



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Índices de vegetación a partir de datos obtenidos mediante sistemas VANT

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Rodríguez Cabrera, Julio Cesar.

DIRECTOR: González Jaramillo, Víctor Hugo, Ing.

CO-DIRECTOR: Fries, Andreas Erwin, Ph. D.

LOJA - ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR Y CO-DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing.

Víctor Hugo González Jaramillo.

Ph.D.

Andreas Erwin Fries.

DOCENTES DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: Índices de vegetación a partir de datos obtenidos mediante sistemas VANT, realizado por Julio César Rodríguez Cabrera, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Septiembre de 2017

f).....

DIRECTOR

f).....

CO-DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Julio César Rodríguez Cabrera declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Índices de vegetación a partir de datos obtenidos mediante sistemas VANT, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo el Ing. Víctor Hugo González Jaramillo director y el Ph.D. Andreas Erwin Fries co-director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f).....

Autor: Julio César Rodríguez Cabrera

Cedula: 1105113235

DEDICATORIA

A Dios por acompañarme día a día en mis estudios y permitir alcanzar este logro. A la memoria de mi padre Euclides Rodríguez y a la de mi hermano Pablo Rodríguez, que me dieron lo mejor de ellos cuanto estuvieron junto a mí, y sobre todo a mi mamá Julia Cabrera, de quien aprendí a luchar contra todos los obstáculos para poder alcanzar mis metas, y quien me apoyado durante todos mis estudios, con todo su amor, esfuerzo y sacrificio.

A mis hermanos Carlos y Luis, y hermanas María y Juanita, por acompañarme todo este tiempo, y por toda la ayuda que me han dado, a mi sobrina María del Cisne Gallo, por su apoyo y motivación, y a toda mi familia y amigos, quienes con sus consejos ha contribuido para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la oportunidad de alcanzar esta meta, y así poder contribuir a mi sociedad con los conocimientos adquiridos durante mi formación profesional. A mi mamá Julia Cabrera, por el apoyo y amor incondicional que me ha dado durante todo este tiempo.

A mi Director de Tesis Ing. Víctor Hugo González Jaramillo, y a mi Co-Director, PhD. Andreas Erwin Fries, por compartirme su tiempo y conocimientos para la realización de esta investigación, así por la confianza que me brindaron y su excelente calidez humana.

A todos los docentes de la Universidad Técnica Particular de Loja, por ayudar a subir cada escalón del conocimiento y así contribuir en mi formación profesional.

A todos mis compañeros de la Titulación de Ingeniería Civil por acompañarme a través del camino, de esta gran aventura universitaria. Especialmente a los miembros del GSI por todos esos momentos vividos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR Y CO-DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Teledetección	6
1.2. Sistemas de Teledetección.....	6
1.3. Elementos de un sistema de Teledetección.....	6
1.4. Radiación Electromagnética	7
1.4.1. Teoría ondulatoria.....	7
1.4.2. Teoría cuántica.....	8
1.5. El espectro electromagnético.....	8
1.6. Interacción de la radiación electromagnética con la superficie.....	9
1.7. Plataformas	10
1.7.1. Plataformas satelitales.....	10
1.7.2. Plataformas aéreas.....	11
1.7.3. Plataformas VANT.....	11
1.8. Sensores	12
1.8.1. Sensores pasivos.....	12
1.8.2. Sensores activos.....	12

1.9.	Características de las imágenes de Teledetección	13
1.9.1.	Definición.	13
1.9.2.	Almacenamiento de imágenes.	13
1.9.3.	Resolución en imágenes de Teledetección.	13
1.9.3.1.	<i>Resolución espacial</i>	13
1.9.3.2.	<i>Resolución espectral</i>	13
1.9.3.3.	<i>Resolución temporal</i>	14
1.9.3.4.	<i>Resolución radiométrica</i>	14
1.10.	Pre-procesamiento de las imágenes de Teledetección	14
1.10.1.	Corrección radiométrica.....	14
1.10.1.1.	<i>Conversión de ND a radiancia</i>	14
1.10.1.2.	<i>Conversión de radiancia a reflectancia TOA</i>	15
1.10.1.3.	<i>Corrección atmosférica</i>	15
1.10.2.	Procesamiento.....	16
1.11.	Extracción de información de imágenes.....	16
1.12.	Características espectrales de la vegetación	16
1.12.1.	Estructura de la hoja.....	16
1.12.2.	Comportamiento de la vegetación en el espectro visible (VIS).	17
1.12.3.	Comportamiento de la vegetación en el espectro infrarrojo cercano (NIR).	17
1.13.	Índices de vegetación.....	17
1.13.1.	Índices basados en pendiente.	18
1.13.1.1.	<i>Índice de vegetación de ratio (RATIO)</i>	18
1.13.1.2.	<i>Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)</i>	18
1.13.1.3.	<i>Índice de vegetación cociente (RVI)</i>	19
1.13.2.	Índices basados en distancia.....	19
1.13.2.1.	<i>Índice de Vegetación Perpendicular (PVI)</i>	19
1.13.2.2.	<i>Índice de Vegetación de Diferencia (DVI)</i>	20
1.13.2.3.	<i>Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)</i>	20
CAPÍTULO II - ÁREA DE ESTUDIO.....		22

2.1.	Ubicación geográfica	23
2.2.	Clima	23
2.3.	Vegetación	24
2.4.	Suelos	24
CAPÍTULO III – EQUIPOS Y DATOS.....		25
3.1.	Equipos para la adquisición de imágenes espectrales	26
3.1.1.	Plataforma VANT.	26
3.1.1.1.	<i>Componentes.</i>	26
3.1.1.2.	<i>Ámbito legislativo del uso de VANT.</i>	26
3.1.2.	Sensor multi-espectral.....	27
3.3.	Software	28
3.3.1.	Datamapper Inflight.....	28
3.3.2.	PIX4D.	28
3.3.3.	ArcGIS 10.3.	29
3.3.4.	IDRISI Selva.	29
3.3.5.	SNAP 5.0.	29
CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA.....		30
4.1.	Descripción de la metodología.....	31
4.2.	Adquisición de imágenes mediante un VANT	32
4.2.1.	Plan de vuelo.	32
4.2.2.	Ejecución del vuelo.	33
4.3.	Pre-tratamiento de las imágenes obtenidas mediante el VANT	33
4.3.1.	Generación de mapas de reflectancia.	33
4.4.	Índices de vegetación	33
4.5.	Análisis estacional	35
4.6.	Datos satelitales	36
4.7.	Pre-tratamiento de las imágenes satelitales.....	36
4.7.1.	Corrección atmosférica.	36
4.7.2.	Índices de vegetación.....	36

4.8. Validación	36
CAPÍTULO V – RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	37
5.1. Imágenes obtenidas	38
5.2. Mapas de reflectancia.....	38
5.3. Tipos de cobertura en el área de estudio.....	39
5.4. Índices de vegetación	40
5.4.1. Índices RATIO.....	41
5.1.1. Índice NDVI.....	43
5.1.2. Índice RVI	45
5.1.3. Índice PVI.....	47
5.1.4. Índice DVI	49
5.1.5. Índice SAVI	51
5.2. Comparacion de índices	53
5.3. Validación	55
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de algunos satélites de Teledetección	11
Tabla 2: Plataformas VANT empleadas en Teledetección.	12
Tabla 3: Características generales del sensor	28
Tabla 4: Características de cada sensor monocromático	28
Tabla 5. Coeficiente de la línea del suelo.....	40
Tabla 6: Imágenes del programa SENTINEL-2A analizadas.....	56
Tabla 7: Coeficientes de correlación entre los índices de vegetación entre imágenes satelitales y sistema VANT	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de un sistema de Teledetección.....	6
Figura 2: Ilustración de una onda electromagnética	7
Figura 3: Bandas del espectro electromagnético	9
Figura 4: Descomposición del flujo solar incidente.....	9
Figura 5: Estructura interna de la hoja	17
Figura 6: Área de estudio.....	23
Figura 7: Variabilidad de las precipitaciones y temperatura en el estación meteorológica Malacatos	24
Figura 8: Sistema VANT – INSPIRE 1	26
Figura 9: Sensor multi-espectral Parrot Sequoia a) Sensor Multi-espectral, b) Sunshine Sensor.	27
Figura 10: Metodología general del proyecto de investigación.....	31
Figura 11: Plan de vuelo tipo rejilla	32
Figura 12: Configuración de los componentes del sistema VANT	33
Figura 13: Cálculo de los Índices de Vegetación.....	34
Figura 14: Variación de las coberturas presentes en la superficie terrestre a través de los Índices de Vegetación	35
Figura 15: Área delimitada de los mapas de reflectancia a) banda NIR, y b) banda RED, para el 26-04-2017, c) banda NIR y d) banda RED, para el 24-05-2017.....	38
Figura 16: Coberturas presentes en el área de estudio a) suelo desnudo y estructuras civiles, b) vegetación dispersa o enferma, c) vegetación poco densa o con una menor vigorosa y d) vegetación densa y sana	39
Figura 17: Regresión lineal de las banda roja e infrarroja a) datos del 26-04-2017, b) datos del 24-05-2017	40
Figura 18: Índice de vegetación RATIO a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017.....	42
Figura 19: Variación del índice RATIO, a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017.....	43
Figura 20: Índice de vegetación NDVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017 ..	44
Figura 21: Variación del índice NDVI, a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017.....	45
Figura 22: Índice de vegetación RVI, a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017... ..	46
Figura 23: Variación del índice RVI a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017.....	47
Figura 24: Índice de vegetación PVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017	48
Figura 25: Variación del índice PVI a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017.....	49
Figura 26: Índice de vegetación DVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017....	50
Figura 27: Variación del índice DVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017	51

Figura 28: Índice de vegetación SAVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017..	52
Figura 29: Variación del índice SAVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017 ...	52
Figura 30: Variación de las diferentes coberturas	54
Figura 31: Sensibilidad de DVI, a) suelo desnudo, b) vegetación enferma, c) vegetación poco densa y d) vegetación densa	55
Figura 32: Imágenes satelitales del SENTINEL-2A a) imagen del 27-04-2017, b) imagen del 06-06-2017	56
Figura 33: Orto-mosaicos RGB del área de estudio	69
Figura 34: Clasificación de los índices basados en pendiente para las dos fechas analizadas; a) clasificación del 26 de abril del 2017 b) clasificación del 24 de mayo del 2017	70
Figura 35: Clasificación de los índices basados en distancia para las dos fechas analizadas; a) clasificación del 26 de abril del 2017 b) clasificación del 24 de mayo del 2017	71
Figura 36: Variación de los índices de vegetación entre la primera y segunda fecha de obtención de los datos	72
Figura 37: Índice RATIO a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017	73
Figura 38: Índice NDVI a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017	73
Figura 39: Índice RVI a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017	74
Figura 40: Índice SAVI a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017	74
Figura 41: Índice RATIO a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017	75
Figura 42: Índice NDVI a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017	75
Figura 43: Índice RVI a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017	76
Figura 44: Índice SAVI a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017	76
Figura 45: Índice RATIO, para el 27 de abril del 2017	77
Figura 46: Índice NDVI, para el 27 de abril del 2017	77
Figura 47: Índice RVI, para el 27 de abril del 201	78
Figura 48: Índice SAVI, para el 27 de abril del 2017	78
Figura 49: Índice RATIO, para el 26 de junio del 2017	79
Figura 50: Índice NDVI, para el 26 de junio del 2017	79
Figura 51: Índice RVI, para el 26 de junio del 2017	80
Figura 52: Índice SAVI, para el 26 de junio del 2017	80
Figura 53: Correlación entre a) RATIO, b) NDVI, c) RVI, d) SAVI	81
Figura 54: Correlación entre a) RATIO, b) NDVI, c) RVI, d) SAVI	82

RESUMEN

En esta investigación se generaron índices de vegetación como: RATIO, NDVI, RVI, PVI, DVI y SAVI; empleando datos obtenidos mediante un sistema VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) e imágenes de una cámara multi-espectral. Las imágenes empleadas fueron captadas por la cámara en las bandas roja (RED) e infrarroja cercana (NIR) del espectro electromagnético, a una resolución espacial de 10 cm x 10 cm. Mediante diferentes combinaciones de estas bandas se calcularon múltiples índices de vegetación para detectar el estado de la vegetación y evaluar que índice se adapta mejor para el monitoreo de vegetación.

El área de estudio seleccionada fue la parroquia Malacatos, ubicada en el sur del Ecuador, provincia de Loja, cantón Loja. La vegetación fue monitoreada en la transición de la época lluviosa a la época seca en un intervalo de 28 días. Los índices de vegetación generados indicaron que la vegetación en la zona de estudio se ve afectada por la falta del recurso hídrico en la estación seca, donde el índice DVI ha mostrado los mejores resultados en determinar las variaciones en las diferentes coberturas vegetales.

PALABRAS CLAVE: RATIO, NDVI, RVI, PVI, DVI, SAVI, VANT, índices de vegetación.

ABSTRACT

In this research vegetation indices were generated such as: RATIO, NDVI, RVI, PVI, DVI and SAVI; for this purpose it was used data obtained through a system UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and images from a multispectral camera. The used images was captured by the camera in the bands red (RED) and near infrared (NIR) of the electromagnetic spectrum, at a spatial resolution of 10cm x 10cm. Using different combinations of these bands multiple vegetation indices were calculated for detecting the state of vegetation and assess which index is best adapted for monitoring the vegetation.

The selected study area was the Malacatos parish located in the south of Ecuador, province of Loja, canton Loja. The vegetation was monitored in the transition between the rainy to the dry season; the temporal interval was 28 days. The generated vegetation indexes indicated that the vegetation in the study area is affected by the deficit of water resources in the dry season, where the DVI index has shown the best results in determining variations in the different vegetal coverages.

KEYWORDS: RATIO, NDVI, RVI, PVI, DVI, SAVI, UAV, vegetation index

INTRODUCCIÓN

El estudio de la vegetación es de gran importancia debido a su influencia en diversos factores ambientales, tales como la humedad del suelo, contribución del vapor de agua a la atmósfera a través de la transpiración de las plantas, generación de oxígeno y secuestro del carbono (Duval, Benedetti, y Campo, 2015). Los cambios en la cobertura vegetal pueden causar variaciones en el clima local (Fries et al., 2009) y en la dinámica del intercambio de calor y humedad entre la superficie y la atmósfera (Golubyatnikov y Denisenko, 2006; Guo, Zhou, Wang, y Tao, 2014). Para detectar los cambios en la cobertura vegetal se necesitan imágenes de alta resolución, proporcionadas generalmente por sensores remotos, que faciliten la clasificación del ecosistema y además brinden información sobre las características y composición de la vegetación (Tang y Shao, 2015). Esta información de alta resolución permite comprender de una mejor manera los procesos ambientales y sus impactos debido al cambio de la cobertura vegetal (Bhandari, Kumar, y Singh, 2012; Sehgal, Jain, Aggarwal, y Jha, 2011).

En la actualidad existen diferentes fuentes para la adquisición de datos de cobertura vegetal. Los satélites de Teledetección han proporcionado información útil y precisa sobre las características de la superficie terrestre (Chang, 2012). Sin embargo, esta información es muchas veces incompleta debido a la trayectoria orbital fija de estos dispositivos y a la nubosidad frecuente sobre algunas regiones (Chiba et al., 2014). Por ejemplo, en el Ecuador algunas zonas tienen más del 50% de cobertura de nubes durante todo el año (Bendix, Rollenbeck, Göttlicher, y Cermak, 2006; González et al., 2016).

El gran desarrollo tecnológico que han tenido los Vehículo Aéreos No Tripulados (VANT) (Panda, Rao, Thenkabail, y Fitzgerald, 2016), ha permitido que estos dispositivos puedan transportar equipos o sensores que facilitan información sobre la cobertura vegetal. Además, los VANT vuelan a baja altura evitando así algunos problemas que tienen los satélites para la adquisición de datos (p.ej. nubosidad; Koh y Wich, 2012). Como herramientas de teledetección estos dispositivos equipados con sensores específicos permiten obtener información con una alta resolución espacial y temporal (Chang, 2012; Chao y Chen, 2012; Colomina y Molina, 2014), especialmente para superficies pequeñas de unas pocas hectáreas (Bendig et al., 2015). Los VANT facilitan imágenes georreferenciadas de bajo coste y de rápido despliegue, porque son empleados frecuentemente en el monitoreo y gestión del medio ambiente (Morocho, Martin, y Hardter, 2015).

Los VANT equipados con cámaras multi-espectrales, generan imágenes de la superficie terrestre en distintas bandas del espectro electromagnético, incluyendo la verde (0.5 a 0.6 μm), la RED (0.6 a 0.7 μm) y la NIR (0.7 a 1.1 μm) (Díaz, 2015). Estas bandas son

similares a las bandas de algunos satélites de observación espacial (Toth y Józków, 2016a). Con la información obtenida de los VANT se puede analizar las características fisiológicas y anatómicas de la vegetación (Steven, Malthus, y Baret, 2016).

Bendix et al. (2006) y Sanchez et al. (2012), indican que los ecosistemas presentan un ciclo fenológico regular, que depende de las estaciones húmedas y secas durante el año. Estas variaciones definen el patrón estacional de crecimiento, floración y senescencia de la vegetación (Campbell y Wynne, 2011). Basados en la fenología como un fenómeno biológico de la vegetación y su relación con el clima (Brown, De Beurs, y Grace, 2016), se usan las diferentes bandas del espectro electromagnético para calcular una serie de Índices de Vegetación (IV). Estos son usados como un indicador efectivo de los cambios intra e inter-anales que causa el clima en el estado de la vegetación (Brown, De Beurs, y Grace, 2016; Clerici, Weissteiner, y Gerard, 2012; Sancha, 2010). Entre los IV se ha considerado el cociente simple (RATIO), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Cociente (RVI), Índice de Vegetación Perpendicular (PVI), Índice de Vegetación de Diferencia (DVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Estos índice son los más usados para determinar el estado de la vegetación (Campbell y Wynne, 2011; Chuvieco, 2010).

Esta investigación analiza el desarrollo o estado vegetativo mediante el uso de diferentes índices de vegetación (RATIO, NDVI, RVI, PVI, DVI, y SAVI), para determinar la variabilidad estacional de la cobertura vegetal. El estudio se ubica en la parroquia de Malacatos, provincia de Loja en el sur del Ecuador. La zona de estudio tiene un clima cálido sub-tropical que presenta dos estaciones bien definidas: la estación seca (meses de mayo a septiembre) y húmeda (meses de octubre a abril). Estas condiciones ambientales dictan los procesos vegetativos, que dependen principalmente del recurso hídrico (Pinheiro, 1998).

El objetivo principal de esta investigación es el empleo de un VANT para la adquisición de datos para el estudio de la vegetación. Para calcular los diferentes índices de vegetación se analiza los datos adquiridos por medio de una cámara multi-espectral transportada por el VANT. Los índices de vegetación obtenidos se analizan para determinar su relación con la variabilidad del recurso hídrico en las estaciones climáticas.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: En el Capítulo I se describe los fundamentos teóricos de Teledetección necesarios para la investigación. El Capítulo II, presenta las características de la zona de estudio. El Capítulo III describe los equipos empleados. El Capítulo IV, explica los métodos para el cálculo de los índices de vegetación. En el Capítulo V, se analizan y discuten los resultados obtenidos. Finalmente se presenta las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO

1.1. Teledetección

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS por sus siglas en inglés), define la Teledetección como una técnica usada para recopilar y procesar información sobre un objeto, sin contacto físico directo con este. Esta técnica se basa en la información adquirida a través de sensores remotos, que emplean la radiación electromagnética emitida o reflejada por un objeto, en una o más regiones del espectro electromagnético (Campbell y Wynne, 2011).

1.2. Sistemas de Teledetección

Dependiendo del origen de la radiación electromagnética y la recolección de datos, se puede tener dos tipos de Teledetección: Teledetección activa, cuando la fuente de radiación es emitida por el propio sensor, como el radar, y Teledetección pasiva, cuando la fuente de radiación es externa al sensor, como la que es emitida por el Sol o por el propio objeto de estudio (Chuvieco, 2010).

1.3. Elementos de un sistema de Teledetección

Según Chuvieco (2010), un sistema de Teledetección está compuesto por los siguientes elementos (Figura 1):

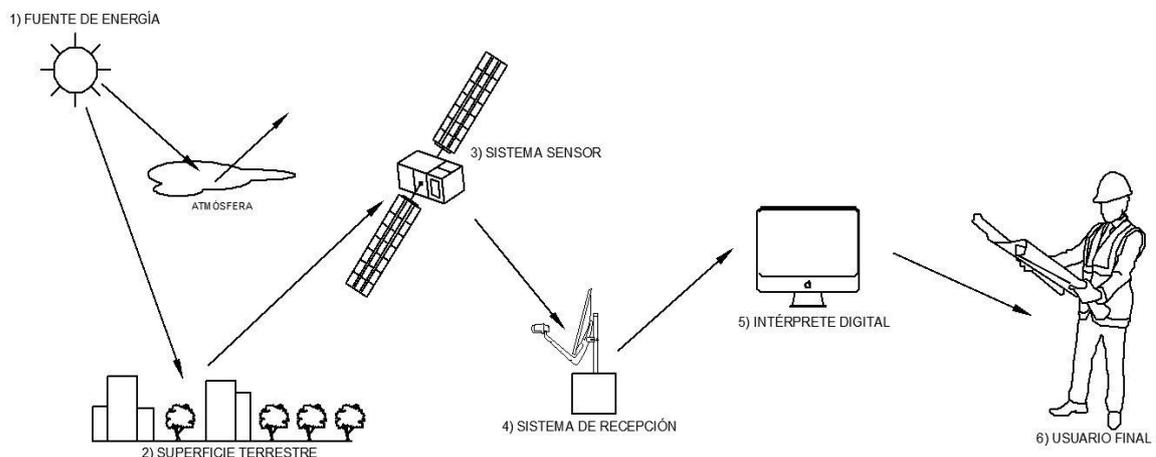


Figura 1: Componentes de un sistema de Teledetección

Fuente: Chuvieco (2010)

Elaboración: El Autor

- 1) Fuente de energía: La energía solar o la emitida por el propio sensor.
- 2) Objeto de estudio: La superficie terrestre, la cual puede ser: masas vegetales, suelo, nieve, o agua, así como también las construcciones artificiales hecha por el hombre.

- 3) Sensor: El dispositivo que capta la energía proveniente de la superficie terrestre, para ser transmitida a una estación receptora. El sensor debe ser albergado en una plataforma fija.
- 4) Sistema de recepción: Los dispositivos que reciben la información que es enviada por el sensor, para su procesamiento.
- 5) Interprete: La persona que analiza los datos, para convertirla en información de interés.
- 6) Usuario final: La persona que recibe la información y le da un uso útil.

1.4. Radiación Electromagnética

Los sistemas de Teledetección se basan en el análisis de la radiación electromagnética, la cual sigue ciertas leyes físicas, que permiten conocer el comportamiento de los objetos que interactúan con esta (Campbell y Wynne, 2011; Rees, 2012). Entre estas leyes tenemos la teoría ondulatoria, que describe la radiación electromagnética como un haz ondulatorio, y la teoría cuántica, que considera la radiación electromagnética como una partícula discreta llamada fotón que viaja a la velocidad de la luz, pero tiene una masa igual a cero (Chuvienco, 2010; Lillesand, Kiefer, y Chipman, 2004).

1.4.1. Teoría ondulatoria.

Según esta teoría la radiación electromagnética está compuesta por dos campos de fuerzas ortogonales, el eléctrico y el magnético (Figura 2) (Campbell y Wynne, 2011). Esta radiación se transmite de un lugar a otro de una forma armónica y continua, a la velocidad de la luz (c) (Chuvienco, 2010).

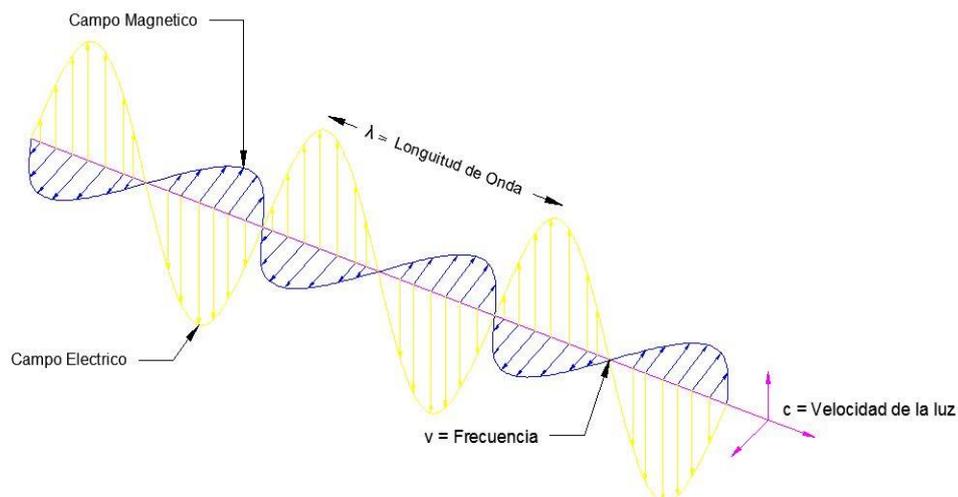


Figura 2: Ilustración de una onda electromagnética
Fuente: Thenkabei (2016)
Elaboración: El Autor

La distancia que forma un pico de la onda con la siguiente se denomina longitud de onda (λ), y el número de picos que pasa por un punto fijo en el espacio por unidad de tiempo se denomina frecuencia (ν). Mediante estos parámetros se puede describir las características de la radiación electromagnética (Campbell y Wynne, 2011; Rees, 2012).

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde c indica la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$), λ expresa la longitud de onda ($\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$), y ν la frecuencia en Hertz.

1.4.2. Teoría cuántica.

Esta teoría indica que la radiación electromagnética es emitida en unidades discretas, llamadas fotones. El tamaño de cada unidad es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación de energía (Campbell y Wynne, 2011). Planck (1900), definió una constante h para relacionar la frecuencia ν con la energía radiante (Q).

$$Q = h \cdot \nu \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Al combinar las ecuaciones ecuación (Ec. 1.1) y (Ec. 1.2) tenemos:

$$Q = h \left(\frac{c}{\lambda} \right) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde Q es la energía radiante de un fotón (en Julios), ν la frecuencia y h la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$).

Según Chuvieco (2010), se puede definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda y frecuencia, y cuya cantidad de energía radiante que contiene un flujo electromagnético es inversamente proporcional a su longitud de onda λ según la ecuación (Ec. 1.3). Esto significa que a menor longitud de onda, mayor es la energía radiante y con mayor longitud de onda menor cantidad de energía radiante.

1.5. El espectro electromagnético

La radiación electromagnética está dividida en varias regiones o bandas, donde su longitud de onda o frecuencia presentan un comportamiento similar (Figura 3) (Chuvieco, 2010). La organización de estas longitudes de onda (o frecuencia) se denomina bandas espectrales, entre las cuales tenemos los rayos gamma (10^{-6} – $10^{-5} \mu\text{m}$), los rayos X (10^{-5} – $10^{-2} \mu\text{m}$), los rayos UV (0.1 – $0.4 \mu\text{m}$), el espectro visible (0.4 – $0.7 \mu\text{m}$), el espectro infrarrojo (0.7 – $10^3 \mu\text{m}$),

las micro ondas (10^3 – 10^6 μm), y las ondas de radio ($>10^6$ μm) (Chuvieco, 2010; Panda et al., 2016).

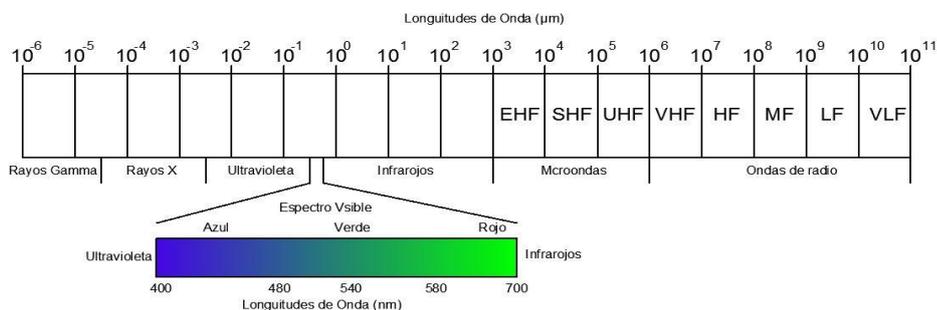


Figura 3: Bandas del espectro electromagnético
Fuente: Thenkabai (2016)
Elaboración: El Autor

Los sistemas de Teledetección generalmente operan en una serie de bandas espectrales, útiles para esta finalidad. Según Chuvieco, (2010) y Campbell y Wynne (2011), para la Teledetección las bandas visible, infrarroja y las micro ondas son las más importantes.

1.6. Interacción de la radiación electromagnética con la superficie

Cuando la energía electromagnética llega e interactúa con un objeto (p. ej. la superficie terrestre, atmosfera), esta puede ser reflejada, absorbida o transmitida (Figura 4) (Campbell y Wynne, 2011; Chuvieco, 2010).

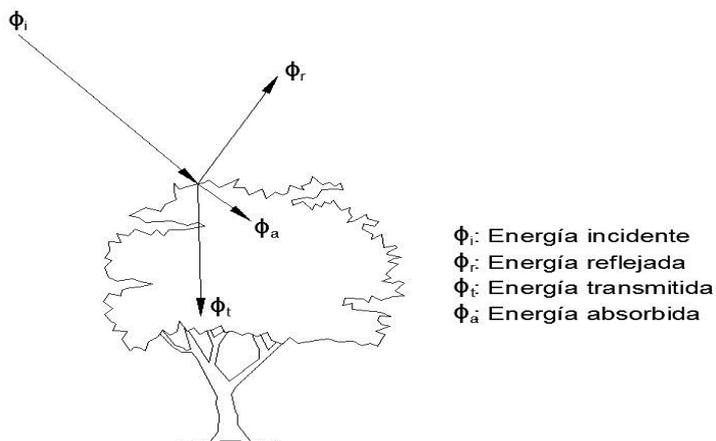


Figura 4: Descomposición del flujo solar incidente
Fuente: Chuvieco (2010)
Elaboración: El Autor

Este comportamiento de la radiación electromagnética, interactuando con un objeto puede expresarse matemáticamente mediante la ecuación (Ec. 1.4) (Chuvieco, 2010).

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Dónde: La energía incidente Φ_i es igual a la suma de la energía reflejada Φ_r , más la energía absorbida Φ_a y más la energía transmitida Φ_t

Según Chuvieco (2010), la ecuación (Ec. 1.4) puede ser expresada en términos relativos, para lo cual dividimos toda la ecuación para la energía incidente Φ_i y luego tenemos:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Dónde: ρ indica la reflectividad, α la absorbida y τ la transmisibilidad. En definitiva la suma de estas tres variables debe ser igual a 1.

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

La cantidad de energía que es reflejada, absorbida o transmitida, depende de las características del objeto y de la longitud de onda en la que se observa (Campbell y Wynne, 2011; Chuvieco, 2010).

1.7. Plataformas

La radiación electromagnética puede ser detectada usando sensores remotos, los cuales están instalados en plataformas satelitales de órbita polar o geoestacionaria, como también en plataformas áreas como aviones, helicópteros o VANT (Chuvieco, 2010; Toth y Józków, 2016b).

1.7.1. Plataformas satelitales.

Los satélites de Teledetección han proporcionado información útil y precisa sobre las características de la superficie terrestre (Chang, 2012). Algunos programas de Teledetección espacial han permitido analizar diferentes fenómenos de grandes extensiones en la superficie terrestre (Tabla 1) (Kressler, Steinnocher, Múcher, y Thunnissen, 2000). Como se ha indicado anteriormente, las plataformas satelitales pueden tener una órbita polar (es una órbita que pasa por encima de los polos de la Tierra) o una órbita geoestacionaria (es una órbita geosíncrona en el plano ecuatorial terrestre) (Campbell y Wynne, 2011). Sin embargo, este tipo de plataformas son muy costosas y su desarrollo y

despliegue puede tardar varios años (Panda et al., 2016). Algunas imágenes satelitales como del Landsat, NOAA y SENTINEL, son de acceso libre, pero la información es limitada debido a su resolución espacial. Otros satélites adquieren imágenes de alta resolución espacial (p.ej. SPOT, IKONOS, AQUA, QuickBird y RapidEye), pero la información no es gratuita y se requiere un área mínima de pedio, que aumenta los costos finales significativamente, lo cual no resulta justificable para áreas pequeñas (Chiba et al., 2014).

Tabla 1: Características de algunos satélites de Teledetección

Plataforma	Sensor	Bandas	Resolución Espacial (m)	Resolución temporal (días)	Acceso a datos
Landsat 7	PAN, ETM+	8	15, 30, 60	16	Libre
Landsat 8	PAN, MS	12	15, 30, 100	16	Libre
NOAA	AVHRR	5	1000	Diaria	Libre
SPOT 6,7	PAN, MS	5	1.5, 6	1-5	Paga
SENTINEL-2A	MS	13	10, 20, 60	10	Libre
IKONOS	PAN, MS	5	1, 4	3	Paga
QuickBird	PAN, MS	5	0.61, 2.44	5	Paga
RapidEye	MS	5	6.5	1-2	Paga

Fuente: Adaptado de (Panda et al., 2016; Toth y Józków, 2016; Ünsalan y Boyer, 2011)
Elaboración: El Autor

PAN: Pancromático, ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus (Mapeo Temático Mejorado+),
MS: Multiespectral

1.7.2. Plataformas aéreas.

Entre las plataformas aéreas usadas en Teledetección tenemos las aeronaves, las cuales se han equipado con diferentes instrumentos para la captura de información de la superficie terrestre (Panda et al., 2016). Este tipo de plataforma fue la principal fuente de información antes de desarrollo de las plataformas espaciales (Jensen, 2014).

1.7.3. Plataformas VANT.

El gran avance tecnológico ha permitido el desarrollo de los VANT como herramientas de Teledetección (Chang, 2012; J. Everaerts, 2008). Los VANT son capaces de obtener información de alta resolución espacial y temporal, debido a su baja altitud de vuelo (Chao y Chen, 2012; Colomina y Molina, 2014). Existen diferentes tipos de VANT como los de ala fija y los de multi-rotor, los cuales están empleados actualmente en diferentes investigaciones. (Toth y Józków, 2016a). Los VANT de multi-rotor presentan ciertas características ventajosas como su mayor flexibilidad a la hora del vuelo, debido a su capacidad de

despegue vertical y maniobrabilidad. Mientras que los VANT de ala fija tienen mayor autonomía, pero a costo de la maniobrabilidad (Panda et al., 2016).

En la tabla 2 se resumen algunos de estos equipos que actualmente se encuentran disponibles en el mercado.

Tabla 2: Plataformas VANT empleadas en Teledetección.

Fabricante	Modelo	Tipo	Propulsión	Peso (kg)	Autonomía máxima (min)
Sensefly	eBee	Ala fija	eléctrico	0.7	40
Topcon	SIRIUS PRO	Ala fija	eléctrico	2.7	50
AeroVironment	Puma AE	Ala fija	eléctrico	6.1	210
DJI	Phantom 2	Quadcopter	eléctrico	1.3	25
DJI	Inspire 1	Quadcopter	eléctrico	2.3	10-15
Altus UAS	Delta X8	Octocopter	eléctrico	9.5	10-14

Fuente: Adaptado de (Toth y Józków, 2016)

Elaboración: El Autor

1.8. Sensores

De acuerdo a los tipos de Teledetección (activa o pasiva), los sensores se clasifican en varios tipos, basados en su escaneo y en el mecanismo de formación de imágenes (Chuvieco, 2010).

1.8.1. Sensores pasivos.

Los sensores pasivos se limitan a recoger la radiación electromagnética que es reflejada o emitida por la superficie terrestre (Panda et al., 2016). Los equipos usados para algunas plataformas son: cámaras análogas, exploradores de barrido y de empuje, o cámaras de video (Chuvieco, 2010). Acorde con la NASA (1999), la observación de la Tierra con sensores pasivos se ha realizado mediante: radiómetros de imágenes, espectrómetro, espectrorradiómetro y radiómetros hiperespectrales.

1.8.2. Sensores activos.

Los sensores activos son capaces de emitir su haz energético, que posteriormente es recogido tras su reflexión en la superficie de un objeto (Chuvieco, 2010). Los equipos más usados son el RADAR (Radio Detection and Ranging) y el LiDAR (Light Detecting and Ranging) (Jensen, 2014). Estos sensores proveen una ventaja en Teledetección, especialmente en zonas tropicales, donde la nubosidad y la lluvia son eventos frecuentes, porque tienen la capacidad de penetrar a través de estos fenómenos (Chuvieco, 2010). Sin

embargo, las desventajas de estos equipos incluyen inferiores características espectrales, procesamiento de datos complicada, volumen masivo de datos, y un mayor costo (Panda et al., 2016).

1.9. Características de las imágenes de Teledetección

1.9.1. Definición.

Una imagen suele ser una representación de dos dimensiones de estructuras rectangulares llamadas pixeles (Chuvienco, 2010). Las imágenes representadas de esta forma se denominan imagen raster o imágenes de mapas de bits (Gupta y Ibaraki, 2014)

1.9.2. Almacenamiento de imágenes.

Según Chuvienco (2010), una imagen raster registra un valor numérico para cada pixel, conocido como nivel digital (ND), que es la medida física realizada por el sensor, que puede traducirse fácilmente a valores de radiancia o reflectancia empleando los coeficiente de calibración del sensor. Los ND de la imagen se graban en códigos binarios en grupos de 8, 10, 12 o 16 bits dependiendo del sensor. Con respecto a los formatos de almacenamiento generalmente se usa el "GeoTIFF", que permite almacenar imágenes de distinta resolución y permite insertar metadatos geográficos para diferentes aplicaciones (Campbell y Wynne, 2011).

1.9.3. Resolución en imágenes de Teledetección.

Las imágenes producidas por diferentes sensores, tanto en plataformas satelitales o en las aéreas, tienen características únicas que se relacionan con las resoluciones espacial, espectral, temporal y radiométrica (Panda et al., 2016).

1.9.3.1. Resolución espacial.

La resolución espacial se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en la imagen producida por un sensor (Jensen, 2014). Las imágenes aéreas procedentes de aviones tripulados convencionales pueden llegar a alcanzar resoluciones submétricas (hasta de 10 cm) que han permitido mapear las infestaciones de diversas malas hierbas en diferentes cultivos (Chuvienco, 2010).

1.9.3.2. Resolución espectral.

La resolución espectral se refiere al número de bandas espectrales que puede discriminar el sensor (Jensen, 2014). Es conveniente que estas bandas sean suficientemente estrechas

para recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro, es decir, a mayor resolución espectral, más útil será la información que pueda ser deducida (Chuvieco, 2010).

1.9.3.3. Resolución temporal.

La resolución temporal es una medida del intervalo de tiempo en que el sistema de Teledetección recoge información de un punto específico en la Tierra (Jensen, 2014). Este tiempo está en función de las características de vuelo de la plataforma que contiene el sensor, como la altura y la velocidad (Chuvieco, 2010).

1.9.3.4. Resolución radiométrica.

La resolución radiométrica se refiere a la capacidad que tiene el sensor para registrar variaciones en la radiancia espectral que recibe (Jensen, 2014). La amplitud de las variaciones indica el rango posible de valores que puede almacenar el sensor, expresando en número de bits (Chuvieco, 2010).

1.10. Pre-procesamiento de las imágenes de Teledetección

Según indica Campbell y Wynne (2011), así como Gupta y Ibaraki (2014), el pre-procesamiento facilita los procesos posteriores de la imagen (como extracción de información y análisis). El propósito de esta herramienta es mejorar la calidad de los datos obtenidos, independiente del tipo de investigación. El pre-procesamiento incluye generalmente la reducción de ruido, corrección geométrica, corrección radiométrica y modificación de la resolución espacial (Jensen, 2014).

1.10.1. Corrección radiométrica.

La corrección radiométrica es el tratamiento de los ND de una imagen con la finalidad de corregir errores, los cuales pueden ser producidos debido al mal funcionamiento del sensor o a los efectos atmosféricos (Chuvieco, 2010). El propósito es obtener valores fiables y completos de ND para toda la imagen (Campbell y Wynne, 2011).

1.10.1.1. Conversión de ND a radiancia.

Algunos programas de Teledetección, p.ej. del satélite Landsat, ofrecen a los usuarios imágenes donde cada pixel contiene un valor ND, expresados como números enteros, para facilitar la distribución de la información (Campbell y Wynne, 2011). Este tipo de información es denominada datos crudos, o nivel de procesamiento cero (Nivel 0) (Teillet, 2016).

Para convertir estos valores de ND a radiancia es necesario conocer los coeficientes de calibración, proporcionados por el fabricante del sensor (Chuvieco, 2010). El sensor

transforma los valores de ND o datos crudos a radiancia medida para cada pixel (Campbell y Wynne, 2011; Teillet, 2016).

Otros programas de Teledetección, p.ej. del satélite SENTINEL-2A, preparan datos con un nivel avanzado de procesamiento (Nivel 1). Las imágenes incluyen valores de reflectancia de la parte superior de la atmosfera (TOA, por sus siglas en ingles), para todos los pixeles. Esta reflectancia es aquella que llega al sensor atravesando la atmosfera, y la cual es afectada por aerosoles y partículas de polvo o agua, que se encuentran dispersas en la atmosfera (Teillet, 2016).

1.10.1.2. Conversión de radiancia a reflectancia TOA.

La reflectancia es la relación entre la energía reflejada y la energía incidente en una determinada superficie (Jensen, 2014). El valor es adimensional comprendido entre 0 y 1, o expresado en porcentaje (Campbell y Wynne, 2011). La reflectancia medida de un sensor satelital se obtiene mediante la siguiente ecuación (Chuvieco, 2010):

$$\rho_{k(i,j)} = \frac{\pi \cdot ND_{k(i,j)}}{A_{k(i,j)} \cdot E_s \cdot d(t) \cdot \cos(\theta_{s(i,j)})} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Dónde: $ND_{k(i,j)}$ es el valor del nivel digital para cada banda (k), $A_{k(i,j)}$ es el valor calibración absoluta del instrumento multi-espectral (MSI por sus siglas en ingles), E_s indica la irradiación solar extra-atmosférica, $\theta_{k(i,j)}$ es el ángulo cenital de incidencia solar, $d(t)$ es el factor de corrección de las distancia Tierra - Sol y se expresa mediante la Ec 1.10:

$$d(t) = \frac{1}{(1 - 0.01673 \cdot \cos(0.0172 \cdot (t - 2)))^2} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Dónde: t es el día Juliano correspondiente a la fecha de adquisición de los datos.

1.10.1.3. Corrección atmosférica.

La radiación electromagnética proveniente de un objeto puede ser absorbida o dispersada por las partículas y gases que se encuentran en la atmosfera, afectando la radiación captada por el sensor (Teillet, 2016). La corrección atmosférica toma en cuenta todos estos parámetros atmosféricos, incluyendo la transmitancia de los gases, la reflectancia aportada por la dispersión atmosférica y por otras superficies vecinas (Chuvieco, 2010; Teillet, 2016).

Existen diversos procesos desarrollados para la corrección atmosférica, como el método Basados en Objeto Oscuro (DOS), o el Modelo de Transferencia Radiativa, que están incluidos en algunos softwares de análisis de imagines (Chuvieco, 2010).

1.10.2. Procesamiento.

El procesamiento abarca una gran variedad de algoritmos que un analista puede aplicar para obtener la información requerida de una imagen (Panda et al., 2016). Los procesos de análisis incluyen histogramas, que tabulan la frecuencia de ocurrencia de cada valor de luminosidad, y los cocientes, que permiten determinar la relación que existen entre diferentes valores de luminosidad en la imagen (Chuvieco, 2010).

1.11. Extracción de información de imágenes

Uno de los objetivos de la Teledetección es proporcionar información para el estudio de ciertos fenómenos naturales (Chuvieco, 2010). En estudios relacionados con la superficie vegetal, la Teledetección ha logrado clasificar diferentes ecosistemas, estimar el volumen de madera, e identificar cultivos específicos, etc., basados en una serie de índices para la vegetación (Campbell y Wynne, 2011).

1.12. Características espectrales de la vegetación

El estudio de la vegetación mediante la Teledetección está relacionado con las características espectrales de las hojas (Chuvieco, 2010). Las hojas presentan una reflectividad a la radiación solar en dos regiones del espectro electromagnético bien distintivas: en el espectro visible (VIS) y en el NIR (Campbell y Wynne, 2011).

1.12.1. Estructura de la hoja.

La capacidad de la hoja para reflejar, absorber y transmitir la radiación electromagnética depende de la estructura interna de la hoja (Chuvieco, 2010). La estructura interna de las hojas, no es idéntica en todas las plantas, pero las hojas de la mayoría de las plantas tienen elementos comunes (Figura 5) como Campbell y Wynne, (2011) y Konecny (2014) indican.

La hoja está conformada por la epidermis superior cubierta por una cutícula transparente que impide la pérdida de humedad desde el interior de la hoja. En la parte superior de la hoja también encontramos el tejido empalizado que consiste en células verticalmente alargadas ordenadas en paralelo. Las células empalizadas incluyen cloroplastos, células compuestas de clorofila y otros pigmentos activos en la fotosíntesis. Debajo del tejido empalizado se encuentra el tejido esponjoso, que consiste en células irregularmente formadas, separadas por aberturas interconectadas. La parte inferior de la hoja está formada por la epidermis inferior, la cual es similar a la epidermis superior excepto que contiene aberturas, llamadas estomas, que permiten el intercambio de aire y humedad entre la hoja y la atmósfera.

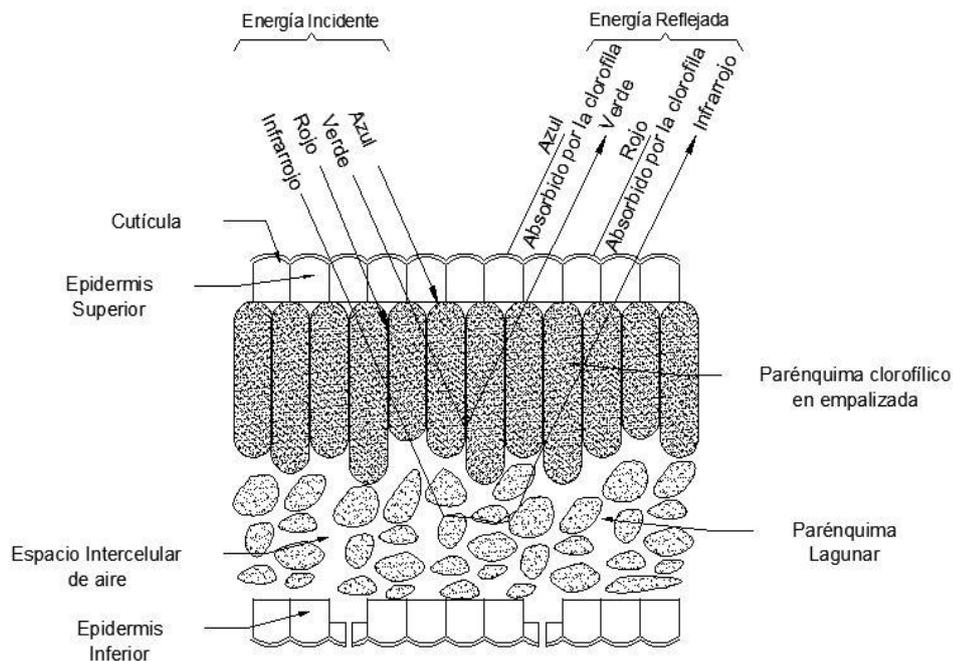


Figura 5: Estructura interna de la hoja
 Fuente: Konecny (2014)
 Elaboración: El Autor

1.12.2. Comportamiento de la vegetación en el espectro visible (VIS).

La vegetación tiene generalmente una baja reflectividad en el VIS, porque la clorofila, xantofila y caroteno absorben fuertemente las longitudes de onda del rojo y azul, para realizar la fotosíntesis (Steven et al., 2016). Solo la banda verde del espectro presenta una alta reflectividad, haciendo que las hojas presenten un color verde para el ojo humano (Chuvieco, 2010).

1.12.3. Comportamiento de la vegetación en el espectro infrarrojo cercano (NIR).

En el espectro NIR la vegetación tiene una baja absorción, y consecuentemente una alta reflectividad (Chuvieco, 2010). Esto se debe a la estructura esponjosa del mesófilo, debido a las cavidades de aire existentes en las células (Campbell y Wynne, 2011). En consecuencia, la reflectividad en la banda NIR depende de la estructura interna de la hoja viva (Chuvieco, 2010; Steven et al., 2016).

1.13. Índices de vegetación.

Un índice de vegetación es un cociente o ratio formado por la combinación de distintos valores espectrales (dos o más bandas) (Liang, Li, y Wang, 2013). Las bandas son sumadas, divididas o multiplicadas para producir un valor que indique el estado de la

vegetación dentro de cada pixel (Campbell y Wynne, 2011). Según Chuvieco (2010), los índices de vegetación se utilizan generalmente para:

- 1) Mejorar la discriminación entre dos cubiertas, debido al comportamiento reflectivo muy distinto en las bandas utilizadas.
- 2) Reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) para la caracterización espectral de distintas cubiertas

El empleo de estos cocientes para el estudio de la vegetación se deriva del comportamiento espectral de la vegetación (Chuvieco, 2010). En la vegetación sana el VIS especialmente la luz azul y roja, son absorbidos por la clorofila y otros pigmentos, mientras que el espectro NIR es reflejado, debido a la estructura esponjosa del mesófilo (Steven et al., 2016).

Jackson y Huete (1991) clasifican los índices de vegetación en dos grupos, los que se obtiene a través de cocientes entre dos bandas (basados en pendiente) y los que emplean combinaciones lineales (basados en distancia).

1.13.1. Índices basados en pendiente.

Los índices de vegetación de este grupo se obtienen empleando las bandas RED y NIR, (Chuvieco, 2010; Liang, Li, y Wang, 2013). Este grupo contiene los siguientes índices

1.13.1.1. Índice de vegetación de ratio (RATIO).

Este índice describe el estado de la vegetación, debido al gran contraste que existe entre la banda RED y NIR, cuando la vegetación está en desarrollo (Chuvieco, 2010). La reflectancia en la banda RED tiende a disminuir, debido a su absorción por parte de moléculas de clorofila, xantofila y caroteno, mientras que la reflectancia en la banda NIR aumenta debido a la estructura interna de la hoja (Campbell y Wynne, 2011). El índice RATIO es empleado para separar la vegetación sana y vigorosa de otro tipo de coberturas (Jackson y Huete, 1991). Este índice presenta valores muy cercanos a 1 para cobertura que presentan un comportamiento reflectivo similar entre las bandas RED y NIR (p.ej. el suelo desnudo), y aumenta sin límite aproximándose al infinito cuando la banda RED se acerca a cero (Chuvieco, 2016). Su ecuación es:

$$RATIO = \frac{NIR}{RED} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

1.13.1.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El NDVI es uno de los índices más usados para separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Campbell y Wynne, 2011). El índice es calculado por la combinación de las bandas

RED y NIR con valores que oscilan entre -1 y 1. Un valor de cero indica la falta de vegetación, valores negativos indican superficies como masas de agua y los valores positivos la presencia de vegetación (Chuvieco, 2010). Su ecuación es:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{Ec. 1.12})$$

1.13.1.3. Índice de vegetación cociente (RVI).

El cálculo del índice RVI se basa en las reflectancia de las bandas RED y NIR, pero inverso comparado con el índice RATIO, por lo cual permite separar coberturas, no vegetales de las vegetales (Richardson y Wiegand, 1977). El índice presenta valores muy cercano a cero cuando existe un gran contraste entre las banda RED y NIR (p.ej. la vegetación), y se aproxima a 1 cuando una determina cobertura tiene un comportamiento similar entre las bandas RED y NIR, como es el caso del suelo desnudo. Su ecuación es:

$$RVI = \frac{RED}{NIR} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

1.13.2. Índices basados en distancia.

Según Chuvieco (2016), en el cálculo de este grupo de índices se emplean las bandas RED y NIR, además del valor de la ordenada al origen de la línea del suelo (**a**) y la pendiente de la línea del suelo (**b**). La línea del suelo se emplea para indicar suelos que están libres de vegetación, se la obtiene a través de una regresión lineal simple entre las bandas roja e infrarroja para una muestra de pixeles de suelos desnudos (Campbell y Wynne, 2011; Chuvieco, 2016) y se define como:

$$NIR_{soil} = a + b \cdot RED_{soil} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

$$b = \frac{\sum (RED_i \cdot NIR_i) - n \cdot (\overline{RED} \cdot \overline{NIR})}{\sum RED_i^2 - \overline{RED}^2} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

$$a = \overline{NIR} - b \cdot \overline{RED} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Dentro este grupo de índices se tiene los siguientes:

1.13.2.1. Índice de Vegetación Perpendicular (PVI).

Este índice calcula la distancia perpendicular de un pixel a la línea de suelo (Chuvieco, 2016). Valores cercanos a cero en el PVI indican que los pixeles están muy cerca de la línea del suelo, por lo cual representan cubiertas que contiene suelo desnudo o superficies con un

comportamiento similar (p.ej. viviendas), valores intermedios del PVI indica que los pixeles tienen contribución del suelo y la vegetación en su respuesta espectral, mientras que valores altos del PVI indican que la respuesta espectral de los pixeles es afectada solo por la vegetación (Richardson y Wiegand, 1977). Su ecuación es:

$$PVI = \frac{NIR - a \cdot RED + b}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

1.13.2.2. Índice de Vegetación de Diferencia (DVI).

Es uno de los índices más simples de este grupo, y al igual que el PVI mide la distancia perpendicular de un pixel a la línea de suelo (Chuvienco, 2016). Según Richardson y Wiegand, (1977) para el cálculo de estos índices, se emplea las reflectancia de las bandas RED y NIR, así como también la pendiente de la línea de suelo. Además (Richardson y Wiegand, (1977) indican que valores cercanos a cero de este índice indican suelo desnudo, negativos indican cuerpos de agua y mayores a cero indican vegetación. Su ecuación es:

$$DVI = b \cdot NIR - RED \quad (\text{Ec. 1.18})$$

1.13.2.3. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).

Huete (1988), propuso este índice, para tomar en cuenta las propiedades ópticas del fondo del suelo, debido a que la vegetación podría dispersar y transmitir una cantidad de energía en la banda NIR al fondo del suelo, y posteriormente el suelo transmite esa energía al sensor, independientemente de sus propiedades ópticas, por lo cual se introdujo el factor **L** en la ecuación del NDVI para corregir esta energía reflejada por el suelo. El factor **L** depende de la densidad de la vegetación en estudio, y se sugiere emplear $L=1$ para niveles bajos de vegetación, $L=0.5$ para un nivel intermedios de vegetación y $L=0.25$ para niveles altos de vegetación (Huete, 1988).

Además Huete (1988), indica que a cantidades bajas de vegetación, no hay suficiente dispersión de la señal NIR de la vegetación al suelo, y que a cantidades altas de vegetación la señal NIR proveniente del suelo debido a la dispersión de la vegetación es muy poca. Sin embargo, a cantidades de vegetación intermedias se observa una dispersión de la energía NIR producida a través de los doseles arbóreos, causando una señal espectral reflejada en el suelo que se asemeja mucho a las firmas espectrales de vegetación.

Para el cálculo de este índice, se emplean la reflectancia de las bandas RED y NIR, además incorpora un factor L de ajuste del suelo, y para mantener una escala similar de mediación al NDVI (entre -1 y 1) se multiplica por el factor (1+L) (Chuvieco, 2010; Huete, 1988). Su ecuación es:

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L) \quad (\text{Ec. 1.19})$$

CAPÍTULO II - ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación geográfica

El área de estudio se ubica en la parroquia de Malacatos (Figura 6), perteneciente al cantón Loja, en la provincia de Loja, en el sur del Ecuador, cuyas coordenadas son: UTM 17S, X: 692,381.713 m, Y: 9,535,547.777 m; con una elevación media de 1630 msnm. Las zonas más altas se encuentran en la parte este y norte, donde existen elevaciones hasta 1674 msnm. La parte central corresponde a zonas con una menor pendiente, con elevaciones que van desde 1610 hasta 1640 msnm. Las áreas más bajas se encuentran en la parte oeste, y una pequeña sección cerca de la parte centro-sur del área de estudio cuya altura varía de 1589 hasta 1610 msnm.

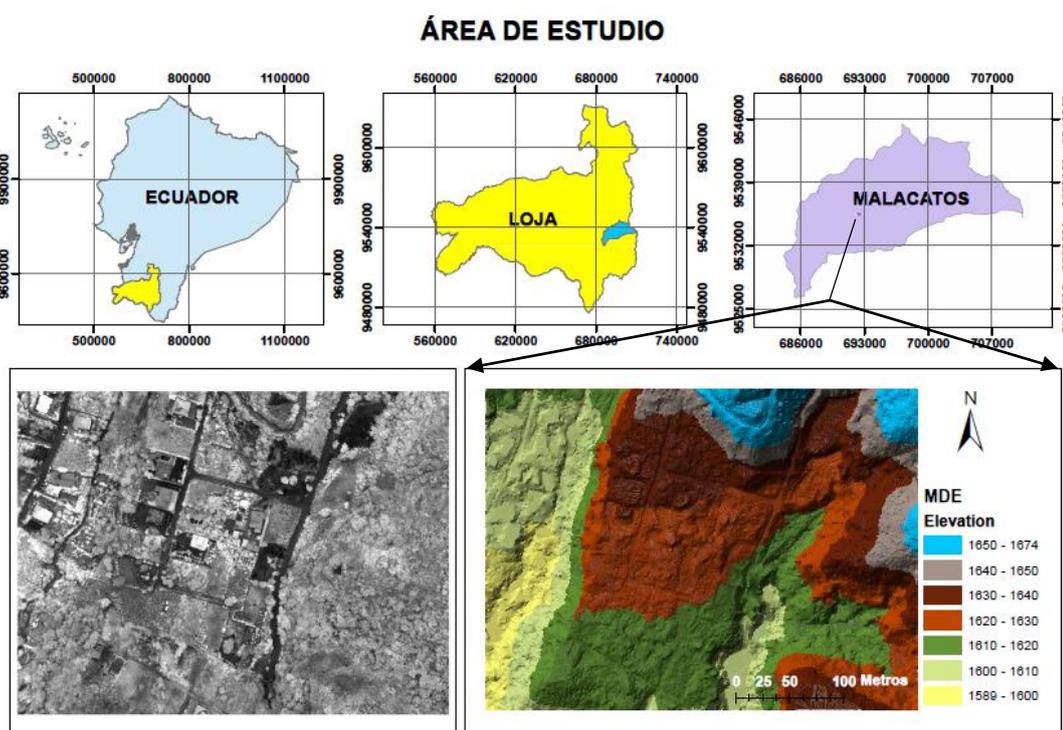


Figura 6: Área de estudio

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

2.2. Clima

El clima en el área de estudio es cálido sub-tropical, con una temperatura media anual de 20.3°C y dos estaciones bien marcadas. Entre mayo y septiembre está formada la estación seca (invierno), mientras que entre octubre y abril la estación húmeda (verano) (CAD Municipal de Loja, 2017). La figura 7 muestra las precipitaciones y temperaturas promedio mensuales para el periodo de 1964 a 2015, donde se distingue claramente las dos estaciones anuales.

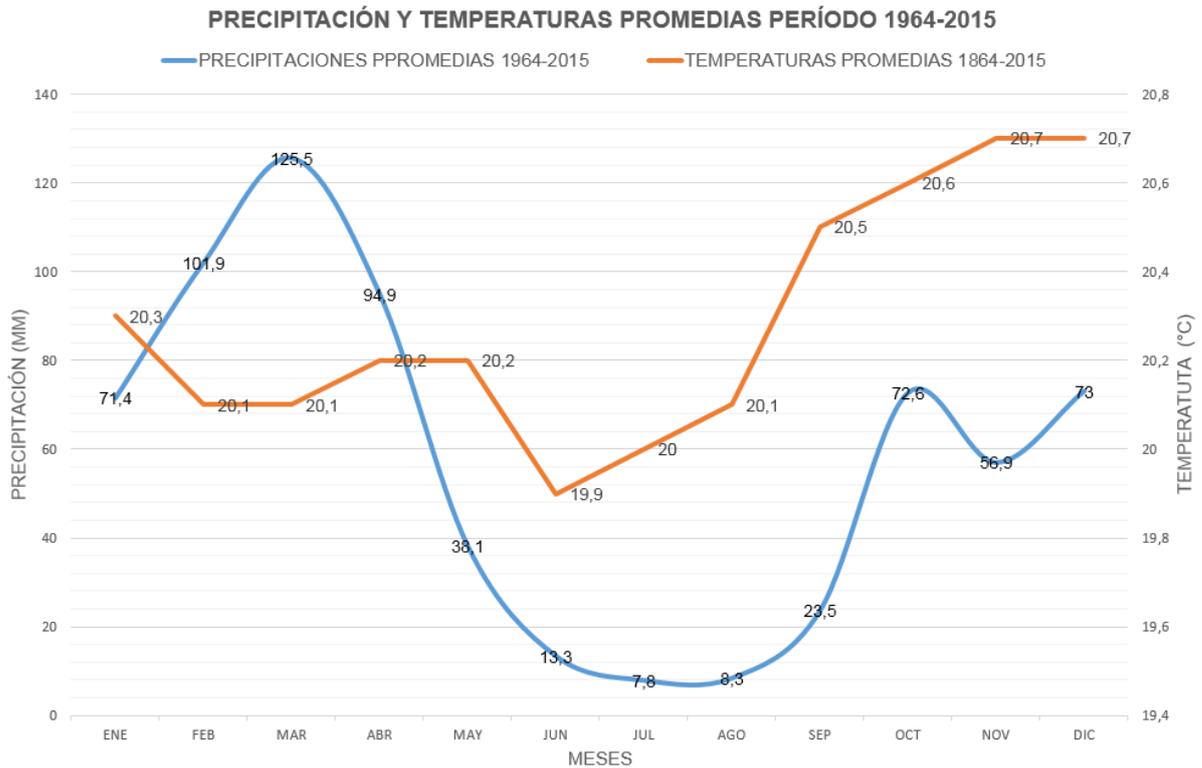


Figura 7: Variabilidad de las precipitaciones y temperatura en el estación meteorológica Malacatos
Fuente: INAMHI
Elaboración: El Autor

2.3. Vegetación

La vegetación natural presente en el área de estudio, se encuentra distribuida en su mayoría en la parte este y oeste, y en pequeñas cantidades en la parte central, y consiste en bosques conformada por plantas como el Faique (*Acacia macracantha*), Bombacaceae (*Ceiba insignis*), Porotillo (*Erythrina velutina*). Vegetación que está adaptada al régimen pluviométrico (Gobierno Provincial de Loja [GPL], 2011).

Además en el área de estudio existen campos de producción agrícola, en donde se cultivan maíz, leguminosas y plantas medicinales, así como también árboles frutales como: *Psidium* Guajava (Guayaba), *Citrus Sinensis* (Naranja) y *Musa Paradisiaca* (Guineo), cultivos que están situados en la parte central del área de estudio.

2.4. Suelos

Los suelos presentes en el área de estudio en su mayoría son estratos de arcillas, producto de la desintegración de la roca magmática que favorecen las actividades agrícolas. Aparte de esto existen conglomerados formados de rocas y arcillas.

CAPÍTULO III – EQUIPOS Y DATOS

3.1. Equipos para la adquisición de imágenes espectrales

3.1.1. Plataforma VANT.

La plataforma VANT empleada para la adquisición de imágenes multi-espectrales en la presente investigación fue el INSPIRE 1 (Figura 8). Desarrollado por la compañía **DJI** (Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd), empresa tecnológica que fabrica plataformas VANT para la fotografía aérea. El diseño del VANT es basada en una plataforma multi-rotor con propulsión eléctrica, con despegue y aterrizaje vertical. Además, para la navegación el VANT tiene un sistema GPS integrado.



Figura 8: Sistema VANT – INSPIRE 1
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

3.1.1.1. Componentes.

El VANT incluye los siguientes componentes:

- **Aeronave:** Estructura de fibra de carbono, de cuatro rotores, peso 2935g (Batería incluida).
- **Sensor:** Es una cámara multi-espectral, que permitirá capturar información de la superficie terrestre en las bandas RED y NIR.
- **Sistema de control:** Dispositivo móvil para el control de vuelo y del sensor.

3.1.1.2. *Ámbito legislativo del uso de VANT.*

En Ecuador la Dirección General de Aviación Civil (**DAC**), ha establecido una serie de reglamentos para el uso de los VANT (RESOLUCIÓN N° 215, 2015). Los artículos más importantes se listan a continuación:

- Art. 1 - La prohibición del uso de VANT en espacios aéreos controlados.
- Art. 2 - La operación de los VANTS no excederá en ningún momento una altura de vuelo de 122 metros.
- Art. 3 – Los VANT serán operados solamente en las horas comprendidas entre la salida y la puesta del sol; y en condiciones meteorológicas de vuelo visual.
- Art. 4 – las personas que operan los controles de VANT serán responsables por la operación general de la misma durante todo el vuelo, en forma solidaria con el explotador o propietario de la aeronave.

3.1.2. Sensor multi-espectral.

El sensor montado en el VANT, fue una cámara multi-espectral de Parrot Sequoia, conformada por dos dispositivos, el **Sensor Multi-espectral** (Figura 9a) que contiene los 4 sensores monocromáticos y el **Sunshine Sensor** (Figura 9b) el cual contiene 4 sensores de luz ambiental.

La cámara capta imágenes en las bandas verde, roja, roja-edge e infrarroja cercano. El dispositivo además consta de una cámara regular (luz visible, RGB). En la tabla 3 se muestra las características generales del sensor, y en la tabla 4 las características de cada uno de los sensores monocromáticos.

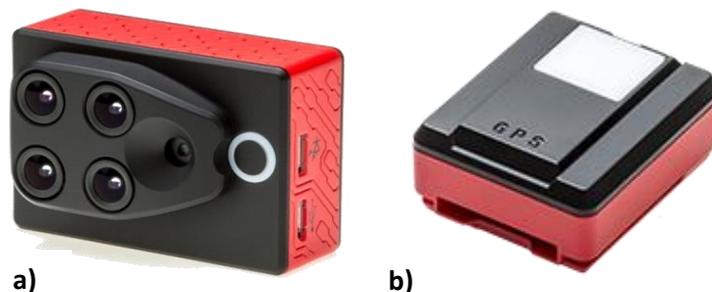


Figura 9: Sensor multi-espectral Parrot Sequoia a) Sensor Multi-espectral, b) Sunshine Sensor.

Fuente: Parrot Company (2016)
Elaboración: Parrot Company

Las imágenes en el espectro NIR, junto con las del espectro VIS, son particularmente útiles en agricultura porque visualizan las concentraciones de clorofila en las hojas o tasas de actividad fotosintética (Chuvieco, 2010). Mediante estas bandas se puede detectar procesos en los cultivos, tales como el stress en la vegetación (Campbell y Wynne, 2011).

Tabla 3: Características generales del sensor

Parámetro	Valor
Dimensiones del sensor (mm)	59x41
Bandas espectrales	4
Resolución espacial de cámaras espectrales (Mpx)	1.2
Peso del sensor (g)	72

Fuente: Guía de Usuario de Parrot Sequoia (2016)

Elaboración: El Autor

Tabla 4: Características de cada sensor monocromático

Banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de la longitud de onda (nm)
Verde	550	510 - 590
Roja	660	620 - 700
Roja-Edge	735	725 - 745
Infrarroja	790	750 - 830

Fuente: Guía de Usuario de Parrot Sequoia (2016)

Elaboración: El Autor

3.2. Imágenes satelitales

Las imágenes usadas en esta investigación se han obtenido del satélite SENTINEL-2A, que posee un sensor multi-espectral (MSI) de trece bandas espectrales con diferentes resoluciones. Cuatro bandas tienen una resolución espacial de 10 metros, seis de 20 metros y tres de 60 metros. Para el estudio se empleó la banda **B4** correspondiente al espectro RED y la **B8** correspondiente al espectro NIR a una resolución espacial de 10 metros. Las imágenes están disponibles de forma gratuita a partir del año 2015 a través del sitio web de la misión Copérnico (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

3.3. Software

3.3.1. Datamapper Inflight.

Para la planificación de vuelo se usó el software “Datamapper Inflight” el cual es de acceso libre para dispositivos Android. El software permite programar una serie de vuelos en función de la velocidad, altura y autonomía del VANT (PrecisionHawk, 2017).

3.3.2. PIX4D.

Para la generación de los mapas de reflectancia se empleó el software “PIX4D” en su versión de prueba. El software contiene todas las funcionalidades para realizar la orientación y georreferenciación de las imágenes capturadas por el sistemas VANT, como también herramientas para la generación de mapas de reflectancia (PIX4D SA, 2017).

3.3.3. ArcGIS 10.3.

ArcGIS 10.3 fue utilizado para la generación y visualización de los índices de vegetación, a través de su módulo “**Map Algebra**” (Docan, 2016).

3.3.4. IDRISI Selva.

Para el procesamiento de las imágenes satelitales se empleó el software IDRISI, que permite el análisis de datos raster y vectoriales. Mediante sus diferentes módulos se puede realizar diferentes procesos, como algebra de mapas y estadísticas para el análisis y presentación de resultados (Eastman, 2012).

3.3.5. SNAP 5.0.

Esta herramienta es la aplicación oficial para el procesamiento de imágenes SENTINEL. El software compone de un amplio conjunto de herramientas de visualización, análisis y procesamiento de la información obtenida por el satélite. Las herramientas permiten realizar la corrección atmosférica de las imágenes y calcular la reflectancia para cada pixel en la superficie. (BOA) (Mueller, 2016).

CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA

4.1. Descripción de la metodología

La metodología para la generación de los índices de vegetación mediante un sistema VANT se presenta resumida en la figura 10, indicando los procesos aplicados para la adquisición de datos, procesamiento y validación de los resultados.

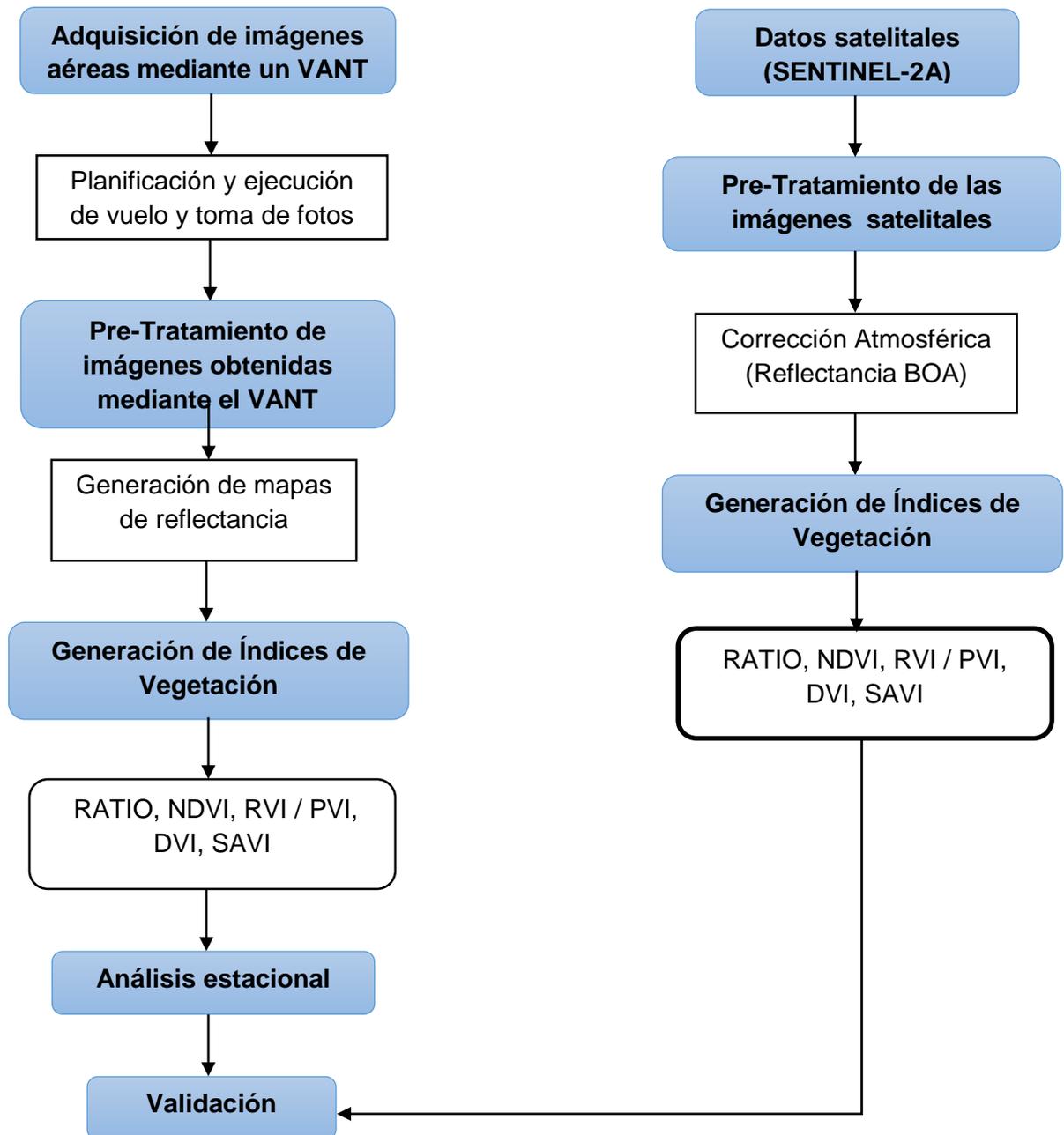


Figura 10: Metodología general del proyecto de investigación
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

4.2. Adquisición de imágenes mediante un VANT

4.2.1. Plan de vuelo.

La planificación del vuelo se basó en las técnicas fotogramétricas propuestos por Ghilani y Wolf (2014). Para la ruta del vuelo se seleccionó el tipo doble rejilla (Figura 11), porque con este método se pueden generar orto-mosaicos de mejor calidad debido al mayor número de imágenes individuales. Además, se estableció un traslape longitudinal y trasversal de 80% en las imágenes como es recomendado por el fabricante del sensor. Las imágenes fueron tomadas a una altura de vuelo de 100 metros, considerando los parámetros de seguridad establecido por el fabricante del VANT y los reglamentos del DAC. La velocidad de vuelo fue de 9 m/s, que es alrededor de 70% la capacidad máxima del VANT y permite hacer un seguimiento visual y control del VANT desde la superficie. El intervalo de tiempo para la captura de las imágenes fue determinado a cada 2.1 segundos, cumpliendo así los traslapes pre-establecidos en función de la velocidad del VANT. Con estos parámetros se puede obtener fotografías a una resolución espacial de 10 cm/pixel para un área aproximada de 16.5 hectáreas durante un vuelo de 10 minutos.

La ejecución del vuelo fue programado mediante la aplicación Datamapper Inflight, en la cual se puede especificar todos los parámetros del vuelo, como altura, velocidad y traslape de las imágenes. Una vez programado el VANT, este realiza el vuelo en forma automática.

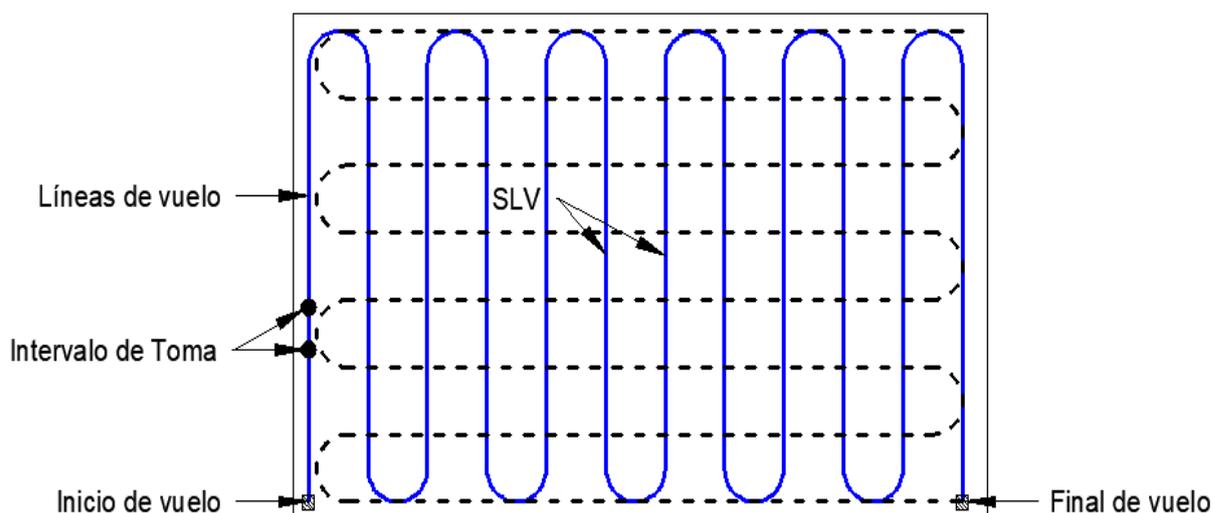


Figura 11: Plan de vuelo tipo rejilla
Fuente: Adaptado de Ghilani y Wolf, (2014)
Elaboración: El Autor

SLV: Separación de las líneas de vuelo

4.2.2. Ejecución del vuelo.

Previo a la ejecución del vuelo, se procedió al montaje del sensor multi-espectral al VANT. El sensor multi-espectral se colocó en la parte inferior trasera sobre una placa construida especialmente para este fin. Además, se instaló el Sunshine sensor en la parte media superior del VANT, que detecta las condiciones de visibilidad para reajustar los parámetros de captura del sensor. Como fuente de energía para la cámara multi-espectral se utilizó una batería portátil ADATA de 5 voltios y 2.1 amperios, la cual fue colocada lateralmente al VANT. La figura 12 muestra la configuración de los equipos en el sistema VANT. Las fechas de observación fueron establecidas para el 26 de abril y el 24 de mayo del 2017. Las bandas espectrales empleadas para la captura de información fueron las RED y NIR.



Figura 12: Configuración de los componentes del sistema VANT
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

4.3. Pre-tratamiento de las imágenes obtenidas mediante el VANT

4.3.1. Generación de mapas de reflectancia.

El software PIX4D fue utilizado para la generación de orto-mosaicos en base de las imágenes obtenidas del sistema VANT. Mediante este software se generó los mapas de reflectancia para las bandas espectrales RED y NIR del sensor. Los mapas de reflectancia son necesarios para el cálculo de los índices de vegetación.

4.4. Índices de vegetación

Una vez obtenidos los orto-mosaicos para las bandas espectrales RED y NIR, se procedió al con el cálculo de los índices de vegetación. Para el cálculo se utilizó el software ArcGIS 10.3 (módulo Map Algebra).

En esta investigación se calcularon los índices de vegetación basados en pendiente y en distancia descritos en la sección 1.13. Estos índices son los más comúnmente usados, y emplean las bandas RED y NIR para su cálculo (Huete, 1988; Oppelt et al., 2015).

Los índices de vegetación basados en pendiente solo necesitan las bandas RED y NIR (Chuvienco, 2010; Liang, Li, y Wang, 2013), mientras que para el cálculo de los índices de vegetación basados en distancia se determinó la pendiente y la distancia al origen de la línea de suelo (Campbell y Wynne, 2011). Estos parámetros se establecieron mediante una regresión lineal simple entre los valores de pixel de suelo desnudo en las bandas RED y NIR, utilizando el módulo REGRESS de IDRISI Selva. Como se ha mencionado antes, estas bandas espectrales también son necesarias como datos de entrada para el cálculo de los índices de vegetación basados en distancia.

La figura 13 indica el proceso de cálculo de los dos grupos de índices de vegetación, aplicando la metodología descrita en el párrafo anterior.

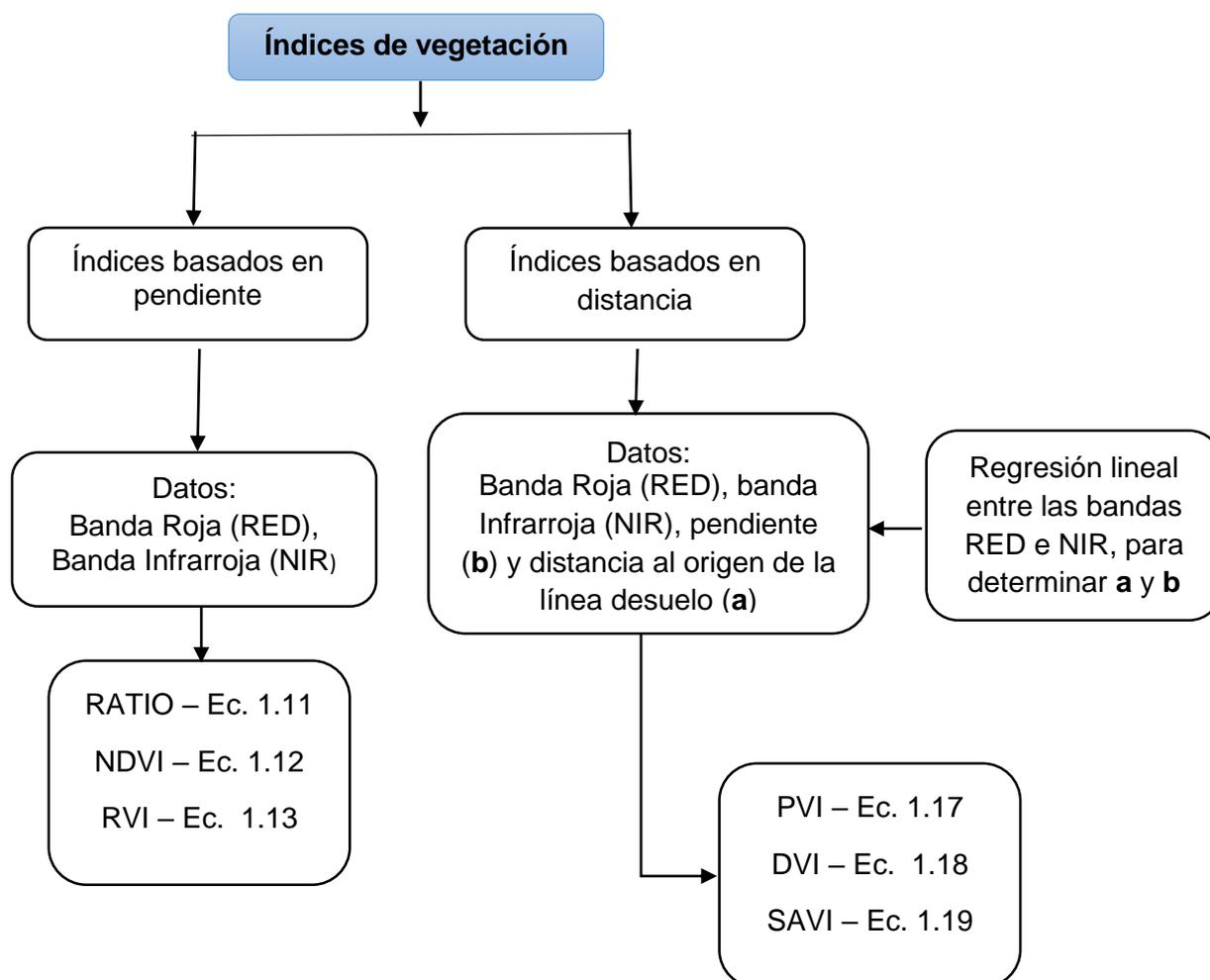


Figura 13: Cálculo de los Índices de Vegetación
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

El factor L empleado para el cálculo del índice de vegetación SAVI fue fijado a 0.5, porque estudios experimentales en campos agrícolas y pastizales obtuvieron mejores resultados aplicando este valor (Chuvienco, 2016).

4.5. Análisis estacional

La variabilidad estacional de los índices de vegetación calculados fue determinada mediante dos vuelos en fechas y estaciones distintas. Para la extracción de características presentes en la superficie terrestre, se debe tomar en cuenta las diferentes cubiertas identificadas en el área de estudio (Bhandari et al., 2012). Esto permite realizar una clasificación supervisada empleando los índices de vegetación calculados y los intervalos en los que se encuentra cada cobertura vegetal dentro del cada índice. Esta clasificación permite determinada la variación de las coberturas, comparando cantidad de píxeles que han sufrido algún tipo de cambio en su comportamiento reflectivo. La figura 14 muestra el esquema del procedimiento.

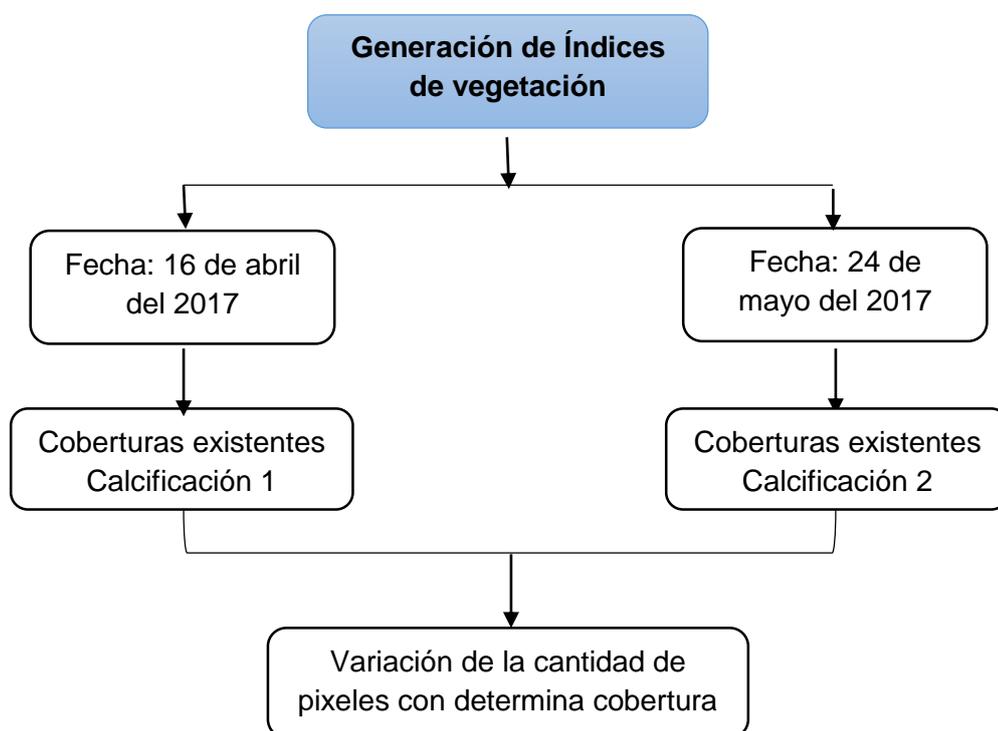


Figura 14: Variación de las coberturas presentes en la superficie terrestre a través de los Índices de Vegetación
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

4.6. Datos satelitales

Como se indicó anteriormente las imágenes satelitales se obtuvieron del satélite SENTINEL-2A, las cuales contienen valores de reflectancia de la parte superior de la atmosfera o TOA (Top of Atmosphere). Estas imágenes deben ser corregidas para obtener la reflectancia en la parte inferior de la atmosfera o BOA (Bottom Of Atmosphere).

4.7. Pre-tratamiento de las imágenes satelitales

4.7.1. Corrección atmosférica.

El proceso de corrección atmosférica se los realiza mediante el software SNAP a través del módulo "sen2cor". Este módulo está basado en el algoritmo, propuesto por Richter y Schlaepfer (2011), y el modelo de transferencia radiativa, desarrollado por Mayer y Kylling, (2005), permitiendo la corrección atmosférica y topográfica de imágenes satelitales.

4.7.2. Índices de vegetación.

Para el cálculo de los índices de vegetación en base de las imágenes satelitales, se siguió el procedimiento descrito en la figura 13.

4.8. Validación

Una vez calculados los índices de vegetación de los datos obtenidos mediante el sistema VANT, se realizó una validación mediante una regresión lineal, que permite comparar los valores de índices de vegetación generados mediante el sistema VANT con las imágenes satelitales.

CAPÍTULO V – RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. Imágenes obtenidas

Las imágenes tomadas durante el despeje y aterrizaje del VANT fueron eliminadas debido a su cercanía a la superficie terrestre. El conjunto de imágenes validas obtenidas durante los vuelos fue de 326 imágenes por cada banda espectral del sensor (resolución 10cm/pixel), dando un total de 652 imágenes entre las bandas usadas (RED y NIR) para cada fecha de observación. También se tomó un conjunto de 326 imágenes RGB a una resolución espacial de 3 cm/pixel, las cuales permitieron identificar el uso del suelo en el área de estudio y las cuales están adjuntas en el Anexo 1.

El sistema VANT empleado permite la orto-rectificación y auto-georreferenciación de las imágenes mediante el GPS/GSNN interno del sensor. Debido a esto, el software es capaz de detectar la posición y orientación de cada una de las imágenes, generando orto-mosaicos (RGB) e imágenes de reflectancia georreferenciadas. Sin embargo, los bordes de las imágenes generalmente contienen vacíos o datos erróneos, debido al proceso de orto-rectificación (Jensen, 2014). Para eliminar las áreas que contienen pixeles erróneos se seleccionó un área rectangular en el centro del área de estudio de 300x400 m (12 hectáreas).

5.2. Mapas de reflectancia

Para la generación de los mapas de reflectancia se utilizó el conjunto de imágenes validas obtenidas durante cada vuelo. Los mapas de reflectancia fueron generados para las bandas RED y NIR, resultando en un total de 2 mapas de reflectancia por cada fecha de vuelo (Figura 15). Debido a los parámetros de vuelo establecidos, todos los mapas de reflectancia tienen una resolución espacial de 10 cm/pixel.

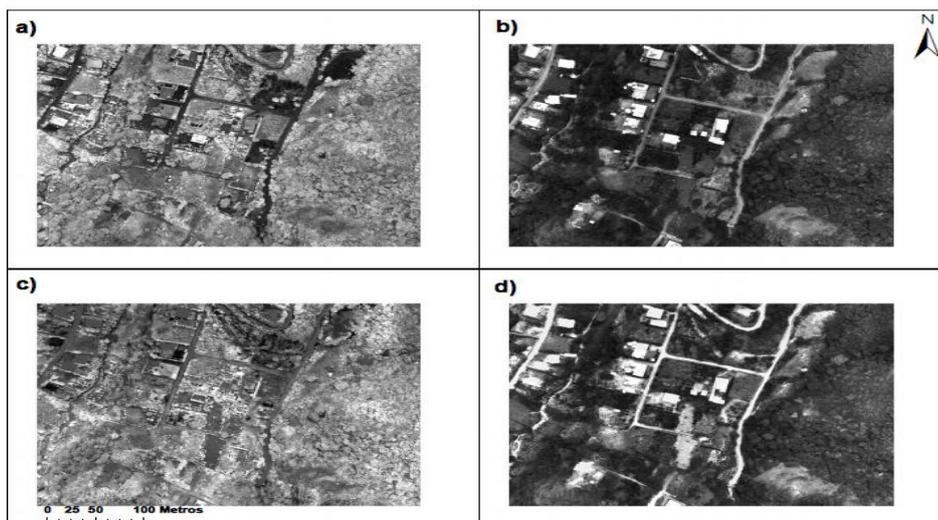


Figura 15: Área delimitada de los mapas de reflectancia a) banda NIR, y b) banda RED, para el 26-04-2017, c) banda NIR y d) banda RED, para el 24-05-2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

5.3. Tipos de cobertura en el área de estudio

La figura 16 muestra ejemplos de los tipos de coberturas predominantes en el área de estudio, clasificadas en: a) suelo desnudo y estructura civiles; como viviendas y carreteras, presentes en la parte central y al noroeste, b) vegetación dispersa o enferma; conformada por pastos, malezas y vegetación en etapa de senescencia, distribuidas por toda el área de estudio pero en mayor cantidad en la parte central, c) vegetación poco densa o con una menor vigorosidad; conformada por las áreas boscosas que presenta vegetación con doseles arbóreos poco densos presentes en la parte este, así como también áreas agrícolas presentes en la parte central, d) vegetación densa y sana; conformada por áreas boscosas presentes en mayor cantidad en la parte este y oeste, así como también árboles frutales como: *Psidium Guajava* (Guayaba), *Citrus Sinensis* (Naranja) y *Musa Paradisiaca* (Guineo) presentes en la parte central del área de estudio.

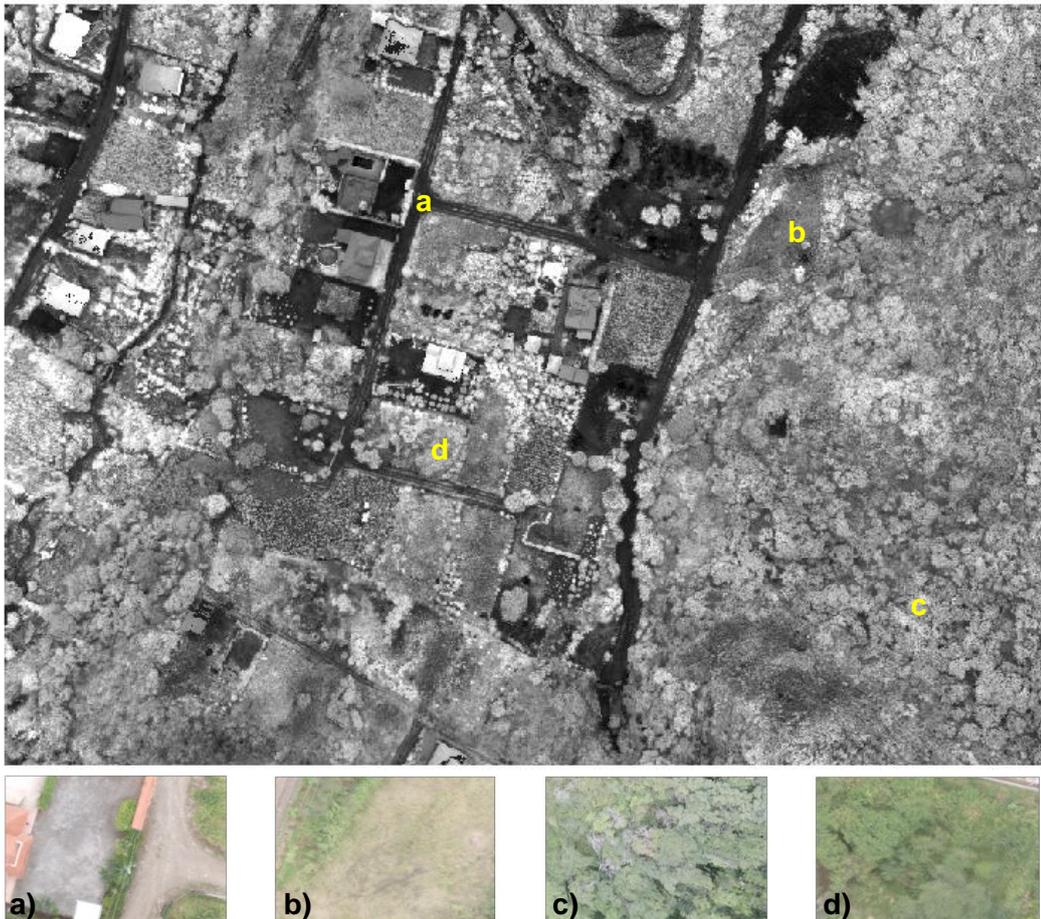


Figura 16: Coberturas presentes en el área de estudio a) suelo desnudo y estructuras civiles, b) vegetación dispersa o enferma, c) vegetación poco densa o con una menor vigorosa y d) vegetación densa y sana

Fuente: EL Autor
Elaboración: El Autor

5.4. Índices de vegetación

Como se indicó anteriormente, en esta investigación se calcularon los índices de vegetación basados en pendiente y en distancia descritos en la sección 1.13. Estos índices son los más comúnmente usados, y emplean las bandas RED y NIR, para su cálculo (Huete, 1988; Oppelt et al., 2015).

Para los índices de vegetación PVI y DVI los coeficientes: **a** (intercepción de la línea del suelo) y **b** (pendiente de la línea del suelo) deben ser determinados como se ha explicado en la sección 1.13.2, aplicando una regresión lineal entre las bandas RED y NIR para determinar estos coeficientes (Figura 18). La tabla 5 muestra los coeficientes resultantes tras este análisis.

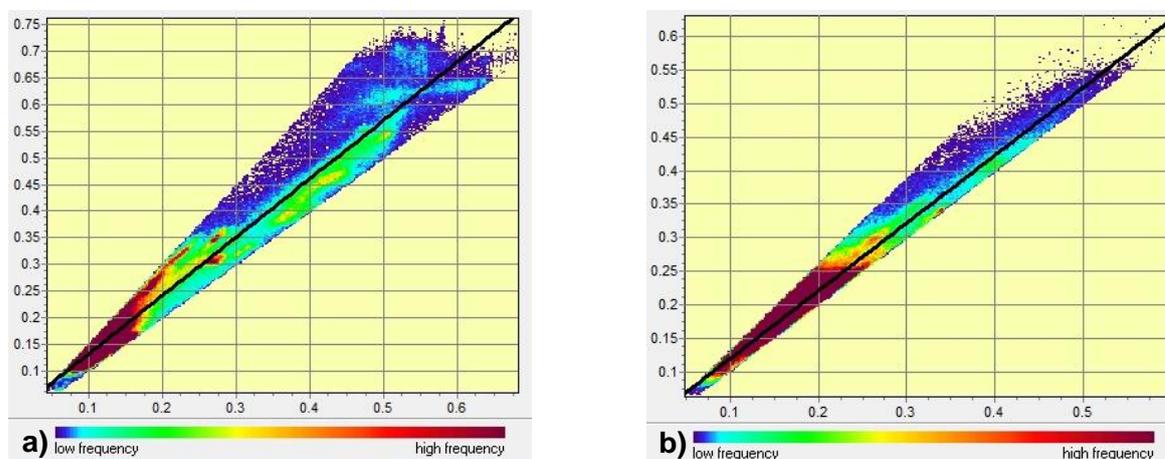


Figura 17: Regresión lineal de las banda roja e infrarroja a) datos del 26-04-2017, b) datos del 24-05-2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

Tabla 5. Coeficiente de la línea del suelo

Vuelo	Variable independiente	a (Distancia al origen)	b (Pendiente)
26-04-2017	Roja (RED)	0.023258	1.092956
24-05-2017	Roja (RED)	0.018490	1.010332

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

Para una mejor presentación y análisis de los resultados, se agrupó los gráficos de ambas fechas por cada índice calculado. Los mapas generados para el 26 de abril de 2017 son visualizados en los gráficos (a) y los mapas para el 24 de mayo de 2017 en los gráficos (b).

5.4.1. Índices RATIO

El índice de vegetación RATIO correspondiente a la primera toma de datos se muestra en la figura 18a. El índice muestra que aquellas coberturas conformadas por suelos desnudos y estructuras civiles tienen valores por debajo de 1.5 y muy cercanos a cero, y las cuales se encuentran presentes en mayor cantidad en la parte central y al noroeste del área de estudio.

Para la vegetación dispersa o enfermas, conformada por pastos, maleza o vegetación en etapa de senescencia el índice presenta valores comprendidos entre 1.5 y 4, y se puede observar estas coberturas en la parte central del área de estudio, así como también en la parte este donde hay vegetación boscosa con este comportamiento, lo cual indica vegetación enferma. En la parte sureste del área de estudio también se observa vegetación con estas características, que está conformada por vegetación dispersa.

Para la vegetación poco densa o con una menor vigorosidad, el índice muestra valores comprendidos entre 4 y 6, y se puede observar este tipo de cobertura en mayor cantidad en la parte este del área de estudio, y otras pequeñas cantidades distribuidas por toda el área. Este tipo de vegetación corresponde a vegetación con doseles arbóreos pocos densos o vegetación con una reducida actividad fotosintética, así como también tierras agrícolas especialmente cultivos de maíz presentes en la parte central del área de estudio.

Valores del índice que van desde 6 y superiores indican una vegetación densa y sana, debido al gran contraste entre las bandas RED y NIR, causado por la actividad fotosintética (Chuvienco, 2016). Esta vegetación presenta este comportamiento debido a que ha tenido mayor disponibilidad del agua durante la época lluviosa, favoreciendo al crecimiento de la planta y logrando así tener un dosel arbóreo mucho más denso. La mayoría de la vegetación con este comportamiento son áreas boscosas, constituidas en gran medida por árboles de Faique (*Acacia macracantha*), presentes en la parte este y oeste del área de estudio. En la parte central el área boscosa es reducida, pero existe vegetación que presenta valores de índice mayores a 6 para vegetación conformada por árboles frutales.

La figura 18b muestra el índice de vegetación RATIO, correspondiente a la segunda toma de datos, y en la cual se puede observar el efecto que ha tenido la vegetación debido al descenso de las precipitaciones entre la primera y segunda fecha en la que se obtuvieron los datos.

Se ha observado una reducción en la cobertura vegetal densa y sana (valores mayores a 6) debido en gran medida a la falta del recurso hídrico, por lo cual la vegetación empieza a aumentar el estrés alterando su comportamiento reflectivo, causando que los valores del índice RATIO sean menores, provocando una reducción es este tipo de cobertura y un aumento en la cobertura con vegetación poco densas o menos vigorosas (valores entre 4 y 6). Esta variación se puede observar en mayor cantidad en la parte este y oeste del área de estudio.

La distribución espacial del índice también permite observar un aumento en la cobertura que indica vegetación dispersa o enferma (valores entre 1.5 y 4), en la parte oeste y centro del área de estudio, así como también en la parte este donde se tiene áreas boscosas, donde se observa que pequeñas cantidades de la cobertura con vegetación poca vigorosidad ha pasado a la cobertura vegetal dispersa o enferma.

Así mismos el índice permite observar un aumento en las coberturas que indica suelo desnudo o estructuras civiles (valores entre 0 y 1.5), en la parte central y oeste del área de estudio, el cambio en esta cobertura se debe a las actividades humanas, como la agricultura.

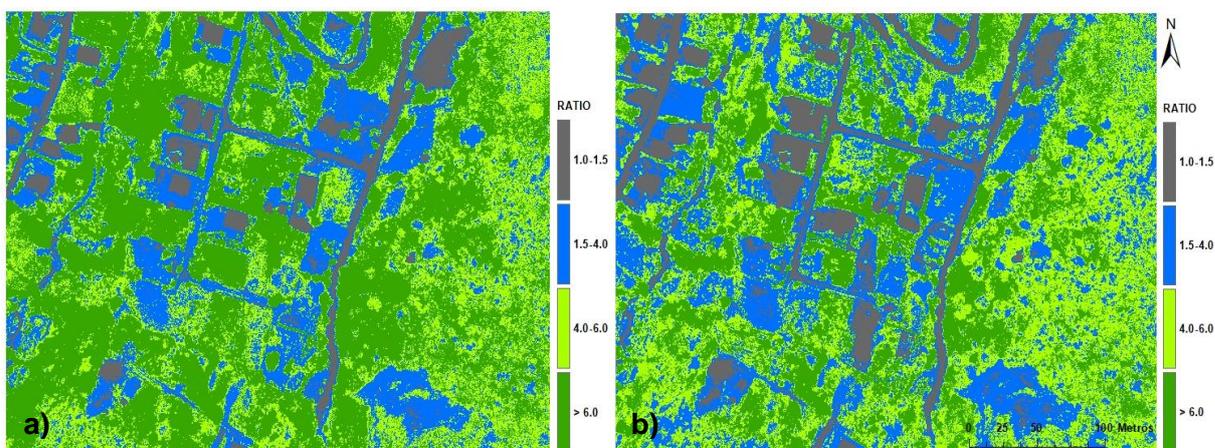


Figura 18: Índice de vegetación RATIO a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017

Fuente: EL Autor
Elaboración: El Autor

La figura 19, resume la variación de los pixeles en relación a los valores calculados para el índice RATIO, en las dos fechas analizadas. La disminución de los valores del índice RATIO entre la primera y segundo fecha de observación esta visible claramente en el gráfico, mostrando la disminución de la vegetación densa y sana (valores mayores a 6), así como el aumento de las coberturas que indica vegetación poco vigorosa o poco densas (valores entre 4 y 6), vegetación dispersa o enferma (valores entre 1.5 y 4) y coberturas de suelo desnudo (valores entre 0 y 1.5).

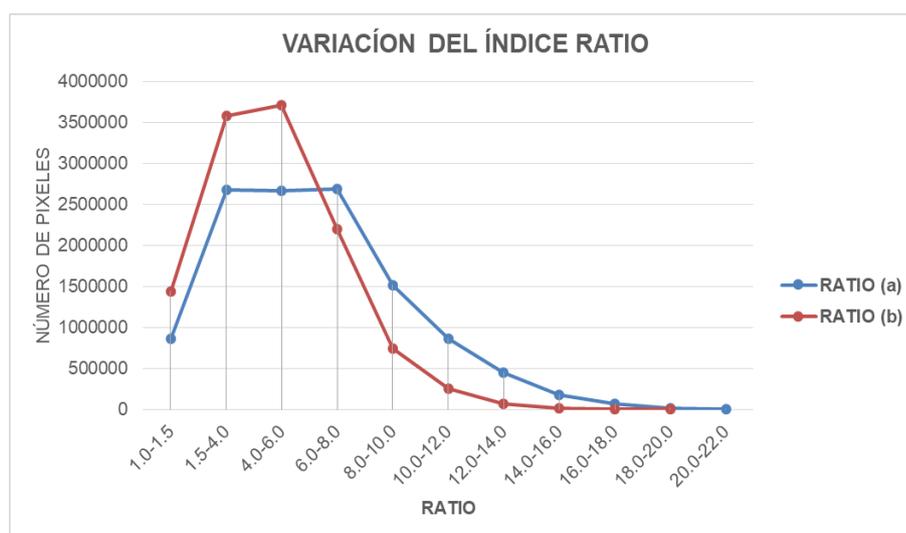


Figura 19: Variación del índice RATIO, a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017
Fuente: EL Autor
Elaboración: EL Autor

5.1.1. Índice NDVI

El índice NDVI correspondiente a la primera toma de datos se muestra en la figura 20a. El NDVI permite identificar varios intervalos que facilitan la distinción de los diferentes estados de la vegetación, así como características presentes en la superficie. Se encontró que el NDVI muestra que para valores comprendido entre 0 y menores a 0.2 se tiene superficies de suelo desnudo e infraestructura civiles, la cuales están presentes en la parte central y al noroeste del área de estudio.

Para valores del NDVI comprendidos entre 0.20 y 0.50, indican vegetación dispersa o enferma, y al igual que índice RATIO, esta cobertura se la puede observar en la parte central del área de estudio y corresponde a vegetación como pastos y maleza, también se observa esta cobertura en pequeñas cantidades sobre la parte este del área de estudio, que corresponde a vegetación boscosa enferma.

Valores comprendidos entre 0.5 a 0.7 del NDVI indican la presencia de vegetación poco densa o con poca vigorosidad, correspondiente a cultivos de maíz, que se encuentran presente en el centro del área de estudio, así como pequeños arbustos con doseles arbóreos poco densos que se encuentran en la parte este del área de estudio. La vegetación presenta estas características debido a que su doncel arbóreo es poco denso, por lo cual se tiene menor área de reflectancia o una menor actividad fotosintética. Los valores más altos de NDVI comprendidos entre 0.7 hasta 0.93 indican la presencia de vegetación densa y sana, estos valores se obtuvieron para el área de cobertura boscosa que se encuentran distribuidas en la parte este y oeste del área de estudio. En la parte central también existe

vegetación con estas características correspondientes a remanentes de bosque y vegetación conformada por árboles frutales.

La figura 20b muestra el índice NDVI, correspondiente a la segunda toma de datos, y al igual que el índice RATIO se puede observar el efecto que ha tenido la vegetación debido al descenso de las precipitaciones entre la primera y segunda fecha en la que se obtuvieron los datos.

El índice permite observar un descenso en la cobertura vegetal correspondiente a la vegetación densa y sana (valores entre 0.7 y 0.93). Este cambio se puede ver en su mayoría en la parte este y oeste del área de estudio. Parte de esta vegetación ha pasado a formar parte de la cobertura vegetal poco densa o poco vigorosa (valores entre 0.5 y 0.7) por lo cual podemos ver un incremento en los píxeles que contienen este tipo de cobertura.

El índice también permite observar el incremento de la cobertura que indica vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.2 y 0.5) en la parte central y al oeste del área de estudio, y en pequeñas áreas en la parte este. Así mismo el índice indica un incremento en la cobertura de suelo desnudo (valores entre 0 y 0.2) especialmente en la parte central y en la parte oeste del área de estudio.

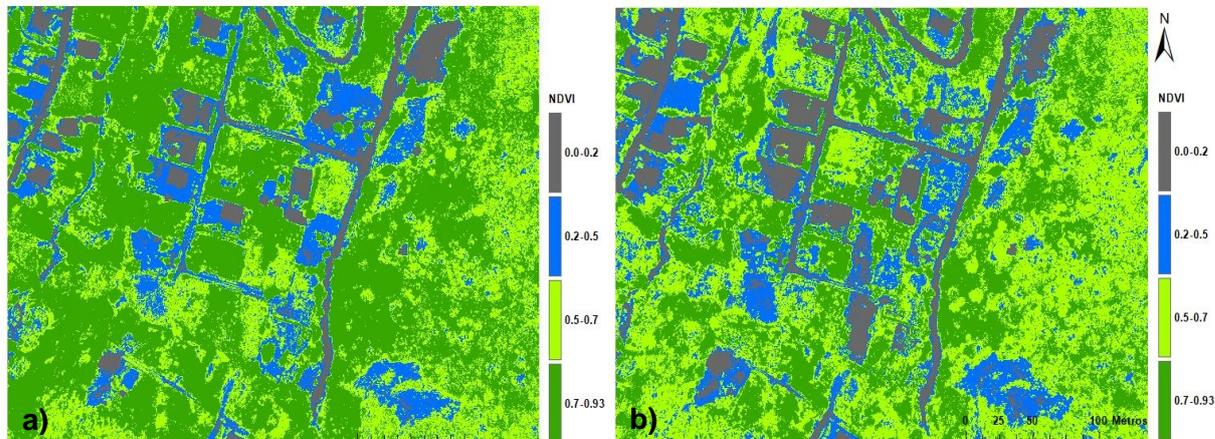


Figura 20: Índice de vegetación NDVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

La figura 21, resume la variación de los píxeles en relación a los valores calculados para el índice NDVI, en las dos fechas analizadas. Al igual que el índice RATIO la disminución de los valores del NDVI entre la primera y segunda fecha de observación está visible claramente en el gráfico, el cual muestra la disminución de la vegetación densa y sana (valores entre 0.7 y 0.93), así como el aumento de las coberturas que indica vegetación poco vigorosa o poco densas (valores entre 0.5 y 0.7), vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.2 y 0.5) y coberturas de suelo desnudo (valores entre (0 y 0.2).

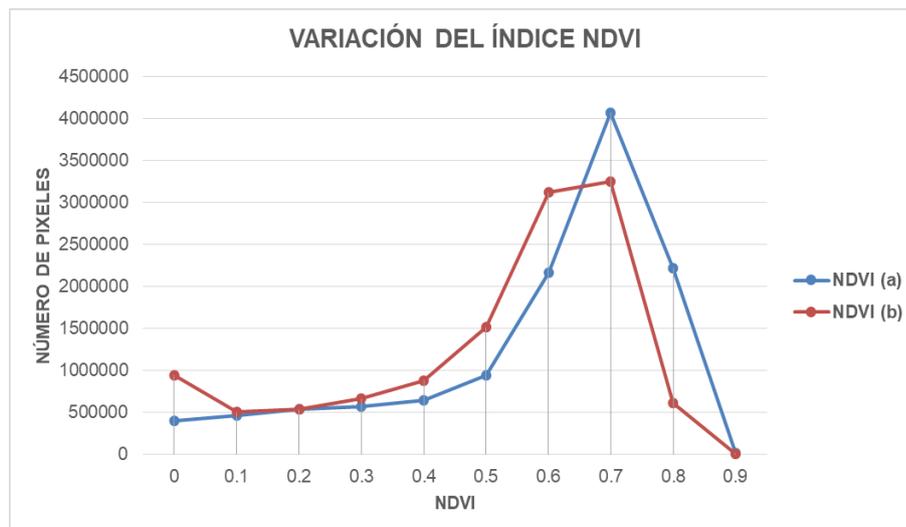


Figura 21: Variación del índice NDVI, a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

5.1.2. Índice RVI

El índice de vegetación RVI correspondiente a la primera toma de datos se muestra en la figura 22a. Este índice de vegetación es el inverso del índice ratio, y presenta valores bajos para coberturas con alta reflectividad en la banda NIR y baja reflectividad en la banda RED (Richardson y Wiegand, 1977), como es el caso de las coberturas conformadas por vegetación densa y sana, cuyos valores del índice van desde 0 a 0.15. Esta cobertura vegetal se puede observar, aunque en menor cantidad, que índice RATIO y NDVI en la parte este y oeste que corresponde a zonas boscosas y en la parte central donde encontramos vegetación como árboles frutales y remanentes de bosque.

Para la vegetación poco densa o con menor vigorosidad, se presenta en mayor cantidad en el índice RVI respecto a los índices RATIO y NDVI y se tiene valores comprendidos entre 0.15 y 0.3 y corresponden a áreas boscosas con vegetación formada por doseles arbóreos pocos densos, presentes en la parte este del área de estudio, así como también en la parte central donde se tiene cultivos de maíz que presenta esta característica.

Para la cobertura vegetal correspondiente a vegetación dispersa o enferma, se tiene valores del RVI entre 0.3 y 0.7, y corresponde a pastos o malezas que se encuentran presentes en la parte central de área de estudio, así como dentro de las áreas boscosa que indica vegetación enferma. Mientras que para la cobertura de suelo desnudo y estructuras civiles presentes en la parte central y al noroeste del área de estudio se tiene valores mayores a 0.7 y muy cercanos a 1 debió a que estos tipos de cobertura tienen un comportamiento similar en las bandas NIR y RED.

La figura 22b muestra el índice RVI, correspondiente a la segunda toma de datos, y al igual que los índices analizados previamente, se puede observar el efecto que ha tenido la vegetación debido al descenso de las precipitaciones entre la primera y segunda fecha en la que se obtuvieron los datos. El índice permite observar que la vegetación densa y sana (valores entre 0 y 0.15) se ha reducido en la parte este y oeste del área de estudio, pasando a formar parte de la vegetación poco densa o menos vigorosa (valores entre 0.15 y 0.3) la cual ha aumentado. También se observa un aumento de la vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.3 y 0.7) al igual que la cobertura que representa suelo desnudo y estructuras civiles (valores entre 0.7 y 1) ha aumentado, en la parte central y al oeste del área de estudio.

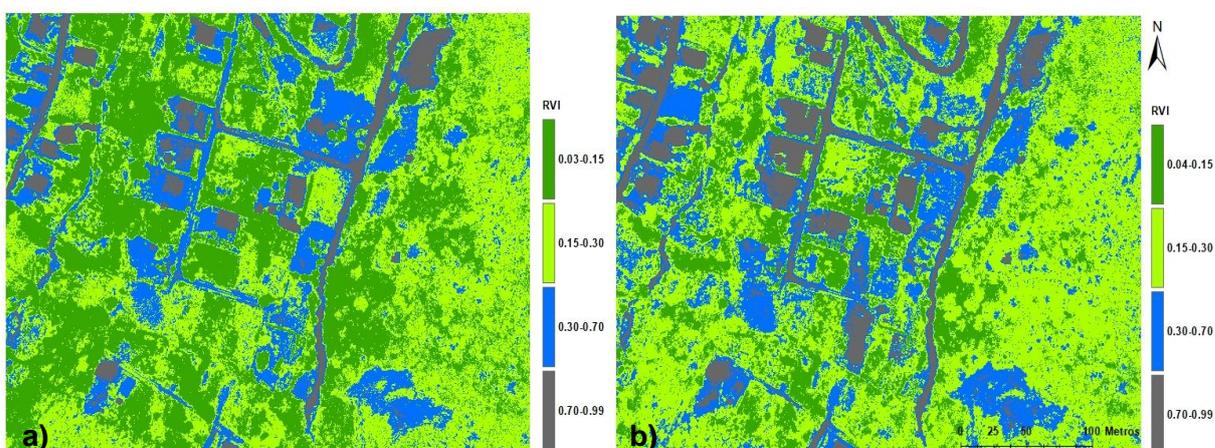


Figura 22: Índice de vegetación RVI, a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017
Fuente: EL Autor
Elaboración: El Autor

La figura 23, resume la variación de los píxeles en relación a los valores calculados para el índice RVI, en las dos fechas analizadas. Al igual que los índices analizados previamente la disminución de los valores del RVI entre la primera y segunda fecha de observación esta visible claramente en el gráfico, el cual muestra la disminución de la vegetación densa y sana (valores entre 0 y 0.15), así como el aumento de las coberturas que indica vegetación poco vigorosa o poco densas (valores entre 0.15 y 0.30), vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.3 y 0.7) y coberturas de suelo desnudo (valores entre (0.7 y 1).

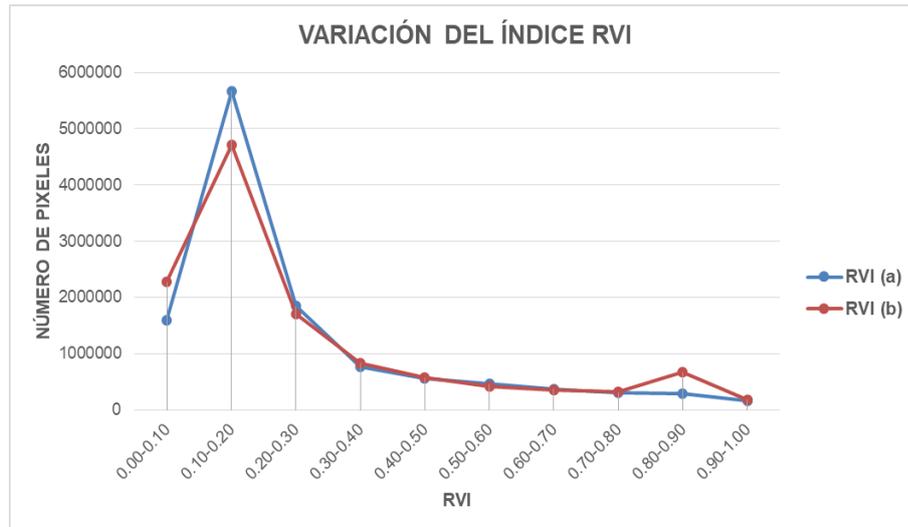


Figura 23: Variación del índice RVI a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

5.1.3. Índice PVI

El índice de vegetación PVI correspondiente a la primera toma de datos se muestra en la figura 24a. El índice presenta valores menores de 0.05 y muy cercanos a cero para las superficies conformadas por suelos desudos y estructuras civiles, al igual que los índices previamente analizados, esta cobertura se puede observar en la parte central y al noroeste del área de estudio.

Para aquellas coberturas que indican vegetación dispersa o enferma conformadas por pastos, malezas o áreas boscosas en etapa de sencencia, el índice presenta valores comprendidos entre 0.05 y 0.15. El índice presenta un incremento en esta cobertura respecto al índice RATIO, NDVI y RVI generados para la misma fecha, lo cual se puede observar en la parte este y oeste del área de estudio.

En coberturas vegetales compuestas por vegetación poco densa o menos vigorosa, se tiene valores del índice entre 0.15 y 0.20, este tipo de vegetación se encuentra distribuida por toda el área de estudio, a diferencia de los índices analizados previamente que presentan esta cobertura en mayor medida en la parte central y al este del área de estudio. Para la vegetación densa y sana correspondiente a áreas boscosas presentes en la parte este y oeste, y árboles frutales presentes en la parte central del área de estudio, se ha obtenido valores del índice mayores de 0.2 hasta 0.47, el índice muestra este tipo de cobertura distribuida por todo el área de estudio.

La figura 24b muestra el índice PVI, correspondiente a la segunda toma de datos y al igual que los índices analizados previamente, se puede observar la variación del índice debido al descenso de las precipitaciones entre la primera y segunda fecha en la que se obtuvieron los datos.

El índice permite observar que la vegetación densa y sana (valores entre 0.2 y 0.47), se ha reducido, lo cual se puede ver en mayor cantidad en la parte central y al noroeste del área de estudio y en el resto de área se presenta en menor cantidad. La cobertura que indica vegetación poco densa o menos vigorosa (valores entre 0.15 a 0.20) ha aumentado en la parte sur del área de estudio, al igual que las coberturas que indican vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.05 a 0.15) en la que se puede ver un aumento en la parte norte del área de estudio, así mismo se ha observado un incremento en la cobertura del suelo desnudo (valores entre 0.05 y 0.15).

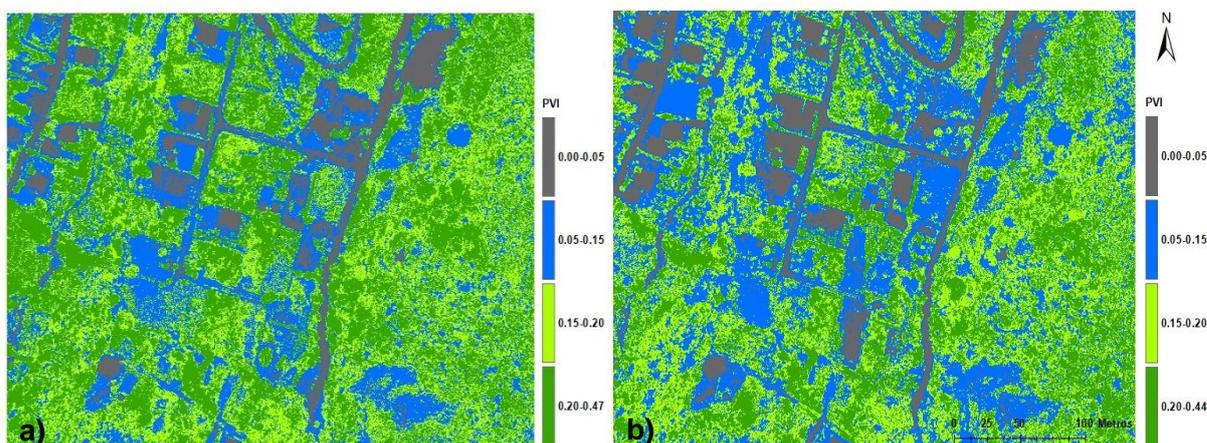


Figura 24: Índice de vegetación PVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017

Fuente: EL Autor
Elaboración: El Autor

La figura 25, resume la variación de los píxeles en relación a los valores calculados para el índice PVI, en las dos fechas analizadas. Al igual que los índices analizados previamente la disminución de los valores del PVI entre la primera y segunda fecha de observación esta visible claramente en el gráfico, la cual muestra la disminución de la vegetación densa y sana (valores entre 0.2 y 0.47), así como el aumento de las coberturas que indican vegetación poco vigorosa o poco densa (valores entre 0.15 y 0.20), vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.15 y 0.05) y coberturas de suelo desnudo (valores entre (0 y 0.05).

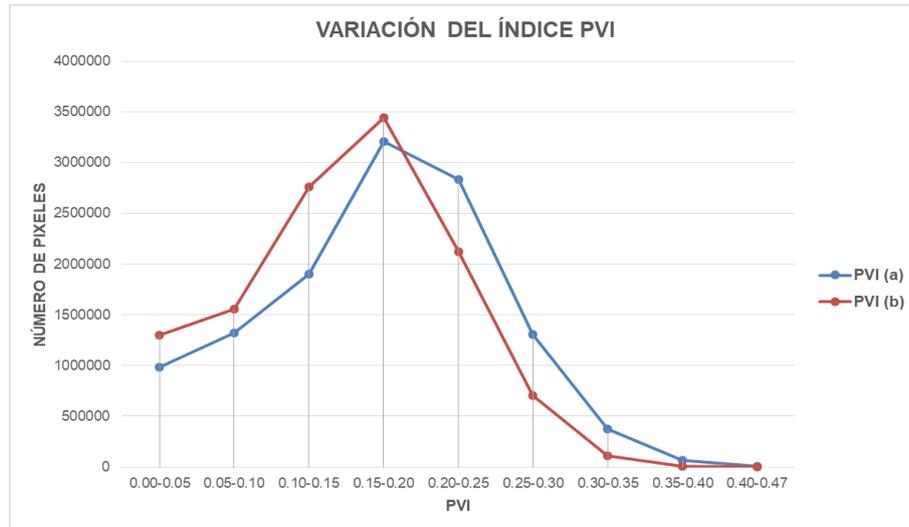


Figura 25: Variación del índice PVI a) fecha 26-04-2017 y b) fecha 24-05-2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

5.1.4. Índice DVI

El índice de vegetación DVI correspondiente a la primera toma de datos se muestra en la figura 26a. El índice muestra que las coberturas conformadas por suelo desnudo y estructuras cívicas, distribuidas en el centro y al noroestes del área de estudio, presentan valores menores a 0.1 y cercanos a cero. Para la cobertura donde se tiene vegetación dispersa o enferma el DVI presenta valores que van desde, 0.1 a 0.2, y se pueden observar en la parte central del área de estudio donde se tiene la presencia de pastos y malezas, así como también como en la parte este donde se tiene áreas boscosas indicando vegetación enferma. Además se ve esta cobertura distribuida en pequeñas zonas dentro del área de estudio. El DVI muestra este tipo de cobertura en una menor cantidad respecto a los índices ya analizados.

Para coberturas vegetales poco densas o menos vigorosas, conformadas por áreas boscosas con doseles arbóreos pocos densos o cultivos agrícolas como el maíz, el DVI presenta valores entre 0.2 y 0.3 y se encuentran distribuidas en mayor cantidad en la parte este y oeste del área de estudio, y en menor cantidad en la parte central. Las áreas boscosas o aquellas que contienen vegetación sana el DVI presenta valores entre 0.3 y 0.7 y las cuales se puede observar distribuidas en toda el área de estudio.

La figura 26b muestra el índice DVI correspondiente a la segunda toma de datos y al igual que los índices analizados previamente, se puede observar la variación del índice debido al descenso de las precipitaciones entre la primera y segunda fecha en la que se obtuvieron los datos.

El índice permite observar una reducción en la cobertura que indica vegetación densa y sana (valores entre 0.3 y 0.7), esta reducción se la puede observar en la parte norte y oeste del área de estudio, y en menor cantidad en la parte este. Parte de esta cobertura ha pasado a formar parte de la cobertura que indica vegetación poco densa o menos vigorosa (valores entre 0.2 a 0.3). También se ha observado un incremento de la cobertura que indica vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.1 y 0.2), en mayor medida en la parte norte del área de estudio, así como en otras pequeñas áreas que se observan en la parte central y sur del área del estudio. Las áreas que indican suelo desnudo (valores entre 0 a 0.1), han incrementado, y esto se puede ver en la parte central y al noroeste del área de estudio.

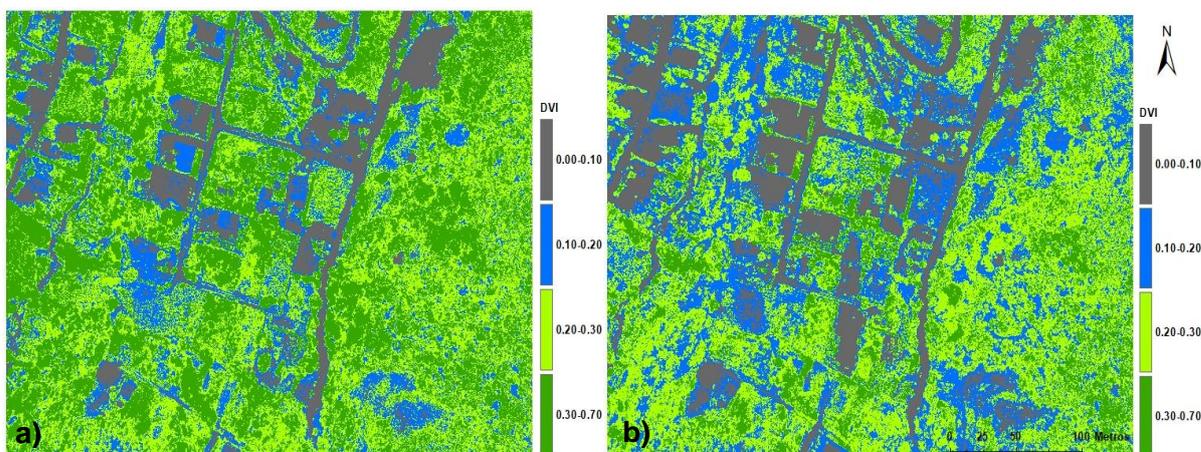


Figura 26: Índice de vegetación DVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

La figura 27, resume la variación de los píxeles en relación a los valores calculados para el índice DVI, en las dos fechas analizadas. Al igual que los índices analizados previamente la disminución de los valores del DVI entre la primera y segunda fecha de observación está visible claramente en el gráfico, el cual muestra la disminución de la vegetación densa y sana (valores entre 0.3 y 0.7), así como el aumento de las coberturas que indican vegetación poco vigorosa o poco densas (valores entre 0.2 y 0.30), vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.1 y 0.2) y coberturas de suelo desnudo (valores entre (0 y 0.1).

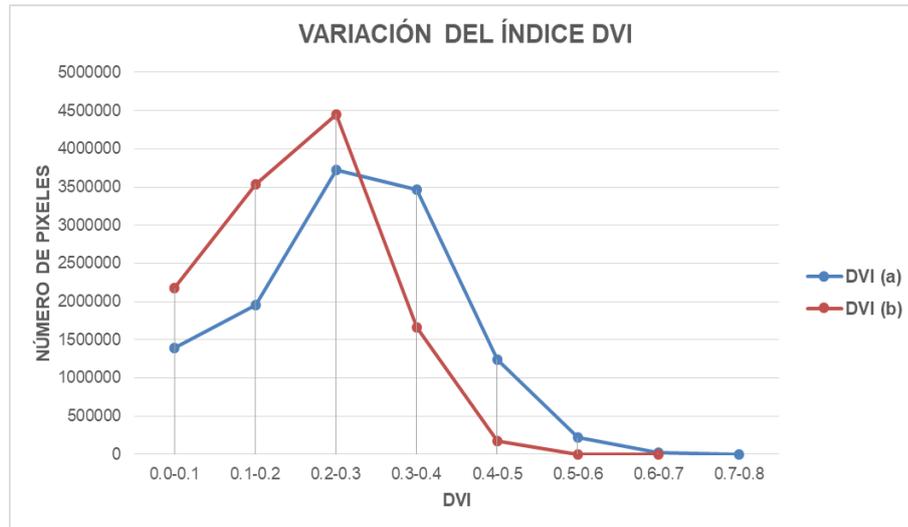


Figura 27: Variación del índice DVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

5.1.5. Índice SAVI

El índice de vegetación SAVI correspondiente a la primera toma de datos se muestra en la figura 28a. El índice muestra que aquellas superficies que contienen coberturas como el suelo desnudo y estructuras civiles presentes en la parte central y al noroeste del área de estudio, presentan valores menores a 0.1 y cercanos a cero. Para coberturas conformadas por vegetación dispersa o enferma el SAVI presenta valores comprendidos entre 0.1 y 0.3, y se muestran en mayor cantidad en la parte central, y en otras pequeñas cantidades distribuidas por toda el área de estudio. Para la vegetación poco densa o menos vigorosa presente en la parte este y oeste del área de estudio, el índice presenta valores entre 0.3 y 0.45. Para las áreas boscosas o para la vegetación sana el SAVI presenta valores comprendidos entre 0.45 y 0.80.

La figura 28b muestra el índice SAVI correspondiente a la segunda toma de datos y al igual que los índices analizados previamente, se puede observar la variación del índice debido al descenso de las precipitaciones entre la primera y segunda fecha en las que se obtuvieron los datos. El Índice muestra una reducción en la cobertura que indica vegetación boscosa o sana (valores entre 0.45 y 0.8), pasando esta a formar parte en su mayoría a una cobertura que indica vegetación escasa o poco vigorosa (valores entre 0.3 y 0.45) por lo cual existe un aumento en esta última cobertura, según se puede observar en su mayoría en la parte este y oeste del área de estudio. Las coberturas que indican vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.1 y 0.3) también han aumentado, en la parte central y al noroeste del área de estudio, así como también existen un incremento en la cobertura que indica suelo

densado (valores entre 0 y 0.1), este incremento se puede ver en mayor cantidad en las partes cercanas a las estructuras cívicas, como caminos y viviendas.

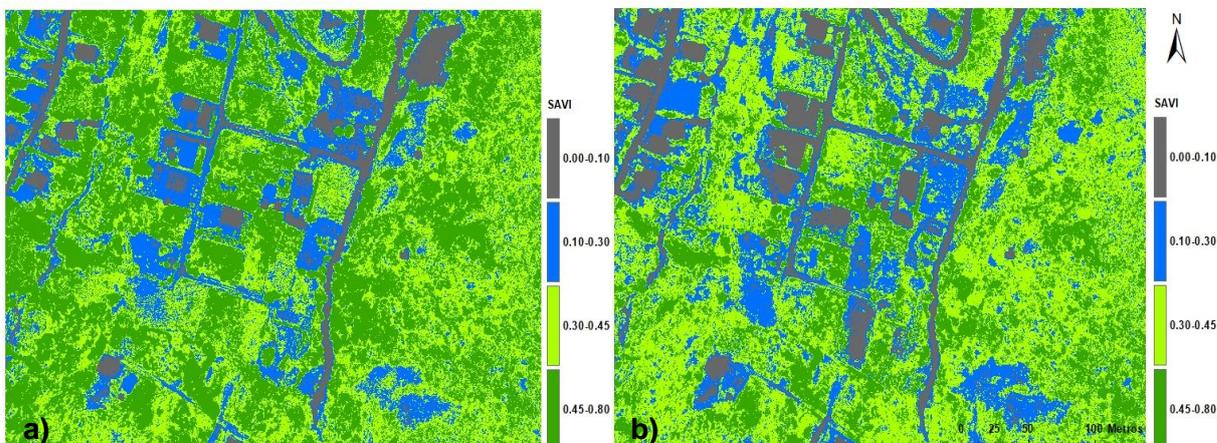


Figura 28: Índice de vegetación SAVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

La figura 29, resume la variación de los pixeles en relación a los valores calculados para el índice SAVI, en las dos fechas analizadas. La disminución de los valores del índice SAVI entre la primera y segunda fecha de observación esta visible claramente en el gráfico, el cual muestra la disminución de la vegetación densa y sana (valores entre 0.45 y 0.8), así como el aumento de las coberturas que indican vegetación poco densa o menos vigorosa (valores entre 0.3 y 0.45), vegetación dispersa o enferma (valores entre 0.1 y 0.3) y coberturas de suelo desnudo (valores entre (0 y 0.1).

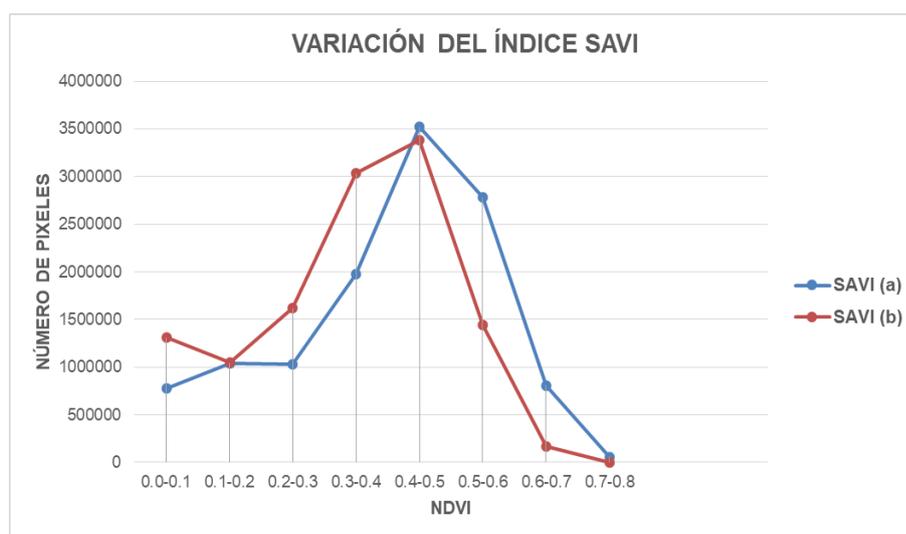


Figura 29: Variación del índice SAVI a) Índice del 26-04-2017, b) Índice del 24-05-2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

5.2. Comparacion de índices

Como se ha indica anteriormente, la falta de recurso hídrico afecta de manera notable la respuesta espectral del comportamiento de la cobertura vegetal captada por el sensor remoto. Esto se puede evidenciar en los índices que son indicadores de la vigorosidad de la vegetación, RATIO (Figura 18), NDVI (Figura 20) y RVI (Figura 22), en donde para aquellas áreas que mostraban vegetación vigorosa, para la segunda fecha los valores de los índices se han reducido. Lo anterior se debe a la falta del recurso hídrico, por lo cual la vegetación, tiende a sufrir estrés, provocando alteraciones en su comportamiento reflectivo y permitiendo detectar estos cambios (Chuvienco, 2010).

También se ha observado, que aquellas áreas de vegetación dispersa o poco vigorosa obtenidas con la primera toma de datos se ha incrementado, esto debido a que la vegetación vigorosa ha pasado a un estado de menor vigorosidad por falta del recurso hídrico. También se ha podido observar un incremento en la cobertura del suelo desnudo, provocado en gran medida por las actividades agrícolas, como la cosecha de cultivos.

A nivel global los índices de vegetación PVI (Figura 24), DVI (Figura 26) y SAVI (Figura 28), presentan los mismos compartimientos similares a los índices RATIO, NDVI y RVI en las variaciones de las coberturas. Presentando una disminución de la cobertura de vegetación vigorosa, y un aumento de las coberturas que indica vegetación poco densa o menos vigorosa, vegetación dispersa y suelo desnudo.

La figura 30 muestra en términos de porcentajes la variación de las diferentes coberturas obtenidas en la segunda fecha respecto a la primera, esto para todos los índices de vegetación calculados. Este porcentaje de variación se determinó a partir de una clasificación supervisada de las imágenes de los índices de vegetación, en donde se estableció umbrales para cada tipo de cobertura e índice (Ver Anexo 2). En la clasificación realizada se puede observar que todos los índices indican una reducción significativa (~46%) en la cobertura de vegetación vigorosa. Mientras que la cobertura de vegetación poco densa o con menor vigorosidad presenta un incremento de más del 30% para los índices RATIO, NDVI, RVI y SAVI y un incremento de 7.26% y 19.61% para los índices PVI y DVI respectivamente. La cobertura de vegetación dispersa presenta un incremento de ~37%, teniendo el máximo incremento en el índice DVI (81.57%). Igualmente en cobertura de suelo desnudo los índices indican un incrementado de ~61%. Las variaciones de cada uno de los índices en términos de áreas se muestran en el Anexo 3.

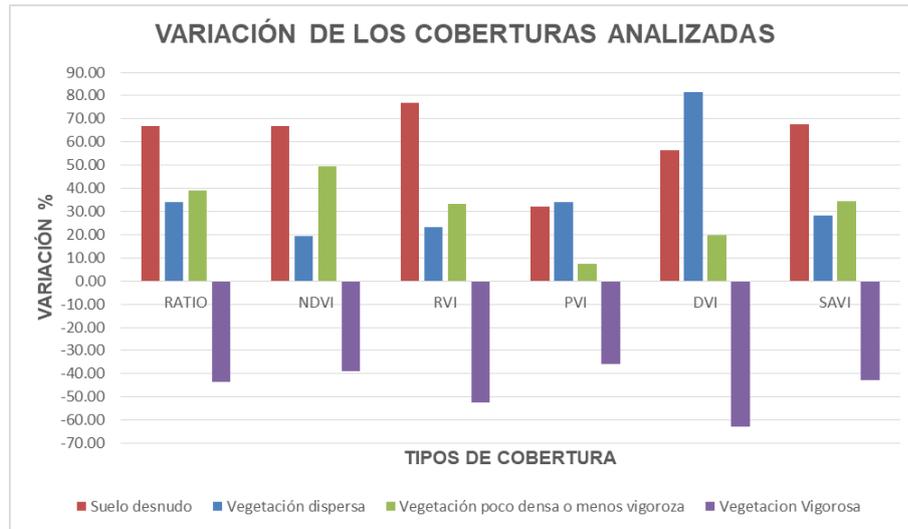


Figura 30: Variación de las diferentes coberturas
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

Sin embargo, los índices de vegetación basados en distancia, (PVI, DVI y SAVI) presenta una mayor sensibilidad a la hora de discriminar diferentes coberturas presentes en una determinada superficie. Esto debido a que estos índices agrupan los pixeles de suelo desnudo en la denominada línea del suelo, y miden la intensidad del índice a través de la distancia perpendicular de un pixel a esta línea, cancelando así el efecto del suelo de fondo (Campbell y Wynne, 2011; Eastman, 2012).

De estos tres últimos índices mencionados en el párrafo anterior, el índice DVI presenta mejores resultados a la hora de discriminar las diferentes coberturas presentes en el área de estudio. Esta cualidad del índice DVI se la puede observar en la figura 31, donde se substrajo una pequeña sección del centro de área de estudio. La imagen RGB y cada índice de vegetación mostrados contienen: a) suelo desnudo, b) vegetación dispersa o enferma, c) vegetación poco densa y d) vegetación densa. Como se puede observar el índice DVI permite discriminar de una mejor manera el suelo desnudo (gris) como se observa al suroeste de la imagen de DVI mostraba en la figura 30. Así mismo permite distinguir aquella vegetación dispersa o enferma, de las coberturas que indican vegetación poco densa y vegetación densa.

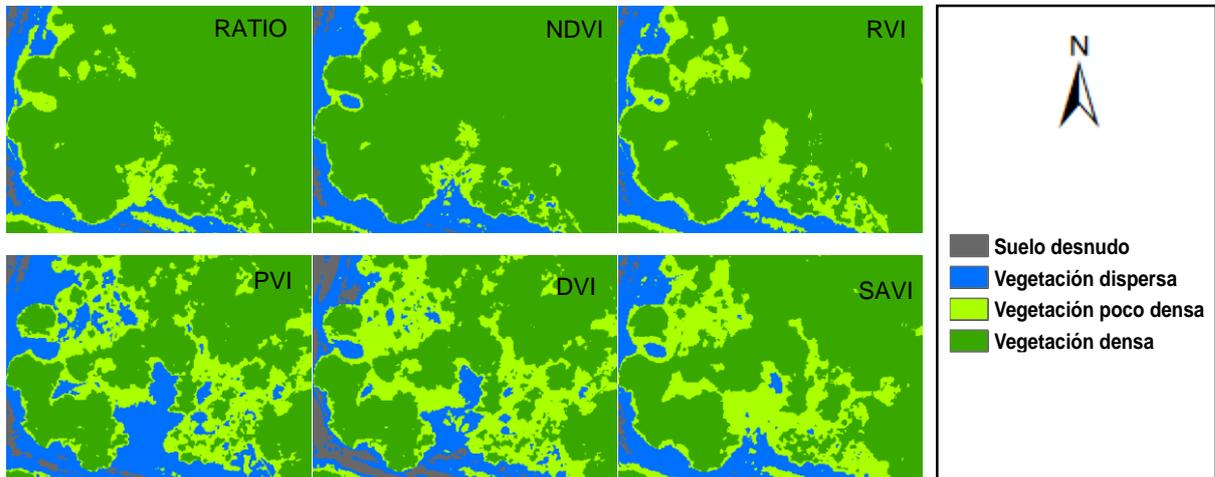


Figura 31: Sensibilidad de DVI, a) suelo desnudo, b) vegetación enferma, c) vegetación poco densa y d) vegetación densa

Fuente: EL Autor
Elaboración: El Autor

5.3. Validación

Para la validación de los resultados se empleó imágenes satelitales obtenidas a través del satélite SENTINEL-2A, debido a su resolución espacial de 10m x 10m. Se analizaron una serie de imágenes (Tabla 6), a una fecha cercana de la obtención realizada mediante el sistema VANT, las cuales presentaban un menor porcentaje de nubosidad que permita la observación del área de estudio. Estas imágenes se muestran en la figura 32, el rectángulo azul indica la ubicación del área de estudio.

Tabla 6: Imágenes del programa SENTINEL-2A analizadas

PROGRAMA SENTINEL-2A	
Fecha	% de nubosidad
27-04-2017	42.27
06-06-2017	36.32

Fuente: EL Autor
Elaboración: El Autor

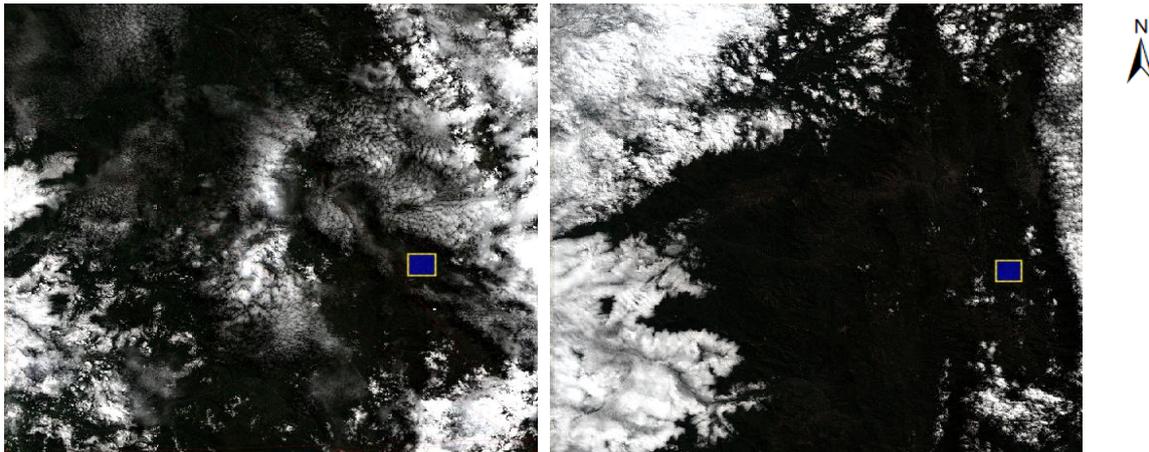


Figura 32: Imágenes satelitales del SENTINEL-2A a) imagen del 27-04-2017, b) imagen del 06-06-2017

Fuente: Programa SENTINEL-2A
Elaboración: El Autor

Los índices de vegetación generados mediante el sistema VANT, fueron convertidos a una resolución de 10 metros para obtener la misma resolución que las imágenes del SENTINEL-2A. La conversión se la realizó a través de del módulo **Resample** de ArcGIS empleando el método del vecino más cercano. Estos índices son mostrados en el Anexo 4.

Sin embargo estimaciones hechas en esta investigación dieron como resultado, que los tiempos de procesamiento que tardaría para determinar el valor promedio de un conjunto de píxeles de 100x100, con una resolución de 10cm/píxel (valor promedio en un nuevo píxel de 10 m) tomaría un tiempo de 25 minutos. Para completar una imagen de 1200 píxeles con resolución espacial de 10 metros (resolución espacial de imágenes del SENTINEL-2A) que abarca el área de estudio, llevaría un tiempo de 20.83 días para cada imagen, con un alto requerimiento computacional.

Los índices de vegetación generados con las imágenes satelitales se muestran en el Anexo 5. La tabla 7 indica los coeficientes de correlación obtenidos, entre los índices de vegetación RATIO, NDVI, RVI, y SAVI, generados con el sistema VANT y con los generados con las imágenes satelitales. Las ecuaciones de correlación conjuntamente con sus gráficas se adjuntan en el Anexo 6.

Los índices de vegetación PVI, DVI, no fueron analizados, debido a que se requiere determinar los coeficientes de la línea del suelo para su cálculo (pendiente y distancia al origen). Esto requiere que se identifique una muestra de suelo desnudo en las imágenes satelitales, lo que se convierte en una tarea difícil debido a su resolución espacial. Dentro del área de estudio se identificaron muy pocos píxeles (76 píxeles en total) que contienen esta información, y como resultado, los coeficientes de pendiente y distancia al origen de la línea del suelo salieron muy bajos fuera del intervalo indicado por Chuvieco (2016). Esto se debe a la resolución espacial relativamente baja de las imágenes satelitales comparado con el sistema VANT. Aparte de esto, la información satelital contiene píxeles mixtos (varios tipos de cobertura censadas en un mismo píxel).

Tabla 7: Coeficientes de correlación entre los índices de vegetación entre imágenes satelitales y sistema VANT

SENTINEL-2A/VANT	27-04-2017/26-04-2017		06-06-2017/24-05-2017	
ÍNDICE	r	R ² %	r	r ² %
RATIO	0.33	10.88	0.37	13.45
NDVI	0.49	24.63	0.61	37.72
RVI	0.50	24.74	0.63	39.15
SAVI	0.42	17.53	0.59	34.78

Fuente: EL Autor
Elaboración: El Autor

La baja correlación entre los índices generados con los datos de los dos sistemas, se debe a varios puntos:

La alta resolución espacial de la información generada por el sistema VANT (10cm/píxel) que permite obtener una mejor información espectral en cada píxel para cada cobertura, como la vegetal o suelo desnudo. Al momento de generar los índices de vegetación con datos obtenidos mediante el sistema VANT, estos presentan valores específicos de gran detalle para cada una de estas coberturas.

Las coberturas vegetales tienen generalmente una distribución heterogénea, que solamente puede ser detectado con una resolución espacial muy alta, como la obtenida mediante el sistema VANT. Esta variación no es detectada por las imágenes satelitales del SENTINEL-2A que tienen una resolución espacial de 10 m, donde la respuesta espectral de los píxeles no es única para una determinada cobertura. Schweik y Green (1999), indican que cuando un sensor observa una superficie de cobertura mixta, la respuesta espectral de píxel mostrará una mezcla de espectros de aquellas superficies captadas por el píxel. Esto es el

principal problema para identificar coberturas con imágenes satelitales de media o baja resolución. (Kressler, Steinnocher, Múcher, y Thunnissen, 2000).

Al hacer la comparación entre los índices de vegetación generados con los dos sistemas a una resolución espacial de 10m, se podrá observar que las imágenes satelitales representan los índices mucho más suaves y homogéneos, esto debido a que sus píxeles tienen una información espectral mixta de las diferentes coberturas presentes. Mientras que los índices generados con el sistema VANT indican muchas más variaciones, esto debido a que su alta resolución espacial permite detectar de manera detallada los cambios de cobertura.

CONCLUSIONES

- La presente investigación ha demostrado que la tecnología VANT como el DJI Inspire 1, equipada con sensores multi-espectrales como el Parrot Sequoia, pueden ser empleadas para la adquisición de datos sobre el estado de la vegetación. La ventaja de este sistema es la adquisición de datos en alta resolución espacial y temporal, especialmente en pequeñas áreas de unas pocas hectáreas. Esto constituye una buena alternativa a las tecnologías actuales como los sistemas de Teledetección satelital que se ven limitadas en cuanto a resolución espacial y temporal, además están sujetas a las condiciones climáticas (como la nubosidad) y los elevados costos en los que se incurre al momento de adquirir los datos.
- De los datos adquiridos con el sistema VANT, las imágenes de reflectancia en las bandas RED y NIR han permitido generar una serie de índices de vegetación como: RATIO, NDVI, RVI, PVI, DVI y SAVI, a una resolución espacial de 10 cm/píxel. Con esta resolución espacial es posible mostrar información muy detallada de la superficie terrestre, lo que permite identificar los cambios que se presentaron en las diferentes coberturas.
- Los índices de vegetación han permitido investigar los efectos de la falta de recurso hídrico sobre las coberturas vegetales, esto debido a la transición de la época lluviosa a la época seca. En este periodo se ha podido constatar mediante el uso de índices de vegetación que de manera general que la vigorosidad de la cobertura vegetal decrece por falta de recurso hídrico; en donde la vegetación vigorosa se ha reducido en un ~46%. La cobertura poco vigoroso ha tenido un incremento de ~30%, la cobertura de vegetación dispersa presenta un incrementado de ~37% y la cobertura de suelo desnudo un incremento de ~61%. Este último incremento en la cobertura de suelo desnudo es producto de la falta del recurso hídrico y de las actividades agrícolas desarrolladas en el área de estudio (cosecha y limpieza del terreno).
- Comparando los dos grupos de índices de vegetación generados en esta investigación (basados en pendiente y distancia), se puede indicar que el índice de vegetación DVI muestra los mejores resultados debido a la cancelación de la influencia del suelo de fondo a través de la línea del suelo, por lo cual ha permitido discriminar la vegetación de otros tipos de coberturas como se muestra en la figura 31.

- Queda demostrado que los índices de vegetación generados con la cámara multi-espectral transportada por sistema VANT permiten estudiar el comportamiento de los diferentes tipos de coberturas (vegetal, estructuras civiles y suelo desnudo), esto a pesar que se tiene una baja correlación con los productos derivados de las imágenes satelitales SENTINEL-2A. Los umbrales mínimos y máximos obtenidos de la correlación entre las imágenes satelitales y el sistema VANT corresponden a los índices RATIO y RVI. Para la primera toma de datos se presenta un R^2 de 10.88% para el índice RATIO y 24.77% para el índice RVI, representando los valores mínimo y máximo respectivamente. Para la segunda toma de datos, se obtuvo un R^2 de 13.45% para el índice RATIO y 39.15% para el índice RVI, que representan el mínimo y máximo respectivamente. Estos valores bajos del R^2 se deben a la capacidad de registro de un único valor por pixel y a la gran diferencia en la resolución espacial de los sensores, en donde se tiene una resolución moderada en el sistema satelital (pixel de 10 m) y una alta resolución en el sistema VANT (píxel de 10 cm).

RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar técnicas que permitan realizar un suavizado de los píxeles en las imágenes de reflectancia, para obtener una imagen más homogénea y al mismo tiempo corrigiendo píxeles aislados que presentan valores muy altos o muy bajos respecto a sus vecinos (similar al efecto sal y pimienta descrito por Chuvieco 2010). Este puede hacerse con un análisis focal, entre 3x3 o 4x4 píxeles, promediando los valores de reflectancia.
- Para futuras investigación, se recomienda el uso de una placa de calibración con valores conocidos de reflectividad, que permitan conocer con mayor exactitud, la energía electromagnética incidente y reflejada en el área de estudio. Estos valores se pueden emplear para realizar una calibración mixta en el Sunshine sensor y los valores obtenidos con la placa de calibración. También se puede emplear un radiómetro de campo para medir la anergia electromagnética incidente y reflejada en cualquier superficie, y obtener así estos coeficientes.
- Se debe dar continuidad a la investigación, para levantar información de la superficie terrestre en alta resolución, esto con la finalidad de poder generar una base de datos de esta información para tierras agrícolas presentes en la zona sur de Ecuador. Proyectos similares se ejecutan en países como EEUU y Japón (Chiba et al., 2014) para ser empleados en estudios de la dinámica vegetal para diferentes periodos de tiempo (mensual, semestral o anual). Esto permite comprender mejor su comportamiento de la dinámica vegetal en periodos de tiempo más extensos y generar información que puede ser empleada para gestionar este tipo de recurso natural.

BIBLIOGRAFÍA

- ASPRS – IMAGING AND GEOSPATIAL SOCIETY. (n.d.). Retrieved July 31, 2017, from <https://www.asprs.org/>
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., ... Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
- Bendix, J., Homeier, J., Cueva Ortiz, E., Emck, P., Breckle, S. W., Richter, M., & Beck, E. (2006). Seasonality of weather and tree phenology in a tropical evergreen mountain rain forest. *International Journal of Biometeorology*, 50(6), 370–384. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0029-8>
- Bendix, J., Rollenbeck, R., Göttlicher, D., & Cermak, J. (2006). Cloud occurrence and cloud properties in Ecuador. *Climate Research*, 30(2), 133–147. <https://doi.org/10.3354/cr030133>
- Bhandari, A. K., Kumar, A., & Singh, G. K. (2012). Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Case Study of Jabalpur City. *Procedia Technology*, 6, 612–621. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.074>
- Brown, M., De Beurs, K., & Grace, K. (2016). Global Land Surface Phenology and Implications for Food Security. In P. Thenkabail (Ed.), *Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing* (pp. 353–365). Taylor & Francis Group, LLC.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. Guilford Press.
- Chang, N.-B. (2012). *Environmental Remote Sensing and Systems Analysis*. (N.-B. Chang, Ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
- Chao, H., & Chen, Y. (2012). Remote Sensing Using Single Unmanned Aerial Vehicle. In *Remote Sensing and Actuation Using Unmanned Vehicles* (pp. 101–120). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Chiba, K., Kamei, T., Ito, T., Sugai, S., Ohta, S., Satori, S., & Kingdom, U. (2014). Generation of Normalized Difference Vegetation Index Map for Precision Agriculture Using Small-Type Unmanned Aerial Vehicle, 12(June), 16–20.

- Chuvienco, E. (2010). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Ariel.
- Chuvienco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*.
- Civil Dirección General de Aviación. (2015). *RESOLUCION 215*.
- Clerici, N., Weissteiner, C. J., & Gerard, F. (2012). Exploring the Use of MODIS NDVI-Based Phenology Indicators for Classifying Forest General Habitat Categories. *Remote Sensing*, 4(12), 1781–1803. <https://doi.org/10.3390/rs4061781>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS / RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión ., 78.
- Docan, D. C. (2016). *Learning ArcGIS for Desktop*. Packt Publishing.
- Eastman, R. (2012). *IDRISI Selva - Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark University.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Gottlicher, D., Naus, T., Homeier, J., Peters, T., & Bendix, J. (2009). Thermal Structure of a Megadiverse Andean Mountain Ecosystem in Southern Ecuador and its Regionalization. *Erdkunde*, 64(4), 321–335. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2009.04.03>
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2014). *Elementary surveying: an introduction to geomatics*.
- Golubyatnikov, L. L., & Denisenko, E. A. (2006). Interrelation between the vegetation index and the climatic parameters and structural characteristics of vegetation cover. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 42(4), 484–496. <https://doi.org/10.1134/S0001433806040086>
- González, V., Fries, A., Rollenbeck, R., Paladines, J., Oñaate, F., & Bendix, J. (2016). Assessment of deforestation during the last decades in Ecuador using NOAA-AVHRR satellite data. *Erdkunde*, 70(3), 217–235. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2016.03.02>
- GPL. (2011). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial de la Provincia de Loja*. Loja.
- Guo, B., Zhou, Y., Wang, S. xin, & Tao, H. ping. (2014). The relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and climate factors in the semiarid

- region: A case study in Yalu Tsangpo River basin of Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 11(4), 926–940. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2902-3>
- Gupta, S. D., & Ibaraki, Y. (2014). *Plant image analysis: fundamentals and applications*.
- Huete, A. . (1988a). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Huete, A. R. (1988b). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309. Retrieved from http://ac.els-cdn.com.proxy.library.carleton.ca/003442578890106X/1-s2.0-003442578890106X-main.pdf?_tid=f235f148-2d5a-11e7-9c97-00000aacb361&acdnat=1493525609_6bf51af3ed3a51ffe3eb1bb3e84f66e4
- Inspire 1 V2.0 - Everything you need for aerial filmmaking - DJI. (n.d.). Retrieved July 31, 2017, from <http://www.dji.com/inspire-1>
- J. Everaerts. (2008). The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(Part B1), 1187–1192. Retrieved from http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/203.pdf [Accessed 23 October 2015]
- Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3–4), 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2)
- Jensen, J. (2014). *Remote Sensing of the Environment An Earth Resource Perspective* (Second).
- Koh, L. P., & Wich, S. A. (2012). Dawn of Drone Ecology: Low-Cost Autonomous Aerial Vehicles for Conservation. *Tropical Conservation Science*, 5(2), 121–132. <https://doi.org/10.1177/194008291200500202>
- Konecny, G. (2014). *Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems* (Second Edi). Taylor & Francis Group, LLC.
- Kressler, F., Steinnocher, K., Mücher, C. A., & Thunnissen, H. A. M. (2000). Evaluation of Medium-Resolution Satellite Images For Land Use Monitoring Using Spectral Mixture Analysis. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, 709–716.
- Liang, S., Li, X., & Wang, J. (2013). Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications. *International Journal of Remote Sensing*, 34(14), 5262–5263. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.787707>

- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). Concepts and Foundations of Remote Sensing. In *Remote Sensing and Image Interpretation* (Fifth Edit, pp. 1–12). John Wiley & Sons, Inc.
- Malacatos | Municipio de Loja. (n.d.). Retrieved July 31, 2017, from <http://www.loja.gob.ec/contenido/malacatos>
- Morocho, V., Martin, M., & Hardter, U. L. F. T. (2015). Análisis de imágenes uav de las islas galápagos, 26–37.
- Mueller, W. (2016). *Sen2Cor Configuration and User Manual*.
- Oppelt, N., Scheiber, R., Gege, P., Wegmann, M., Taubenboeck, H., & Berger, M. (2015). Fundamentals of Remote Sensing for Terrestrial Applications: Evolution, Current State of the Art, and Future Possibilities. In P. Thenkabail (Ed.), *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies* (pp. 61–83).
- Panda, S., Rao, M., Thenkabail, P., & Fitzgerald, J. (2016). Remote Sensing Systems - Platforms and Sensors: Aerial, Satellite, UAV, Optical, Radar, and LiDAR. In P. Thenkabail (Ed.), *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies* (pp. 3–57). Taylor & Francis Group, LLC.
- Pinheiro, A. (1998). Relationship between satellite-derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface hydrology. Massachusetts Institute of Technology. Retrieved from <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/46149>
- PIX4D SA. (2017). Pix4Dmapper 3.2 User Manual. Retrieved from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf-#gsc.tab=0>
- Planck's radiation law | physics | Britannica.com. (n.d.). Retrieved August 6, 2017, from <https://www.britannica.com/science/Plancks-radiation-law>
- PrecisionHawk. (2017). Agricultura de Precisión, VANT Comercial y Drones Agricultores para la Venta. Retrieved July 30, 2017, from <http://www.precisionhawk.com/es/>
- Rees, G. (2012). Data processing. In *Physical Principles of Remote Sensing* (THIRD EDIT, pp. 373–381). New York: Cambridge University Press.
- Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12), 1541–1552.
- Sancha, E. (2010). El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las

- relaciones entre la vegetación y el clima. *Tecnologías de La Información Geográfica*, 1095–1108.
- Sanchez, A., Kalacska, M., Quesada, M., Stoner, K. E., Lobo, J. A., & Arroyo, P. (2013). Phenology: An Integrative Environmental Science. In D. M. Schwartz (Ed.) (pp. 157–171). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_9
- Schweik, C. M., & Green, G. M. (1999). The Use of Spectral Mixture Analysis to Study Human Incentives, Actions, and Environmental Outcomes. *Social Science Computer Review*, 17(1), 40–63. <https://doi.org/10.1177/089443939901700105>
- Sehgal, V. K., Jain, S., Aggarwal, P. K., & Jha, S. (2011). Deriving Crop Phenology Metrics and Their Trends Using Times Series NOAA-AVHRR NDVI Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 39(3), 373–381. <https://doi.org/10.1007/s12524-011-0125-z>
- Sequoia – MicaSense Knowledge Base. (n.d.). Retrieved August 7, 2017, from <https://support.micasense.com/hc/en-us/categories/202567307-Sequoia->
- Soledad Duval, V., María Benedetti, G., & María Campo, A. (2015). Relación clima-vegetación: adaptaciones de la comunidad del jarillal al clima semiárido, Parque Nacional Lihué Calel, provincia de La Pampa, Argentina. *Investigaciones Geograficas*, 2015(88), 33–44. <https://doi.org/10.14350/rig.48033>
- Steven, M., Malthus, T., & Baret, F. (2016). Toward Standardization of Vegetation Indices. In P. Thenkabail (Ed.), *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies* (pp. 175–193). Taylor & Francis Group, LLC.
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), 791–797. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>
- Teillet, P. M. (2016). Overview of Satellite Image Radiometry in the Solar Reflective Optical Domain. In P. Thenkabail (Ed.), *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies* (pp. 87–108). Taylor & Francis Group, LLC.
- The, H., War, W., li, W. W., Sands, W., States, U., & Pruitt, E. (2011). Remote Sensing : Feature Articles Remote Sensing : Feature Articles, 1–9. Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/>
- Toth, C., & Józków, G. (2016a). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>

Toth, C., & Józków, G. (2016b). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>

Ünsalan, C., & Boyer, K. L. (2011). Remote Sensing Satellites and Airborne Sensors. In *Multispectral Satellite Image Understanding* (pp. 7–15). London: Springer London.

https://doi.org/10.1007/978-0-85729-667-2_2

ANEXOS

Anexo 1: Orto-mosaicos RGB del área de estudio

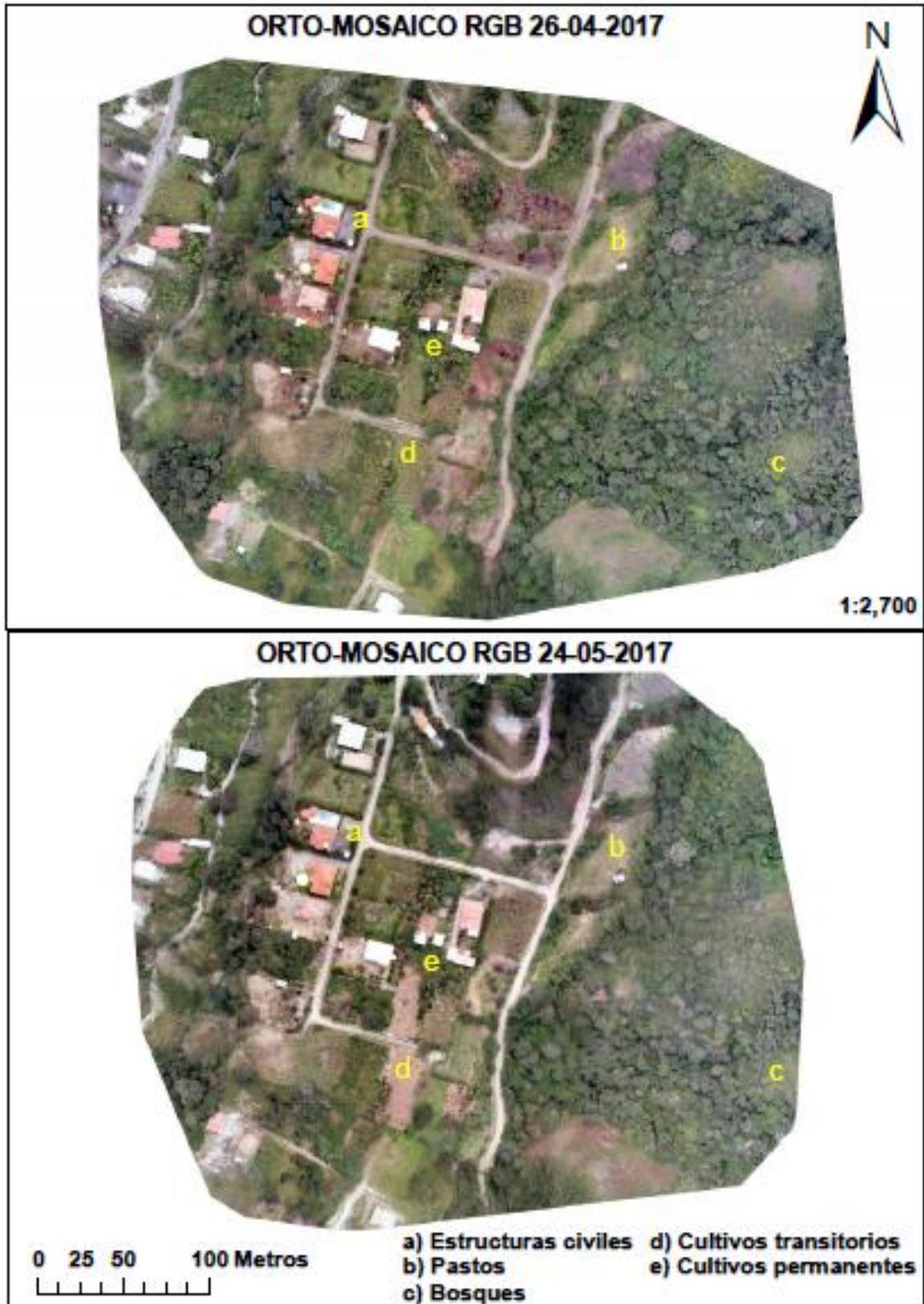


Figura 33: Orto-mosaicos RGB del área de estudio

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

Anexo 2: Clasificación de las diferentes coberturas con los índices de vegetación

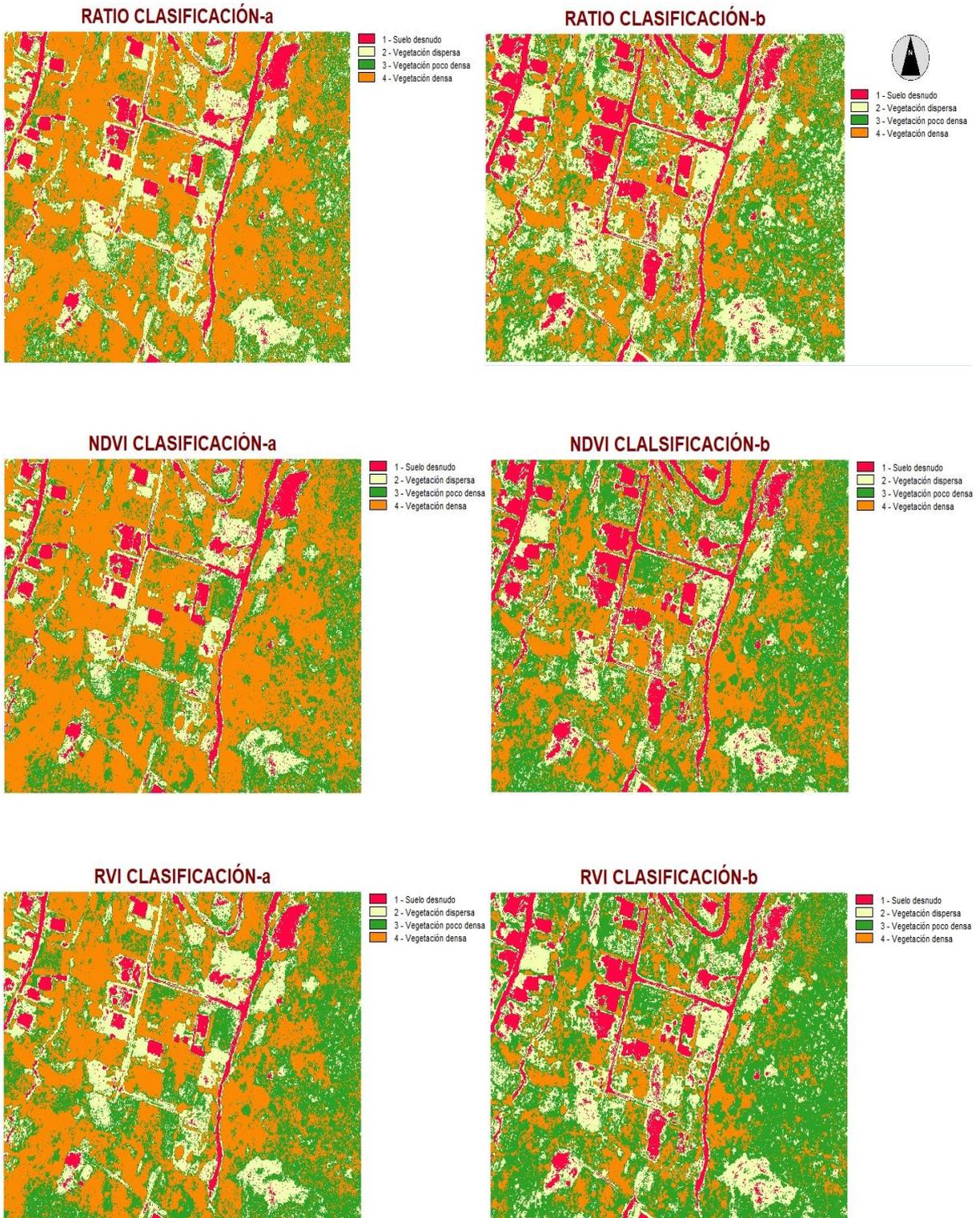


Figura 34: Clasificación de los índices basados en pendiente para las dos fechas analizadas; a) clasificación del 26 de abril del 2017 b) clasificación del 24 de mayo del 2017.

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

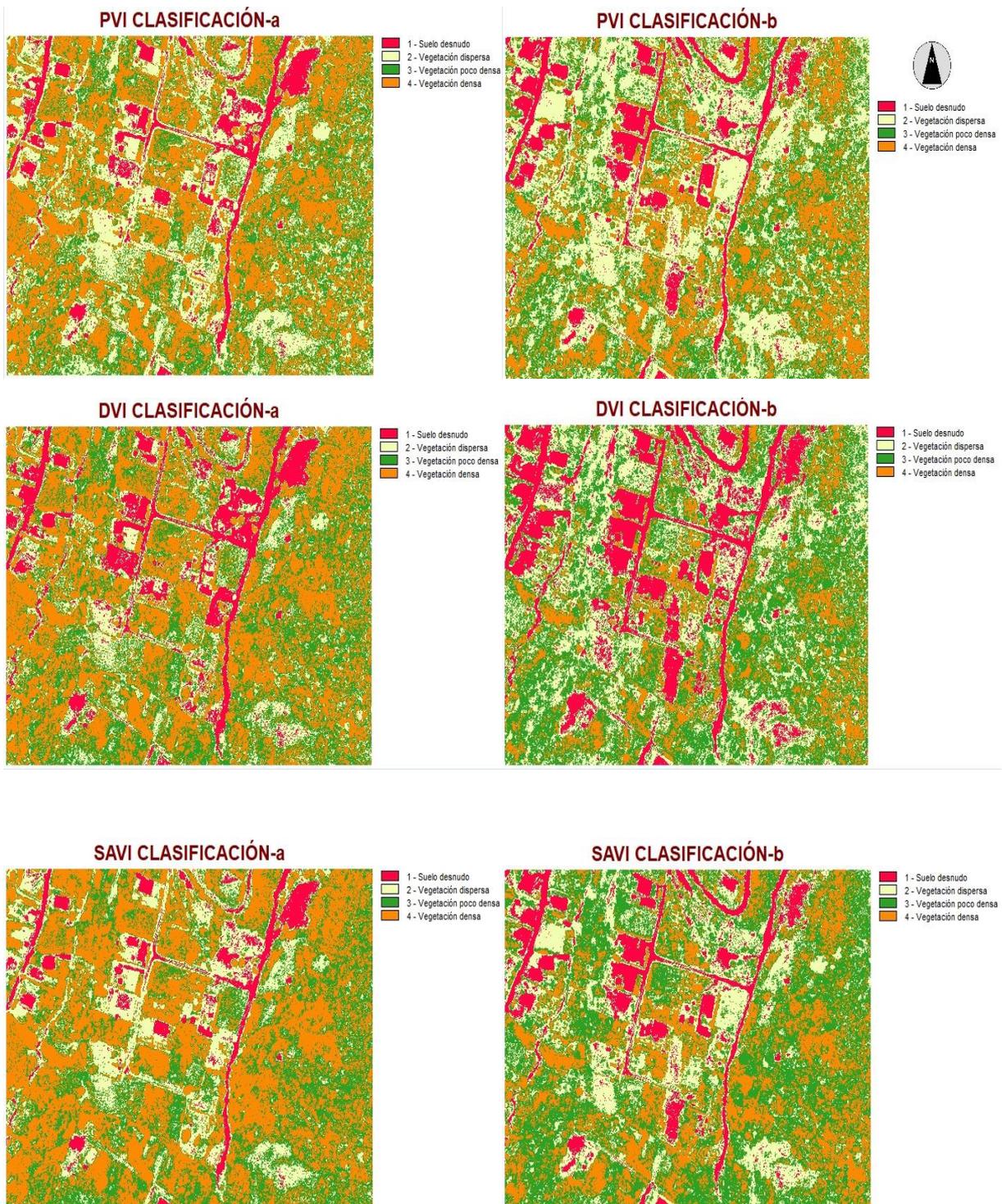


Figura 35: Clasificación de los índices basados en distancia para las dos fechas analizadas; a) clasificación del 26 de abril del 2017 b) clasificación del 24 de mayo del 2017.

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

Anexo 3: Variación de los índices de vegetación



Figura 36: Variación de los índices de vegetación entre la primera y segunda fecha de obtención de los datos

Fuente: EL Autor

Elaboración: EL Autor

Anexo 4: Índices de vegetación generados con el sistema VANT a una resolución espacial de 10 m.

Índice generado con los datos VANT obtenidos el 26 de abril del 2017

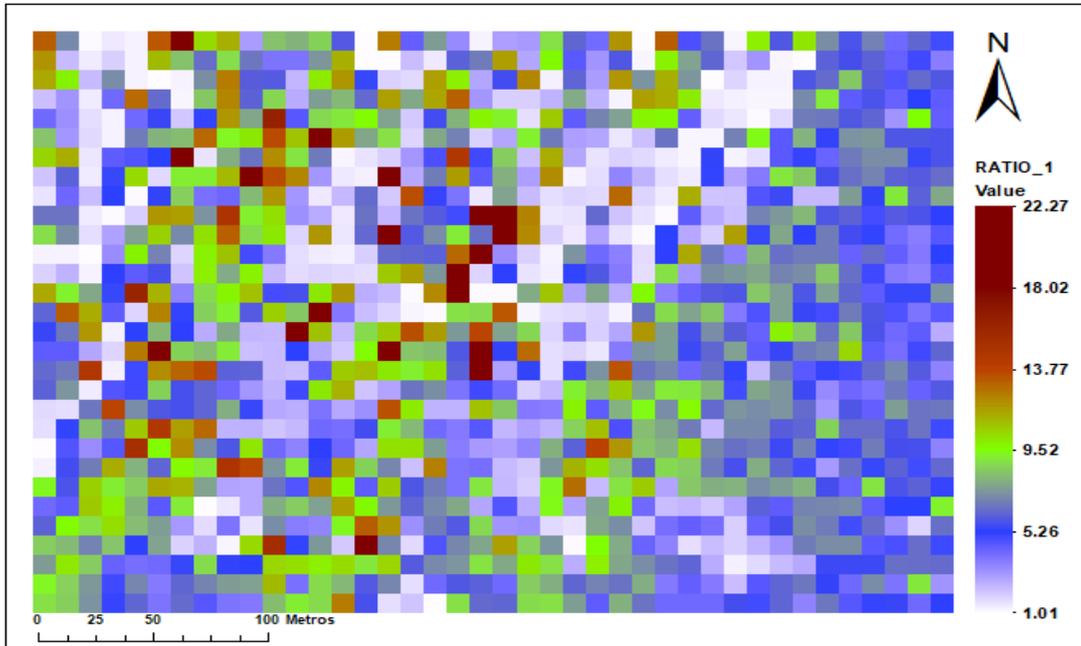


Figura 37: Índice RATIO a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

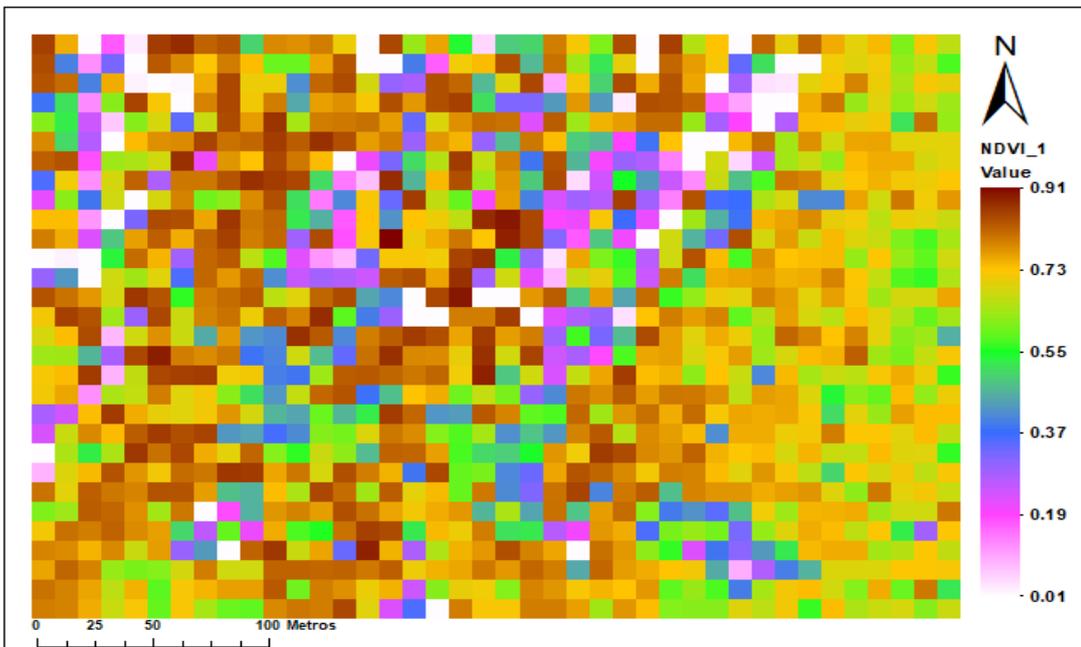


Figura 38: Índice NDVI a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

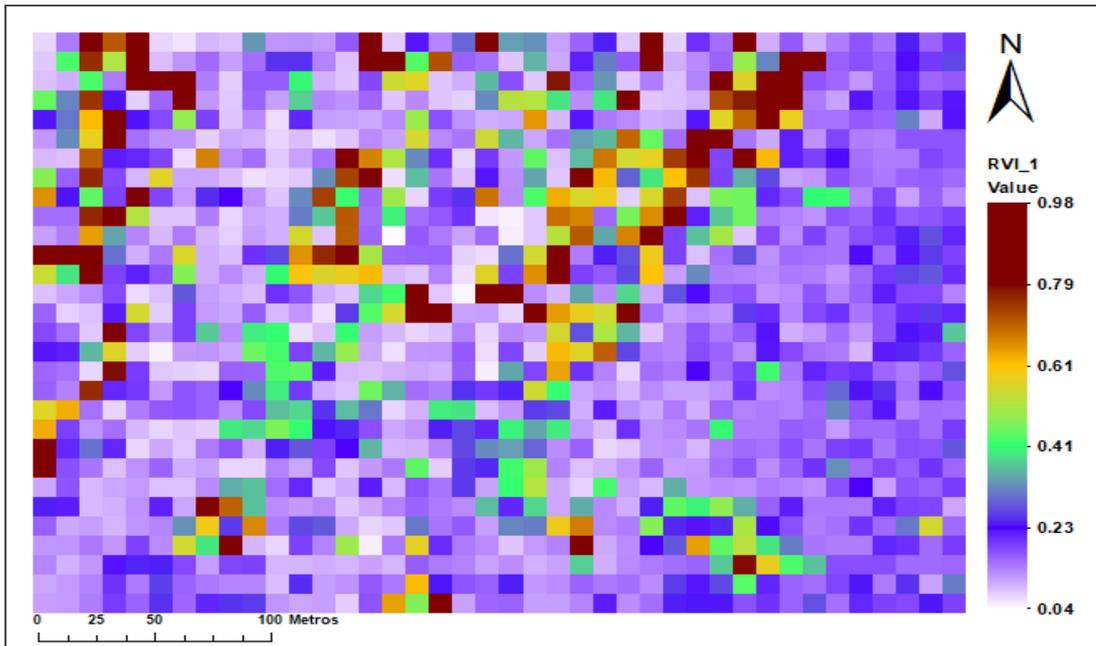


Figura 39: Índice RVI a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

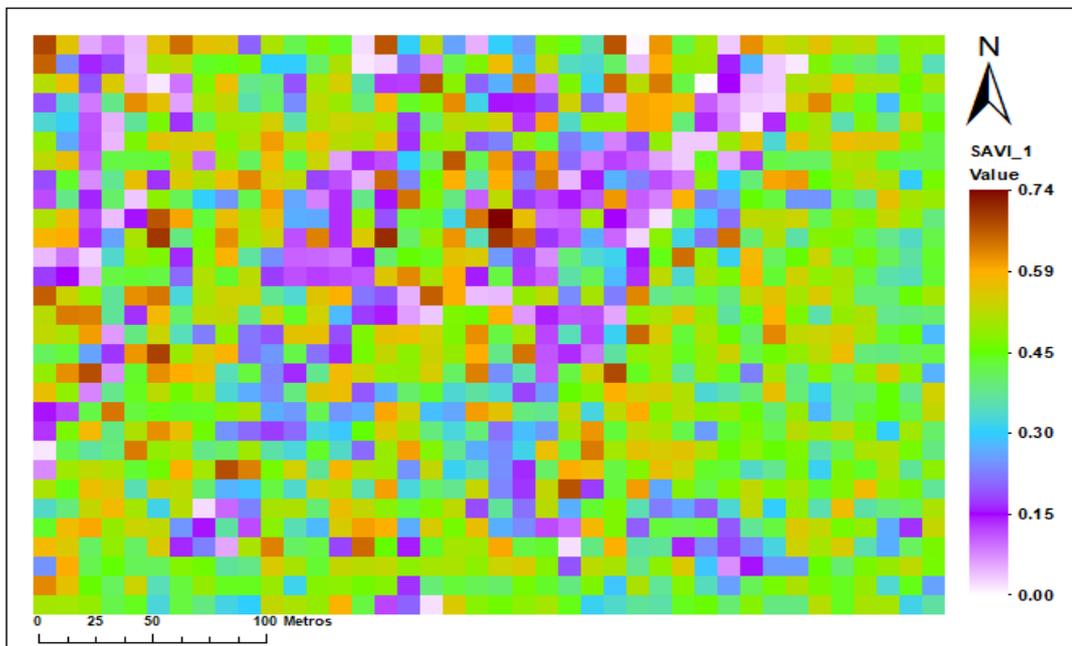


Figura 40: Índice SAVI a 10 m de resolución espacial, para el 26 de abril del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

Índice generado con los datos VANT obtenidos el 24 de mayo del 2017

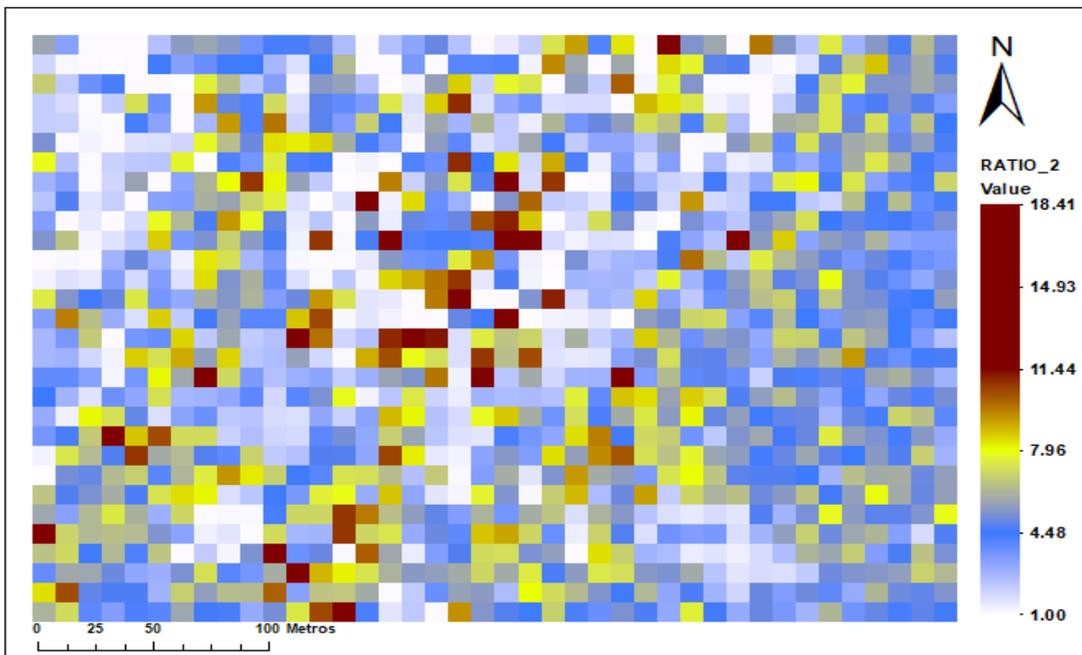


Figura 41: Índice RATIO a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

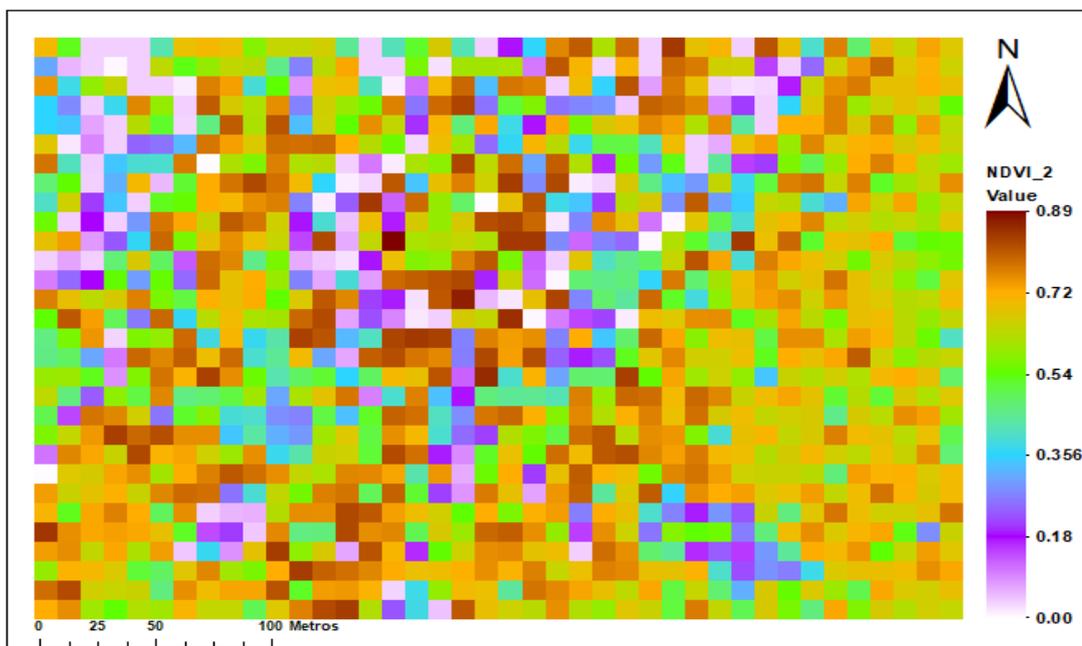


Figura 42: Índice NDVI a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

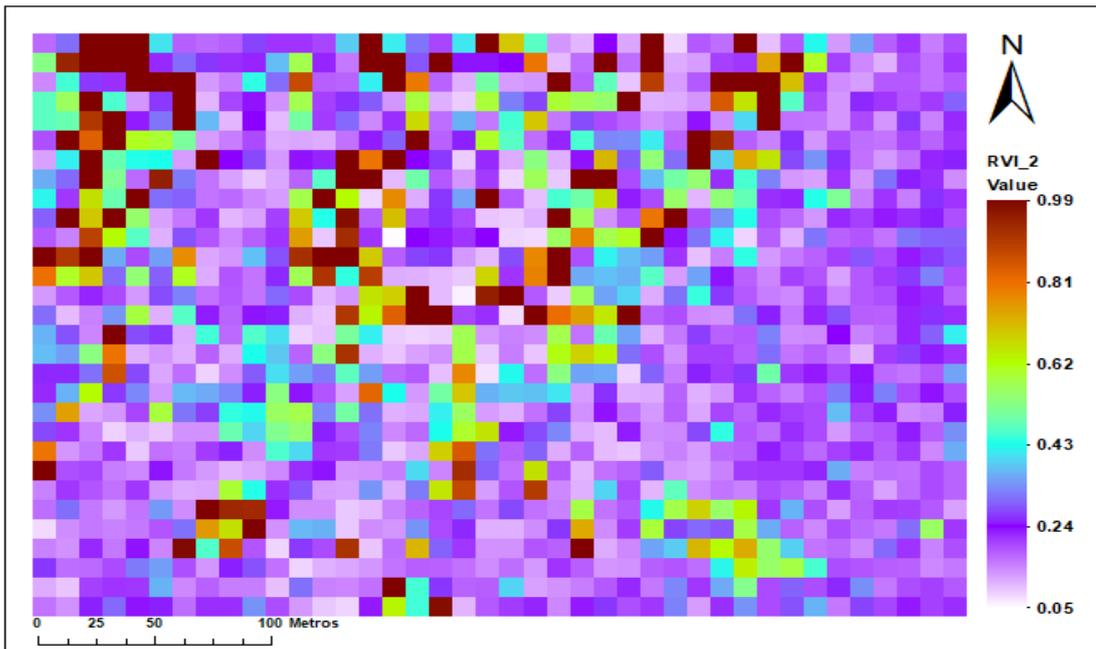


Figura 43: Índice RVI a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

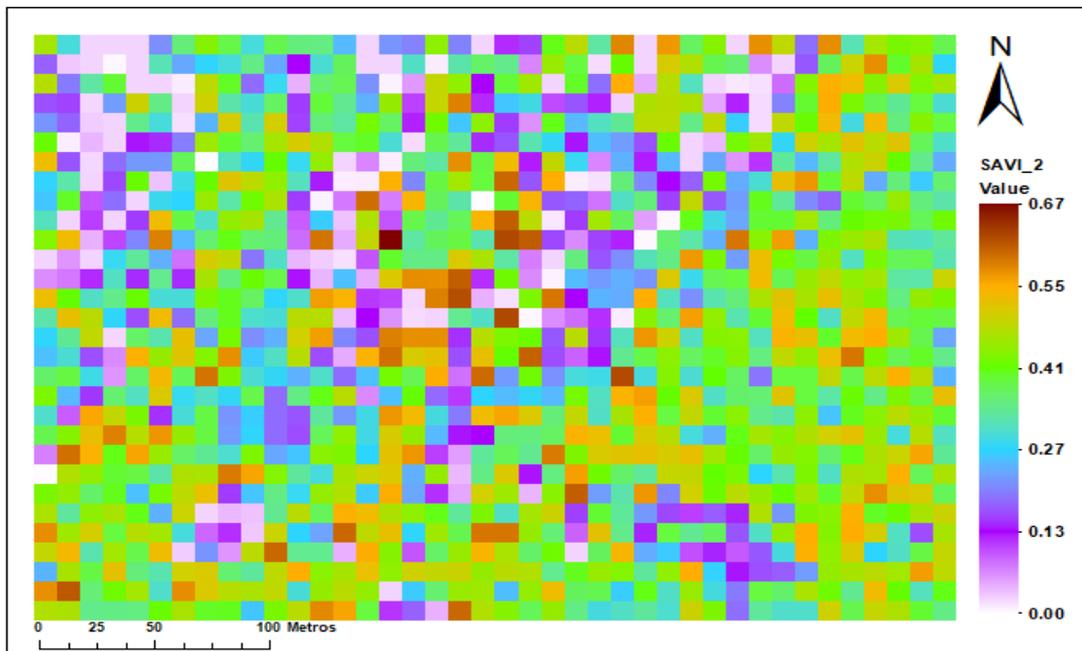


Figura 44: Índice SAVI a 10 m de resolución espacial, 24 de mayo del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

Anexo 5: Índices de vegetación generados con imágenes del programa SSENTINEL-2A

Índice generado con los datos del SENTINEL-2A obtenidos el 27 de abril del 2017

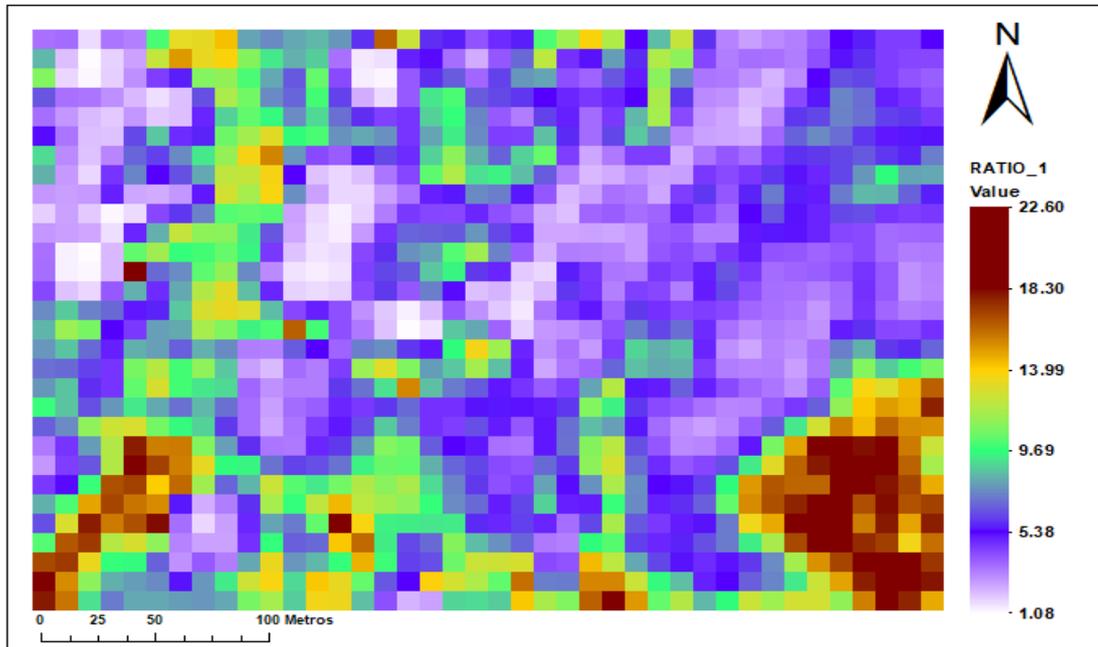


Figura 45: Índice RATIO, para el 27 de abril del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

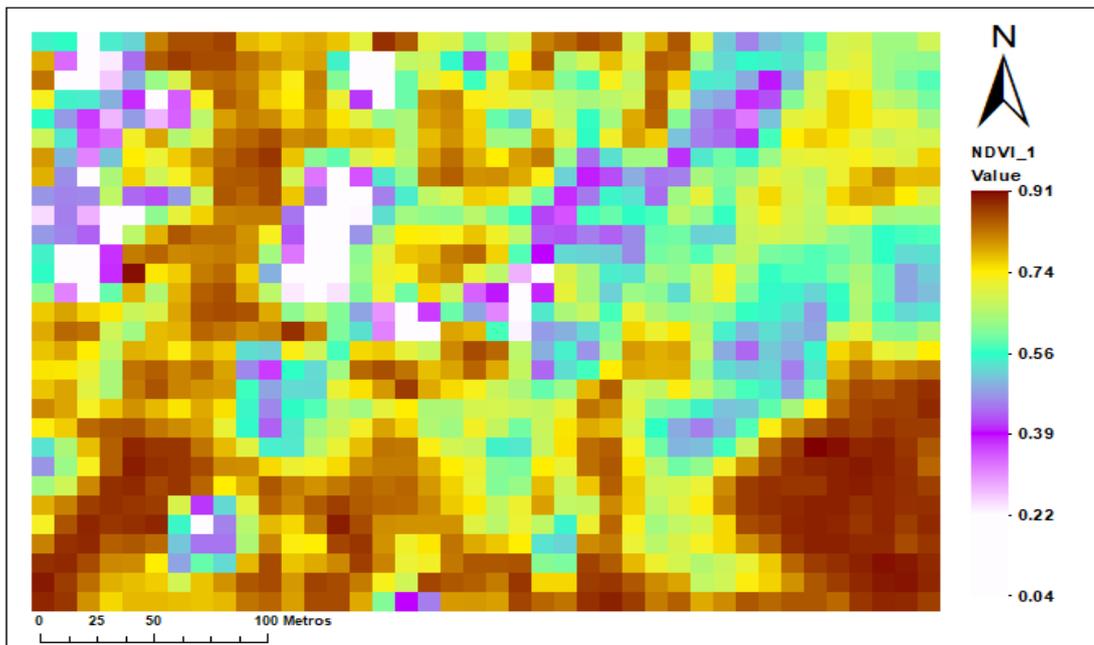


Figura 46: Índice NDVI, para el 27 de abril del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

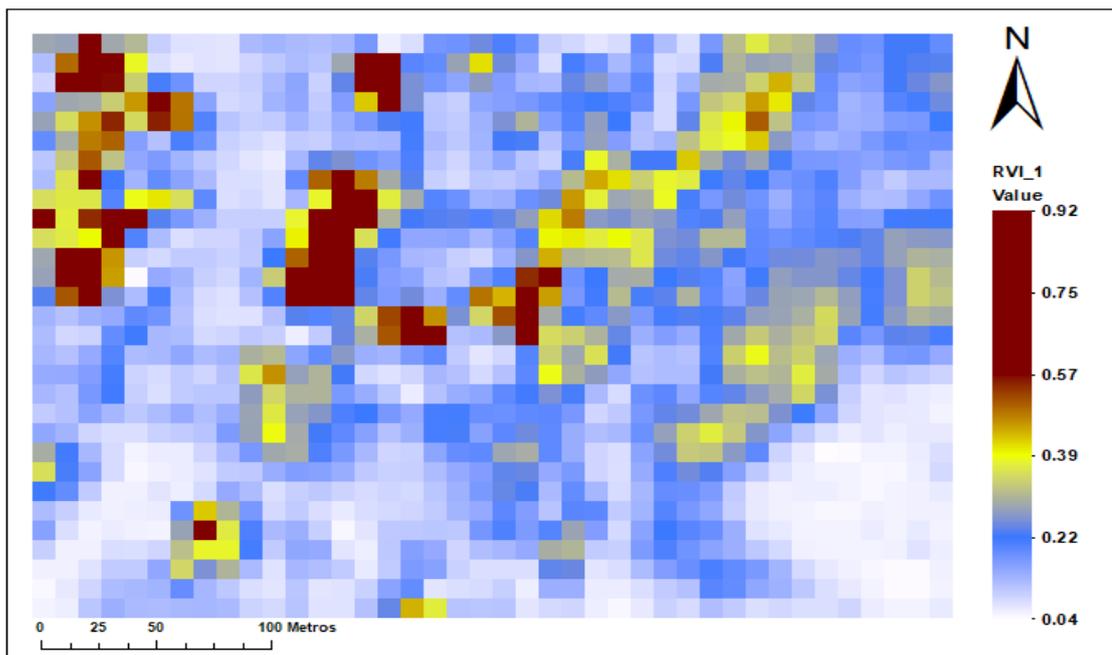


Figura 47: Índice RVI, para el 27 de abril del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

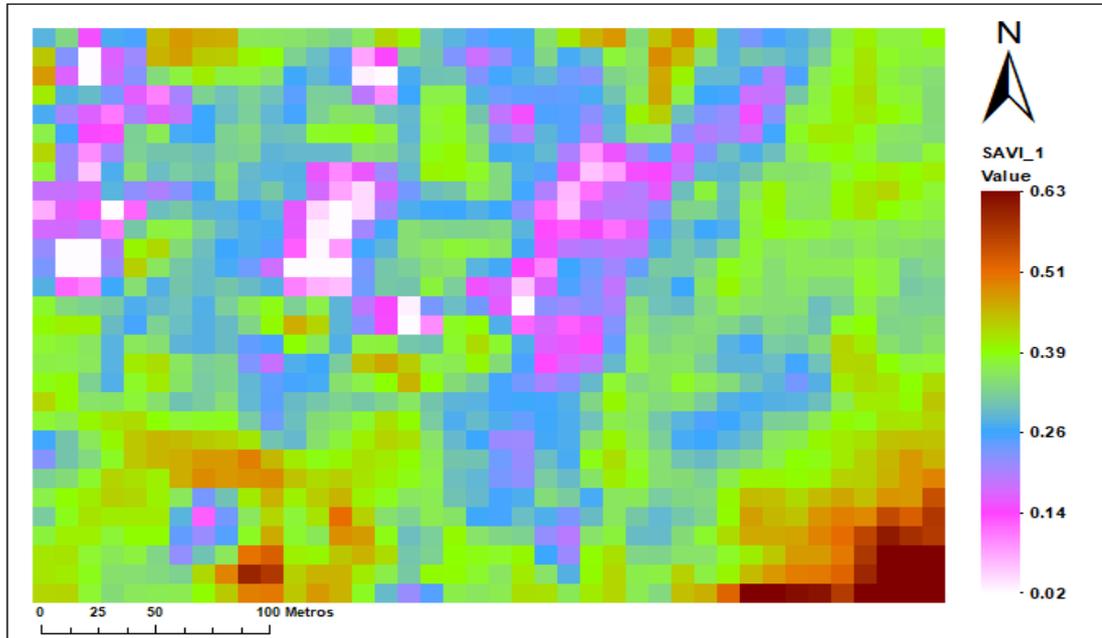


Figura 48: Índice SAVI, para el 27 de abril del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

Índice generado con los datos del SENTINEL-2A obtenidos el 26 de junio del 2017

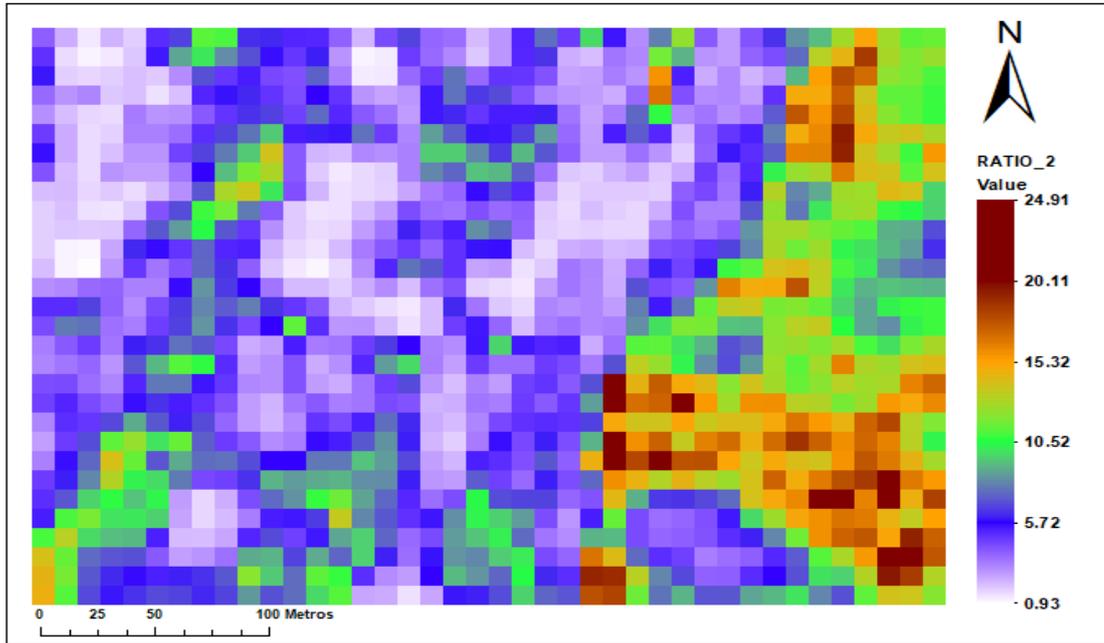


Figura 49: Índice RATIO, para el 26 de junio del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

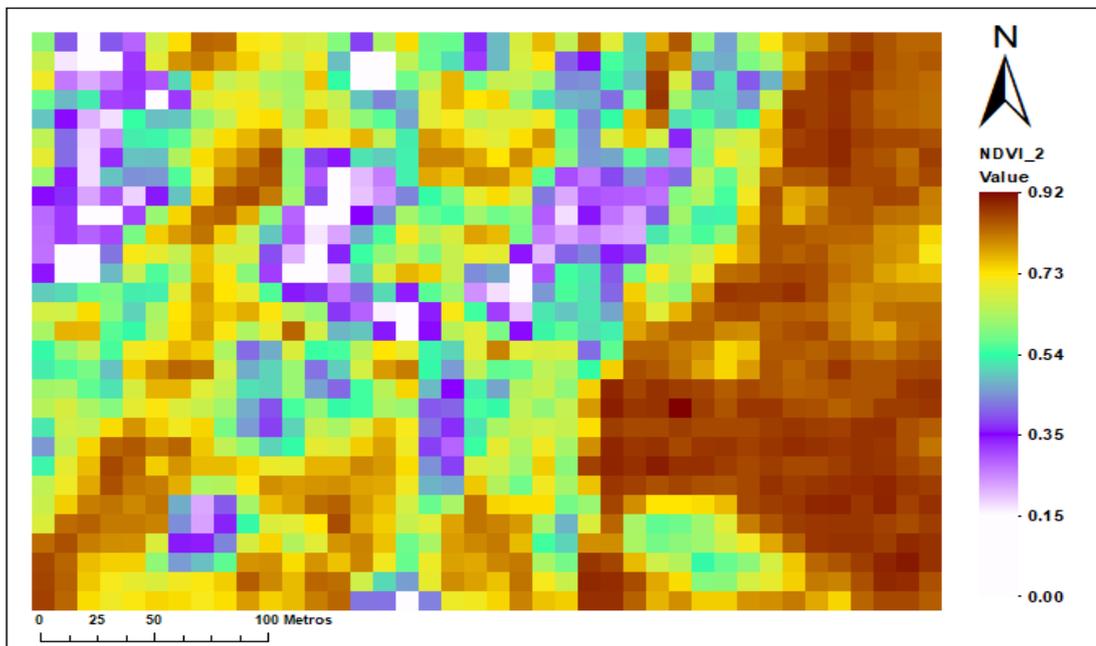


Figura 50: Índice NDVI, para el 26 de junio del 2017

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

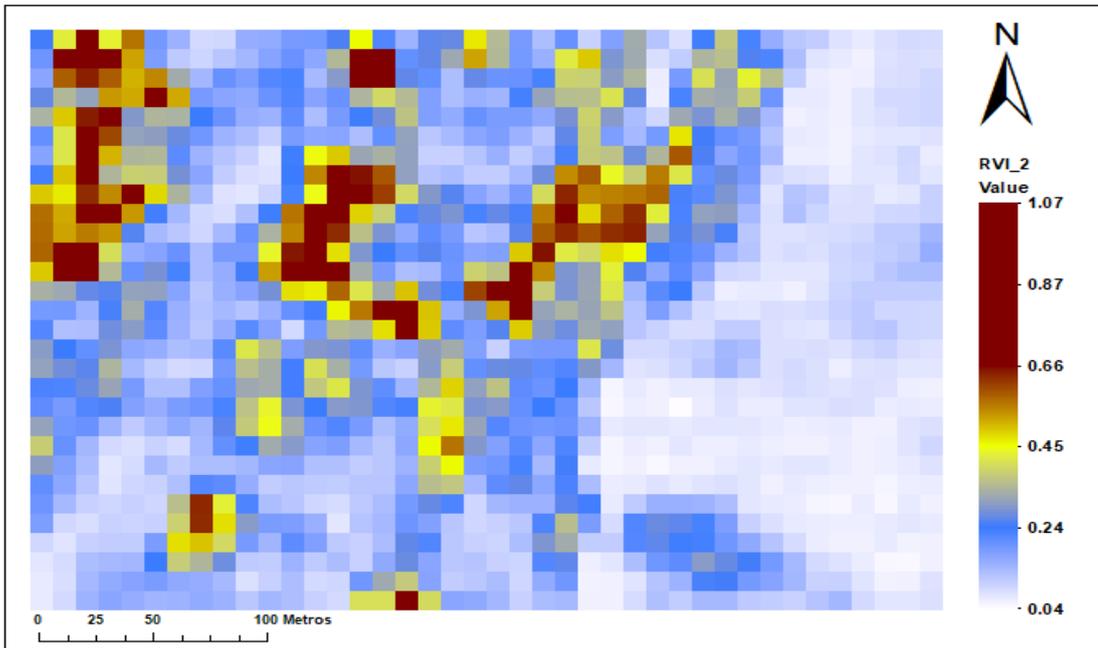


Figura 51: Índice RVI, para el 26 de junio del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

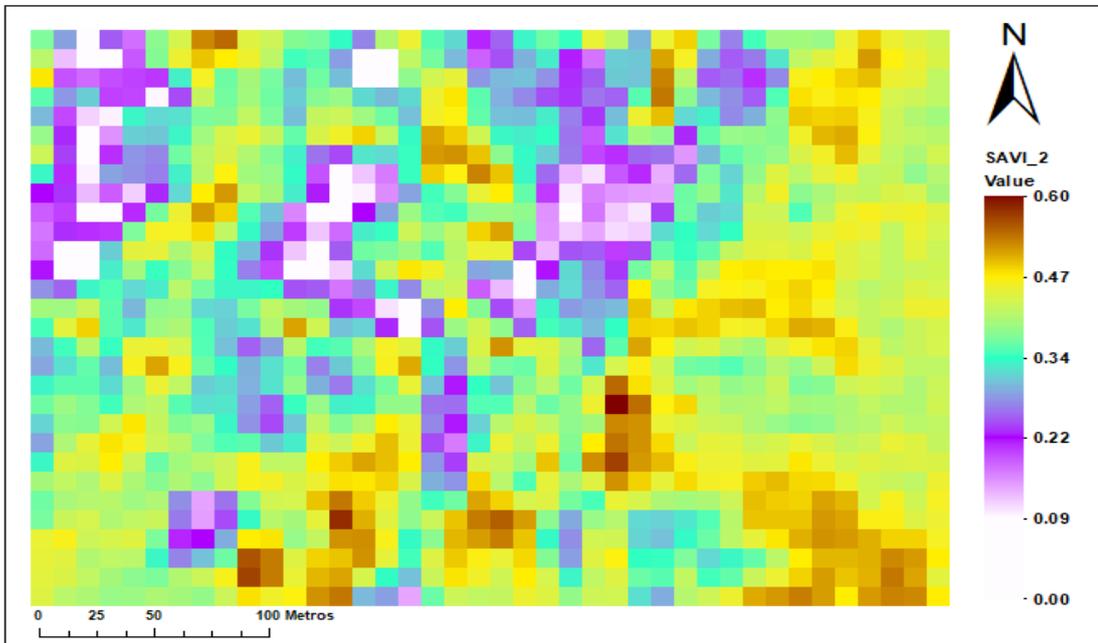


Figura 52: Índice SAVI, para el 26 de junio del 2017
 Fuente: EL Autor
 Elaboración: El Autor

Anexo 6: Correlación entre los índices de vegetación generados con los dos sistemas, el VANT y el Satelital.

Correlación entre los índices SENTINEL-2A (27-04-2017) y VANT (26-04-2017)

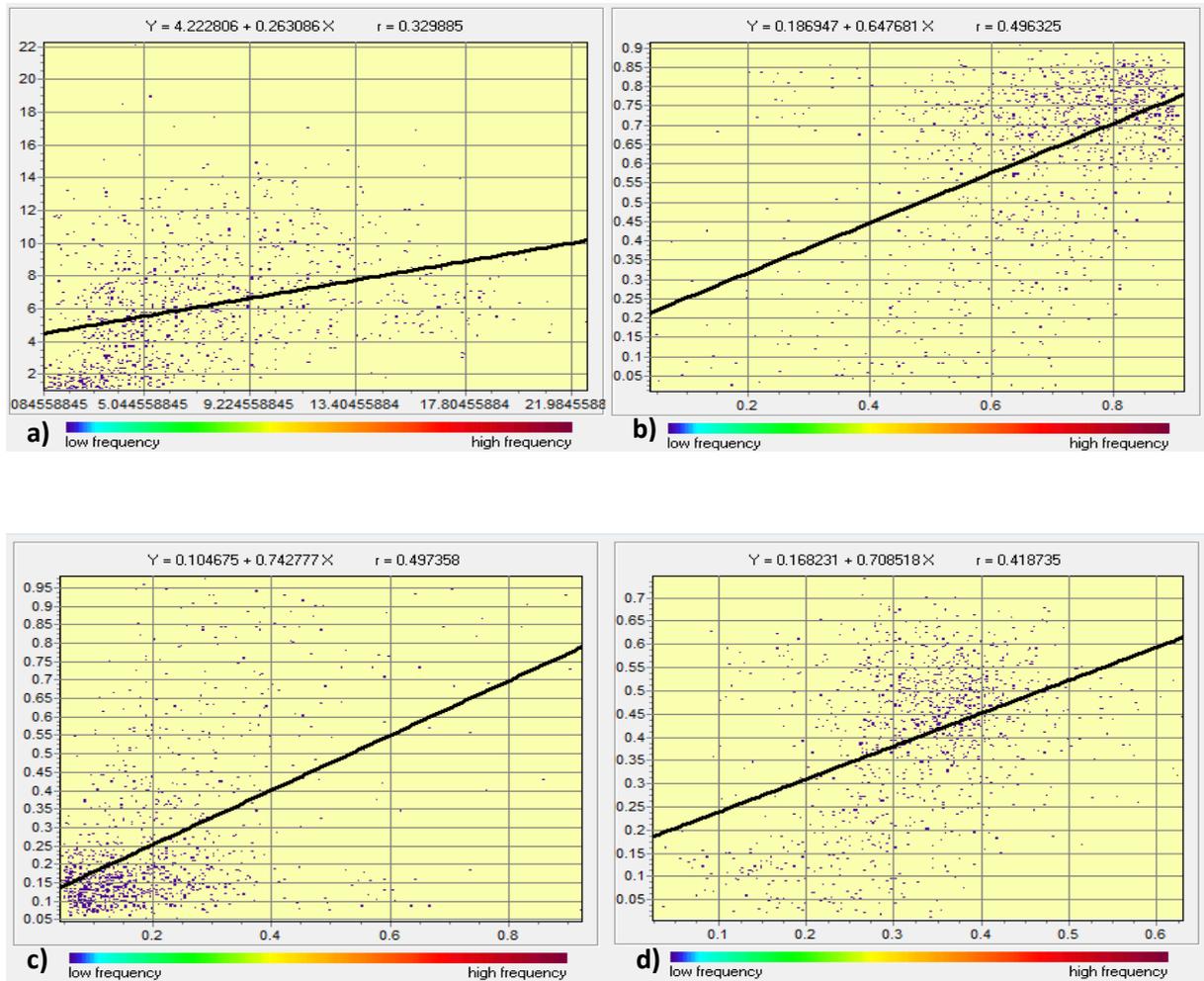


Figura 53: Correlación entre a) RATIO, b) NDVI, c) RVI, d) SAVI

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor

Correlación entre los índices SENTINELI-2A (06-06-2017) y VANT (24-05-2017)

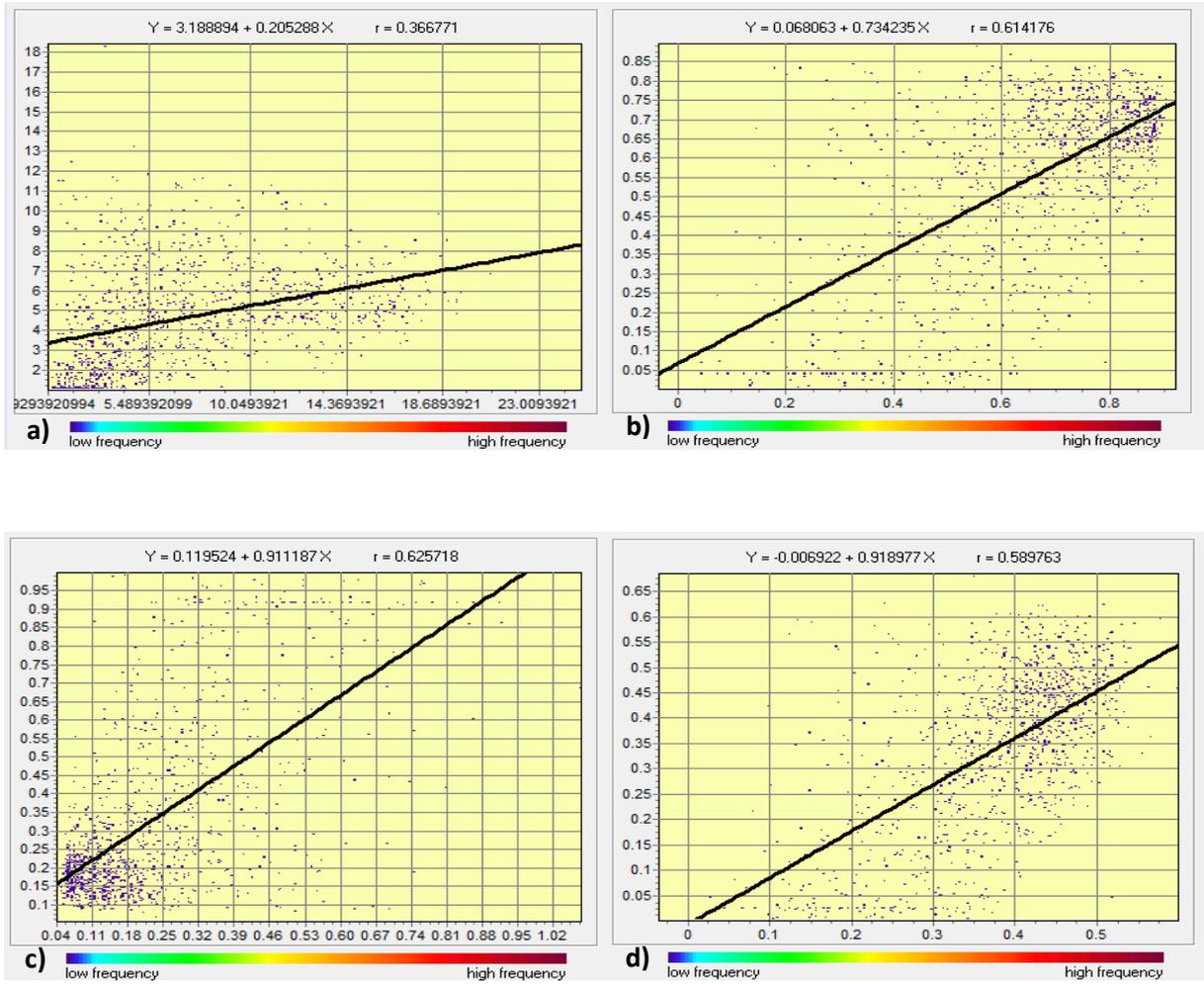


Figura 54: Correlación entre a) RATIO, b) NDVI, c) RVI, d) SAVI

Fuente: EL Autor

Elaboración: El Autor