));
NDVI5(ind5)=0;
figure, imshow(NDVI5,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI5_sinNaN (nir - gre)./(nir +gre)')
%% Valores hallados en clasificación.
val = [-0.686274 -0.372549 -0.323800 -0.238400 -0.153000 -0.067600
0.017800 0.103200 0.5];
values1 = [val];
seg_ndvi5a = imquantize(NDVI5,values1);
RGB_ndvi5a = label2rgb(seg_ndvi5a);
figure;imshow(RGB_ndvi5a);title('RGB NDVI5');

%% Código para evaluar imagen 4
%% Leer RED 4
im_red4=imread('IMG_190609_133304_0014_RED.TIF'); % leer imagen
mred4 = histeq(im_red4);
fotored4 = medfilt2(mred4);
red4=im2double(fotored4);
%% Leer NIR 4
im_nir4=imread('IMG_190609_133304_0014_NIR.tif'); % leer imagen
mnir4 = histeq(im_nir4);
fotonir4 = medfilt2(mnir4);
nir4=im2double(fotonir4);
%% cálculo de índice NDVI4
NDVI4 = (nir4(:,:) - red4(:,:))./(nir4(:,:) +red4(:,:));
%% Solución de NaN valores
ind4=find(isnan(NDVI4));
NDVI4(ind4)=0;
figure, imshow(NDVI4,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI4_sinNaN (nir - gre)./(nir +gre)')
%% Valores hallados en clasificación.
seg_ndvi4a = imquantize(NDVI4,values1);
RGB_ndvi4a = label2rgb(seg_ndvi4a);
figure;imshow(RGB_ndvi4a);title('RGB NDVI 4')

%% Código para evaluar imagen 3
%% Leer RED 3
im_red3=imread('IMG_190603_144220_0006_RED.TIF'); % leer imagen
mred3 = histeq(im_red3);
fotored3 = medfilt2(mred3);
red3=im2double(fotored3);
%% Leer NIR 3

```

```

im_nir3=imread('IMG_190603_144220_0006_NIR.tif'); % leer imagen
mnir3 = histeq(im_nir3);
fotonir3 = medfilt2(mnir3);
nir3=im2double(fotonir3);
%% cálculo de índice NDVI3
NDVI3 = (nir3(:,:) - red3(:,:))./(nir3(:,:) +red3(:,:));
%% Solución de NaN valores
ind3=find(isnan(NDVI3));
NDVI3(ind3)=0;
figure, imshow(NDVI3,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI3_sinNaN (nir - gre)./(nir +gre)')
%% Valores hallados en clasificación.
seg_ndvi3a = imquantize(NDVI3,values1);
RGB_ndvi3a = label2rgb(seg_ndvi3a);
figure;imshow(RGB_ndvi3a);title('RGB NDVI 3')

%% Código para evaluar imagen 2
%% Leer RED 2
im_red2=imread('IMG_190526_155343_0004_RED.TIF'); % leer imagen
rot_r2 = imrotate(im_red2,180,'bilinear','crop');
mred2 = histeq(rot_r2);
fotored2 = medfilt2(mred2);
red2=im2double(fotored2);
%% Leer NIR 2
im_nir2=imread('IMG_190526_155343_0004_NIR.tif'); % leer imagen
rot_nir2 = imrotate(im_nir2,180,'bilinear','crop');
mnir2 = histeq(rot_nir2);
fotonir2 = medfilt2(mnir2);
nir2=im2double(fotonir2);
%% cálculo de índice NDVI2
NDVI2 = (nir2(:,:) - red2(:,:))./(nir2(:,:) +red2(:,:));
%% Solución de NaN valores
ind2=find(isnan(NDVI2));
NDVI2(ind2)=0;
figure, imshow(NDVI2,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI2_sinNaN (nir - gre)./(nir +gre)')
%% Valores hallados en clasificación.
seg_ndvi2a = imquantize(NDVI2,values1);
RGB_ndvi2a = label2rgb(seg_ndvi2a);
figure;imshow(RGB_ndvi2a);title('RGB NDVI 2')

%% Código para evaluar imagen 1
%% Leer RED 1
im_red1=imread('IMG_190526_165032_0090_RED.TIF'); % leer imagen
rot_r1 = imrotate(im_red1,180,'bilinear','crop');
mred1 = histeq(rot_r1);
fotored1 = medfilt2(mred1);
red1=im2double(fotored1);
%% Leer NIR 1
im_nir1=imread('IMG_190526_165032_0090_NIR.tif'); % leer imagen
rot_nir1 = imrotate(im_nir1,180,'bilinear','crop');
mnir1 = histeq(rot_nir1);
fotonir1 = medfilt2(mnir1);
nir1=im2double(fotonir1);
%% cálculo de índice NDVI1
NDVI1 = (nir1(:,:) - red1(:,:))./(nir1(:,:) +red1(:,:));
%% Solución de NaN valores
ind1=find(isnan(NDVI1));
NDVI1(ind1)=0;
figure, imshow(NDVI1,'DisplayRange',[-1 1]);title('NDVI1 (nir - gre)./(nir +gre)')

```

```
%% Valores hallados en clasificación.
seg_ndwila = imquantize(NDVI1,values1);
RGB_ndvila = label2rgb(seg_ndwila);
figure;imshow(RGB_ndvila);title('RGB NDVI 1')
```

c) Código de k-means.

```

clc; clear all; close all;
kclase=13;
%% Leer NIR
%% girar y recortar imagen (Dato 5)
im_nir5 = imread('IMG_190616_135515_0025_NIR.tif'); % Leer imagen
n5 = imrotate(im_nir5, 9.4, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO
rec_nir5=imcrop(n5, [376 484 260 477]); %recorte
%% Pre procesamiento
m_nir5 = histeq(rec_nir5);
fot_nir5 = medfilt2(m_nir5);
nir5=im2double(fot_nir5);
%%RED %% girar y recortar imagen (Dato 5)
im_red5 = imread('IMG_190616_135515_0025_RED.TIF'); % Leer imagen
r5 = imrotate(im_red5, 9.4, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO
rec_red5=imcrop(r5, [376 484 260 477]); %recorte
%% Pre procesamiento
m_red5 = histeq(rec_red5);
fot_red5 = medfilt2(m_red5);
red5=im2double(fot_red5);
%% girar y recortar imagen (Dato 4)
im_red4=imread('IMG_190609_133304_0014_RED.TIF'); % Leer imagen
r4 = imrotate(im_red4, 20, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO
rec_red4=imcrop(r4, [536 336 233 382]);
%% Pre procesamiento
m_red4 = histeq(rec_red4);
fot_red4 = medfilt2(m_red4);
red4=im2double(fot_red4); %
%% girar y recortar imagen (Dato 3)
im_red3=imread('IMG_190603_144220_0006_RED.TIF'); % Leer imagen
r3 = imrotate(im_red3, 14, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO
rec_red3=imcrop(r3, [455 339 324 522]);
%% Pre procesamiento
m_red3 = histeq(rec_red3); %
fot_red3 = medfilt2(m_red3);
red3=im2double(fot_red3);
%% girar y recortar imagen (Dato 2)
im_red2=imread('IMG_190526_155343_0004_RED.TIF'); % Leer imagen
r2 = imrotate(im_red2, 169, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO
rec_red2=imcrop(r2, [480 367 272 497]);
%% Pre procesamiento
m_red2 = histeq(rec_red2);
fot_red2 = medfilt2(m_red2);
red2=im2double(fot_red2);
%% girar y recortar imagen (Dato 1)
im_red1=imread('IMG_190526_165032_0090_RED.TIF'); % Leer imagen
r1 = imrotate(im_red1, 178, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO
rec_red1=imcrop(r1, [640 474 240 441]); %recorte
%% Pre procesamiento
m_red1 = histeq(rec_red1);
fot_red1 = medfilt2(m_red1);
red1=im2double(fot_red1);

```

```

%% girar y recortar imagen (Dato 4)
im_nir4=imread('IMG_190609_133304_0014_NIR.tif'); % Leer imagen
n4 = imrotate(im_nir4,20,'bilinear','crop');%% ANGULO
rec_nir4=imcrop(n4,[536 336 233 382]); %recorte
%% Pre procesamiento
mni_r4 = histeq(rec_nir4);
fotoni_r4 = medfilt2(mni_r4);
nir4=im2double(fotoni_r4);
%%
%% girar y recortar imagen (Dato 3)
im_nir3=imread('IMG_190603_144220_0006_NIR.tif'); % Leer imagen
n3 = imrotate(im_nir3,14,'bilinear','crop');%% ANGULO
rec_nir3=imcrop(n3,[455 339 324 522]); %recorte

mni_r3 = histeq(rec_nir3);
fotoni_r3 = medfilt2(mni_r3);
nir3=im2double(fotoni_r3);
%% girar y recortar imagen (Dato 2)
im_nir2=imread('IMG_190526_155343_0004_NIR.tif'); % Leer imagen
n2 = imrotate(im_nir2,169,'bilinear','crop');%% ANGULO
rec_nir2=imcrop(n2,[480 367 272 497]); %
%% Pre procesamiento
mni_r2 = histeq(rec_nir2);
fotoni_r2 = medfilt2(mni_r2);
nir2=im2double(fotoni_r2);
%%
%% girar y recortar imagen (Dato 1)
im_nir1=imread('IMG_190526_165032_0090_NIR.tif'); % Leer imagen
n1 = imrotate(im_nir1,178,'bilinear','crop');%% ANGULO
rec_nir1=imcrop(n1,[640 474 240 441]);
%% Pre procesamiento
mni_r1 = histeq(rec_nir1);
fotoni_r1 = medfilt2(mni_r1);
nir1=im2double(fotoni_r1);
%% calculo de índice NDVI 5
NDVI 5 = (nir5(:,:) - red5(:,:))./(nir5(:,:) +red5(:,:));
NDVI 5x=(NDVI 5+2)*1000;
ind5=find(isnan(NDVI 5x));
NDVI 5x(ind5)=0;
%% kmeans
NDVI 5K=uint16(NDVI 5x);
[L, Centers5] = imsegkmeans(NDVI 5K,kclase);
B = labeloverlay(NDVI 5, L);
imshow(B)
title('NDVI 5')
%%
%% calculo de índice NDVI 4
NDVI 4 = (nir4(:,:) - red4(:,:))./(nir4(:,:) +red4(:,:));
NDVI 4x=(NDVI 4+2)*1000;
%figure, imshow(NDVI 4, 'DisplayRange', [-1 1]);title('NDVI 4 (nir - gre)./(nir +gre)')
%% Solucion de NaN valores
ind4=find(isnan(NDVI 4x));
NDVI 4x(ind4)=0;

```

```

%% kmeans
NDVI 4K=uint16(NDVI 4x);
[L1, Centers4] = imsegkmeans(NDVI 4K, kcl ase);
B4 = label overlay(NDVI 4, L1);
imshow(B4)
title(' NDVI 4' )
%%
%% calculo de índice NDVI 3
NDVI 3 = (nir3(:, :) - red3(:, :))./(nir3(:, :) +red3(:, :));
NDVI 3x=(NDVI 3+2)*1000;
ind3=find(isnan(NDVI 3x));
NDVI 3x(ind3)=0;
%% kmeans
NDVI 3K=uint16(NDVI 3x);
[L3, Centers3] = imsegkmeans(NDVI 3K, kcl ase);
B3 = label overlay(NDVI 3, L3);
imshow(B3)
title(' NDVI 3' )
%%
%% calculo de índice NDVI 2
NDVI 2 = (nir2(:, :) - red2(:, :))./(nir2(:, :) +red2(:, :));
NDVI 2x=(NDVI 2+2)*1000;
ind2=find(isnan(NDVI 2x));
NDVI 2x(ind2)=0;
%% kmeans
NDVI 2K=uint16(NDVI 2x);
[L2, Centers2] = imsegkmeans(NDVI 2K, kcl ase);
B2 = label overlay(NDVI 2, L2);
imshow(B2)
title(' NDVI 2' )
%%
%% calculo de índice NDVI 1
NDVI 1 = (nir1(:, :) - red1(:, :))./(nir1(:, :) +red1(:, :));
NDVI 1x=(NDVI 1+2)*1000;
%% Solucion de NaN valores
ind1=find(isnan(NDVI 1x));
NDVI 1x(ind1)=0;
%% kmeans
NDVI 1K=uint16(NDVI 1x);
[L1, Centers1] = imsegkmeans(NDVI 1K, kcl ase);
B1 = label overlay(NDVI 1, L1);
imshow(B1)
title(' NDVI 1' )

```

d) Código de prueba de hojas en paralelo.

```

clc; clear all; close all;
Clase = 12;
%% Leer RED
image_name = 'IMG_191022_182719_0000_RED.tif';
img1 = imread(image_name);
r1 = imrotate(img1, 0, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO DE ROTACION
im_red=imcrop(r1, [435 86 314 570]); %selecciona con el mouse la region
a
figure; imshow(im_red)
%% Leer NIR
image_nir = 'IMG_191022_182719_0000_NIR.tif';
img2 = imread(image_nir);
nir1 = imrotate(img2, 0, 'bilinear', 'crop'); %% ANGULO DE ROTACION
im_nir1=imcrop(nir1, [422 96 314 570]); %selecciona con el mouse la
region a
figure; imshow(im_nir1)
%% Pre procesamiento
% ecualización de histograma
mni_r5 = histeq(im_nir1); % figure, imshow(mgre); title('gre med+hist')
fotoni_r5 = medfilt2(mni_r5); %figure, imshow(fotogre); title('gre
mediana')
ni_r5=im2double(fotoni_r5); %figure, imshow(ni_r5); title('gre med+hist
%%RED
mred5 = histeq(im_red); % figure, imshow(mgre); title('gre med+hist')
fotored5 = medfilt2(mred5); %figure, imshow(fotogre); title('gre
mediana')
red5=im2double(fotored5); %figure, imshow(red5); title('gre med+hist
%% calculo de índice NDVI 5
NDVI 5 = (ni_r5(:,:) - red5(:,:))./(ni_r5(:,:) +red5(:,:));
ind5=find(isnan(NDVI 5));
NDVI 5(ind5)=0;
figure
subplot(1, 2, 1); imshow(NDVI 5, 'DisplayRange', [-1 1]); title('NDVI 5')
% Metodo de Otsu NDVI
thresh_ndvi 5a = multithresh(NDVI 5, Clase);
seg_ndvi 5a = imquantize(NDVI 5, thresh_ndvi 5a);
RGB_ndvi 5a = label2rgb(seg_ndvi 5a);
subplot(1, 2, 2); imshow(RGB_ndvi 5a); title('NDVI 5 imagen segmentada')

```

ANEXO 03: FICHAS TÉCNICAS.

a) UAV MATRICE 600 DJI



AIRCRAFT

STRUCTURE

Diagonal Wheelbase	1133 mm
Aircraft Dimensions	<ul style="list-style-type: none"> • 1668 mm x 1518 mm x 759 mm (Propellers, frame arms and GPS mount unfolded) • 640 mm x 582 mm x 623 mm (Frame arms and GPS mount folded)
Package Dimensions	620 mm x 320 mm x 505 mm
Intelligent Flight Battery Quantity	6
Weight (with six TB47S batteries)	9.1 kg
Weight (with six TB48S batteries)	9.6 kg
Max Takeoff Weight	15.1 kg

PERFORMANCE

Hovering Accuracy (P-Mode, with GPS)	Vertical: ± 0.5 m, Horizontal: ± 1.5 m
Max Angular Velocity	Pitch: $300^\circ/\text{s}$, Yaw: $150^\circ/\text{s}$
Max Pitch Angle	25°
Max Speed of Ascent	5 m/s
Max Speed of Descent	3 m/s
Max Wind Resistance	8 m/s
Max Flight Altitude above Sea Level	2500 m
Max Speed	18 m/s (No wind)
Hovering Time (with six TB47S batteries)*	No payload: 35 min, 6 kg payload: 16 min
Hovering Time (with six TB48S batteries)*	No payload: 40 min, 5.5 kg payload: 18 min

* The hovering time is based on flying at 10 m above sea level in a no-wind environment and landing with 10% battery level.

PROPULSION SYSTEM

Motor Model	DJI 6010
Propeller Model	DJI 2170

OTHER

Supported DJI Gimbals	Zenmuse X3; Zenmuse X5 series; Zenmuse XT; Ronin-MX; Zenmuse Z15 series HD gimbals: Z15-A7, Z15-BMPCC, Z15-5D III, Z15-GH4
Retractable Landing Gear	Standard
Operating Temperature	14° to 104° F (-10° to 40° C)

CHARGER

Model	A14-100P1A
Voltage Output	26.3 V
Power Rating	100 W

FLIGHT CONTROL SYSTEM

Model A3

REMOTE CONTROLLER

Operating Frequency	<ul style="list-style-type: none"> • 920.6 MHz to 928 MHz (Japan) • 5.725 GHz to 5.825 GHz • 2.400 GHz to 2.483 GHz
Max Transmission Distance (unobstructed, free of interference)	<ul style="list-style-type: none"> • FCC Compliant: 3.1 miles (5 km) • CE Compliant: 2.1 miles (3.5 km)
EIRP	<ul style="list-style-type: none"> • 10 dBm @ 900 M/i> • 13 dBm @ 5.8 G • 20 dBm @ 2.4 G
Video Output Port	HDMI, SDI, USB
Dual Users Capability	Master-and-Slave control
Mobile Device Holder	Supports smartphones and tablets
Output Power	9 W
Operating Temperature	14° to 104° F (-10° to 40° C)
Storage Temperature	<ul style="list-style-type: none"> • Less than 3 months: -4° to 113° F (-20° to 45° C) • More than 3 months: 72° to 82° F (22° to 28° C)
Charge Temperature	32° to 104° F (0° to 40° C)
Built-in Battery	6000 mAh, 2S LiPo
Max Tablet Width	170 mm

BATTERY (OPTIONAL)

Model	TB48S
Capacity	5700 mAh
Voltage	22.8 V
Type	LiPo 6S
Energy	129.96 Wh
Net Weight	680 g
Operating Temperature	14° to 104° F (-10° to 40° C)
Storage Temperature	<ul style="list-style-type: none"> • Less than 3 months: -4° to 113° F (-20° to 45° C) • More than 3 months: 72° to 82° F (22° to 28° C)
Charge Temperature	41° to 104° F (5° to 40° C)
Max Charging Power	180 W

BATTERY (STANDARD)

Model	TB47S
Capacity	4500 mAh
Voltage	22.2 V
Type	LiPo 6S
Energy	99.9 Wh
Net Weight	595 g
Operating Temperature	14° to 104° F (-10° to 40° C)
Storage Temperature	<ul style="list-style-type: none"> • Less than 3 months: -4° to 113° F (-20° to 45° C) • More than 3 months: 72° to 82° F (22° to 28° C)
Charge Temperature	41° to 104° F (5° to 40° C)
Max Charging Power	180 W

b) CÁMARA MULTIESPECTRAL PARROT SEQUIA



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ^

CÁMARA RGB 16 MPIX

- Definición: 4608x3456 píxeles
- HFOV: 63.9°
- VFOV: 50.1°
- DFOV: 73.5°

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS

- 59 mm x 41 mm x 28 mm
- 72 g (2,5 oz)
- Hasta 1 fps
- Almacenamiento incorporado de 64 GB
- IMU & magnetómetro
- 5 W (pico ~12 W)

4 CÁMARAS CON OBTURADOR GLOBAL DE UNA SOLA BANDA DE 1,2 MPIX

- Definición: 1280 x 960 píxeles
- HFOV : 61.9°
- VFOV : 48.5°
- DFOV : 73.7°

SENSOR SOLAR

- 4 sensores espectrales (los mismos filtros que el cuerpo)
- GPS
- IMU & magnetómetro
- Ranura para tarjeta SD
- 47 mm x 39,6 mm x 18,5 mm
- 35 g (1,2 oz)
- 1 W

4 BANDAS DISTINTAS

- Verde (550 BP 40)
- Rojo (660 BP 40)
- Borde rojo (735 BP 10)
- Infrarrojo cercano (790 BP 40)

c) PC



Marca	Dell
Modelo	XPS 8920-i7_16V8A480SD256 + Monitor DELL S2316M de 17"
Procesador	Séptima generación Intel® Core™ i7-7700 (8 MB de caché, hasta 3,6 GHz) con vPro.
Placa	DELL XPS chipset: Intel® Z270 express
Chipset	Intel Z170
Memoria RAM	16 GB de Memoria Doble Canal DDR4 a 2400MHz , ampliable hasta 64 GB
Disco Duro	1 TB SATA 6Gb/s (7,200RPM) 64MB Cache + Unidad de x4 estado sólido M.2 PCIe de 256 GB
Fuente de poder	460 W (la eficiencia de PSU varía según los requisitos reglamentarios regionales)
Unidad óptica	16X CD/DVD burner (DVD+/-RW), escribe en CD/DVD
Tarjeta de video	8 GB DDR5 AMD Radeon RX 480 dedicados con : 3 x DisplayPort 1, .2 (preparado para HDR de DP 1.4), HDMI 2.0b

Conectividad	WAN : WiFi : 802.11ac + Bluetooth 4.2 LAN : Gigabit 10/100/1000 RJ-45
Multimedia	Entrada para auriculares estéreo/micrófono . Audio integrado de 5.1 canales con Waves MaxxAudio Pro
Puertos y Ranuras	<p><u>Puertos :</u></p> <p>Frente</p> <p>4 puertos USB 3.0 1 entrada para micrófono 1 auricular 1 lector de tarjetas SD (SD, SDHC, SDXC)</p> <p>Posterior</p> <p>3 puertos USB 3.0 1 puerto USB 3.1 2 puertos USB 2.0 1 puerto USB 3.1 Type-C 1 HDMI 1 Display Port 1 Ethernet Gigabit 1 puerto de audio (canal 5.1 [ficha de 3])</p> <p>Conexiones internas :</p> <p>Internal connectors: USB Un USB 2.0 connector M.2 card • Un M.2 card slot for Wi-Fi and Bluetooth combo card • Un M.2 card slot for SSD PCIe card • Un PCIe x4 card slot • Un PCIe x16 card slot • Un PCIe x16 card slot (x4 wire)</p>
Teclado & mouse	Teclado y mouse: Si
Características adicionales	No

d) EQUIPO MÓVIL

**Especificaciones técnicas**

- **Batería**
 - Tiempo de uso: 25-35 horas
 - Tiempo en espera: 501-507 horas
 - Batería de 3600 mAh
 - Carga inalámbrica compatible con cargadores Qi y PMA
- **Teclado**
 - Pantalla táctil con teclado en pantalla
- **Memoria**
 - 4 GB RAM, 32 GB ROM
 - Admite tarjeta MicroSD de hasta 256 GB
- **Red**
 - Capacitado para 2G/3G/4G/LTE
 - GSM: '850, 900, 1800, 1900
 - UMTS: Banda 5(850), Banda 4(AWS), Banda 2(1900), Banda 1(2100)
 - LTE: B2,B4,B12
 - Roaming LTE: B1/B3/B5/B7/B8/B18/B19/B20
 - TDD 38,39,40,41

 - TDSCDMA : Banda 34, Banda 39
- **Sistema operativo**
 - SO Android 6.0.1

- **Procesador**
 - Procesador Qualcomm de doble núcleo de 2.15GHz + doble núcleo de 1.593GHz
- **Con capacidad para VoLTE**
 - Sí
- **Aplicación para desbloquear el equipo**
 - Sí

Conectividad

- Wi-Fi 802.11 11a/b/g/n/ac 2.4GHz/5GHz (doble banda)
- Navegación por la web con Wi-Fi
- Wi-Fi compartido
- Llamadas Wi-Fi 2.0
- NFC
- Conexión de APN
- USB micro
- Bluetooth® 4.0, A2DP, AVRCP, HID, HSP, HFP, OPP, PBAP, MAP, PAN (sólo PANU), HOGP, DI (perfil de identificación del equipo)
- Llamadas con video de T-Mobile: Sí
- Mensajería avanzada: sí

Internet

- AppleWebKit/537.36 (KHTML, como Gecko)
- Mozilla/5.0

Cámara

- 12 MP (trasera)
- 5 MP (frontal)
- Zoom digital de 8X
- Destello
- Autofoco
- Modos de tomas múltiples
- Grabación de video

Multimedia

- Audio estéreo (con audífono)
- Compatibilidad de audio: MP3, AAC, AAC+, WMA, MPEG4, WAV
- Compatibilidad de imagen: GIF, PNG, BMP
- Compatibilidad de video: 3GP, MP4
- Compatibilidad con audífonos: M4, T3