EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN OBTENIDOS CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8.

VALENTINA CÓRDOBA ROJAS
CRISTIAN DAVID URBANO ROJAS

Documento presentado a
Ingeniería Topográfica
como requisito para optar por el título de
Ingeniero Topográfico

Director: Olga Lucia Baquero Montoya MSc.



Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Facultad de Ingeniería- Sede Cali
Diciembre 2020

Resumen

Los Índice de Vegetación (VI) son combinaciones de bandas espectrales cuya función es diferenciar tipos de cobertura (agua, suelo, vegetación, urbano) y el estado de la vegetación a partir de su respuesta espectral. Se realizó una revisión bibliográfica de índices de vegetación, de los que se seleccionaron 13: RVI, NDVI, YVI, PVI, SAVI, ARVI, GEMI, MSAVI, GARI, EVI, GNDVI, DVI y TVI. Los índices se aplicaron y analizaron en un estudio multitemporal, teniendo en cuenta las variaciones de precipitación como indicador de clima de la zona con el fin de estudiar el comportamiento de los índices.

Se emplearon 2 imágenes Landsat 8- sensor OLI en el área de estudio comprendida entre la región norte y centro del Valle del Cauca, Colombia y coberturas a escala 1:100.000. Para el estudio multitemporal se seleccionaron dos épocas: abril y diciembre del año 2017. Teniendo en cuenta las respuestas espectrales de cada tipo de cobertura (agua, suelo, vegetación, zona urbana) se calcularon los rangos de respuesta de cada índice y se compararon con los valores extraídos de estos, calculados a partir de las imágenes, en la muestra representativa de dichas coberturas.

Los resultados obtenidos mostraron que cada índice responde a características como densidad de vegetación, suelo desnudo, nubes y cantidad de agua. Por consiguiente, es importante tener conocimiento de las coberturas que se están evaluando para aplicar un índice que describa realmente el estado de estas. Para facilitar el proceso se desarrolló una interfaz gráfica para calcular los índices en lenguaje Python.

Palabras clave– Percepción remota, Índices de vegetación, Coberturas.

Índice general

Pag.

Resumen I

Índice general II

Índice de figuras IV

Índice de tablas VI

Acrónimos VII

1. Introducción 1

    1.1 Objetivo General 2
    1.2 Objetivos Específicos 2

2. Antecedentes 4

3. Marco teórico 6

    3.1 Concepto de percepción remota 6
        3.1.1 Resoluciones 6
        3.1.2 Espectro electromagnético 7
    3.2 Firmas espectrales 7
        3.2.1 Cuerpos de agua 8
        3.2.2 Coberturas vegetales 8
        3.2.3 Suelo desnudo 9
        3.2.4 Zona urbana 9
    3.3 Superficies 9
    3.4 Landsat 8: características 12
    3.5 Corrección Geométrica 13
        3.5.1 Localización de GCP 14
        3.5.2 Transformación de coordenadas 14
    3.6 Corrección radiométrica y atmosférica 14
    3.7 Coeficiente de correlación lineal de Pearson 16
    3.8 Índices de vegetación 16
    3.9 Índice de área foliar (LAI) 17
    3.10 Línea del suelo 17

4. Revisión Bibliográfica 19

5. METODOLOGÍA 38

5.1 Revisión Bibliográfica 38
5.1.1 Determinación de criterios de selección y selección de índices. 39
5.1.2 Selección de zona de estudio 39
5.2 Adquisición de imágenes 41
5.2.1 Pre procesamiento 41
5.2.1.1 Corrección geométrica 41
5.2.1.2 Corrección radiométrica 42
5.2.2 Cálculo de índices 42
5.2.3 Generación de mapa de coberturas y extracción de puntos de muestreo 44
5.3 Análisis 45
5.3.1 Evaluación de los índices 45
5.3.2 Identificación de ventajas y desventajas 46

6. Resultados y Discusión 47

6.1 Comparación índices por cobertura 91
6.1.1 Cuerpos de agua 91
6.1.2 Cobertura tipo vegetal 92
6.1.2.1 Bosque 92
6.1.2.2 Cultivos 93
6.1.2.3 Vegetación baja 93
6.1.3 Suelo desnudo 94
6.1.4 Zona urbana 94
6.2 Valores propuestos 96

7. Conclusiones y Recomendaciones 98

7.1 Conclusiones 98
7.2 Recomendaciones 99

Anexos 101
Anexo A 101

BIBLIOGRAFÍA 105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Pag.

3.1 Espectro electromagnético. Fuente: Pérez y Muñoz, 2006. 7

3.2 Firmas espectrales. Fuente: Hernández y Montaner, 2009. 8

4.1 Índices basados en pendiente: interpretación gráfica. Fuente: Muñoz,(2013) 20

5.1 Metodología. Fuente: autores 38

5.2 Zona de estudio. Fuente: autores 40

5.3 Interfaz. Fuente: autores 43

5.4 Mapa de coberturas. Fuente: autores 44

5.5 Composición de ventanas múltiples. Fuente: autores 46

6.1 Aplicación RVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 50

6.2 Aplicación NDVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 53

6.3 Aplicación RVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 55

6.4 Linea del suelo abril. Fuente: autores 56

6.5 Linea del suelo diciembre. Fuente: autores 56

6.6 Aplicación PVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 58

6.7 Aplicación SAVI 0.25 en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 61

6.8 Aplicación SAVI 0.5 en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 64

6.9 Aplicación SAVI 1 en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 66

6.10 Aplicación ARVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 70

6.11 Aplicación GEMI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 72

6.12 Aplicación MSAVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 75

6.13 Aplicación GARI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 78
6.14 Aplicación EVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores..... 81
6.15 Aplicación GNDVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores..... 84
6.16 Aplicación DVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 87
6.17 Aplicación TVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 90
6.18 Aplicación TVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores 91
7.1 Inicio de la interfaz 101
7.2 Interfaz 102
7.3 Guía de usuario 104

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA Pag.

3.1 Coberturas de la tierra basada en metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Fuente: IDEAM,(2010) 11

3.2 Especificación bandas Landsat 8. Fuente: IGAC, 2013..... 12

3.3 Especificaciones de productos LDCM a Nivel 1. Fuente: IGAC,2013 13

5.1 Información de imágenes utilizadas. Fuente: USGS 41

5.2 Puntos de muestreo. Fuente: autores 45

6.1 Compilado de valores SAVI para L 0.25, 0.5 y 1. Fuente: autores..... 67

6.2 Índices recomendados por cobertura. Fuente: autores..... 95

6.3 Rango clasificación de coberturas para índices estudiados. Fuente: autores 96

Acrónimos

ARVI Índice de Vegetación de Resistencia Atmosférica. 5, 28, 29, 32, 68, 69, 70, 92, 93, 94

CAR Corporación Autónoma Regional. 99

CC Convolución Cúbica. 13

Chl Clorofila. 31, 32, 34

CVC Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. 44, 99

DEM Modelo Digital de Elevación. 12, 41

DVI Difference Vegetation Index. 20, 35, 84, 85, 86, 87, 92

EVI Índice de Vegetación Mejorado. 5, 32, 33, 78, 92, 93, 94

GARI A green atmospherically resistant vegetation index. 31, 75, 77, 92, 94

GCP Ground Control Point. 12, 13, 14, 41, 42

GEMI Global Environmental Monitoring Index. 29, 30, 70, 92

GeoTIFF Geographical Tagged Image File Format. 12

GNDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde. 5, 33, 81, 82, 83, 92, 94

GPS Sistema de Posicionamiento Global. 42

IDEAM Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales. 9, 10, 40

KLT Kanade-Lucas-Tomasi. 14

LAI Índide de Área Foliar. 1, 17, 21, 25, 35, 36

LDCM Landsat Data Continuity Mission. 12

MODIS Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer. 5, 32

MSAVI A Modified Soil Adjusted Vegetation Índex. 30, 73, 92, 93, 94

ND Nivel Digital. 13, 14, 15, 42, 99, 103

NDVI Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado. 5, 19, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 50, 51, 52, 92, 93, 94

NIR Infrarrojo Cercano. 19, 20, 31

OLI Operational Land Imageri. 12

PVI Perpendicular Vegetation Index. 18, 20, 25, 26, 55, 92, 93, 94

RVI Índice de Vegetación de Radio. 16, 19, 20, 21, 29, 30, 47, 50, 52, 92, 94

SAVI Índice de Vegetación Ajustado al Suelo. 5, 20, 26, 27, 30, 31, 58, 59, 61, 64, 66, 92, 93, 94, 98

TIRS Thermal Infrared Sensor. 12

TOA Top Of Atmosphere. 15, 42

TVI Transformed Vegetation Index. 19, 35, 36, 87, 92, 93, 94

USGS United States Geological Survey. 12, 37

VI Índice de Vegetación. I, 1, 2, 4, 5, 16, 18, 19, 20, 23, 25, 27, 29, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 42, 44, 45, 46, 60, 66, 77, 79, 80, 83, 86, 96, 98, 99, 103

VIN Índice de Vegetación de Número. 16

YVI Yellow Vegetation Index. 23, 24, 53, 91, 92

1. Introducción

La percepción remota en la actualidad ha proliferado hacia diferentes campos de aplicación (Pellat y cols., 2005) , gracias al fácil acceso y la disponibilidad, de algunos datos abiertos al público, como lo son las imágenes satelitales (Juzga, 2016), que son captadas por un sensor que observa la Tierra desde una órbita estable y repetitiva, permitiendo el seguimiento continuo de los procesos dinámicos que ocurren en la superficie (Gonzaga, 2014). Dentro de los diferentes tipos de coberturas se encuentra la vegetación, que pueden ser estudiadas por sensoramiento remoto empleando indices de vegetación.

El estudio de las coberturas vegetales desde la percepción remota es posible gracias a la creación de sensores especiales que emplean la respuesta espectral de la cobertura estudiada (Bannari y cols., 1995), que está condicionada por: la estructura de la cubierta, donde se tiene en cuenta el Índide de Área Foliar (LAI), el tamaño, forma y orientación de las hojas; la estructura y fisiología de la planta (tallos, hojas, flores y frutos); y la geometría de la observación, definida por la orientación relativa sol-superficie y por la posición del sensor-superficie (Juzga, 2016).

Los VI son operaciones algebraicas efectuadas a partir de bandas espectrales, donde el objetivo principal de estos es realzar rasgos de interés y minimizar el efecto de otros elementos (suelo, atmósfera, topografía) que pueden perturbar el resultado (Juzga, 2016). En la vegetación, la respuesta espectral también esta condicionada por propiedades intrínsecas de esta. La absorción de energía se debe a pigmentos como las clorofilas (a,b,c,d, e) y los carotenoides. La clorofila a y b son pigmentos fotosintéticos, es decir absorben energía $(0.45 - 0.51\mu m, 0.64 - 0.67\mu m)$ y se encargan de transformar la energía solar en energía química. Los carotenoides por otro lado absorben luz violeta y verde azulada. Además, regulan el exceso de energía liberándola en forma de calor, de no ser así el proceso de fotosíntesis se rompería.

Teniendo en cuenta los condicionantes mencionados anteriormente, Jackson y cols. (1983) definen el índice de vegetación ideal como *"aquel particularmente sensible a la*

cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geometrías de la iluminación y de la observación".

Paz y cols. (2015), identificaron aproximadamente setenta VI que han sido aplicados a lo largo del tiempo sin conocer las propiedades intrínsecas de cada modelo, por esta razón Carvacho y Sánchez (2010) afirman que no existen tantos estudios o publicaciones dedicados a la determinación y evaluación de los resultados que entregan los diferentes índices.

En este sentido, en el presente estudio, se realizó una comparación y evaluación de trece 13 VI empleando imágenes satelitales Landsat 8 en diferentes épocas (abril - diciembre). Para el análisis de los resultados, identificación de ventajas y desventajas de sus aplicaciones, se tomó con referencia la revisión bibliográfica realizada en este trabajo.

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de un número determinado índices de vegetación, para determinar las ventajas y desventajas de su uso, empleando imágenes satelitales *LANDSAT 8*. Tomando como objeto experimental las coberturas presentes en la zona geográfica.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer los criterios de selección de índices de vegetación a estudiar.
- Seleccionas y reconocer los fundamentos físico de la creación de cada índice estudiado.
- Aplicar los índices de vegetación seleccionados mediante el uso de la Teledetección en una zona geográfica para su posterior análisis.
- Evaluar las diferencias localizadas que hacen necesaria la elección correcta de un

tipo de índice para cada investigación.

2. Antecedentes

Los VI fueron desarrollados con la finalidad de evaluar el estado de las coberturas vegetales, a partir del comportamiento espectral que los caracteriza, Permitiendo su aplicación en diferentes campos de interés tales como monitoreo de vegetación, clasificación de superficies, agricultura de precisión, entre otros, haciendo uso de la gran diversidad de VI planteados a lo largo del tiempo para necesidades específicas. Hoy día se contabiliza que a lo largo de las últimas dos décadas se encontraron más de cuarenta índices de vegetación (Bannari y cols., 1995).

Respecto a lo anterior, Bannari y cols. (1995) realizaron un estudio bibliográfico en el que se presentan los índices más conocidos y empleados, destacando las ventajas y desventajas de su aplicación en cuanto a su funcionalidad desde la interacción de la energía radiante para determinar las condiciones experimentales y campos de aplicación, clasificándolos de acuerdo a los factores y perturbaciones que pueden contrarrestar cada uno de ellos destacando la sombra, el color del suelo y la humedad, como los principales. Según Bannari y cols. (1995) cada índice que es creado se basa tanto en contrarrestar un factor específico que lo puede afectar como en resaltar una característica de la cobertura vegetal y bajo este fundamento se determina su funcionalidad y sus limitaciones creando un recurso importante para entender los métodos teóricos para el uso pertinente de ellos.

Por otro lado, Xue y Su (2017) definen los índices como una ecuación que permite la cuantificación del estado de las coberturas vegetales. Los autores destacan la importancia de que para la elección de un índice de vegetación se deben tener en cuenta los objetivos del estudio y las condiciones de la zona para la correcta representación e interpretación del estado de la cobertura que se estudia y a razón de ello en su documento realizan un estudio bibliográfico que permite introducir a las características espectrales de la vegetación a partir de un recuento de un gran porcentaje de índices desarrollados a lo largo del tiempo destacando sus ventajas y desventajas en cuanto a su aplicabilidad, representatividad y tipo de vegetación, además de un enfoque adicional como lo es la instrumentación utilizada y las plataformas.

Carvacho y Sánchez (2010), realizan un estudio de comparación de cinco VI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), Índice de Vegetación de Resistencia Atmosférica (ARVI), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) y Índice de Vegetación Mejorado (EVI) para evaluar la respuesta espectral que ofrecen determinadas cubiertas vegetales, considerando diferentes épocas del año (invierno y verano) a partir de productos MODIS y los resultados indicaron que las medidas de vigor son muy semejantes entre los VI, sin embargo, se evidencian diferencias que hacen necesario que la elección del índice sea la adecuada.

Aguilar (2016), realizó un estudio para conocer cuáles son los VI que mejor identifican las variaciones espectrales de las coberturas naturales (biomas) a partir de un estudio multitemporal correlacionando los resultados con los niveles de precipitación.

3. Marco teórico

3.1 Concepto de percepción remota

La Percepción remota es la técnica que permite la captura, tratamiento y análisis de información tomada desde una plataforma espacial (Pérez y Muñoz, 2006). Esta técnica de estudio se clasifica de acuerdo a la fuente emisora de energía: pasiva, su la fuente es el sol o activa cuando el sistema cuenta con su propia fuente de energía en la plataforma (Richards y Richards, 1999).

La percepción remota estudia las superficies a partir de su respuesta a la radiación proveniente del sol desde la proporción en que esta es reflejada, absorbida o transmitida.

3.1.1 Resoluciones

Un sistema de percepción remota se basa en cuatro componentes principales, conocidos como las resoluciones de los sensores, también definido como el nivel de detalle que caracteriza la imagen. Dentro de ello se encuentra: resolución espacial, temporal, radio-métrica y espectral (Villegas, 2008).

- Resolución espacial: Es la capacidad de un sensor en distinguir un objeto de la superficie de menor tamaño, es decir, la calidad de detalle de la imagen, también conocido como tamaño del píxel. Por lo tanto, la resolución espacial está estrechamente relacionado con la escala de trabajo.
- Resolución temporal: Es la periodicidad o frecuencia con la que un satélite captura una imagen de la misma zona, también se relaciona con la capacidad de registrar y obtener información y determinar los cambios en la superficie.
- Resolución radio-métrica: Es la capacidad de un sensor en distinguir los niveles de energía o también intensidad de radiancia, que se almacenan en un formato

binario (bits) representado en tonos de gris, generando mayor calidad de detalle de la imagen.

- Resolución espectral: Se conoce como el número de canales espectrales y la anchura de ellos con la que cuenta un sensor. También conocido como el número de bandas y el rango del espectro que ellas pueden captar, permitiendo mayor capacidad de distinción de los diferentes materiales y características de la superficie observada.

3.1.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es un sistema de clasificación de la energía radiante, figura 3.1, en función de la longitud de onda o frecuencia, que se extiende desde la radiación de ondas de menor longitud, Gamma, hasta las de mayor longitud, Radio.

A partir de metodologías remotas es posible estudiar la radiación electromagnética que emite o absorbe un objeto a partir de las longitudes de onda, la frecuencia o la intensidad de radiación.

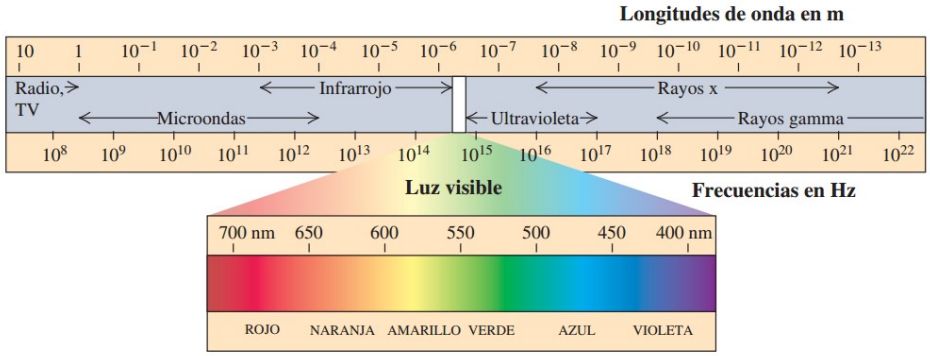


Figura 3.1: Espectro electromagnético. Fuente: Pérez y Muñoz, 2006.

3.2 Firmas espectrales

La forma en que un objeto refleja, emite o absorbe la energía electromagnética genera un patrón espectral al que se le llama firma espectral, figura 3.2, que permite identificar

diferentes objetos de la naturaleza ya que se construye a partir de la señal registrada por los sensores remotos en las diferentes porciones del espectro electromagnético.

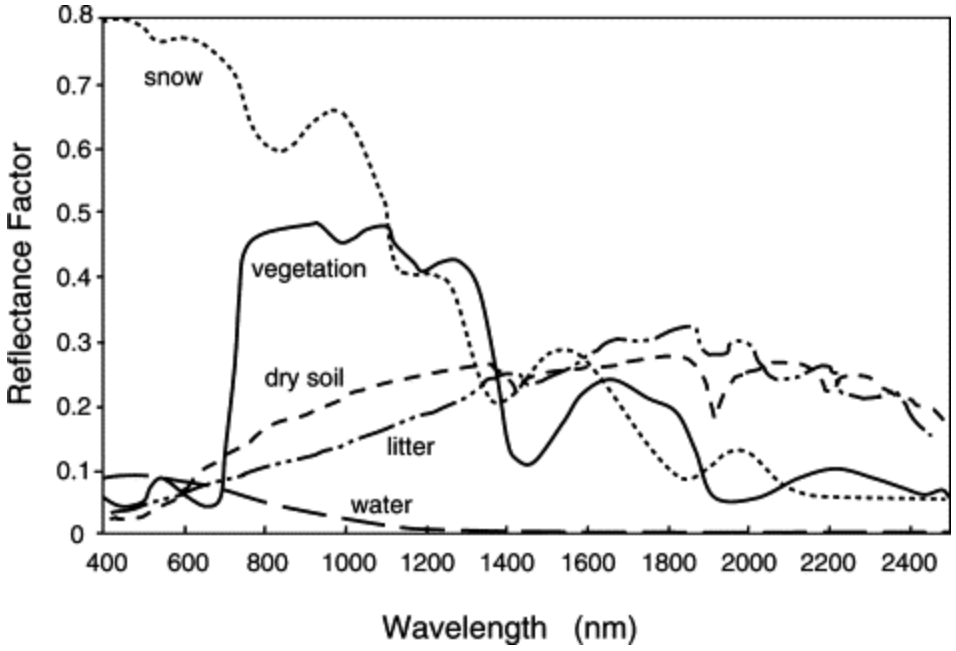


Figura 3.2: Firmas espectrales. Fuente: Hernández y Montaner, 2009.

3.2.1 Cuerpos de agua

El comportamiento espectral del agua depende de gran variedad de factores como: la pureza, su color, su estado de movimiento y finalmente por los elementos suspendidos en ella. En condiciones normales los cuerpos de agua tienden a reflejar inversamente proporcional a la magnitud de longitud de onda, es decir su reflexión es mayor en el espectro visible que en el infrarrojo ($Azul > Verde > Rojo > Infrarrojo$). Dado el caso en que el comportamiento espectral no sea el esperado puede deberse a los factores anteriormente mencionados.

3.2.2 Coberturas vegetales

Las coberturas vegetales se caracterizan por realizar el proceso de la fotosíntesis donde uno de los insumos es la energía solar que la compone un amplio rango de longitudes de onda. En la fotosíntesis las principales longitudes de onda tomadas son

las del espectro visible, es decir azul, verde y roja. Su capacidad de absorción va a depender del estado, densidad y estructura de vegetación, una cobertura sana absorbe en grandes proporciones en el azul y rojo y presentar un pico de reflectancia significativo en el verde e infrarrojo, dotando de una tonalidad verdosa, el tipo de absorción de estos canales dependerán de los pigmentos presentes (clorofila, xantofilas o carotenoides). Mientras que una vegetación enferma presentaría un incremento de reflectividad en el azul y rojo y una disminución en el canal verde cambiando su tonalidad.

3.2.3 Suelo desnudo

El comportamiento espectral de este tipo de superficies depende principalmente de 2 factores: el color del suelo y el porcentaje de humedad, adicionalmente también puede depender del contenido de materia orgánica, textura y estructura. Suelos secos presentar mayor reflectancia que los suelos húmedos, presentándose las diferencias especialmente en el canal infrarrojo. Los suelos presentan un comportamiento creciente en proporción al aumento de longitud de onda ($Azul < Verde < Rojo < Infrarrojo$). Dado el caso en que las reflectancias en el espectro visible no sean las esperadas puede deberse a la presencia de vegetación.

3.2.4 Zona urbana

Las superficies urbanas tienen comportamientos espectrales diferentes, dependiendo del material y color. Normalmente este tipo de materiales tienden a reflejar y ser muy calientes. Su comportamiento espectral se caracteriza, al igual que los suelos desnudos, a incrementar el % de reflectancia a medida que aumenta la longitud de onda en materiales como pavimento, asfalto y concreto. Lo que quiere decir que el espectro visible va a reflejar menos que el infrarrojo ($Azul < Verde < Rojo < Infrarrojo$).

3.3 Superficies

Según el Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales (IDEAM) (IDEAM, 2007), las superficies están compuestas por diferentes clases de coberturas y

se clasifican de acuerdo a sus características físicas, ambientales y fisonómicas. Por otro lado, la CVC (2004) define las coberturas como el recubrimiento de la superficie y que se caracterice por ser de origen natural o artificial que puede ser estudiado mediante las diferentes técnicas de percepción remota.

Colombia cuenta con la clasificación de las coberturas, tanto naturales como antrópicas, desarrolladas bajo la metodología europea CORINE Land Cover en escala 1:100.000 adaptada, principalmente por el IDEAM, a partir de las características temáticas y los recursos naturales que se encuentran en el territorio Colombiano (IDEAM, IGAC, y CORMAGDALENA, 2008).

Actualmente la clasificación de coberturas se encuentra estructurada bajo unos niveles de jerarquización, adaptada a diferentes escalas de trabajo, para la definición y representación de las diferentes unidades a nivel nacional. Principalmente las coberturas están agrupadas en cinco clases bases (IDEAM, 2010):

- Territorios artificiales: Zonas que se han visto intervenidas en procesos de urbanización, compuestas por una población y con usos de suelo de características comerciales, industriales, de servicio o recreativas.
- Territorios agrícolas: Zonas establecidas para la producción de productos alimenticios o para el desarrollo de materia prima industrial, clasificada como usos de suelo dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pasto o zonas agrícolas heterogéneas.
- Bosques y áreas seminaturales: Zonas de cobertura vegetal de origen natural producto de cambios climáticos o procesos en la tierra como los de tipo boscoso, arbustivo, herbáceo, plantaciones forestales, afloramientos rocosos hasta suelos desnudos.
- Áreas húmedas: Zonas propensas a inundaciones o que están parcialmente cubiertos por agua y vegetación.
- Superficies de agua: Zonas compuestas por todo tipo de cuerpos de agua de curso permanente, intermitente o estacional.

Tabla 3.1: Coberturas de la tierra basada en metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Fuente: IDEAM,(2010)

Tipos de cobertura NIVEL I	Tipos de cobertura NIVEL II
Territorios artificiales	Zonas urbanizadas
	Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación
	Zonas de extracción minera y escombreras
	Zonas verdes artificiales, no agrícolas
Territorios agrícolas	Cultivos transitorios
	Cultivos permanentes
	Pastos
	Áreas agrícolas heterogéneas
Bosques y áreas seminaturales	Bosques
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
Áreas Húmedas	Áreas húmedas continentales
	Áreas húmedas costeras
Superficies de agua	Aguas continentales
	Aguas marítimas

3.4 Landsat 8: características

La octava versión del programa Landsat es denominada LDCM y tras su lanzamiento es renombrado como Landsat 8. Se compone de dos segmentos: el observatorio, que integra un radiómetro de barrido multicanal OLI y un radiómetro infrarrojo de dos canales TIRS, ver tabla 5.1, encargados de recopilar toda la información de la superficie terrestre en 11 bandas; el segundo segmento es el sistema terrestre, encargado de planificar y programar todas las tareas de LDCM, además, de administrar y distribuir sus datos.

Tabla 3.2: Especificación bandas Landsat 8. Fuente: IGAC, 2013

Bandas	**Longitud de onda**	**Resolución (m)**
1. Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
2. Azul	0.45 - 0.51	30
3. Verde	0.53 - 0.59	30
4. Rojo	0.64 - 0.67	30
5. Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
6. SWIR 1	1.57 - 1.65	30
7. SWIR 2	2.11 - 2.29	30
8. Pancromático	0.50 - 0.68	15
9. Cirrus	1.36 - 1.38	30
10. Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
11. Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Los productos LDCM son distribuidos en formato Geographical Tagged Image File Format (GeoTIFF) y son proporcionados bajo diferentes niveles de procesamiento por el United States Geological Survey (USGS). En la tabla 3.3 se encuentra información relacionada con el nivel 1 de tipo L1Gt / L1T: los productos Systematic Terrain Corrected de nivel 1 (L1Gt) contienen correcciones sistemáticas, empleando modelos digitales de elevación Modelo Digital de Elevación (DEM) y datos de las efemérides; los productos nivel 1 Terrain (L1T) tiene un procesamiento de corrección geométrica sistemática aplicadas empleando Ground Control Point (GCP), entregando los

productos en proyección cartográfica WGS84, Adicionalmente, cuentan con corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve.

Tabla 3.3: Especificaciones de productos LDCM a Nivel 1. Fuente: IGAC,2013

Características de los datos	Formato de datos Geo TIFF
	Re muestreo por Convolución Cúbica (CC)
	Norte arriba (MAP) de orientación
	Proyección cartográfica: UTM
	Datum al Sistema Geodésico Mundial: WGS84
	12 metros de error circular, 90 % de confianza con exactitud global para OLI
	41 metros de error circular, 90 % de confianza con exactitud global para TIRS
	Los valores de pixel en 16 bits

3.5 Corrección Geométrica

Es el proceso de transformación de coordenadas y estandarización de la proyección de la imagen a partir de una transformación polinomial de segundo grado basada en el uso de GCP (Richards y Richards, 1999), para la corrección de geometría, geo-referenciación y asignación de propiedades de escala (Kardoulas, Bird, y Lawan, 1996). El proceso de corrección geométrica consta de una serie de pasos que abarcan la localización de GCP, transformación de coordenadas y transformación de niveles de grises (Ambrosio, González, y Arévalo, 2002). Este concepto genera cambios en la posición de los píxeles de la imagen y de los Nivel Digital (ND).

3.5.1 Localización de GCP

Consta de la ubicación de GCP en la imagen con el fin de establecer relaciones geométricas de posición y escala, cuya precisión depende del número de GCP y su distribución uniforme, que se puede realizar ya sea manualmente o por algoritmos como el Kanade-Lucas-Tomasi (KLT). Finalmente para completarse este proceso se debe contar con una imagen o un mapa o los puntos tomados en tierra como referencia. Dentro de las recomendaciones de (Villegas, 2008) es que los puntos de control sean claramente identificables tanto en la cartografía de referencia como la imagen en proceso de corrección y no sujetos a cambios temporales como: cruces de carretera, edificios, calles, entre otros.

3.5.2 Transformación de coordenadas

El objetivo de este paso es estimar una función que relacione el producto a corregir y el de referencia a partir de la localización de los GCP en la imagen, mapa o elemento de referencia y así generar un polinomio linear de primer grado, obtenido por un ajuste de mínimos cuadrados y transforma las coordenadas y genera una nueva imagen corregida de distorsiones según la proyección de cartografía de referencia (Ambrosio y cols., 2002) y se transfieren los ND originales a la nueva posición, donde se calcula el nivel de gris de los píxeles en la nueva imagen corregida, desde un proceso de remuestreo (Brown, 1992).

3.6 Corrección radiométrica y atmosférica

La calibración radiométrica corrige los efectos de las condiciones de la atmósfera y de iluminación que ocasionan que las imágenes estén compuestas por diferentes valores de intensidad (Ariza, 2013). Por lo tanto, durante este proceso se convierten los valores numéricos, conocidos como ND, a Niveles de Reflectancia sin los efectos de dispersión

o absorción que se causan por la presencia de partículas en la atmósfera (Ariza, 2013).

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L \tag{3.1}$$

Donde:

L_λ: Radiancia espectral del sensor
ML: Factor multiplicativo de reescalamiento de radiancia específico de la banda
Qcal: Valor del pixel discretizados y calibrados del producto estándar
AL: Factor aditivo de reescalamiento de radiancia específico de la banda

Adicional, se corrige el efecto causado por los diferentes ángulos de incidencia de la energía electromagnética, causados por las diferencias de tiempo en que se toman las imágenes convirtiendo a reflectancia Top Of Atmosphere (TOA), corrigiendo el ángulo solar. Primero se debe calcular la reflectancia TOA (Ec.3.2) que posteriormente es corregida por el ángulo de incidencia solar (Ec.3.3).

$$\rho'_\lambda = M_\rho * Q_{cal} + A_\rho \tag{3.2}$$

$$\rho_\lambda = \frac{\rho'_\lambda}{\cos(\theta_{ZE})} \qquad \acute{o} \qquad \frac{\rho'_\lambda}{\sin(\theta_{SE})} \tag{3.3}$$

Donde:

ρ_λ: Reflectancia a TOA del sensor, con corrección del ángulo del sol
M_ρ: Factor de cambio de escala multiplicativo de reflectancia de la banda
Q_{cal}: Valores de pixeles de productos estándar cuantificados y calibrados ND
A_ρ: Factor aditivo de reescalamiento de reflectancia específico de la banda
θ_{SE}: Ángulo de elevación del sol local
θ_{ZE}: Ángulo cenital solar en grados

3.7 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide el grado de covarianza entre variables cuantitativas en una relación lineal cuyos valores absolutos oscilan entre -1 y 1. Un valor de índice igual o cercano a 1 y -1 indica una correlación real positiva o negativa y valores cercanos a 0 indican que no existe relación lineal.

$$R = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} \tag{3.4}$$

Donde:

σ_{xy} : covarianza (x,y)
σ_x : desviación estándar en la variable x
σ_y : desviación estándar en la variable y

3.8 Índices de vegetación

Un VI es una relación que se calcula entre valores de reflectancia a diferentes longitudes de onda (Gilabert y cols., 1997) para destacar el estado de las coberturas vegetales (Muñoz, 2013).

Debido a la cantidad de combinaciones existentes no hay, hasta el momento, una expresión matemática única o ideal para determinar el estado de las coberturas vegetales (Bannari y cols., 1995).

A pesar de que no existe un VI único, la mayoría de estos son desarrollados a partir de Índice de Vegetación de Radio (RVI) y Índice de Vegetación de Número (VIN), por

(Person y Miller, 1972).

$$RIV = \frac{R}{NIR} \tag{3.5}$$

$$VIN = \frac{NIR}{R} \tag{3.6}$$

Donde:

R = Es la reflectancia media en el canal rojo
NIR = Es la reflectancia media en el canal infrarrojo cercano.

3.9 Índice de área foliar (LAI)

EL LAI es una expresión adimencional, que se obtiene de la relación del área de una cubierta fotosintéticamnete activa sobre el área que esta ocupa en metros cuadros (m^2) y esta relacionado con procesos de intercambio de energía y gases entre la atmósfera y los ecosistemas. La importancia de este índice radica en que la cantidad y distribución de la cubierta vegetal es fundamental para estimar la captación de radiación solar, interceptación con el agua lluvia, y por consiguiente la eficiencia de los procesos de fotosíntesis, evapotranspiración y respiración (Watson, 1947). Desde este punto de vista, las vegetaciones bajas y de hoja estrecha presentarán un LAI diferente a otras, a pesar de que ocupen una mayor extensión.

3.10 Línea del suelo

En la firma espectral de los suelos (fig 3.2) se observa que la reflectancia de estos en la banda roja y infrarroja es similar y alta en suelos secos, y por el contrario, en suelos suelos húmedos, la reflectancia disminuye en ambas bandas. Para el cálculo de la línea del suelo se debe tomar una muestra de suelo desnudo y extraer los valores de la

banda roja (variable independiente) e infrarroja (variable dependiente) y posteriormente realizar una regresión lineal para conocer la ecuación de esta. De la ecuación resultante se extrae el valor de la pendiente y el intercepto, que son empleados en VI basados en el concepto de la línea del suelo como el PVI (Pereda, 2013). Si un punto tiene una alta reflectancia en el infrarrojo y baja en el rojo, el punto se ubicará fuera de la línea y cuanto mas alejado esté, mayor vegetación se tendrá en el píxel (Sánchez y cols., 2000).

4. Revisión Bibliográfica

La evolución de los sensores remotos ha generado gran expectativa en el campo de los índices espectrales, cuyo enfoque son las relaciones empíricas entre la información captada por los sensores y las variables biofísicas o propiedades de los diferentes tipos de coberturas de objetivo de estudio (Pellat y cols., 2005). Dichos índices se clasifican de acuerdo a la aplicación (tema, objeto o variable de estudio) en la que el índice se desarrolla. Actualmente sus usos abarcan el campo de la geología, el agua, el suelo, fuego y finalmente la vegetación, cuyo estudio normalmente se orienta hacia los patrones que se reflejan, la respuesta espectral y la estructura del índice espectral (Liu y Huete, 1995).

Los índices de vegetación pueden ser clasificados en tres grupos, basados en la pendiente, en la distancia y en transformaciones ortogonales. Los VI basados en la pendiente, son simples son ecuaciones entre algún canal del espectro visible (azul, verde o rojo) y el Infrarrojo Cercano (NIR) (Pereda, 2013). Se denominan de esta manera debido a que cualquier valor del índice puede producir una linea que pase por el origen empleando un sistema bi-espectral (en el eje X rojo y en el eje Y NIR) (Campo de Ferreras, Peña, Gandullo, y Cal, 2011). Como se observa en la figura 4.1, al comparar las pendientes de las lineas formadas por el origen y el valor del VI es claro que al aumentar el valor de la pendiente (positivo), el valor corresponderá a vegetación con mayor probabilidad (Muñoz, 2013). Este tipo de VI muestran el estado y la abundancia de la vegetación, minimizando los problemas introducidos por la iluminación cambiante a consecuencia de la variación topográfica. Estos índices se pueden ver afectados por un valor cero en el denominador, por esta razón se emplean normalizaciones (Gómez, 2004). Algunos de estos índices son NDVI, RVI,Transformed Vegetation Index (TVI).



Figura 4.1: Índices basados en pendiente: interpretación gráfica. Fuente: Muñoz,(2013)

Los VI basados en la distancia, son derivados del Perpendicular Vegetation Index (PVI): índice que será ampliado más adelante. El principal objetivo de estos índices es reducir o eliminar el efecto del suelo en zonas donde la vegetación se encuentra dispersa o es escasa. El diseño matemático de estos VI se fundamenta en la linea del suelo, que a groso modo, consiste en realizar una regresión lineal de una muestra de suelo desnudo con valores de la banda roja contra NIR para construir la ecuación $(ax + b)$ de la linea que mejor se ajusta a los datos (Gómez, 2004). Los VI basados en distancia emplean los valores de a (pendiente) y b (intercepto) de la linea del suelo como variables para su calculo (Pereda, 2013). Algunos de estos índices son el PVI, Difference Vegetation Index (DVI), SAVI.

Por último, los índices de transformación ortogonal, consisten en la transformación de bandas disponibles, con el objetivo de generar un nuevo conjunto de bandas espectrales no correlacionadas. Dentros de estos se puede encontrar el Análisis de componente (PCA), De Tasseled Cap (GVI), De Misra (tipo de transformanción) (MGVI).

Ratio Vegetation Index (RVI)

El Índice de Vegetación de Ratio (RVI) fue planteado por Jordan (1969), Tucker, Miller, y Pearson (1976) como una metodología alternativa para medir la biomasa

remotamente a partir de análisis de reflectancias espectrales en el canal rojo e infrarrojo, ecuación 4.1, ya que encontraron que la razón entre estas longitudes de onda permitían un estudio aproximado del comportamiento de la vegetación. Las metodologías convencionales involucraban el corte y medición manual de biomasa por unidad de área: proceso que con el tiempo afectaba la productividad. .

$$RVI = \frac{\rho_{RED}}{\rho_{NIR}} \tag{4.1}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en el canal rojo

Tucker y cols. (1976) destacan que el RVI además de ser una herramienta útil para medir el área foliar, también permitía detectar la biomasa de manera remota como método alternativo al trabajo de campo tedioso, ineficiente y con el tiempo dañino para vegetación estudiada. Luego Jordan (1969) encontró que el RVI era una metodología de estudio independiente a la época del año, un método más preciso para medir el LAI y determinar la relación entre este y el contenido de clorofila, siempre y cuando las especies estudiadas fueran homogéneas o similares. Según Tucker y cols. (1976) estas ventajas son posibles gracias a que el canal rojo permite estimar la cantidad de biomasa presente en el dosel, debido de la fuerte absorción de clorofila por su base fisiológica, además en el canal infrarrojo el porcentaje de reflectancias es alto por falta de absorción junto con la dispersión de las hojas. Tucker y cols. (1976) logran determinar que la correlación del RVI con la biomasa es superior al 0.79.

Dentro de las desventajas encontradas por Jordan (1969) se tiene que los datos para este índice deben ser capturados preferiblemente al medio día para evitar la influencia de la sombra de las nubes. El índice no funciona con imágenes nubladas, debido a que el grosor de la capa de nubes interfiere en la intensidad de la luz incidente.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) fue propuesto por (Rouse Jr, 1972) para evaluar cualitativa y cuantitativamente la cantidad de biomasa (estado de la vegetación) en las cubiertas vegetales, con un proceso de normalización que genera una escala de medición lineal entre -1 y 1 permitiendo un estudio del estado de la vegetación por tanto sus diferentes estados. Para estudiar la vegetación el índice emplea el rango de longitud de onda correspondiente al infrarrojo y rojo, como se muestra en la ecuación 4.2, en la que se establece la relación entre la reflectividad y las características de la coberturas evaluadas.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \tag{4.2}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en el canal rojo

El índice además de evaluar el estado de la vegetación, permite diferenciar entre varios tipos de cobertura como agua, suelo o roca a partir de la diferencia y posterior normalización entre la reflectancia del canal infrarrojo y del canal rojo.

Cuando la actividad fotosintética es óptima el comportamiento espectral de la vegetación presenta alta absorción en el canal rojo y baja absorción en el infrarrojo, clasificando de esta manera los resultados con valores mayores a 0 como presencia de vegetación, que entre más aproximado esté a 1 mejor será el estado de ella o mayor presencia habrá. Una ausencia de actividad foto-sintética causa bajos valores de absorción en el rojo y alta absorción en el infrarrojo, cuyo comportamiento tiende a ser el de una cobertura de agua, clasificada en los rangos de valor menor a 0. Finalmente el valor 0 nos aproxima a una superficie de suelo desnudo, cuya absorción y reflectancia en ambos canales tiende a ser igual.

A partir del NDVI es posible distinguir presencia de rocas, suelo desnudo, vegetación, valores mal tomados o ruido de la imagen, generando herramientas para el monitoreo de coberturas por su relación con la estructura de dosel y procesos de fotosíntesis. Por su facilidad de uso, de procesamiento y capacidad de análisis de grandes extensiones de terreno es uno de los índices más utilizados en el estudio de vegetación a nivel regional o global (Tucker y Sellers, 1986).

Debido a la forma como se calcula este índice no discrimina características como brillo del suelo, color del suelo, componentes atmosféricos, además requiere calibración de detección remota, no distingue de manera precisa entre suelo y vegetación en píxeles muy cercanos y sobre estima el porcentaje de cobertura . El uso de este índice es poco eficiente en zonas donde la proporción de vegetación supera el 50 % del total del área estudiada debido a que se satura.

Yellow Vegetation Index (YVI)

En 1976 Kauth y Thomas desarrollaron cuatro VI entre ellos el Índice de Vegetación Amarillo (YVI), ecuación 4.3, diseñado a partir de métodos empíricos sin tener en cuenta la interacción y relación entre la atmósfera, el suelo y la vegetación. Los autores emplean el método Tasselled- Cap para convertir los cuatro canales en un nuevo conjunto que facilita la interpretación y representación del brillo de la imagen, el verdor y la humedad del suelo, adicionalmente realizan una transformación ortogonal que crea un espacio 4D en la que evalúa el desempeño de cada canal para estudiar fenómenos importantes del desarrollo del cultivo como las señales del suelo, procesos de desarrollo de la cosecha.

$$YVI = (-0.899 * \rho_{GREEN} + 0.428 * \rho_{RED} + 0.076 * \rho_{NIR1} - 0.041 * \rho_{NIR2}) \tag{4.3}$$

Donde:
ρ_{GREEN} : reflectancia en el canal verde del 500:600
ρ_{RED} : reflectancia en el canal rojo del 600:700
ρ_{NIR1} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano del 700:800
ρ_{NIR1} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano del 800:1100

Su método de estudio permite identificar el comportamiento de la vegetación o de las coberturas en cada canal y destacar los procesos que cada uno puede captar y resaltar mejor. En primera instancia analizan que los cultivos empiezan su desarrollo sobre la línea del suelo y que a medida que este crece la respuesta en el canal 3 (0.75 nm) también lo hará por la presencia de celulosa en la planta. Luego en su punto máximo de productividad la reflectancia en las longitudes de onda 0.65 nm disminuirán por el alto porcentaje de clorofila, que es absorbente.

(Kauth y Thomas, 1976a) destacan que es importante tener en cuenta la geometría de adquisición, con el fin de evitar la sombra generada por la geometría de la toma, también que a medida que las condiciones de observación como la geometría de iluminación, vapor de agua en forma de neblina o nubes cambian, las reflectancias también lo harán. Junto con ello destacan que el tipo de suelo en que se cultiva es un factor que influyente, debido a que en suelos oscuros la sombra no genera tantas interferencias o no se distingue como cuando el suelo en la zona de estudio es claro.

Jackson y cols. (1983) sugieren que el Yellow Vegetation Index (YVI) se use para evaluar los cambios en la cubierta vegetal y para corregir los efectos atmosféricos como la neblina y absorción causada por el vapor de agua atmosférico.

Años después Arkebauer en 2005 analizan las propiedades radiativas de las hojas, destacando que se pueden comparar con las propiedades físicas de las hojas a partir del intercambio de energía radiante, debido a que en el proceso de absorción de la radiación se genera la transformación a energía química a través de la fotosíntesis. Adicional al enfoque de Kauth y Thomas (1976a) de estudiar el brillo, el verdor y humedad del suelo, deciden agregar la componente temperatura por su estrecha relación en el intercambio de energía en la hoja y debido a que ella permite dar señales de tasa de respiración, de crecimiento y de productividad.

Dentro de los análisis ambos estudios concuerdan con que las propiedades ópticas de la hoja cambian durante el desarrollo y a medida que la composición del pigmento y su concentración lo hacen. Y como elemento adicional Arkebauer (2005) encuentra que la alta capacidad de absorción en los canales de longitud de onda visible se debe a la presencia de pigmentos de vegetación no solamente la clorofila sino también por las xantofilas y los carotenoides.

La alta capacidad de absorción en la canal de onda visible se debe a la presencia de pigmentos vegetales, clorofilas, xantofilas y carotenoides.

Perpendicular Vegetation Index (PVI)

El Índice de vegetación Perpendicular PVI fue desarrollado por Richardson y Wiegand (1977). Los autores retoman el razonamiento de Kauth y Thomas (1976b), quienes a partir de un estudio de reflectancia del suelo determinan que la distribución espacial de los datos de reflectancia del suelo se reducen a una linea en dos dimensiones. Richardson y Wiegand (1977) se plantean que los datos de reflectancia del fondo del suelo podrían llegar a entregar información valiosa relacionada con la vegetación empleando VI.

Teniendo en cuenta la premisa anterior, Richardson y Wiegand (1977) estudiaron las condiciones del suelo, vegetación, agua y nubes. Dentro de la vegetación analizada, se encuentran cultivos de sorgo[1], estudiados mediante datos de reflectancia. La investigación mostró que los puntos de reflectancia se alejan de linea del suelo de manera perpendicular: los campos de sorgo cuentan con un LAI mayor, hecho que se corresponde a una mayor densidad de vegetación, por consiguiente la distribución espacial de los datos dista en mayor proporción de la linea del suelo.

En otro escenario se contempló cultivos de sorgo, siendo las condiciones climáticas, del suelo y la atmósfera generalmente secas. Realizando calculo de algunos puntos se demostró que presentaban poca o casi nula desviación de la línea del suelo. Finalmente, se realiza un último experimento en condiciones de irrigación, dando como resultado que los puntos estudiados fueran más allá de la linea del suelo. De esta manera, los autores concluyen que la medición de dicha distancia (punto en cuestión - linea del suelo), puede emplearse como un indicador de vegetación. La ecuación 4.4 es el modelo matemático del PVI (Richardson y Wiegand, 1977).

$$PVI = \frac{\rho_{NIR} - a\rho_{RED} - b}{\sqrt[2]{a^2 + 1}} \tag{4.4}$$

[1]Cereal similar al maíz, tanto en apariencia como en aportes nutricionales.

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en el canal rojo
a : hace referencia a la pendiente de la linea del suelo
b : hace referencia a la distancia que existe entre la linea del suelo y el origen

Para efectuar el calculo del PVI, en primera instancia se debe hacer el cálculo de la linea del suelo o también conocida como linea del fondo del suelo. Para esta operación se debe correr una regresión lineal entre ρ_{NIR} y ρ_{RED} del suelo, es decir, se debe extraer una muestra de la imagen en donde se observe de manera clara que la zona corresponde a suelo desnudo (bare soil). Posteriormente se traza una linea que mejor se ajuste a los valores del suelo: se efectúa la regresión con el objetivo de conocer los valor de a y b.

El estudio mostró que los puntos que hacen referencia al agua se desvían en sentido contrario al de la vegetación, teniendo como punto de referencia la linea del suelo:en el caso de la vegetación se presenta una fuerte absorción de la radiación electromagnética en la región del rojo y una alta reflectividad en la región NIR, mientras tanto en los cuerpos de agua la respuesta espectral es mayor en la canal roja. Lo cual implica, que el conocer la linea del suelo ayuda a la determinación de bordes de masa de agua.

Finalmente, este índice permite conocer la posición de un píxel en la linea del suelo, ventaja que ningún otro índice tiene, en pocas palabras permite conocer la intersección entre la vegetación y la linea del suelo y por ello menos sensible a los efectos radiativos del suelo.

Los posibles resultados al calcular el PVI son :
$PVI = 0$: Suelo desnudo
$PVI > 0$: Vegetación
$PVI < 0$: Cuerpo de agua

Soil Adjusted Vegetation Índex (SAVI)

El Índice de Vegetación de Suelo ajustado (SAVI) fue planteado por Huete (1988):

diseñado con la finalidad de corregir el efecto de absorción atmosférico y minimizar la influencia de la radiación del suelo, para discriminar las coberturas vegetales del suelo a través de la percepción remota. Huete (1988) se baso en un sistema dinámico suelo-vegetación que corrige las interferencias del suelo a partir de la introducción de una constante "L"denominada ajuste del suelo: establecido desde un modelo simplificado de transferencia radiativa. La ecuación 4.5 representa el modelo del índice SAVI.

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} * (1 + L) \tag{4.5}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en el canal roja
L : ajuste del suelo

El índice de vegetación SAVI está conformado por las longitudes de onda infrarroja, roja y el factor de ajuste, que puede variar según sean las proporciones de vegetación presentes en la cobertura estudiada; el aumento de su valor representa una disminución de las variaciones inducidas por el suelos. El valor de L oscila entre -1 y 1; cuando el valor de L es 0, para escenas donde la cobertura vegetal sea menor al 15 % o se evidencien suelos expuestos, el SAVI toma el valor de NDVI.

Dentro de las ventajas que ofrece el SAVI se encuentra la reducción de la influencia del suelo a partir del uso de las longitudes de onda roja e infrarroja y puede ser una herramienta para describir sistema suelo-vegetación a partir de datos de percepción remota, corrigiendo interferencias relacionadas con el color, humedad y materia orgánica del suelo.

Huete (1988) en su estudio emplea un valor de $L = 1$ para densidades de vegetación muy bajas, $L = 0.5$ para densidades de vegetación intermedias y $L = 0.25$ para densidades de vegetación muy alta.

Dentro de las desventajas se encuentra que el SAVI, en condiciones bajas de vegetación no distingue la presencia de ella, en proporciones altas de vegetación el VI

no capta suficientes señales de suelo. El uso de este índice resulta poco eficiente donde la superficie (fondo del suelo) presenta una sola condición (húmeda, seca, claro u oscuro).

Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)

El Índice de Vegetación de Resistencia Atmosférica (ARVI) fue propuesto por Kaufman y Tanre (1992) como alternativa para solucionar las limitaciones del NDVI respecto a los efectos atmosféricos. Este índice nace de la premisa realizada por Huete (1988) quien sugirió que el NDVI podría ser modificado para contrastar las alteraciones inducidas por la atmósfera.

El índice es fundamentado en que la atmósfera afecta significativamente el canal rojo, por lo tanto aplican un proceso de auto-corrección calculando un parámetro que minimiza las alteraciones mediante la información radiométrica contenida en la canal azul de las imágenes multiespectrales, generando una diferencia entre los canales azul y rojo como se muestra en la ecuación 4.6.

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RB}}{\rho_{NIR} + \rho_{RB}} \tag{4.6}$$

Donde:

$$RB = \rho_R - \gamma[\rho_R - \rho_B] \tag{4.7}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en el canal rojo
ρ_{BLUE} : reflectancia en el canal azul
ρ_{RB} : es la diferencia entre B y R es la reflectividad relacionada con la dispersión molecular y la absorción gaseosa para las correcciones de ozono

γ : factor de auto-corrección atmosférico que depende de los tipos de aerosol

ARVI opera realizando ajuste atmosférico al NDVI empleando el canal azul, rojo e infrarrojo cercano y aplicando una constante γ que usualmente toma el valor de 1 o por defecto 0.5 si las condiciones del entorno- atmósfera no son conocidas, pero puede oscilar entre 0 y 1 cuando es calculado: cabe resaltar que se deben conocer las condiciones. Dicho factor de auto- corrección permite que el índice sea 4 veces menos dependiente de las condiciones atmosféricas que el NDVI hasta en ambientes marítimos y continentales y tenga mucha más resistencia en zonas de vegetación.

Finalmente se encontró que el ARVI depende del tipo de superficie y de las propiedades radiativas de la atmósfera, que presenta baja resistencia en ambientes áridos y su resistencia presenta dependencia del coeficiente de corrección γ, respecto a lo que se recomienda utilizarla como 1 si no se conoce las condiciones o el modelo.

Global Environmental Monitoring Index (GEMI)

El Índice de Monitoreo del Medio Ambiente Global (GEMI) es planteado por Pinty y Verstraete (1992) y nace de la identificación de errores al usar los índices NDVI y RVI. Puntualmente, se detectó problemas con la dispersión de Rayleigh a causa de la presencia de aerosoles en la atmósfera, trayendo como consecuencia una disminución en los valores de los VI anteriormente mencionados. Para contrarrestar el efecto atmosférico se realizó una relación entre el NDVI y RVI empleando el Modelo de Transferencia Atmosférica (Koepke, 1989). Con base en este modelo Pinty y Verstraete (1992) diseñaron tres tipos de atmósferas (clara, media y turbia), concluyendo que es necesario efectuar modificaciones a los índices, de tal manera que se corrija el problema, pero se conserven la potencialidades de los mismos.

El Global Environmental Monitoring Index (GEMI) se caracteriza por disminuir considerablemente las distorsiones inducidas por la atmósfera en los resultados de los VI. Para lograr esta ventaja el índice emplea una constante η, que es calculada a partir de las longitudes de onda infrarrojo y rojo. A continuación, en la ecuación 4.8 se presenta

el modelo matemático de este índice. Para el cálculo del η se debe hacer uso de la ecuación 4.9.

$$GEMI = \eta * (1 - 0.25 * \eta) - \frac{(\rho_{RED} - 0.125)}{(1 - \rho_{RED})} \tag{4.8}$$

Donde:

$$\eta = \frac{2 * ({\rho_{NIR}}^2 - {\rho_{RED}}^2) + 1.5 * \rho_{NIR} + 0.5 * \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5} \tag{4.9}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en el canal rojo

Finalmente, se encontró que el GEMI es menos afectado por condiciones de iluminación, muestra las condicones de la superficie de manera más fiel, conserva las propiedades del RVI, es decir trabaja bien sobre vegetación baja. También conserva la propiedades de NDVI: trabaja bien sobre vegetación profunda. El valor del GEMI varia entre 0 y +1: si RVI toma su valor máximo o el NDVI se encuentra en cero y +1.

A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI)

El "A Modified Soil Adjusted Vegetation Índex (MSAVI)"fue propuesto por Qi y cols. (1994) con el fin de mejorar la sensibilidad del SAVI a la vegetación, incrementar su rango dinámico para reducir el fondo del suelo, reemplazando el factor de ajuste de suelo L por una función variable como se muestra en la ecuación 4.10, debido a que identificaron que dicho factor dependía de la proporción de vegetación y que variaba

inversamente proporcional a ella.

$$MSAVI = \frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR+1})^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)}}{2} \tag{4.10}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en la canal infrarrojo cercano
ρ_R : reflectancia en la canal roja

Para modificar el factor de ajuste del suelo realizaron un estudio en campo basado en mediciones espectrales, mediante el cual observaban el cambio en la respuesta variando la densidad del dosel y la cantidad de humedad del suelo. De esta forma establecen un nuevo enfoque para la constante L.

Dentro de sus limitaciones la más destacable es su campo de acción, debido a que su mejor desempeño únicamente se presenta en zonas donde el porcentaje de vegetación es muy baja o en cultivos en etapa de inicio, debido que en proporciones altas el VI tiende a comportarse como el NDVI y en porporciones intermedias su comprtamiento se asemejara al SAVI.

A green atmospherically resistant vegetation index (GARI)

Gitelson y cols. (1996) proponen el Índice de Vegetación de Resistencia Atmosférica Verde (GARI) como alternativa ante los problemas que genera la atmósfera en un estudio de vegetación al utilizar el canal rojo. Los autores analizan que la combinación de los canales NIR y Rojo para estimar el estado de la vegetación es muy usada en diferentes VI y que se producen saturaciones con concentraciones bajas de Clorofila (Chl) o problemas con el efecto atmosférico. Para ello plantean el uso de los canales

rojo, verde, azul e infrarrojo como se muestra en la ecuación 4.11.

$$GARI = \frac{\rho_{NIR} - [\rho_{Green} - (\rho_{blue} - \rho_{red})]}{\rho_{NIR} + [\rho_{Green} - (\rho_{blue} - \rho_{red})]} \tag{4.11}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en la canal infrarrojo cercano
ρ_G : reflectancia en la canal verde

La creación del índice fue fundamentado a partir del ARVI y enfocado hacia dos propósitos, el primero de ellos estimar la clorofila y segundo evitar afectaciones de otros factores. Para ello lograron demostrar que un VI estimaba mejor las concentraciones de clorofila si en el se usaba el canal verde, luego de ello descubrieron que adicionar el uso del canal rojo permitía una relación con el contenido de Chl-a. Finalmente tienen en cuenta el planteamiento del ARVI para dar la capacidad de resistencia a partir de los canales infrarrojo y azul.

Enhanced Vegetation Index (EVI)

El Índice de Vegetación Mejorado (EVI) fue desarollado por el equipo Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Matsushita y cols., 2007) con base en la detección de errores introducidos por diferentes índices. Para esta caso, los errores fueron identificados en uno de los primeros índices creados (NDVI). La creación del EVI se fundamenta en que la simplicidada de la estructura del NDVI, haciendo referencia a su ecuación, lo hace susceptible a problemas por atmósfera, fondo del suelo y efectos topográficos.

El EVI integra dentro de su ecuación la canal azul como complemento a la canal infrarroja y roja del espectro electromagnético. Con la integración la canal azul no se pretende contribuir en gran medida a la obtención de información biofísica de la vegetación, por el contrario la función de esta canal es reducir el efecto del ruido y la incertidumbre producida por los aerosoles. Con la creación de este nuevo índice se

pretende corregir los errores relacionados con la abundancia de biomasa, mejor segregación de la señal dosel-fondo y efectos topográficos. A continuación, en la ecuación 4.12

$$EVI = G * \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{(\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{RED} - C_2 * \rho_{BLUE}) + L} \tag{4.12}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo
ρ_{RED} : reflectancia en el canal rojo
C_1 : coeficiente utilizado para corregir la dispersión de aerosoles en la canal roja por el uso de la canal azul
C_2 : coeficiente utilizado para corregir la dispersión de aerosoles en la canal roja por el uso de la canal azul
L : factor de ajuste del suelo
G : factor de ganancia
Según Matsushita y cols. (2007), generalmente se usa $G = 2.5$, $C_1 = 6.0$, $C_2 = 7.5$ y $L = 1$.

Dentro de las ventajas identificadas se encuentra que el EVI logra una mayor sensibilidad a las regiones de biomasa alta, es una herramienta apta para monitoreo de vegetación en zonas de baja influencia topográfica, reduce los efectos adversos a factores ambientales e integra un factor de ajuste L en su denominador. El valor del rango para EVI es de -1 a +1, donde los valores entre 0.20 a 0.80 corresponden a vegetación saludable.

Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Gitelson y cols. (1996) fundamentan la creación del índice en la capacidad de los animales de detectar la presencia de vegetación a partir del rango espectral verde. El Índice de Digerencia Normalizada Verde (GNDVI) conserva el concepto de

normalización, como se muestra en la ecuación 4.13, es decir su rango de valor de respuesta varía únicamente entre -1 y 1, con el fin de facilitar el análisis de datos. A partir del estudio los autores descubren que utilizar el canal verde no solamente permite detectar mejor las concentraciones de clorofila, medir la tasa de fotosíntesis y monitorear el estrés de la planta, sino que también era un VI más resistente a los efectos atmosféricos.

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Green}}{\rho_{NIR} + \rho_{Green}} \tag{4.13}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{Green} : reflectancia en el canal verde

En primera instancia los autores realizaron los estudios a nivel de hoja, probando el VI en diferentes pigmentos con el fin de determinar su capacidad y variabilidad respecto a ese factor. Dentro de sus resultados encontraron que llegaba a ser hasta 5 veces más sensible a concentraciones de Chl-a, debido a que en el canal verde hay mejor correlación con la detección de la concentración y al estudio del estrés de la planta.

El índice fue desarrollado dentro de un rango normalizado en donde cada evaluación sobre una superficie es representado por un valor entre -1 y 1, aquellos valores superiores a 0 reflejan la presencia de vegetación, una actividad fotosintética específica y un comportamiento especial. Por otro lado, valores inferiores a 0 representa ausencia de vegetación y en este caso la presencia de áreas de captación de agua y hasta nitrógeno. Pero es importante tener en cuenta que dentro de las recomendaciones establecen no aplicar en zonas con gran variación de especies vegetales debido a que suele saturarse y no cuentan con los suficientes estudios para corroborar su efectividad y debe contar con buena iluminación .

Difference Vegetation Index (DVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia (DVI) es planteado por Richardson y Wiegand (1977) se basan en determinar la relación que existe entre la reflectancia del suelo y el desarrollo de la vegetación. A continuación, en la ecuación 4.14 se presenta el modelo matemático del DVI.

$$DVI = \rho_{NIR} - \rho_{RED} \tag{4.14}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en la canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en la canal roja

Este índice se caracteriza en ser una combinación lineal. Con su desarrollo se pretende efectuar estudios de biomasa, condiciones de la vegetación, del suelo y el agua, basados en un análisis de la linea del suelo. Dentro de las ventajas encontradas por Richardson y Wiegand (1977) se encuentra la facilidad de aplicación del DVI, mejor distinción entre el suelo y la vegetación y finalmente, se desempeña de mejor manera en condiciones de LAI bajas.Una de las debilidades encontradas en el DVI es que no tiene en cuenta la diferencia entre reflectancia y luminosidad causada por los efectos atmosféricos o por la sombras. Adicionalmente, este VI es sensible a altas densidades de vegetación.

Al momento de aplicar el DVI y obtener un valor de cero indica que se trata de suelo desnudo, valores inferiores a cero sugieren agua y valores superiores a cero indican vegetación.

Transformed Vegetation Index (TVI) e VI

Deering (1975) plantea el Índice de Vegetación (VI) y el Índice de Vegetación Transformado (TVI): sus modelos matemáticos se presentan en las ecuaciones 4.15 y

4.16 respectivamente. Más adelante Tucker (1978) realiza un experimento con datos de espectroradiómetro, para evaluar y cuantificar varias combinaciones lineales de rojo e infrarrojo: en condiciones de biomas, contenido de agua, y clorofila simulados. Dentro de las combinaciones que se usan se encuentra el ratio $\frac{RED}{NIR}$, $\sqrt[2]{\frac{RED}{NIR}}$, $RED - NIR$, VI, TVI: para el estudio se emplean tres conjuntos de datos de los meses junio, septiembre y octubre. Su estudio se fundamenta en que existe un aumento en el uso de combinaciones de este tipo, pero es evidente la falta de detalles en el análisis de las limitaciones de las aplicaciones para monitorear la vegetación con estos modelos: conocer bien las limitaciones permitiría obtener un máximo beneficio de una combinación de canales.

$$VI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \tag{4.15}$$

$$TVI = \sqrt[2]{\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} + 0.5} \tag{4.16}$$

Donde:
ρ_{NIR} : reflectancia en el canal infrarrojo cercano
ρ_{RED} : reflectancia en el canal roja

Tucker (1978) en primera instancia deriva el VI, pero opta por agregar una raíz cuadra y una constante (0.5) para evitar trabajar con valores negativos dado origen al TVI. Dentro de las ventajas encontradas esta que las combinaciones de rojo e infrarrojo permiten monitorear la biomasa fotosintéticamente activa del dosel, el VI y TVI derivados de datos landsat se pueden usar para monitorear pastizales y cosecha de trigo, existe una relación estrecha entre el TVI y la biomasa, esto permitiría hacer seguimiento de los cultivos como una cobertura del suelo, el incremento de la biomasa y el LAI, también se podría tener inferencia fenológicas para cierto tipo de cultivos y finalmente $\frac{RED}{NIR}$, $\sqrt[2]{\frac{RED}{NIR}}$, $RED - NIR$, VI, TVI mostraron ser muy sensitivos a la cantidad de de vegetación fotosintéticamente activa presentes en el dosel de la vegetación. Una de las desventajas identificadas es que la acumulación de estados de muerte en el dosel de la vegetación afecta en gran medida las mediciones de la

vegetación verde.

Terminado el proceso de revisión y clasificación de los índices de vegetación, se concluye que el mejor método para estudiar el estado de la vegetación o de las coberturas de manera remota, es a partir de los VI (a gran escala o en grandes extensiones de terreno). Teniendo en cuenta cuatro variables: costo, resolución espacial, espectral y radiométrica se elige el producto a utilizar para ejecutar el estudio, en este caso, se elige trabajar con productos Landsat 8, distribuidos por la USGS debido a su facilidad de acceso, procesamiento y cubrimiento, además, cuentan con correcciones en la toma e información de metadatos.

Como parte de la revisión bibliográfica, se determina que para este estudio resulta pertinente aplicar, analizar y comparar los 13 VI documentados, que son el resultado de revisar aproximadamente cuarenta publicaciones con el fin de realizar un estudio más completo, poder estudiar las diferencias que los caracterizan y analizar la forma en que los VI miden la vegetación a partir de la información captada por un sensor. Adicionalmente durante la recopilación de la información, muchos autores sugieren realizar los estudios de coberturas remotamente comparando mínimo 2 épocas del año, con el fin de evaluar y documentar el comportamiento de las coberturas, tanto en sequía como con presencia de lluvia.

5. METODOLOGÍA

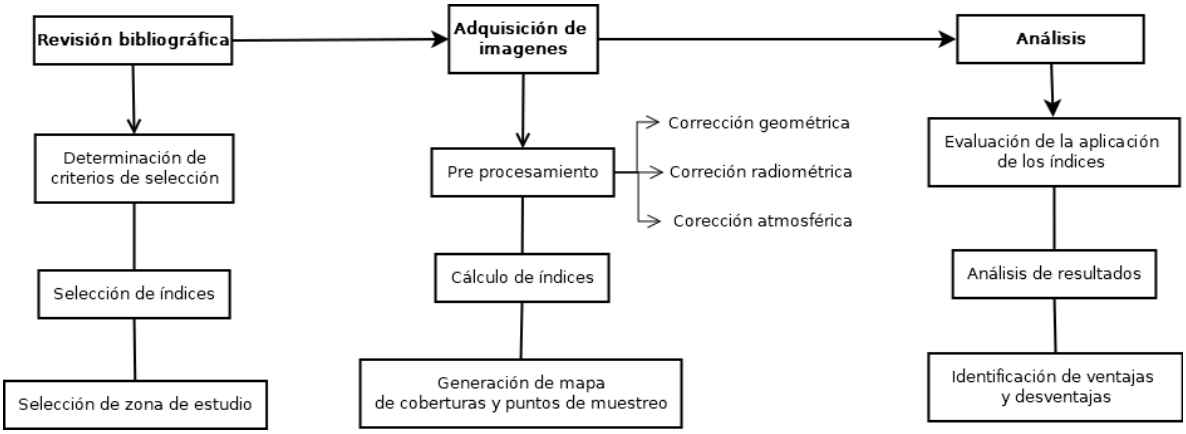


Figura 5.1: Metodología. Fuente: autores

5.1 Revisión Bibliográfica

El proceso de revisión bibliográfica consiste en consultar los artículos fuentes de creación de diferentes VI y publicaciones cuya metodología se haya enfocado en aplicar y estudiar las respuestas los índices. La consulta debe limitarse en este caso a toda publicación que sea de libre acceso, para ello nos basamos en el capítulo de antecedentes, específicamente en los trabajos realizados por Bannari y cols. (1995) y Xue y Su (2017), que en sus documentos hacen cortas reseñas y enlistan la mayoría de los índices que existen hoy en día.

En el apartado 2 y 4 se presenta la revisión bibliográfica de 45 publicaciones enfocadas al estudio o presentación de diferentes índices de vegetación, que son tenidos en cuenta para la selección.

5.1.1 Determinación de criterios de selección y selección de índices.

Para la selección de los índices a evaluar se realiza el estudio bibliográfico que permite conocer los fundamentos de creación, formación y alcance de los modelos, dando como resultado las bases teóricas sobre las que apoyarse para el desarrollo del estudio. Como criterios pre establecidos se tiene: índices enfocados al estudio y clasificación de vegetación e índices que se ajusten a la resolución espectral de Landsat 8.

Una vez se establecen los criterios, se procede a aplicar los filtros de selección en la lista de índices consultados y reseñados en la revisión bibliográfica.

5.1.2 Selección de zona de estudio

Colombia se encuentra ubicado al noroccidente de la región de América del Sur. Su relieve es determinado por tres cordilleras: la occidental, que se caracteriza por ser montañosa; la Central; y la Oriental, región plana.

También se caracteriza por sus diferentes relieves, ecosistemas y climas, que dan paso a un amplio grupo de coberturas que se basan en criterios fisonómicos de altura y densidad. Respecto a lo anterior, en el territorio colombiano se cuenta con cinco grandes grupos de clasificación de coberturas: territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y cuerpos de agua (IDEAM, 2010).

Para la selección de la zona de estudio se establecieron tres criterios principales: el primero de ellos, es realizar el estudio en una zona con variedad de coberturas; el segundo, elegir imágenes con un porcentaje de nubes menor al 40 %; el tercero, seleccionar una zona en el Valle del Cauca. Basados en este criterio se seleccionan dos imágenes satelitales Landsat 8 del año 2017: una del mes de abril y la otra del mes de diciembre, con un porcentaje de cobertura de nubes del 33.11 % y 36.54 % respectivamente. Dichas imágenes capturan la región norte y centro del Valle del Cauca, como se muestra en la figura 5.2 , compuesta por cuerpos de agua, vegetación espesa, cultivos y zona urbana.

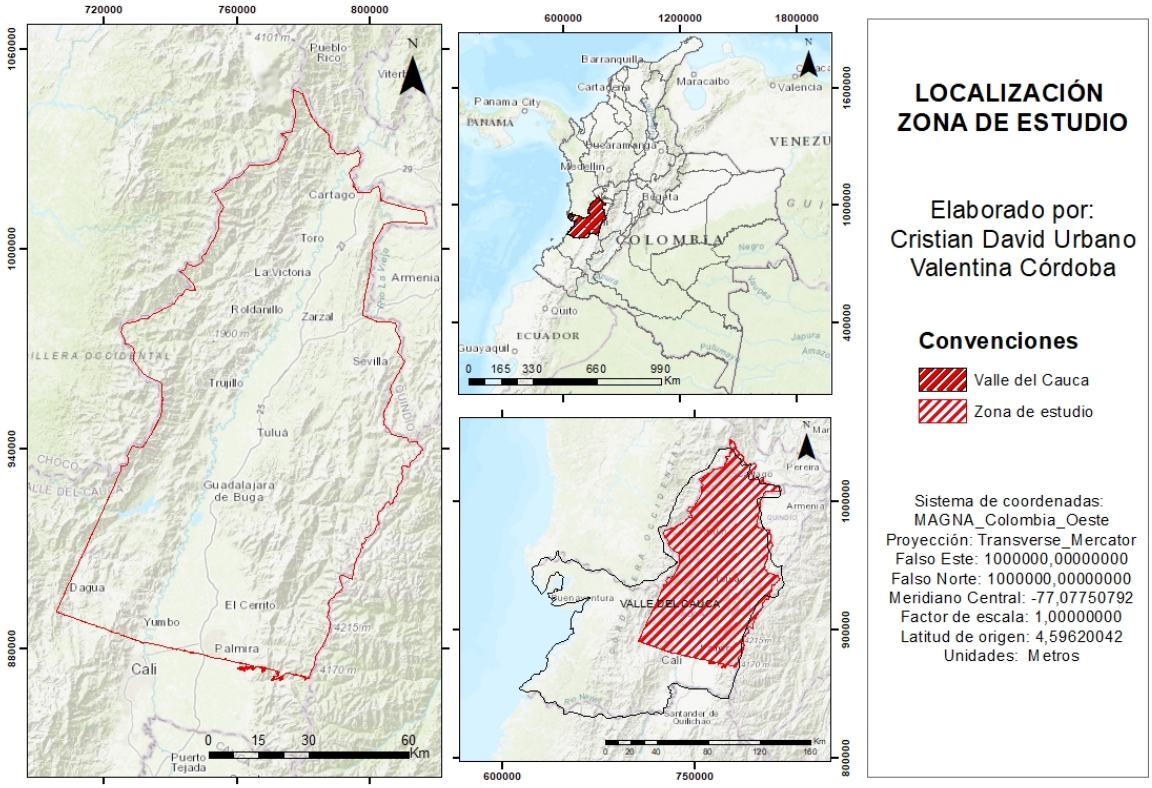


Figura 5.2: Zona de estudio. Fuente: autores

La primera imagen es del 22 de abril del 2017, según el boletín climatológico mensual del IDEAM abril es el inicio de la temporada lluviosa, con aumentos notorios de las precipitaciones respecto a los meses anteriores, destacándose como el mes más lluvioso de la primera temporada aproximadamente con precipitaciones entre 100 y 300 mm en el Valle del Cauca.

La segunda de las imágenes es del 18 de diciembre del 2017, basados en el boletín climatológico del IDEAM se determina que es un mes de transición de temporadas, por lo que se presenta disminución de precipitaciones, con un aproximado en el Valle del Cauca de 50 y 100 mm. El estudio del boletín climatológico mensual se realiza con el fin de identificar las condiciones aproximadas de la zona con el fin de aplicarlo al análisis de los índices de vegetación.

5.2 Adquisición de imágenes

Las imágenes se obtienen en el servicio de Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), donde se descargan las dos imágenes LANDSAT 8 correspondientes a las fechas anteriormente mencionadas, por su proximidad a la fecha de generación de coberturas de la C.V.C, por su porcentaje de nubes y por la diferencia de precipitaciones. En la tabla se presentan las características de las imágenes seleccionadas.

Tabla 5.1: Información de imágenes utilizadas. Fuente: USGS

Información	**Imagen Abril**	**Imagen Diciembre**
Sensor	Landsat 8	Landsat 8
Landsat Scene ID	LC80090572017112LGN00	LC80090572017352LGN00
Path	9	9
Row	57	57

Los productos Landsat 8 requieren una serie de ajustes con el fin de corregir perturbaciones atmosféricas, geométricas, radiométricas y de rotación, todo eso se realiza con métodos automatizados en el lenguaje de programación Python en el que también se incluye el cálculo de los índices.

5.2.1 Pre procesamiento

5.2.1.1 Corrección geométrica

Los productos *LandSat* 8 cuentan con un nivel de procesamiento $L1T$, esto quiere decir que los datos incluyen calibración geométrica de tipo sistémico, corrección por puntos de control en terreno GCP o también conocida como corrección de precisión asistida por chips en tierra, finalmente se integra un DEM para corregir las distorsiones de paralaje introducidas por el relieve local (Wulder y cols., 2019). La calidad de esta corrección varia en gran medida con las versiones anteriores de *LandSat*, debido al

diseño de barrido de su sensor (pushbroom sensor design) y a la integración de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), con el objetivo de obtener la posición externa de manera directa y no depender de la inferencia usando los GCP. Esta mejora se ve reflejada en la disminución del error cuadrático de la geolocalización circular: menor a doce metros (12m) (Roy y cols., 2014).

5.2.1.2 Corrección radiométrica

Con la calibración radiométrica se busca corregir los efectos de dispersión y/o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera y el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar, mejorando la precisión de las medidas de reflectancia.

El proceso de calibración radiométrica inicia con la conversión de los ND de las imágenes, a magnitudes físicas de radiancia *Ecuación* (3.1) . Posteriormente se calcula la relación que existe entre la energía incidente y la reflejada, conocida como cálculo de reflectancia a TOA con corrección angular *Ecuación* (3.2) (3.3).

5.2.2 Cálculo de índices

Una vez corregidas las bandas de la imagen se procede a realizar el cálculo de los índices de vegetación seleccionados para el estudio, a partir de sus respectivos modelos. Para este proceso se hace uso del software de programación Python, en el que se diseña un código que realiza las correcciones anteriormente mencionadas a las imágenes seleccionadas y finalmente desarrolla las respectivas ecuaciones basadas en los modelos de cada VI cuyo resultado de la operación se genera una matriz con formato GEOTIFF.

No se lleva a cabo proceso de segmentación de nubes debido a que la interpretación de anomalías al estudiar la clasificación de coberturas hace parte del estudio.

En la figura 5.3 se presenta la interfaz creada para realizar las correcciones presentadas en el apartado 5.2.1 y generar las imágenes correspondientes a los índices

(ver Anexo A) .

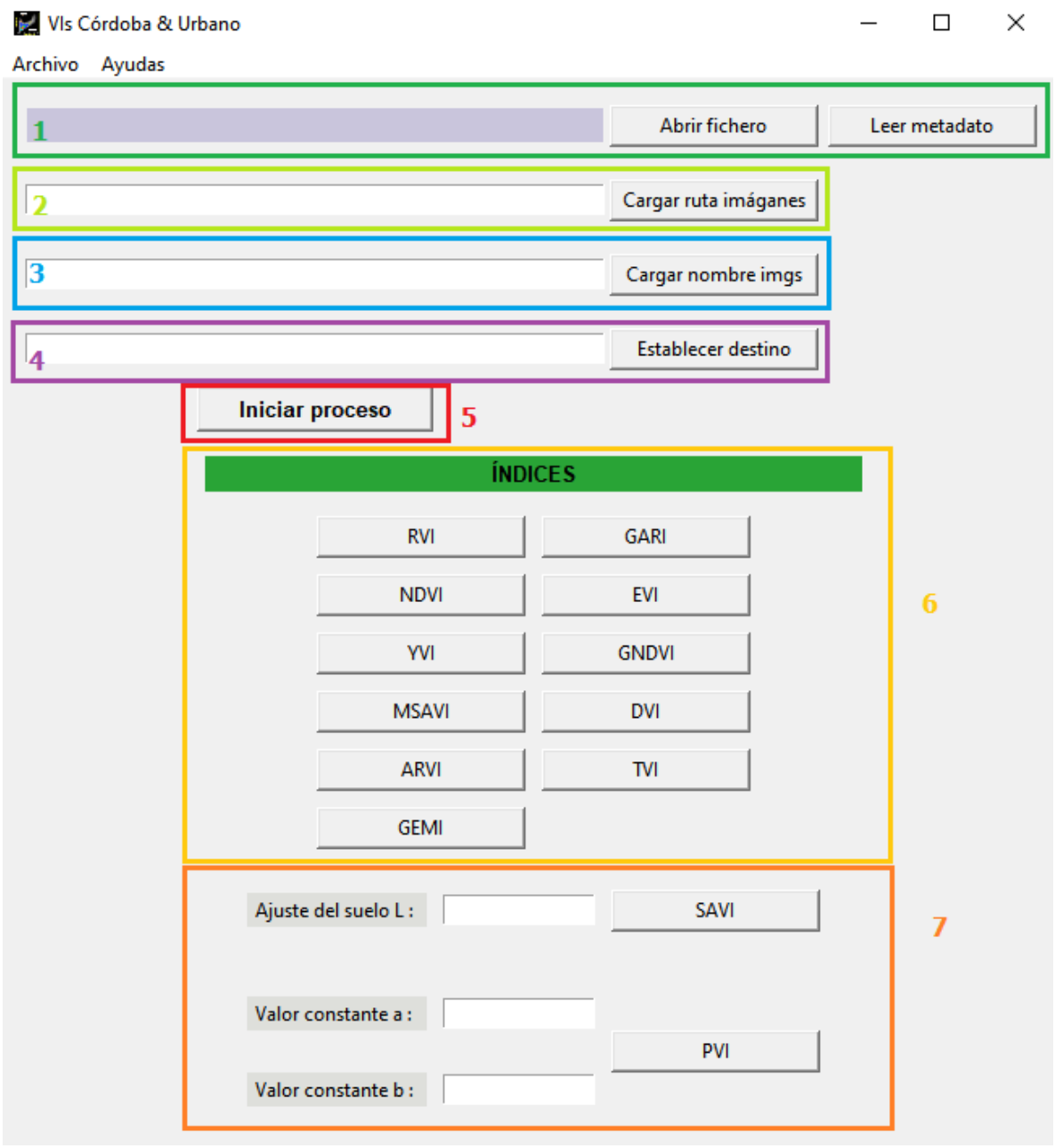


Figura 5.3: Interfaz. Fuente: autores

5.2.3 Generación de mapa de coberturas y extracción de puntos de muestreo

Como fuente de información de soporte para el análisis y comparación de los VI se hace uso de las capas de cobertura del Geovisor de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) en escala 1:100.000 y formato ShapeFile, fuente clasificada como de segundo orden. Para la generación del mapa de coberturas se requiere previamente un proceso de segmentación de las capas, con el fin de clasificar las coberturas acorde a una serie de características enfocadas al objetivo de estudio. Se establecieron seis tipos de superficies: bosques, cuerpos de agua, cultivos, suelo desnudo, vegetación baja y zona urbana como se muestra en la figura 5.4

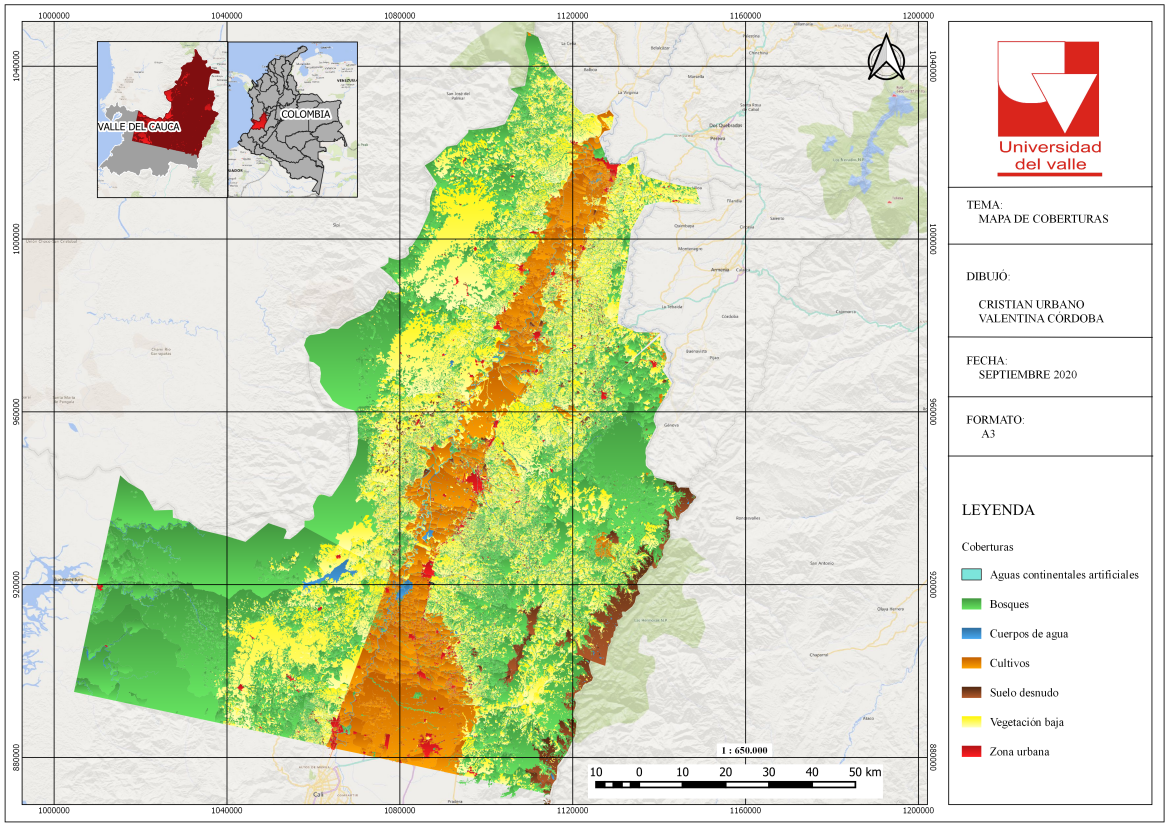


Figura 5.4: Mapa de coberturas. Fuente: autores

Aleatoriamente sobre cada cobertura se genera el número de puntos de muestreo presentados en la tabla 5.2, desde el algoritmo de puntos aleatorios en el software

Quantum GIS (QGIS), a partir de los polígonos respectivos para las coberturas. Posteriormente, desde el complemento Point Sampling Tool se da valor a los puntos desde el raster generado a partir de la aplicación de los índices, este proceso se repite para todos los índices con cada unas de las coberturas para el respectivo análisis.

Las muestras generadas son aleatorias y no controladas con el fin de poder estudiar y analizar las anomalías que se lleguen a presentar en los puntos extraídos.

Tabla 5.2: Puntos de muestreo. Fuente: autores

Cobertura	**Numero de puntos de muestreo extraídos**
Bosques	205 puntos
Cuerpos de agua	55 puntos
Cultivos	85 puntos
Suelo desnudo	68 puntos
Vegetación baja	125 puntos
Zona urbana	64 puntos

5.3 Análisis

5.3.1 Evaluación de los índices

En el proceso de evaluación de los índices se realiza un análisis desde la ecuación de cada VI y la firma espectral para cada cobertura donde se establecen los posibles rangos de clasificación.

Una vez se hace el estudio teórico se procede a analizar los puntos de muestreo con los valores extraídos de los respectivos índices, se compara con el análisis teórico realizado a partir de la firma espectral de la cobertura y la ecuación del índice para evaluar las diferencias entre lo esperado y lo obtenido, es decir entre las coberturas de la C.V.C y la clasificación del índice. Finalmente se determinan las condiciones en que las coberturas fueron o no correctamente clasificadas.

Para el análisis de los valores obtenidos por para los VI, se hace uso del software *Quantum GIS* (*QGIS*), desde múltiples ventanas como se muestra en la figura 5.5. En la configuración gráfica se emplean seis vistas: de manera general VI abril 2017,

mapa de coberturas, VI diciembre 2017, mapa base "Google Satellite", stack abril 2017 y stack diciembre 2017.

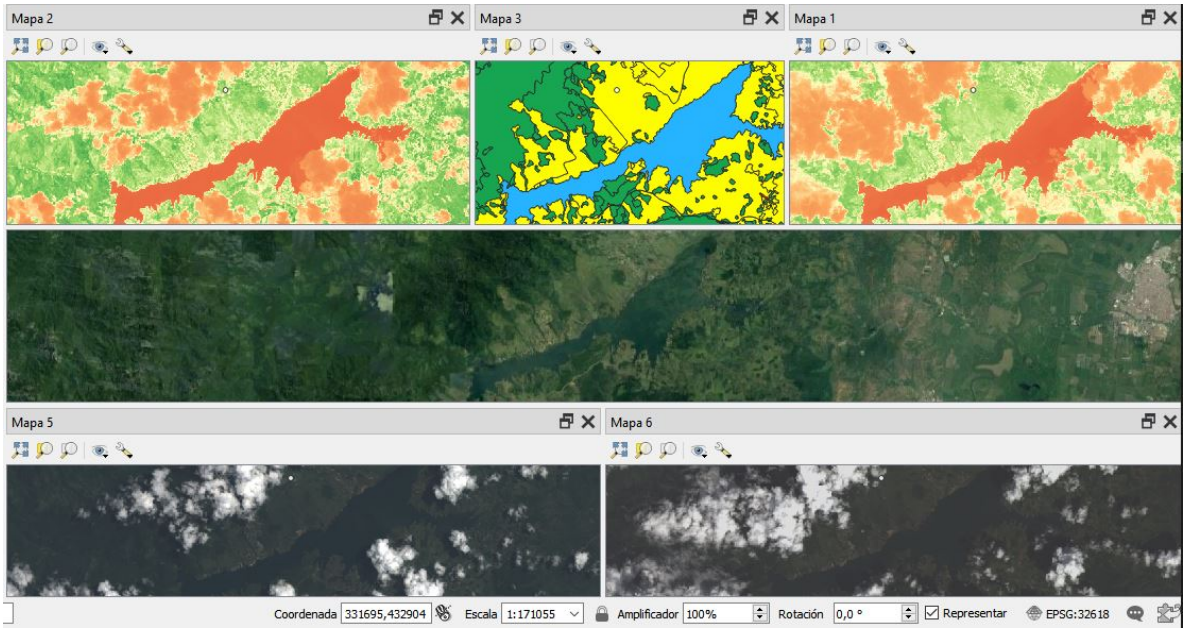


Figura 5.5: Composición de ventanas múltiples. Fuente: autores

5.3.2 Identificación de ventajas y desventajas

Con base en la revisión bibliográfica efectuada y la aplicación de los VI en la zona de estudio se establece la relación entre la reflectividad y la cobertura evaluada, con el fin de determinar la viabilidad de aplicación de los índices seleccionados. Finalmente se presenta una aproximación de los rangos de clasificación para las coberturas aquí estudiadas y ventajas y desventajas de la aplicación de cada VI, destacando las situaciones en que cada uno de ellos desarrolla mejor su potencial.

6. Resultados y Discusión

Ratio Vegetation Index (RVI)

Basados en el comportamiento espectral del agua y en la ecuación del RVI (4.1) se esperaría que los valores del índice para esta fueran iguales o mayores a 1, donde en el caso de no ser así se debería a que el canal rojo absorbe más de lo esperado, lo que puede deberse a la presencia de elementos suspendidos en el agua, como vegetación.

El análisis de las muestras permitió identificar que el 11 % de los puntos de abril presentaban respuesta de cuerpos de agua, mientras que en diciembre era de vegetación, lo que se le atribuye a la temporada de lluvia en abril que puede ocasionar estancamientos de agua en pasos intermitentes. La evaluación de los valores de clasificación nos arrojo un rango entre $1 - 1.6$ donde ningún ocasión dicho rango correspondía a algún otra cobertura, además también encontraron proporciones de agua en valores desde el 0.9 con pequeñas influencias de vegetación o suelo desnudo, como puntos posicionados sobre bordes del río, lagos que superficialmente se visualizaban verdes o redes de drenaje secundarias cuyo paso de agua por ellas era mínimo.

Aplicando el comportamiento espectral de la vegetación a la ecuación (4.1) se obtuvo que el índice debe clasificarla en un rango de valores mayores a 0 pero muy bajos y próximos a cero, donde entre más cercano a 0 sea el valor representaría una vegetación más sana, vigorosa o frondosa. Este concepto se verificó en el análisis de los puntos correspondientes a vegetación, en el que el 62 % de los datos de abril eran mayores que diciembre como posible respuesta ante la diferencia de precipitaciones entre ambos meses. Tal como se predijo, el índice tiende a representar estas coberturas con valores bajos, desde 0 hasta aproximadamente 0.3 y valores entre 0.3 y 0.5 en algunos casos hacían referencia a vegetación influenciada por nubes de baja densidad o la sombra de estas.

Las áreas correspondientes a vegetación, especialmente las de tipo boscosas, se encontraban muy perturbadas por nubes por lo que el índice en estos puntos no presentaba el valor esperado. Pero a pesar de ello en algunos casos se lograba identificar la vegetación. En la clasificación de estas coberturas y a partir del índice se observó que no existían diferencias significativas entre superficies con vegetación muy abundante y superficies con vegetaciones no tan abundantes, debido a que el rango de clasificación es muy pequeño.

El índice permite identificar las zonas con presencia de vegetación correctamente y realizar seguimiento del crecimiento de ella, como en zonas de cultivos, esto debido a que las vegetaciones bajas o incluso en mal estado tiende a presentar un comportamiento diferente en el canal rojo que lleva a que su valor sea un poco más alto de lo esperado, similar al suelo desnudo. Por lo tanto, la aplicación del índice permite clasificar esta cobertura de manera remota y estudiar el crecimiento de los cultivos de manera general siempre y cuando la zona no se encuentre perturbada por nubes.

Por otra parte, los suelos desnudos deberían ser representados entre el rango de la vegetación y del agua, es decir desde 0.3 hasta 0.9. Al analizar los puntos de muestreo se identificó que gran porcentaje de ellos en la época de evaluación de diciembre se encontraban posicionados sobre nubes, por lo que solamente se pudo trabajar con un aproximado del 15 % para los datos para este mes. El exploratorio de datos mostró un promedio de 0.380, con valores desde 0.219 hasta 0.63 pero con influencias de vegetaciones para el valor mínimo y con perturbaciones de sombras de nubes para el valor máximo del índice. Es claro que el RVI permite distinguir y clasificar bien los suelos desnudos siempre y cuando se encuentren despejados y no presenten influencias de otras superficies, debido a que puede alterar su valor.

Las zonas urbanas por su parte se esperaría que el índice las clasificara con valores más altos que suelo, pero más bajos que el agua. Al analizar los puntos de muestreo se encontraron valores en urbano desde 0.45 hasta 0.78 aproximadamente, respecto a la comparación de épocas no se observaron diferencias significativas en sus resultados, a excepción de los valores más bajos que al ser analizados se identificó que presentaban influencias de vegetación o en puntos que en alguna de las dos épocas era perturbado por una nube.

Al clasificar la imagen se observó que no existían zonas urbanas muy grandes, eran pequeños cascos urbanos rodeados de vegetaciones bajas o cultivos cuya influencia llegaba hasta ciertas zonas del área urbana, razón por la cual el RVI clasificó valores bajos como el 0.4. El índice identificó cada zona de construcción en la imagen desde los cascos urbanos hasta carreteras, donde entre más cercano fuera el valor a 0.8 mayor es la presencia de este tipo de superficies y más es la ausencia de vegetación.

El índice no permite detectar posibles pasos de agua o pasos de agua muy angostos, debido a que depende totalmente de la presencia de ella, de su caudal, de su extensión, por cuestiones de resolución espacial, aun así cabe resaltar que en ninguno de los casos de este estudio los valores del agua se asemejan o se llegaron a confundir con nubes o ninguna otra cobertura. No fue posible diferenciar entre suelos secos y suelos húmedos o entre suelos claros y oscuros debido a que la resolución espacial y un análisis remoto no es una base suficientemente clara para tener previa identificación de la localización de ellos, para este caso es necesario hacer estudios de campo.

En la figura 6.1 se presenta el resultado de aplicación del índice en las dos imágenes seleccionadas, en ella se observa los pasos de agua temporales en abril, la forma en que la zona de cultivos cambia de abril a diciembre y como la vegetación y zonas urbanas son clasificadas.

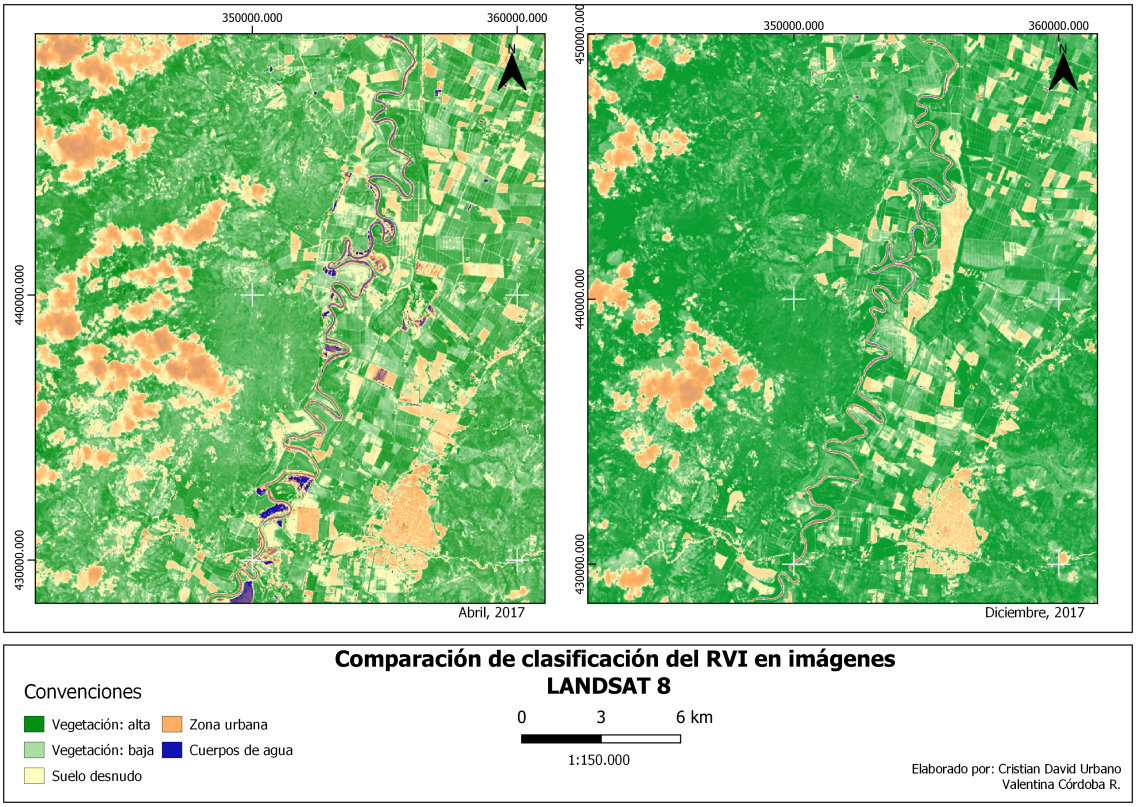


Figura 6.1: Aplicación RVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

El NDVI es un índice cuya ecuación está compuesta, al igual que el RVI, por las reflectancias de los canales rojo e infrarrojo pero con la diferencia que el resultado de este índice es normalizado, es decir varía entre -1 y 1.

Aplicando el comportamiento espectral del agua a la ecuación (4.2) se establece que los valores correspondientes a esta superficie al momento de aplicar el NDVI serían aquellos negativos, pero como se trata de una ecuación normalizada los valores de clasificación del agua irían desde el -1 al 0, sin incluir el 0. En primera instancia se hace análisis de los puntos de muestreo con el fin de corroborar los valores que clasificarían el agua al aplicar el NDVI a partir del análisis de la ecuación. El estudio de los puntos de muestreo arrojó tanto valores negativos, como se esperaba, como valores positivos, que

al verificar el tipo de cobertura que existía bajo ese valor se distinguió que pertenecía a vegetación, bordes de ríos o los bordes de cuerpo de agua cuya influencia del valor del punto podría verse afectada por la superficie de su alrededor a causa de la resolución espacial.

En las coberturas de tipo vegetal se esperaría que el índice respondiera a este tipo de superficies con valores > 0, que entre más cercano a 1 sea mayor sería la producción de biomasa. Evaluando los puntos de muestreo se observó que el 62 % de los datos de diciembre eran mayores que abril. Respecto a los valores del índice se observó que desde el 0.5 hacían referencia a vegetación, aunque con perturbaciones de sombras de nubes haciendo variar la intensidad de la radiación, y desde aproximadamente 0.6 hasta 1 era vegetación sin ningún tipo de interferencia, valores que corresponden al análisis teórico. Sin embargo estos umbrales se ven afectados por la presencia de nubes.

En la zona montañosa se encontró grandes perturbaciones de nubes, pero a pesar de ello fue posible analizar las coberturas de vegetación sin necesidad de tomar más muestras de puntos debido a que los valores que no presentaban conflicto con ninguna otra superficie eran claros y suficientes para el estudio. Adicionalmente se encontró que el NDVI permite diferenciar entre densidades de vegetación (LAI) por lo tanto, permite llevar a cabo seguimiento de vegetación, herramienta muy útil para el monitoreo de cultivos.

El suelo según su firma espectral es una superficie en la que el NDVI debería representarlo con valores mayores a 0 pero cercanos a él. El estudio de los puntos de muestreo nos permite verificar que corresponden a valores positivos y con resultados mucho menores al de la vegetación, con un valor máximo de 0.795, valor mínimo de 0.023 y un promedio de 0.345. Desde el análisis se verificó que los valores mayores a 0.45 eran una respuesta de la presencia de vegetación, nubes o sombra de nubes, por lo tanto, el suelo desnudo en este índice es clasificado de manera aproximada entre un rango de valores de 0.023 y 0.45.

Las superficies urbanas por lo general están compuestas por diferentes tipos de coberturas, pero en mayor proporción se encuentran materiales como asfalto, pavimento o concreto que por lo general son elementos que tienden a calentarse mucho y eso es debido a su capacidad de absorber tanto en el canal rojo como en el infrarrojo, en

proporciones muy similares, lo que aplicado a la ecuación del NDVI y por ello elíndice en este tipo de superficies deben comportarse o clasificarse con valores bajos muy próximos a cero, de forma muy similar a los suelos desnudos.

Al evaluar los puntos de muestreo se encontró un rango muy amplio de valores de clasificación, donde el valor mínimo fue 0.0592, el valor máximo 0.8480 y un promedio de 0.4187, esto debido a que como se mencionó anteriormente las zonas urbanas están compuestas por diferentes coberturas como parques, áreas destapadas o cuerpos de agua. Para ello se hizo el estudio de cada punto en de la muestra en el que se verificó que los valores altos pertenecían a vegetaciones, por la aleatoriedad de la toma de muestras y que efectivamente los valores bajos y próximos a 0 hasta aproximadamente el 0.2 eran específicamente materiales de construcción como los mencionados anteriormente.

El índice clasifica correctamente las zonas urbanas, permite generar una clasificación clara tanto visual como de valores del estado de las diferentes coberturas que llegan a componer un espacio. Adicionalmente este mismo rango de valores funciona para identificar zonas rocosas, siempre y cuando sean de gran extensión o la resolución espacial del sensor capte la zona.

A pesar de que el NDVI emplea los mismos canales que el RVI el proceso de normalización permite definir de forma más sencilla los rangos de clasificación de las coberturas, especialmente en imágenes con alto porcentaje de nubes. Adicionalmente el rango de clasificación de la vegetación en este caso es mucho más amplio, lo que favorece para el estudio de la misma. En el caso del estudio de dos temporadas las diferencias encontradas no son tan representativas, como se observa en la figura 6.2 para ninguna de las coberturas, a excepción de los cuerpos de agua, por lo que no afecta la temporada en la que el índice sea aplicado.

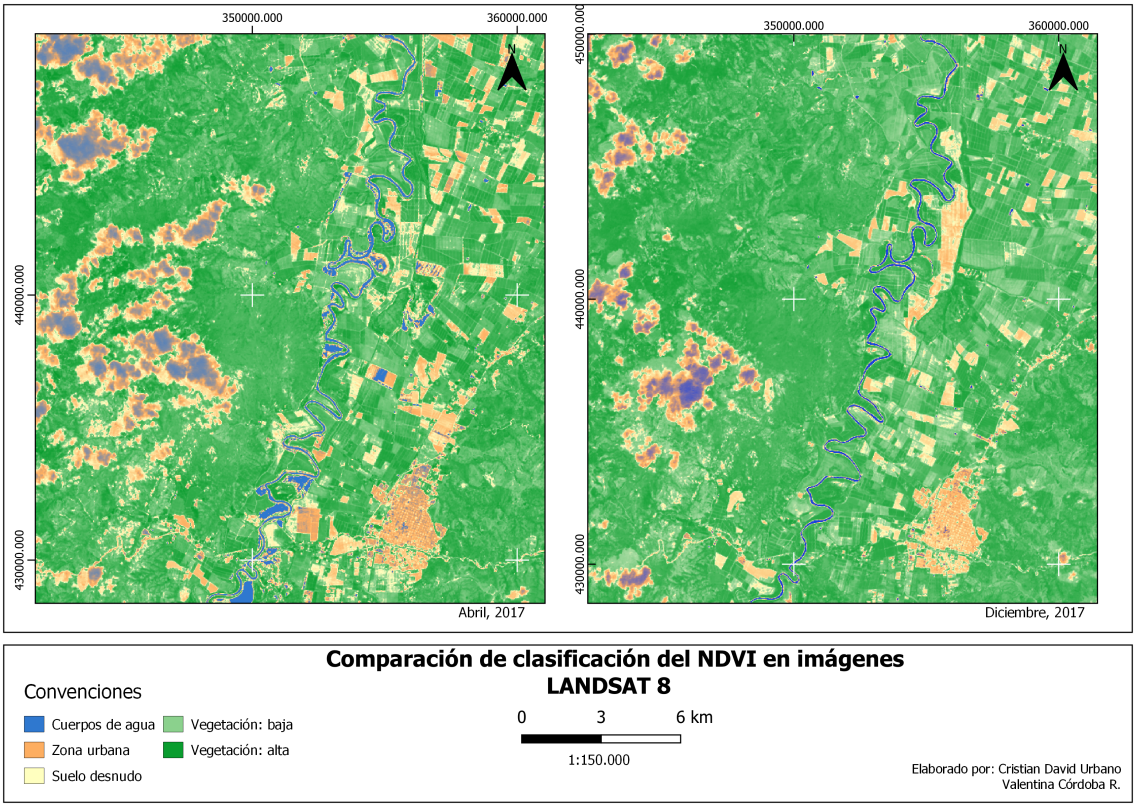


Figura 6.2: Aplicación NDVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Yellow Vegetation Index (YVI)

El YVI es un índice desarrollado a partir del concepto de transformación (Tasselled- Cap) cuyo propósito es convertir los canales en una representación visual de las coberturas presentes en la superficie, para ello emplean unas constantes que permiten resaltar unos canales sobre otros. El índice en primera instancia fue desarrollado para Landsat 1, 2 y 3 pero se realizó una equivalencia de bandas con el fin de poder aplicarlo a imágenes Landsat 8. Esta equivalencia generó diferencias debido a que no manejaban los mismos rangos espectrales a pesar de tratarse de los mismos canales, en especial en Infrarrojo próximo (NIR) ya que Landsat 1, 2 y 3 contaba con dos rangos del 0,7 al 0.8 um y del 0,8 al 1,1 um a diferencia de Landsat 8 en el que solo se maneja el rango del 0.85 al 0.88 um.

En primera instancia se observa que la imagen clasifica todas las coberturas con

valores negativos a excepción de pequeñas zonas de vegetación boscosa en el que se encontraron unos cuantos valores positivos pero muy bajos con un máximo de 0.0234, para abril, 0.0061, para diciembre y esto es debido a que en NIR se presentó un comportamiento diferente al esperado, que absorbía más de lo esperado, lo que puede deberse a exceso de agua en dichas zonas. Adicional a ello, las 3 tipos de coberturas vegetal se confundían una con otra por lo que no fue posible establecer un rango si quiera para clasificar la vegetación desde el YVI.

Los cuerpos de agua no son bien demarcados por este índice debido a que tienden a confundirse con la zona de cultivos y de vegetación baja, debido a que se encontró que el rojo reflejaba más que el verde y no al contrario como se supondría que es el comportamiento espectral de los cuerpos de agua, adicional a ello la ecuación del índice conlleva a que el rojo resalte más y el valor de reflectancia en el verde sea más bajo presentando un comportamiento similar al suelo o vegetaciones bajas o en mal estado. Respecto a los puntos de muestreo, el 100 % de ellos eran negativos pero no fue posible establecer un rango debido a que se mezclaban entre valores de vegetación.

Al igual que con las coberturas anteriormente evaluadas, los suelos y zonas urbanas presentaban en el 100 % de sus puntos de muestreo valores negativos, con baja capacidad para distinguir entre todas las superficies que forman la zona de estudio ya que en mayor proporción se confunde tanto con la zona de cultivos como con los cuerpos de agua por lo tanto tampoco fue posible establecer un rango de clasificación.

Respecto a las nubes se logra diferencias que en las zonas de menor densidad el índice logra penetrar y clasificar la cobertura debajo de ellas, lo que comprueba su capacidad para corregir efectos atmosféricos de neblina o vapor de agua atmosférico. Adicionalmente, las nubes más densas son claramente distinguibles de las superficies estudiadas, como se observa en la figura 6.3 y son todos aquellos valores aproximadamente menores a -0.2.

Los autores dentro de las publicaciones que dan origen al YVI destacan su capacidad para estudiar el comportamiento y desarrollo de la vegetación pero en la aplicación para nuestro caso de estudio no fue posible comprobarlo, como se observa en la figura 6.3, debido a que el índice no desarrolla su potencial completo por las equivalencias que se realizaron para aplicarlo en imágenes Landsat 8 ya que no cuentan con los mismos

rangos de longitud de onda que el índice requiere.

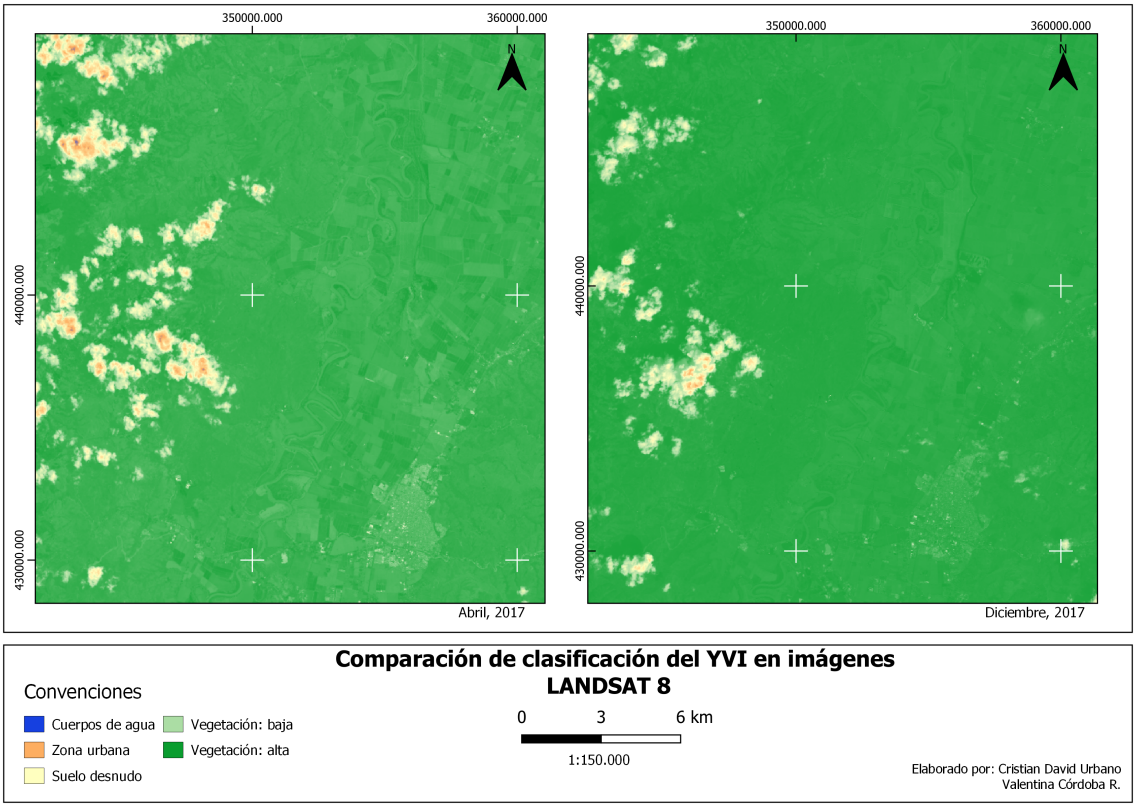


Figura 6.3: Aplicación RVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Perpendicular Vegetation Index (PVI)

El PVI es un índice desarrollado para estudiar coberturas de bajo porcentaje de vegetación desde el concepto de línea del suelo y a partir de una gráfica de dispersión y del modelo de regresión lineal de los datos empleados. Para la construcción de la línea del suelo fue necesario tomar muestras de puntos en la imagen que representaran suelo desnudo de la reflectividad tanto en el rojo como del infrarrojo, graficarlos, figura 6.4 y figura 6.5 y realizar análisis de regresión lineal, siendo la banda roja la variable independiente y la infrarroja la dependiente.

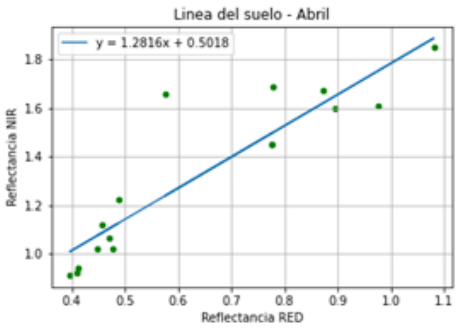


Figura 6.4: Linea del suelo abril. Fuente: autores

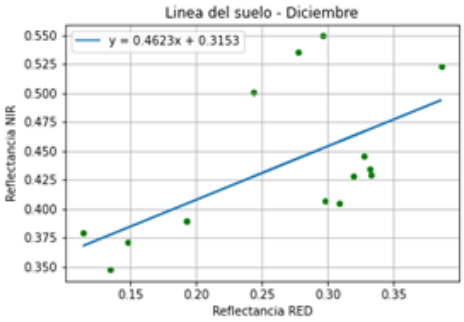


Figura 6.5: Linea del suelo diciembre. Fuente: autores

Los valores del análisis de regresión lineal ($ax + b$) son los que se utilizaron en la ecuación (4.4), por lo que la precisión del índice depende del proceso anteriormente realizado. Este concepto permite identificar a partir de una línea el tipo de cobertura de la superficie, basados en la proximidad de los puntos a dicha línea, si estos se encuentran cerca de ella hacen referencia a suelo pero si por el contrario está muy alejado dicho punto representa un punto de vegetación o agua, por lo tanto el índice es la distancia del punto a la línea del suelo, valores cercanos a la línea que representa suelo deberían ser suelo desnudo, valores por encima de la línea serían vegetación y finalmente valores por debajo representarían agua.

Primero comenzamos analizando los puntos de muestreo correspondientes a coberturas de agua, basados en su comportamiento espectral este tipo de coberturas deberían ser representadas con valores negativos, lo que se comprobó al aplicar el índice y analizar las zonas previamente identificadas. A pesar de ser un índice diseñado para el estudio del suelo y la vegetación, permite identificar claramente las formas de agua, desde ríos hasta lagos, a excepción de zonas en las que la superficie tenía presencia de otros elementos, en cuyo caso el índice no clasifica correctamente el agua.

La segunda cobertura analizada es la vegetación, que en el caso de estudio de este proyecto como se menciona anteriormente se clasifica en: bosque, vegetación baja y cultivos que al ser una cobertura aislada del suelo el índice debería clasificarla con valores superiores a 0. Los puntos tomados para esta clasificación toman valores entre 0.25 y 1.5 en donde los valores más bajos corresponden a zonas de poca densidad,

donde el suelo es un componente de la radiación y los valores más altos a vegetaciones de mayor densidad.

La respuesta del índice permite clasificar la zona de cultivos, tal como se esperaba, debido a que no solo identificó claramente las zonas con vegetación y no vegetación, sino que también delimitó los surcos, permitiendo diferenciar entre los diferentes sectores de cultivos muy detalladamente, esto debido a que se basa en el concepto de línea del suelo debido a que el índice es muy bueno para determinar densidades de vegetación. En cuanto al bosque y la vegetación baja el índice permitió clasificarlas correctamente pero no diferenciarlos, debido a la ausencia de suelo desnudo en estas zonas ya que el índice clasifica entre suelo y no suelo.

Posteriormente se evaluó el suelo desnudo, cobertura de la que se esperaba valores cercanos a 0, debido a su proximidad a la línea del suelo. Dentro de la zona de estudio esta superficie presenta áreas muy pequeñas lo que dificultó su análisis por la resolución espacial de la imagen, a pesar de ello se logró evaluar e identificar que los rangos de clasificación eran inferiores a 0.15, pero nunca 0, porque de ser así las reflectancias en el canal rojo e infrarrojo deberían ser iguales.

En este tipo de coberturas hay que tener especial cuidado debido a que en algunas ocasiones puede presentar valores negativos. Si el valor de la constante b es menor a la resta de las reflectancias de rojo e infrarrojo los valores negativos no solamente harán referencia a agua, sino que los más próximos a 0 pero negativos representarán también suelos, superficies rocosas o hasta zonas urbanas. Lo que normalmente ocurre cuando las reflectancias de ambas bandas son bajas y similares.

Finalmente se evaluó la zona urbana, el comportamiento espectral de este tipo de superficies dependen del material del que han sido construidas, a pesar de ello hay un comportamiento promedio. Los valores para clasificar este tipo de superficies dependen mucho del valor de la contante b, debido a que los valores de reflectancia en ambos tienden a ser muy bajos y si “b” es alta el PVI clasificaría estas superficies con valores cercanos a 0 pero negativos tal como sucedió en las zonas urbanas de la época de estudio de diciembre, en el que las zonas urbanas son negativas, contrario a abril debido a que las reflectancias eran mayores, respecto a lo que suponemos que se debe a la temporada de lluvia y el crecimiento de la vegetación que podría haber influido.

El PVI es una herramienta de gran utilidad para identificar coberturas influenciadas por el suelo, debido a que permite clasificarlos a buen nivel de detalle. Para que el índice clasifique correctamente es importante que los puntos o muestras empleadas correspondan a suelo desnudo. Adicionalmente hay que tener en cuenta que no existe un valor de constante a o b predeterminado que asegure la clasificación correcta de diferentes áreas de estudio, lo mejor es calcularlas para cada caso. Respecto a las diferencias de temporadas, se observó que los datos de abril de todas las coberturas evaluadas se distanciaron más de la línea del suelo que los diciembre, como se observa en la figura 6.6, donde la vegetación, el suelo y el agua resaltan mucho más.

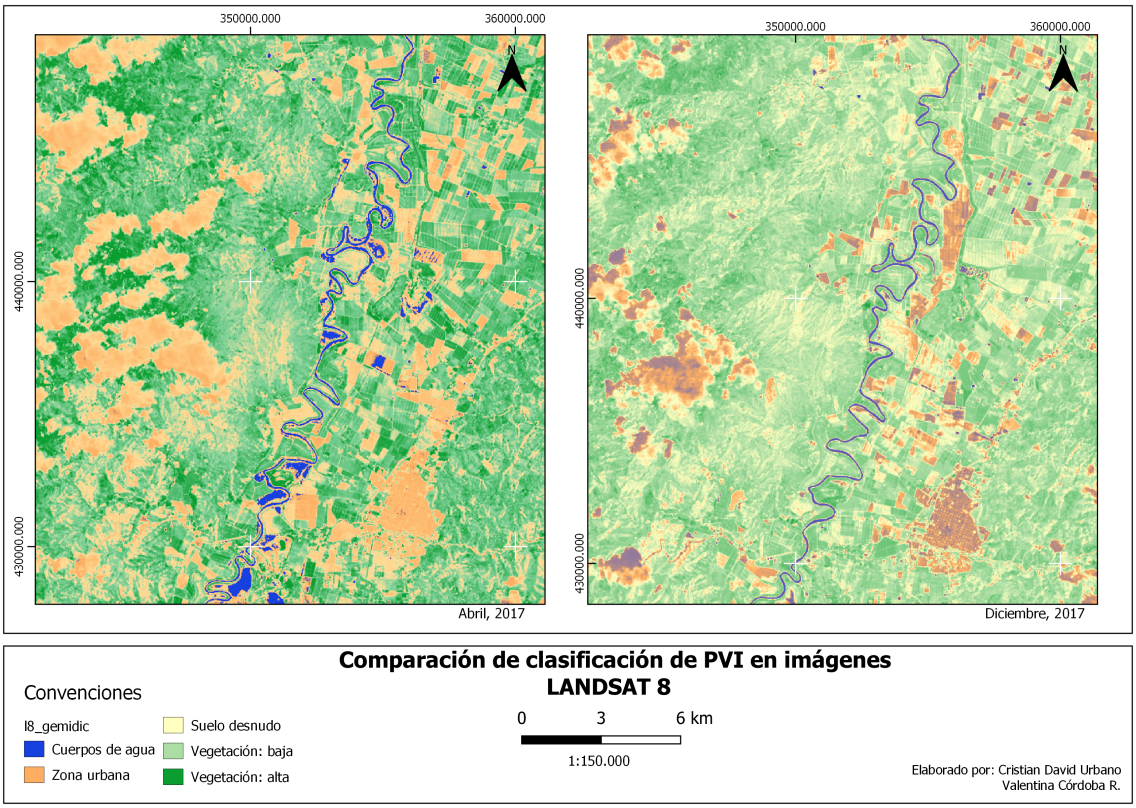


Figura 6.6: Aplicación PVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Soil Adjusted Vegetation Índex (SAVI)

El SAVI es una propuesta para el estudio de superficies con presencia de suelo

desnudo que contrarresta esta a partir de la aplicación de un factor de autocorrección, en el que su valor depende de la proporción de vegetación de la zona estudiada. Dicho factor puede tomar 3 valores, recomendados por sus autores, 0.25, 0.5 y 1.

Los cuerpos de agua en la ecuación (4.5) deberían presentarse con valores menores a 0 para los 3 factores de ajuste, donde a medida que aumenta el factor de ajuste (L) el valor del índice para esta cobertura disminuiría. Las vegetaciones por su parte se representarían con valores mayores a 0 y muy altos, al tratarse de una cobertura sana y vigorosa, presentando una relación directamente proporcional entre L y el valor del índice. Finalmente, los suelos y las zonas urbanas tienden a representarse con valores muy próximos el uno del otro, para estos se esperaría valores mayores a 0 pero bajos y teniendo en cuenta la naturaleza del índice la clasificación de los suelos debería ser más aproximada respecto a otros índices.

SAVI 0.25

El estudio de los datos obtenidos para el SAVI en cuerpos de agua con una constate de ajuste del suelo de 0.25 mostraron un valor máximo de 0.887, valor medio de 0.310 y mínimo de -0.306. Dentro del conjunto de valores para abril el 65 % de los datos resultaron positivos (36 puntos). Para diciembre, se obtuvo un valor máximo de 0.768, promedio 0.344, mínimo de -0.182 y el 85 % de los datos eran positivos.

Realizando una diferencia entre los datos de abril y diciembre, se obtuvo que el 44 % de los datos de abril eran mayores que diciembre y con una correlación de 0.825 para la cobertura agua indicando que no existe una gran variación entre los valores obtenidos para las dos temporadas.

Al aplicar el índice se encontró este tipo de coberturas se encuentran clasificada en valores cercanos a cero y negativos, coincidiendo con el análisis del modelo matemático del índice, sin embargo, en el análisis de los puntos de muestreo se encontraron valores positivos, debido a que estos hacían referencia a otro tipo de superficies como vegetación o suelo conllevando a que el índice aumente sus valores significativamente.

De las coberturas vegetales se obtuvo un valor máximo de 0.897, medio 0.583 y

mínimo de 0.040, donde el 100 % de los puntos eran valores positivos (205 puntos) tanto para abril como para diciembre, adicionalmente los valores de abril eran mayores. Tal como se esperaba el VI clasifica las vegetaciones con valores mayores a 0, específicamente desde el 0.5 para nuestro caso de estudio.

Para la zona de cultivos el VI se identificó que existe diferencias significativas entre los valores del abril y diciembre, comportamiento que lo corrobora el coeficiente de correlación, con un valor de 0.057. Este comportamiento refleja la sensibilidad del índice a los cambios de vegetación y a la presencia de suelo, destacándose como una herramienta óptima para la clasificación de este tipo de coberturas.

En los tres tipos de vegetación evaluados se encontraron diferencias entre temporadas, ya que en abril los valores eran mayores identificando la cobertura como más sana o más frondosa respecto a diciembre. A pesar de ello es un índice que en presencia de suelo desnudo detalla muy bien la vegetación y dentro de su rango permite diferenciar el estado y la presencia de ella.

Para los suelos desnudos en el mes de abril se encontró un valor máximo de 0.717, un valor medio de 0.380 y mínimo de 0.028 sin valores negativos. En el mes de diciembre el valor máximo encontrado fue 0.695, valor promedio 0.275 y mínimo de 0.039. Al igual que en el mes de abril, en mes de diciembre no se presentaron valores negativos.

Se encontró que el 76 % de los datos de abril resultaron mayores que los datos de diciembre. El análisis mostró que muchos de los valores calculados eran influenciados por a la proliferación de vegetación. Sin embargo, se estudiaron zonas donde el suelo expuesto se mantenia para las dos temporadas, mostrando que los valores para este tipo de cobertura el índice está en el rango de 0.028 a 0.45.

Las zonas urbanas en el mes de abril presentaron un valor máximo de 0.806, un valor promedio de 0.440 y mínimo de 0.069 y en diciembre un valor máximo de 0.780, medio de 0.369 y mínimo de 0.093, sin valores negativos en ninguno de los dos meses evaluados.

Los datos correspondientes a construcciones no presentan variación entre épocas, con un coeficiente de correlación de 0.803, que a pesar de ser alto se estudia de

manera puntual los valores dentro de centros urbanos encontrando para esta cobertura se encuentran entre de 0.200 a 0.30. A este índice no responde ante la delimitación de tejido urbano discontinuo regresando valores influenciados por los elementos circundantes, lo que le atribuimos a la resolución espacial mientras que el tejido urbano continuo es correctamente delimitado y se logra diferenciar en medio de las zonas urbanas los puntos correspondientes a vegetación.

En la figura 6.7 se presenta el resultado de la aplicación del índice al área de estudio, en ella se evidencia la diferencia de clasificación por temporadas, resaltando más las coberturas en abril. Adicionalmente es posible observar el cambio en el área de cultivos entre abril y diciembre y el nivel de detalle con el que logra clasificar los surcos.

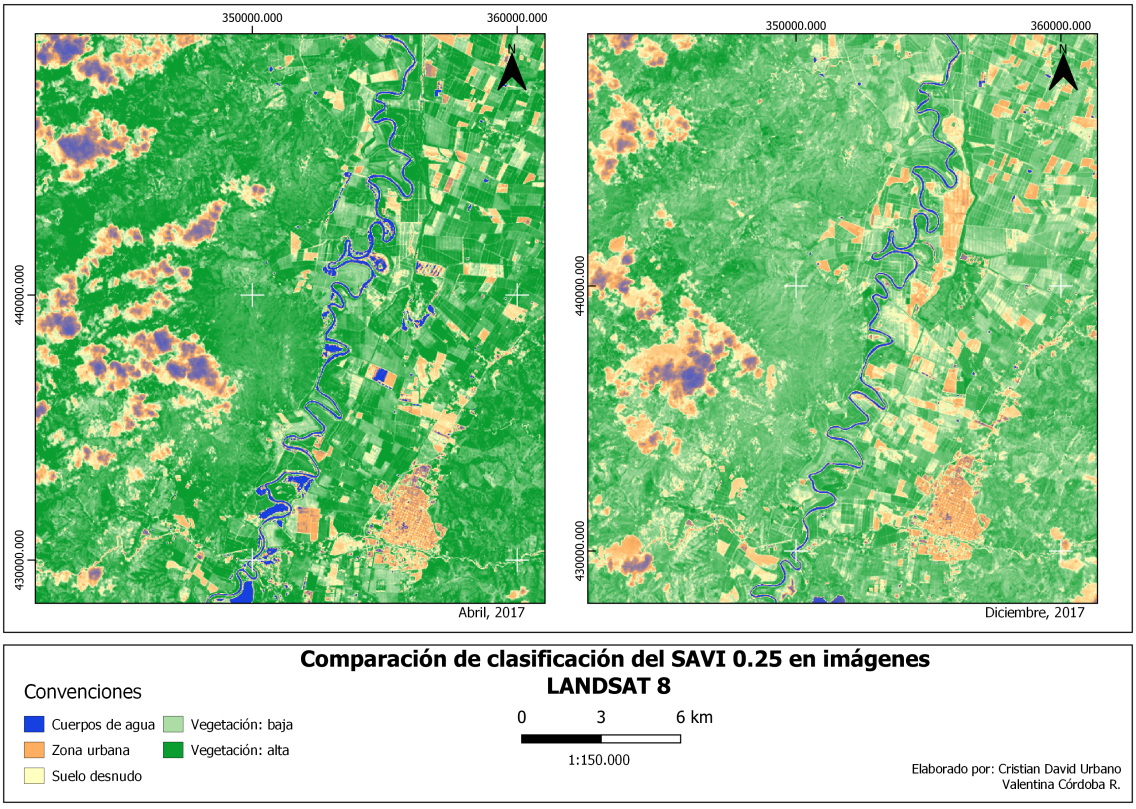


Figura 6.7: Aplicación SAVI 0.25 en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

SAVI 0.5

En las muestras para cuerpos de agua se encontró un valor máximo de 0.969, promedio de 0.337 y mínimo de -0.303. En esta temporada el 65 % de los datos (36 puntos) eran positivos y el 35 % negativos (19 puntos). Mientras que en diciembre, se encontró como valor máximo de 0.747, medio de 0.312 y mínimo de -0.149, donde el 85 % de los datos resultaron positivos (47pts) y el 15 % negativos.

El 53 % de los valores correspondientes al mes de abril eran mayores que diciembre, con un coeficiente de correlación de 0.825, lo que demuestra poca variación de la cobertura entre una época y otra, donde las pocas diferencias se concentran en zonas de estancamiento de agua en temporadas de lluvia. Respecto al rango de valores todos aquellos positivos encontrados se evidenciaron que estaban influenciados por vegetación, suelo u otros elementos suspendidos que afectaban la pureza del agua, por lo que los valores que corresponden a esta cobertura dentro de la clasificación del índice son todos aquellos menores a 0.

En el rango entre 0 y 0.20 se encontraron puntos correspondientes a agua, esto debido a que el comportamiento espectral, específicamente en canal rojo era menor al de una condición normal. Por ello se presume que dichos puntos se encontraban influenciados por vegetación o suelo desnudo.

Las coberturas vegetales presentaron un valor máximo de 0.989 medio de 0.534 y mínimo de 0.041, dentro de este conjunto de datos no se observaron valores negativos para ninguna de las 3 clasificaciones de vegetación del estudio. El análisis de las muestras se encontró que el índice clasifica correctamente la cobertura vegetal, sin embargo su enfoque no es diferenciar entre densidades. Para este tipo de cobertura se encontró que el rango de valores que puede tomar es entre 0.5 y 0.9, donde entre más alto sea el valor del índice indicaría mayor vigorosidad.

En la zona de cultivos, los valores de abril eran mayores que diciembre, lo que se le atribuye a los niveles de precipitación, al estado de la cobertura y a la diferencia del nivel de desarrollo entre las dos épocas, donde aquellas áreas con cultivos más bajos eran clasificados dentro del valor más bajo del rango anteriormente mencionado y las áreas de cultivos más desarrollados con un valor más alto.

Para el suelo desnudo en el mes de abril el valor máximo encontrado en la muestra

respectiva fue 0.780, medio 0.399 y mínimo 0.033: dentro de este conjunto de datos no se encontraron valores negativos. En el mes de diciembre, el exploratorio de datos mostró un valor máximo de 0.641, promedio de 0.250 y mínimo de 0.043: al igual que el mes abril, en el mes de diciembre no se observaron valores negativos.

La diferencia efectuada entre las dos épocas mostraron que el 84 % de los datos correspondientes a abril son mayores que los del mes de diciembre. Lo anterior se puede deber a la proliferación de vegetación debido a la disponibilidad hídrica. Los valores explorados a partir del análisis clasifican el suelo desnudo en un rango entre 0.16 y 0.24.

También se observó que el índice, con valor de 0.5 para el parámetro de ajuste del suelo, logra destacar con mayor detalle los espacios considerados como suelo desnudo en la zona agrícola del Valle Plano de Río Cauca logrando distinguir los surcos entre lotes sembrados debido a la presencia de vegetación.

En las coberturas de tipo urbano, en el mes de abril se encontró un valor máximo de 0.880, medio de 0.475 y mínimo de 0.077: en el mes de abril no se encontraron valores negativos. Para el mes de diciembre, el valor máximo fue de 0.740, promedio de 0.334 y mínimo de 0.100: al igual que el mes de abril, el mes de diciembre no presenta valores negativos.

Empleando la diferencia entre abril y diciembre, se encontró que el 94 % (58 pts) de los datos correspondientes al mes de abril resultaron mayores que los del mes de abril. Al igual que para un factor de ajuste de 0.25, el $L = 5$ SAVI 0.5 presenta alta correlación entre los valores obtenidos, esto significaría que los elementos urbanos no se ven afectados por el cambio de épocas en el trópico. El rango de valores observado para esta cobertura en el análisis cualitativo fue entre 0.14 y 0.23.

En la figura 6.8 se muestra la aplicación del índice para un factor de ajuste de 0.5, en el se evidencia las diferencias entre las temporadas de lluvia y no lluvia específicamente para los cuerpos de agua y vegetación, la forma en que el índice detalla la zona de cultivos y como delimita las zonas urbanas.

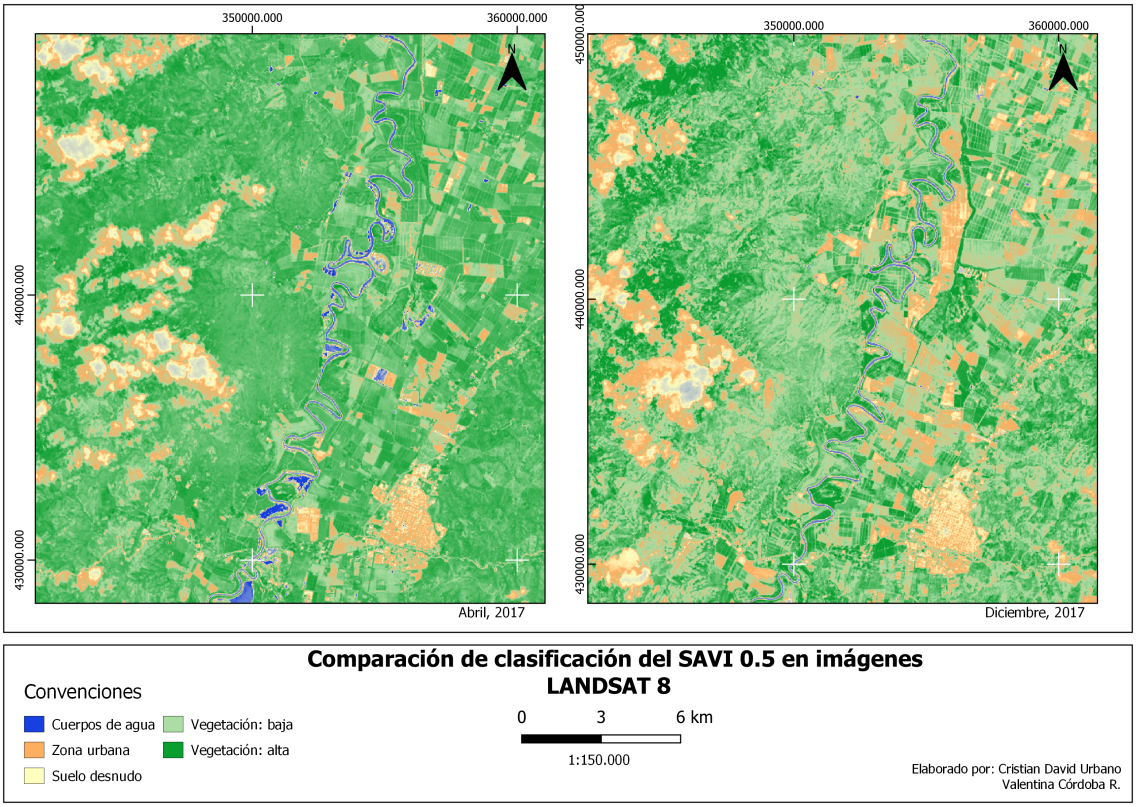


Figura 6.8: Aplicación SAVI 0.5 en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

SAVI 1

Finalmente, se exploran los resultados entregados por el SAVI con constante de ajuste del suelo con valor igual a 1. Para las muestras respectivas a cuerpos se agua en abril el valor máximo encontrado era de 1.095, medio de 0.377 y mínimo de -0.300: En este conjunto de datos el 35 % (19 pts) de los datos eran negativos y que el 65 % (36 pts) de los datos fueron mayores a cero. Para diciembre el valor máximo hallado fue 0.721, promedio de 0.280 y mínimo de -0.121: A diferencia del mes de abril, en el mes de diciembre el porcentaje de valores negativos fue del 15 %.

La diferencia entre ambas épocas (abril – diciembre) mostró que los datos del mes de abril son mayores en un 53 % respecto a diciembre. A pesar de que los datos mostraron una correlación de 0.824 entre los datos de ambas épocas, el exploratorio mostró que existen valores extremadamente altos para una cobertura de tipo hídrica, especialmente

en el mes de abril. Por esta razón se exploró el stacks RGB de índices, encontrando que existe proliferación de vegetación en el mes de abril de manera considerable en los puntos con anomalías, por esta razón el exploratorio muestra valores parecidos a coberturas de vegetación. El rango de valores que delimita los cuerpos de agua se encuentra entre -0.080 y 0.242, con tendencia a cero

Las vegetaciones para este factor de ajuste presentaron un valor máximo de 1.136, valor mínimo de 0.046 y promedio de 0.547 sin valores negativos para ninguna de las coberturas vegetales evaluadas tanto en abril como en diciembre, además se encontraron diferencias entre ambos meses, lo que indica capacidad de detectar los cambios en el estado de las coberturas vegetales. El anterior resultado se verifica en los stack RGB, donde el análisis cualitativo mostró que la cobertura en el mes de diciembre se torna de tonalidades amarillentas, mientras en el mes de abril la cobertura vegetal cuenta con tonalidades verdes. El rango de valores observado puntualmente se encuentra entre 0.568 y 1.013.

Como se mencionó en apartados anteriores, la vegetación de baja densidad es el más propensa a sufrir alteraciones. Esto se corroboró al encontrarla clasificada como vigorosa o como suelo desnudo, ya que la función principal del índice es corregir la influencia del suelo desnudo en la vegetación y no específicamente determinar su estado o densidad.

Para la zona de cultivos nuevamente se encontraron diferencias entre épocas, con un coeficiente de correlación de 0.054, lo que puede deberse a las diferencias de precipitación, de vigorosidad y del desarrollo del cultivo, que tiende a crecer y variar entre meses. Dentro del área de cultivos para ambas épocas se evidenciaron con mayor detalle los surcos entre lotes sembrados. El rango de valores encontrados para este tipo de valores osciló entre 0.450 y 1025.

Para la cobertura suelo, en el mes de abril se encontró un valor máximo de 0.876, medio 0.429 y mínimo de 0.041: Para este conjunto de datos no se encontraron valores negativos. En el mes de diciembre el valor máximo encontrado fue de 0.584, promedio 0.226 y mínimo 0.049: para este conjunto de datos no se encontraron valores negativos. Del análisis de datos se identificó que los valores de los puntos de muestra de abril eran mayores que diciembre, debido a que se encontró proliferación de vegetación como

pastizales. El rango de valores observado para este tipo de cobertura estuvo ente 0.113 y 0.210.

Para la cobertura urbano, en el mes de abril se encontró un valor máximo de 0.996, medio de 0.527 y mínimo de 0.091: este conjunto de datos no mostró valores negativos. En el mes de diciembre se encontró un valor máximo de 0.696, promedio de 0.301 y mínimo de 0.098: al igual que el mes de abril no se encontraron valores negativos y pequeñas diferencias entre épocas, donde las mínimas se debían a los puntos influenciados por vegetación o suelo. El rango de valores observado estuvo entre 0.130 y 0.267.

En la figura 6.9 se presenta el resultado de aplicar el VI SAVI con factor de ajuste 1 a las dos imagenes seleccionadas. En este caso la diferencia entre épocas se evidencia en la vegetación, presentándose en abril los valores más altos.

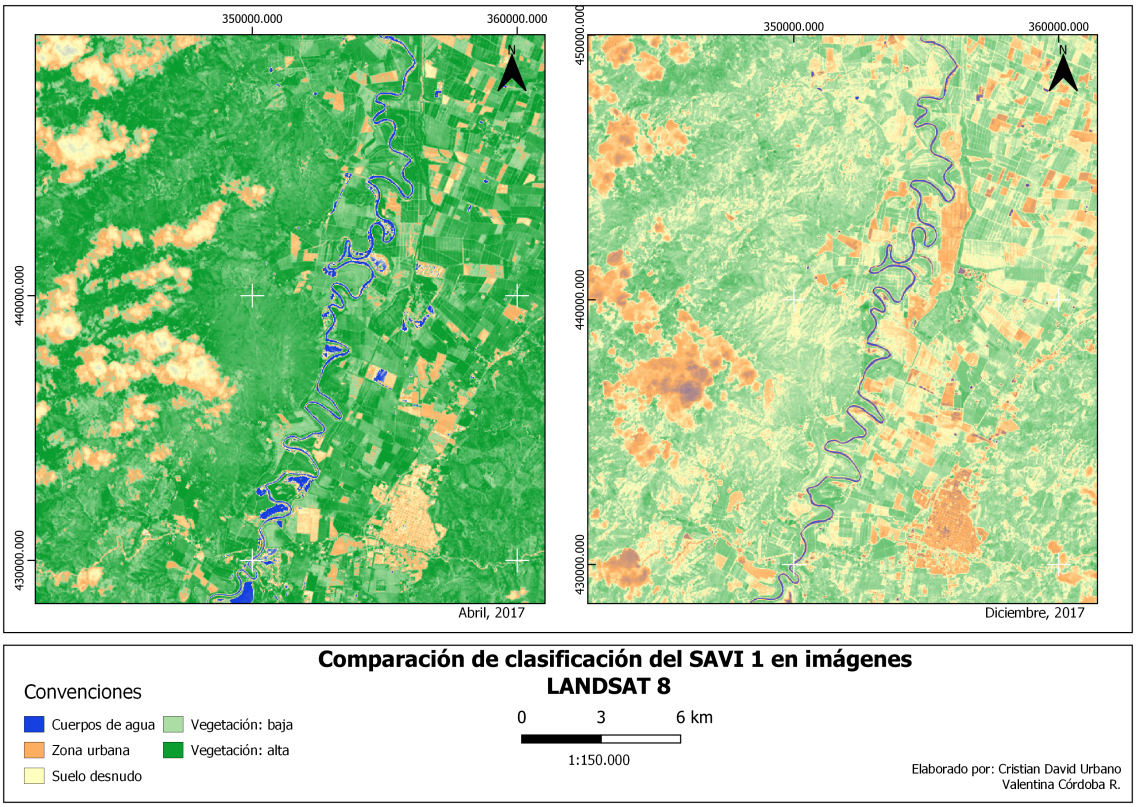


Figura 6.9: Aplicación SAVI 1 en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Finalmente, en la tabla 6.1, se pueden observar cada uno de los valores de SAVI con diferente valor de constante de ajuste del suelo (0.25, 00.5, 1) y para cada tipo de cobertura estudiada. Para el agua en el mes de abril, los valores máximos, medios y mínimos incrementan con el aumento de L. Para diciembre, los valores máximos y promedios disminuyen a medida que aumenta L. Mientras que para el valor mínimo la relación con L es directamente proporcional. Este mismo comportamiento se observó en las coberturas restantes: bosques, cultivos, suelo, urbano y vegetación. De manera general se puede decir que, en el mes de abril, la relación de la constante de ajuste de suelo presenta una relación directamente proporcional, mientas que para el mes de diciembre es inversa.

ÍNDICE / COBERTURA		MÁXIMOS		PROMEDIO		MÍNIMO	
		ABRIL	DICIEMBRE	ABRIL	DICIEMBRE	ABRIL	DICIEMBRE
AGUA	SAVI 0.25	0.887	0.768	0.310	0.344	-0.306	-0.182
	SAVI 0.5	0.969	0.747	0.337	0.312	-0.303	-0.149
	SAVI 1	1.095	0.721	0.377	0.280	-0.300	-0.121
BOSQUES	SAVI 0.25	0.897	0.785	0.538	0.414	0.040	0.038
	SAVI 0.5	0.989	0.749	0.577	0.376	0.046	0.041
	SAVI 1	1.135	0.709	0.637	0.341	0.057	0.046
CULTIVOS	SAVI 0.25	0.873	0.821	0.669	0.547	0.196	0.225
	SAVI 0.5	0.956	0.792	0.722	0.498	0.200	0.183
	SAVI 1	1.086	0.759	0.802	0.448	0.204	0.148
SUELO	SAVI 0.25	0.717	0.695	0.380	0.275	0.028	0.039
	SAVI 0.5	0.780	0.641	0.399	0.250	0.033	0.043
	SAVI 1	0.876	0.584	0.429	0.226	0.041	0.049
URBANO	SAVI 0.25	0.806	0.780	0.440	0.369	0.069	0.093
	SAVI 0.5	0.880	0.740	0.475	0.334	0.077	0.100
	SAVI 1	0.996	0.696	0.527	0.301	0.091	0.098
VEGETACIÓN	SAVI 0.25	0.887	0.768	0.543	0.490	0.047	0.048
	SAVI 0.5	0.983	0.737	0.585	0.448	0.055	0.053
	SAVI 1	1.136	0.705	0.649	0.407	0.068	0.059

Tabla 6.1: Compilado de valores SAVI para L 0.25, 0.5 y 1. Fuente: autores

Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)

El ARVI es un índice diseñado para minimizar los errores causados por los efectos atmosféricos que afectan directamente el canal rojo, para ello hacen uso del canal azul como método para minimizar las alteraciones. El índice está compuesto por las reflectancias del canal azul, rojo e infrarrojo en una ecuación normalizada, por lo que sus valores de clasificación oscilan entre -1 y 1.

Se inicia evaluando los posibles rangos de clasificación de las coberturas previamente establecidas, en donde se espera que la vegetación resalte un poco más por el canal azul.

La primera cobertura que se evalúa es el agua en la que aplicando el comportamiento espectral a la ecuación del ARVI indica que el agua son todos aquellos valores menores que 0. Al analizar los puntos de muestreo se identificó que solamente el 14 % de los puntos de abril eran negativos y en diciembre el 34 % a pesar de que al verificar visualmente la zona eran cuerpos de agua y que en su mayoría eran puntos mayores a 0 pero valores muy bajos, por lo tanto, fue necesario detallar en dichos puntos las reflectancias de cada una de las 3 bandas. Este análisis nos permitió descubrir que en aquellas zonas donde el índice clasificaba de forma positiva los cuerpos de agua se debía a que el canal azul reflejaba de forma diferente a la esperada y tendía a presentar un comportamiento de cuando en la superficie hay presencia de vegetación o suelo desnudo, por lo que el ARVI es más sensible a otro tipo de elementos que se encuentren suspendidos en los cuerpos de agua.

Las coberturas vegetales deberían ser aquellos mayores a 0 en donde entre mayor sea la presencia de vegetación y más sana sea, mayor será la absorción en el azul y en el rojo y más alto será el valor del ARVI, hasta alcanzar el 1 como valor máximo debido a que es una ecuación normalizada.

Se inicia por los cultivos, cuyas zonas presentan variedad desde suelo desnudo, cultivos en primeras etapas hasta cultivos bien desarrollados, que en el índice son bien representados y de la forma esperada. Donde diciembre destacó por presentar los valores más altos, con valores desde 0.002 hasta 0.66 y promedio 0.23, en el que los

valores más bajos correspondían a áreas no cultivadas y los más altos a cultivos desarrollados. De las zonas no cultivadas fue posible apreciar su cambio al estudiarlos nuevamente en el mes de diciembre, donde presentaban cambios significativos, tanto cuantitativa como cualitativamente. Por otro lado, las zonas boscosas y vegetaciones bajas, como pastizales o herbazales, son distinguibles unos de otros visualmente lo que se debe a que el índice logra clasificar las superficies y las vegetaciones presentan el comportamiento esperado.

Los suelos tienen un comportamiento espectral creciente que aplicado a la ecuación del ARVI se obtiene que los suelos se clasifican con valores bajos pero mayores a 0. El estudio de puntos de muestreo presenta una gran variedad de valores, debido a la diversidad de coberturas que se presenta en los suelos desnudos en los que se observó vegetaciones bajas tanto en abril como diciembre o también nubes, además debido a la pequeña extensión de estas áreas en la zona de estudio los píxeles pueden verse influenciados por otro tipo de coberturas, a pesar de ello el promedio de valores de clasificación corresponde a lo esperado, con una media de 0.24. Visualmente resultó más fácil encontrar las zonas correspondientes a suelos desnudos por lo que nos es posible corroborar que los valores de clasificación son los esperados.

Finalmente se estudian las zonas urbanas, cuya superficie está compuesta por diferentes tipos de materiales y además es influenciada por diferentes tipos de coberturas, especialmente las vegetales. A pesar de ello se espera que las zonas urbanas presenten comportamientos similares a los suelos desnudos es decir valores mayores a 0 pero bajos, donde entre más alto sea su valor mayor sería la influencia de vegetación. El estudio cuantitativo de la información nos demuestra que las suposiciones son acertadas, en donde el promedio de clasificación entre abril y diciembre es de 0.38, valor mínimo de 0.0041 y valor máximo de 0.71, que al ser evaluado cualitativamente identificamos que se trataba de un píxel de vegetación.

El ARVI presenta un buen desempeño en cuanto a la clasificación de coberturas, como se observa en la figura especialmente las de tipo vegetal, gracias al uso del canal azul, que permite resaltar sus características y detallarlas siendo una herramienta útil para llevar a cabo un seguimiento del desarrollo de coberturas remotamente, de su estado, distinguir entre densidades de vegetación e igualmente identificar otro tipo de superficies correctamente. Como elemento adicional se comprobó la capacidad del

índice de contrarrestar la interferencia de las nubes y sombra de ellas comparado con el resultado de aplicación de otros índices el ARVI corrige la influencia de ellas, a excepción de las nubes muy densas, lo que resulta muy útil si se cuenta con imágenes con presencia de nubes.

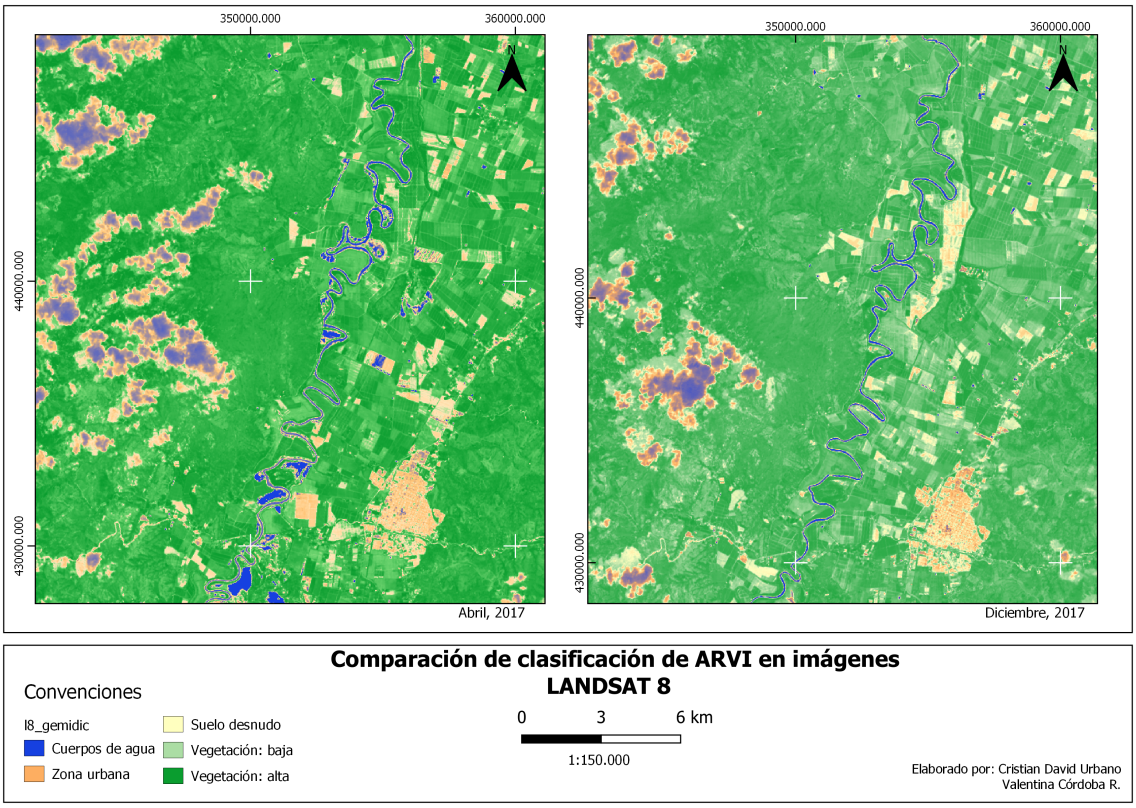


Figura 6.10: Aplicación ARVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Global Environmental Monitoring Index (GEMI)

El GEMI es un índice desarrollado para contrarrestar el error causado por la presencia de aerosoles y conservar el potencial de clasificación de índices como el NDVI y el RVI, para ello emplea un factor de autocorrección "n" que lo componen las reflectancias del rojo e infrarrojo y de tres constantes.

Los cuerpos de agua en este índice, según el comportamiento espectral aplicado al modelo, debería ser representado con valores negativos en aguas limpias, tranquilas y

sin elementos suspendidos, donde entre mayor sean las reflectancias en los canales, más negativo será el valor de índice. Mientras que cuando las reflectancias son bajas y el rojo presenta más absorción de la esperada el índice tiende a aumentar su valor, por lo tanto un agua pura será clasificada con valores menores a 0, pero un agua con presencia de elementos suspendidos podría comportarse con valores positivos. Del análisis de puntos de muestreo se encontró como valor mínimo -2.14 y un máximo de 1.438 que correspondía a un punto de vegetación.

Las coberturas de tipo vegetal en el GEMI se esperaría que se clasificaran con valores positivos, basados tanto en la ecuación 4.8 como en el comportamiento espectral de ellas, donde entre más frondosa, sana y vigorosa sea más alto se espera que sea su valor de clasificación. Del análisis de puntos de muestreo se encontró para bosque un valor máximo de 3.9, para vegetación baja un valor de 5.5 y para cultivos un valor de 2.2 y promedio de 0.69, 0.71 y 0.78 respectivamente. Al estudiar los puntos se identificó que los valores mayores a 1 correspondían a nubes y no a vegetación, que entre más alto el valor del índice mayor era la presencia de coberturas vegetales. En cuanto la zona de cultivos se logra distinguir entre las zonas sembradas y las no sembradas pero no de forma detallada, adicionalmente entre épocas se presentaron diferencias, siendo diciembre el mes con los valores más altos apesar de ser enero la época de precipitaciones, para lo que atribuimos se debe a la estructura del índice.

En cuanto a los suelos el índice debería clasificarlos según su comportamiento espectral con valores mayores a 0 pero bajos, donde entre más alto sea el índice mayor vegetación se supone que presente. Al analizar los puntos de muestreo se identificó que el promedio de clasificación para suelo era de 0.59, pero las formas no eran muy bien delimitadas y no todas las zonas eran clasificadas, ya que se mezclaban con vegetaciones bajas.

Finalmente, las zonas urbanas tienden a presentan en la mayoría de los materiales de construcción que la componen un comportamiento semejante al suelo, por lo que deberían clasificarse como valores positivos y bajos. Al analizar los puntos de muestreo se encontró un promedio de 0.0045 para abril y 0.52 para diciembre, además que el índice permitía delimitar las zonas urbanas pero no lograba clasificar las carreteras o elementos de construcción de escalas más reducidas. En Abril el índice presentó un comportamiento diferente al esperado, ya que la cobertura urbana tendía a reflejar más

de lo normal por lo que el índice representaba dicha zona dentro del rango de valores establecido para cuerpos de agua, lo que puede deberse a que los niveles de precipitación en abril eran mayores y esto pudo haber influenciado la cobertura evaluada, debido a que en diciembre se presentó el comportamiento esperado del análisis de la ecuación y de la firma espectral, pero en ningún otro índice aplicado se volvió a presentar el caso de zona urbana de abril

La aplicación del índice se muestra en la figura 6.11, en ella se evidencia la diferencia entre épocas tanto para vegetación como para zona urbana mencionado en sus respectivos análisis. En cuanto a las nubes, para ambos meses se logran distinguir claramente respecto a las coberturas evaluadas, además que el índice contrarresta la influencia de la sombra de las nubes y de las nubes de baja densidad, clasificando las coberturas debajo de ellas. Finalmente de la evaluación se establece que el índice se comporta diferente en temporada de lluvias, por lo que es un factor a tener en cuenta al momento de aplicarlo, ya que puede alterar las respuestas.

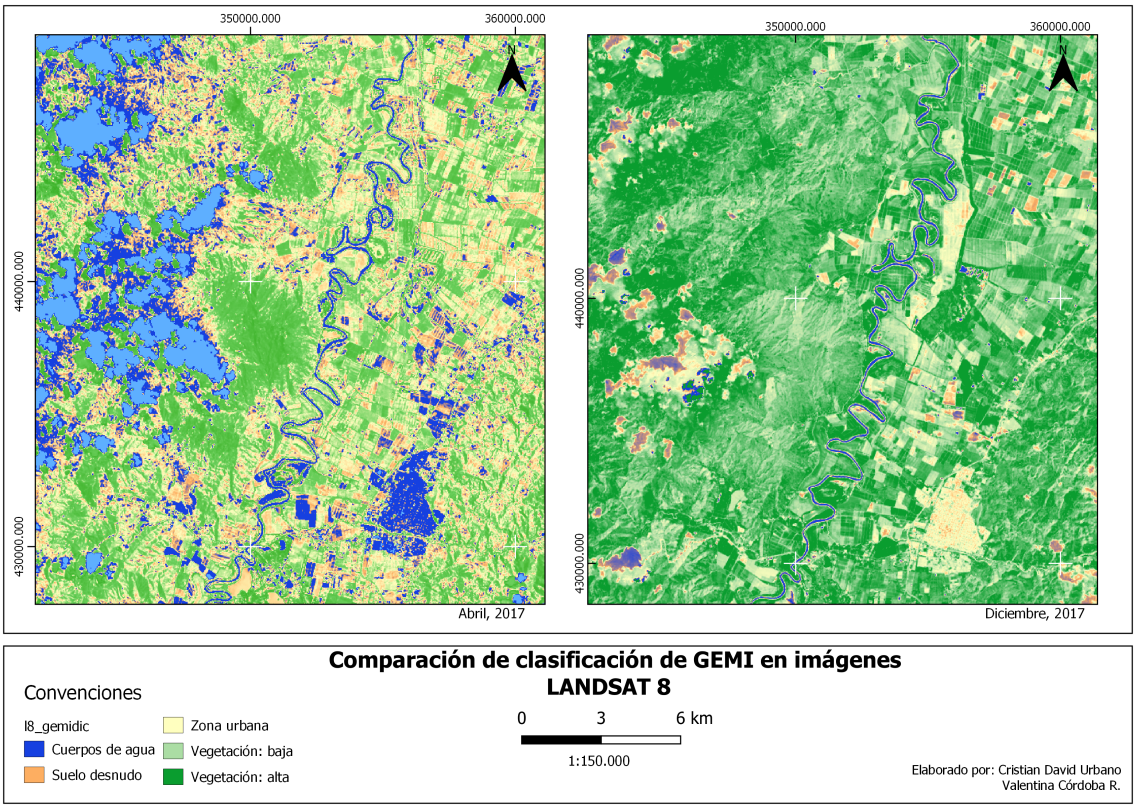


Figura 6.11: Aplicación GEMI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI)

El MSAVI es una propuesta de índice de vegetación enfocado a estudiar zonas con influencia de suelo desnudo, cuyo propósito fue modificar el factor de ajuste de suelo (L) del SAVI por una función variable y eliminar la dependencia del índice a las proporciones de vegetación del área de interés. El índice permite estudiar las coberturas a partir de las reflectancias del rojo e infrarrojo. Al ser una ecuación de mayor complejidad se inició analizando los posibles resultados de su aplicación:

Si $Infrarrojo > Rojo$ el MSAVI es mayor que 0 e incrementa su valor en proporción a la diferencia de las reflectancias de los canales, como es el caso de le vegetación en donde las reflectancias en infrarrojo son altas y en Rojo bajas y entre mayor diferencia haya entre ellos más es la presencia de vegetación.

Si $Infrarrojo \approx Rojo$ el MSAVI es próximo a 0, siempre y cuando infrarrojo sea mayor que rojo, como es el caso del suelo desnudo.

Si $Infrarrojo < Rojo$ el MSAVI es menor que 0 y disminuye su valor en proporción a la diferencia de las reflectancias de los canales, como es el caso del agua.

Una vez se estudia la ecuación (4.10) y los posibles valores de clasificación para coberturas se procede a estudiar el índice en cada una de ellas, iniciando con los cuerpos de agua, tal como se esperaba el índice los clasifica con valores negativos pero muy próximos a 0 especialmente en la zona de río o drenajes secundarios en sus áreas más estrechas, debido a que el píxel puede llegar a tener influencia de las coberturas de su alrededor por cuestiones de escala. Pero a pesar de ello el índice logra clasificar los cuerpos de agua de la manera esperada.

Las vegetaciones son el principal objetivo del MSAVI, especialmente aquellas zonas con presencia de suelo desnudo, que en nuestra zona de estudio serían los cultivos, compuesto por áreas cultivadas y no cultivadas. Entre ambos meses de estudio hay diferencias significativas en las condiciones climáticas que son posibles de identificar a partir del MSAVI, en el mes de abril se observan las zonas de agua estancada, que al

combinarse con vegetación o suelo no son clasificadas totalmente como agua. Adicionalmente el índice clasifica muy claro los sectores con cultivos y aquellos no cultivados en donde la vegetación comienza a diferenciarse aproximadamente desde el 0.4. El índice logra identificar tanto zonas con exceso de agua como detallar entre épocas la evolución de un cultivo a partir de su rango de clasificación permitiendo llevar un seguimiento entre épocas de manera remota.

En cuanto a las coberturas boscosas o de vegetaciones más bajas a ellas el índice las clasifica con valores superiores al 0.4 hasta el 0.9 en nuestra zona de estudio. Entre más espesa, frondosa y vigorosa sea la vegetación el valor del índice es más alto, esto debido a que la proporción en que se absorbe y refleja tanto en el rojo como en el infrarrojo depende de la actividad fotosintética que se realiza en la superficie, por lo tanto, entre mayor sea la cantidad de vegetación y mejor sea su estado mayor será la actividad y más alto será el valor del índice.

Los suelos desnudos y las zonas urbanas tienden a tener un comportamiento similar debido a que ambos presentan ausencia de vegetación y son superficies en las que el rojo e infrarrojo reflejan en proporciones similares, más aún cuando se trata de suelos secos o superficies rocosas, este tipo de superficies como se había supuesto tienden a representarse en el índice con valores bajos y próximos a 0, en donde el índice los representa hasta aproximadamente el 0.4 según nuestro caso de estudio. Específicamente en cuanto a suelos desnudos se identificó que en el mes de abril los valores del índice eran mayores en comparación con el mes de diciembre que tiende a tener niveles de precipitación mucho menores.

Para diferenciar si el índice clasifica suelo desnudo o zona urbana es necesaria una evaluación de la imagen, ya que su rango de clasificación es el mismo, pero el proceso se facilita debido a que las zonas urbanas presentan formas predeterminadas y ordenadas que son fácil de diferenciar.

El índice logra dentro de su formulación resaltar la diferencia entre ambos canales lo que permitiría una clasificación más detallada de las zonas influenciadas por suelos desnudos, debido a que en este tipo de superficies el rojo e infrarrojo llegan a presentar reflectancias muy similares. Cabe resaltar que el enfoque del índice es estudiar coberturas con presencia de suelo desnudo sin factores de ajuste, ni el

concepto de línea del suelo. Su objetivo es un ajuste estándar para toda zona de estudio con el fin de que aplicarlo e interpretarlo sea más sencillo. Entre más bajo es el valor del índice la superficie de suelo estudiada es más seca o rocosa en cuyo caso podría ser también una superficie urbana, pero si el valor del índice comienza a incrementar el suelo tiende a ser más húmedo.

En la figura 6.12 se presenta el resultado de la aplicación del índice. Se puede observar el desempeño, en especial en la zona de cultivos, donde los detalla de forma muy precisa y permite delimitar los surcos, además la vegetación es correctamente clasificada y se logra distinguir desde las tonalidades verdosas las zonas ya sea más frondosas, vigorosas o en mejor estado.

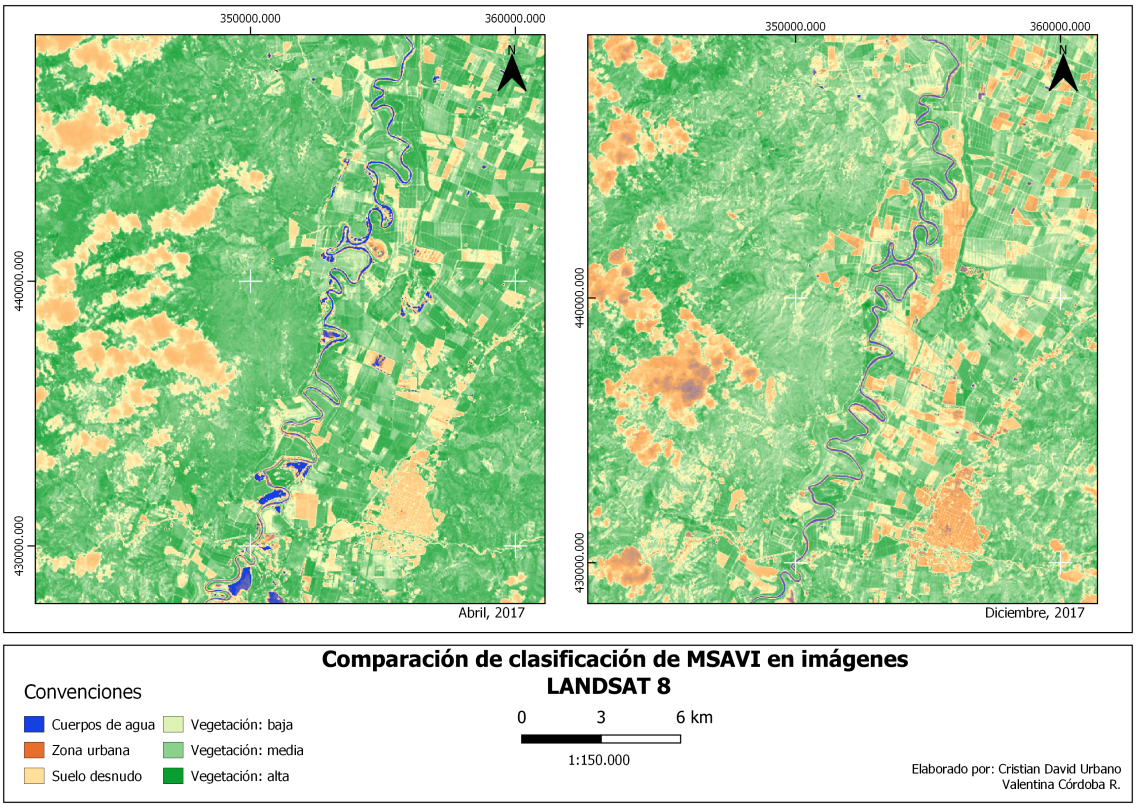


Figura 6.12: Aplicación MSAVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

A Green atmospherically resistant vegetation index (GARI)

Este índice, nace de las perturbaciones introducidas por el uso del canal rojo. Por esta razón se hace la implementación de los canales azul y verde en una ecuación normalizada, por lo que su rango de clasificación está establecido entre -1 y 1.

Por el comportamiento espectral del agua en el espectro visible y la forma de la ecuación (4.11) se esperaría que este tipo de superficies sean representadas con valores negativos al momento de tratarse de agua pura, pero de igual forma debido a la sensibilidad del índice a la vegetación podrían encontrarse valores positivos pero próximos a 0 en los cuerpos de agua, por la influencia de elementos suspendidos en ella o por ser elementos circundantes.

En la cobertura agua, abril arrojó un valor máximo de 0.743, medio de 0.207 y mínimo de -0.413: para este conjunto de datos el 58 % de los valores resultaron positivos y el 42 % negativos. Para diciembre se encontró un valor máximo de 0.827, promedio 0.393 y mínimo de -0.382: el porcentaje de valores positivo fue de 85 % y el 15 % negativos.

La comparación de los conjuntos de datos de los meses de abril y diciembre, mostraron que el 13 % de los datos de mes de abril resultaron mayores que los valores del mes de diciembre. El resultado del análisis mostró que este índice en general delimita las fuentes de agua de manera sobresaliente en el rango del -0.413 hasta -0.110, pero al involucrar dentro de la ecuación las reflectancias de más canales tiende a ser más sensible y detectar anomalías en los comportamientos espectrales de las coberturas mucho más preciso que otros índices.

Las coberturas vegetales presentaron como valor máximo un 0.838, un mínimo de -0.004 y promedio de 0.510, donde el 99 % de los datos eran valores positivos y el valor negativo encontrado correspondía a una nube densa. De manera general este índice presenta dificultad para determinar bosques poco densos, mientras que donde se presenta mayor densidad, los parches de bosques son bien delimitados, adicionalmente los coeficientes de correlación mostraron un valor bajo, indicando que los valores de este tipo de cobertura son variantes entre ambas temporadas estudiadas. El análisis mostró que este tipo de cobertura es muy variante y difícil de clasificar dentro de una clase debido a que en ocasiones se comporta como vegetación y otras como suelo expuesto.

Para los cultivos el análisis entre ambas fechas mostró que el 29 % de los valores correspondientes al mes de abril resultaron mayores a los datos del mes de diciembre. Los conjuntos de valores mostraron un coeficiente de correlación de 0.009, es decir alta variación. El análisis visual del resultado de clasificación de este índice mostró que las zonas de cultivos se encuentran bien delimitadas, incluso se puede apreciar con claridad los ciclos de corte de cultivo, es decir en el mes de abril el área se encontraban sembradas las áreas y en diciembre se observaba el suelo expuesto: el VI inicia clasificando la vegetación desde 0.5 hasta 1.

En la cobertura suelo desnudo para el mes de abril se encontró un valor máximo de 0.582, valor medio de 0.293 y mínimo de 0.006 dentro de este conjunto de datos no se observaron valores negativos. Para el mes de diciembre se encontró un valor máximo de 0.731, promedio 0.320 y mínimo de 0.032 al igual que el mes de abril no se observaron valores negativos dentro de la muestra.

La comparación de ambos conjuntos de valores mostró que el 47 % de los valores del mes de abril son mayores que los datos del de diciembre y una correlación del 0.402, es decir variación entre épocas. El análisis de zonas puntuales en la imagen mostró que los valores de este índice para este tipo de cobertura tienden a cero: cabe recalcar que los valores de GARI en el mes de abril en general son menores, mientras que en el mes de diciembre son superiores a cero. Se presume que este comportamiento podría deberse al crecimiento de vegetación en dichos espacios. Para el caso de suelo desnudo se obtuvo que son bien clasificados en el rango desde 0 hasta 0.320

La cobertura urbano en el mes de abril mostró un valor máximo de 0.652, medio de 0.336 y mínimo de 0.060 no se encontraron valores negativos. Para el mes de diciembre, el valor máximo fue de 0.810, promedio de 0.404 y mínimo de 0.0069 sin valores negativos.

Comparando los datos del mes de abril y diciembre, se encontró que sólo el 19 % de los valores correspondientes al mes de abril resultaron mayores a los del mes de diciembre y una correlación del 0.812. El análisis mostró que las zonas urbanas son bien delimitadas, pero en tejido discontinuo urbano el valor del índice se puede ver afectado por elementos circundantes.

En la figura 6.13 se presenta el resultado de la aplicación del índice, donde se

observa que el índice tiene un desempeño sobresaliente, logra identificar cuerpos de agua extensos y reducidos de manera adecuada, los bosques son delimitados en las zonas donde la densidad de esta cobertura es considerablemente alta. Los cultivos presentan una buena clasificación dejando ver los surcos entre cultivos, además es apreciable la clasificación que existe entre el cultivo en desarrollo y la terminación de este. En suelo desnudo se determinó que los valores de este índice son mayores en el mes de diciembre, mientras que en abril son bajos. En la cobertura urbana la variación entre épocas es mínima: alto índice de correlación. Finalmente, se destaca la sensibilidad del índice ante el comportamiento espectral por la estructura de este mismo al involucran en su cálculo la reflectancia de 4 canales, logrando identificar anomalías que en otros índices no sería posible.

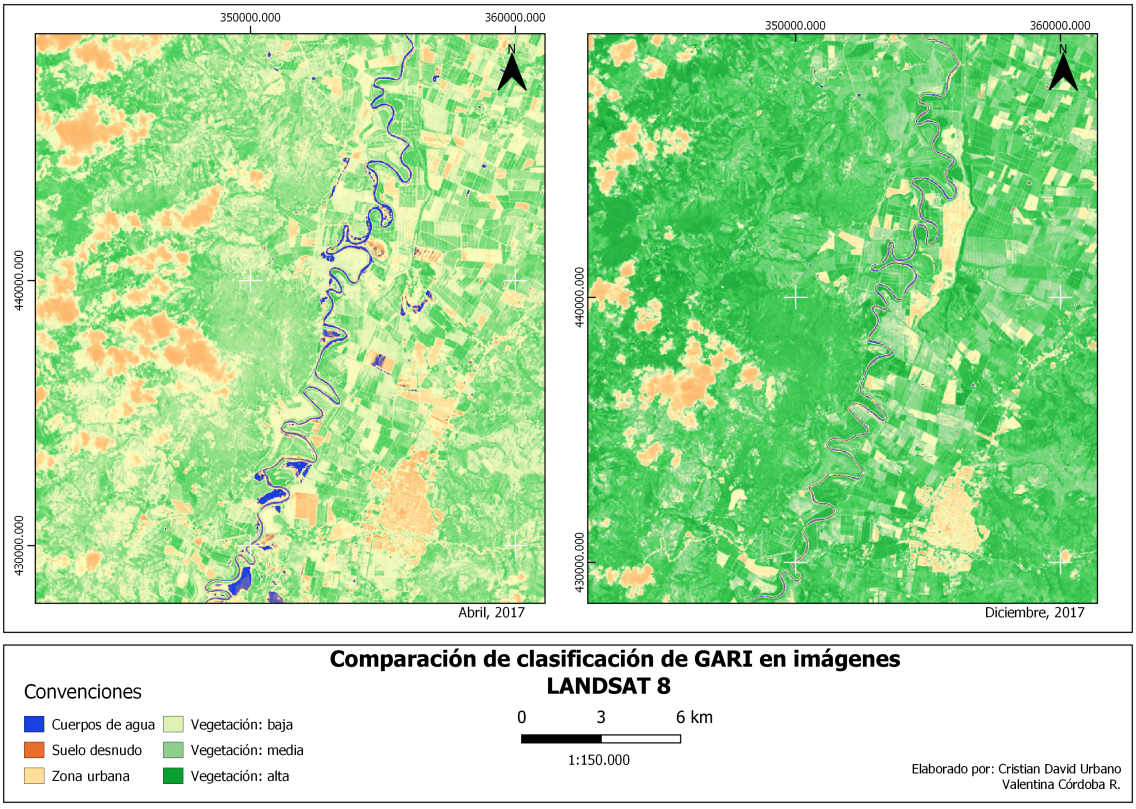


Figura 6.13: Aplicación GARI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Enhanced Vegetation Index (EVI)

El índice de vegetación mejorado es un VI que corrige los errores detectados en el NDVI, especialmente los relacionados con interferencias atmosféricas y aerosoles.

Para la cobertura agua en el mes de abril se encontró un valor máximo de 1.414, medio de 0.488 y mínimo de -0.302. Para este conjunto de datos el 65 % de los datos resultaron positivos. En el mes de diciembre el valor máximo fue de 1.012, promedio de 0.412 y mínimo de -0.0140: el 85 % de estos valores fueron positivos y un coeficiente de correlación entre épocas de 0.816, sin embargo, fue necesario verificar el porque de los valores extremadamente altos obtenidos. El análisis en zonas específicas mostró que el rango de valores para esta cobertura oscilaba entre -0.129 y 0.039 y que el resto de los puntos fuera de este rango hacían referencia a otro tipo de coberturas. Este índice delimita de manera aproximada los cuerpos de agua sin importar su extensión.

Para las coberturas de tipo vegetal, según el análisis de la ecuación (4.12) se esperaría obtener valores positivos. En este tipo de coberturas en el mes de abril se encontró un valor máximo 1.538, medio de 0.915 y mínimo de 0.164. En diciembre el valor máximo fue de 0.980, promedio de 0.559 y mínimo de 0.141. En general los valores del mes de abril son mayores a los del mes de diciembre en un 85 %. En el análisis se encontró que índice no destaca las zonas de alta densidad boscosa, simplemente los clasifica como vegetación. El rango de valores observado para esta cobertura estuvo entre el 0.811 y el 1.258.

En cultivos en el mes de abril el valor máximo fue de 1.446, medio de 1.015 y mínimo de 0.237. Para diciembre el valor máximo fue de 1.074, promedio de 0.632 y mínimo de 0.217. El análisis de los conjuntos de datos mostró que el 89 % de los valores del mes de abril eran mayores que los datos del mes de diciembre. El índice de correlación mostró un valor muy bajo de 0.019. Esto indicaría que índice es muy sensible a los cambios de presencia de vegetación, además se identificó la capacidad de clasificar las zonas de cultivos, demarcando los surcos. El rango de valores encontrado para este VI estuvo entre 0.805 y 0.906.

En la cobertura vegetación baja en el mes de abril se obtuvo un valor máximo de 1.469, medio 0.875 y mínimo de 0.222. En el mes de diciembre el valor máximo fue de 0.970, promedio de 0.606 y mínimo de 0.203. Se determinó que los datos correspondientes al mes de abril son mayores en un 80 % a los datos del mes de

diciembre. El análisis mostró que este índice logra discriminar de mejor manera entre la vegetación y el suelo expuesto. A pesar, que se logra una mejor discriminación de la vegetación el rango de valores para esta cobertura continúa siendo difícil determinar. En la exploración puntual de zonas de vegetación baja se determinó un rango de valores entre 0.706 y 0.786.

En la cobertura suelo para el mes de abril se obtuvo un valor máximo de 1.269, medio 0.532 y mínimo de 0.195: sin valores negativos. Para el mes de diciembre el valor máximo fue de 0.802, promedio de 0.377 y mínimo de 0.165: sin valores negativos. Al comparar ambos conjuntos de datos se encontró que en un 85 % los valores del mes de abril son mayores que los del mes de diciembre. Los anteriores resultados coinciden con el análisis de la ecuación de este índice, puesto que lo esperado serían valores positivos bajos. Sin embargo, en el exploratorio se encontraron valores altos que se analizaron puntualmente, encontrando que, en los puntos que se dieron estos valores hacían referencia a vegetación, dando como resultado a estos valores elevados. Este análisis también mostró que este VI destaca muy bien la zonas sin vegetación. El rango de valores para este índice fue entre el 0.110 y 0.210.

En la cobertura urbana en el mes de abril se encontró un valor máximo de 1.254, medio de 0.674 y mínimo de 0.211: no se observaron valores negativos. En diciembre el valor máximo fue de 0.983, promedio de 0.435 y mínimo de 0.146: sin valores negativos. Según el análisis realizado entre ambos conjuntos de datos, estos mostraron un alto coeficiente de correlación con un valor de 0.817. Esto indicaría que los valores presentan baja variabilidad entre épocas. El análisis cualitativo de zonas puntuales mostró un rango de valores entre el 0.200 y el 0.474. Según lo planteado en el análisis de firmas espectrales, esta cobertura presenta una firma muy similar a la de los suelo desnudo, comportamiento que se corroboró en el análisis cualitativo de este índice, puesto a que no se diferencian de manera fácil las construcciones de los suelo expuestos.

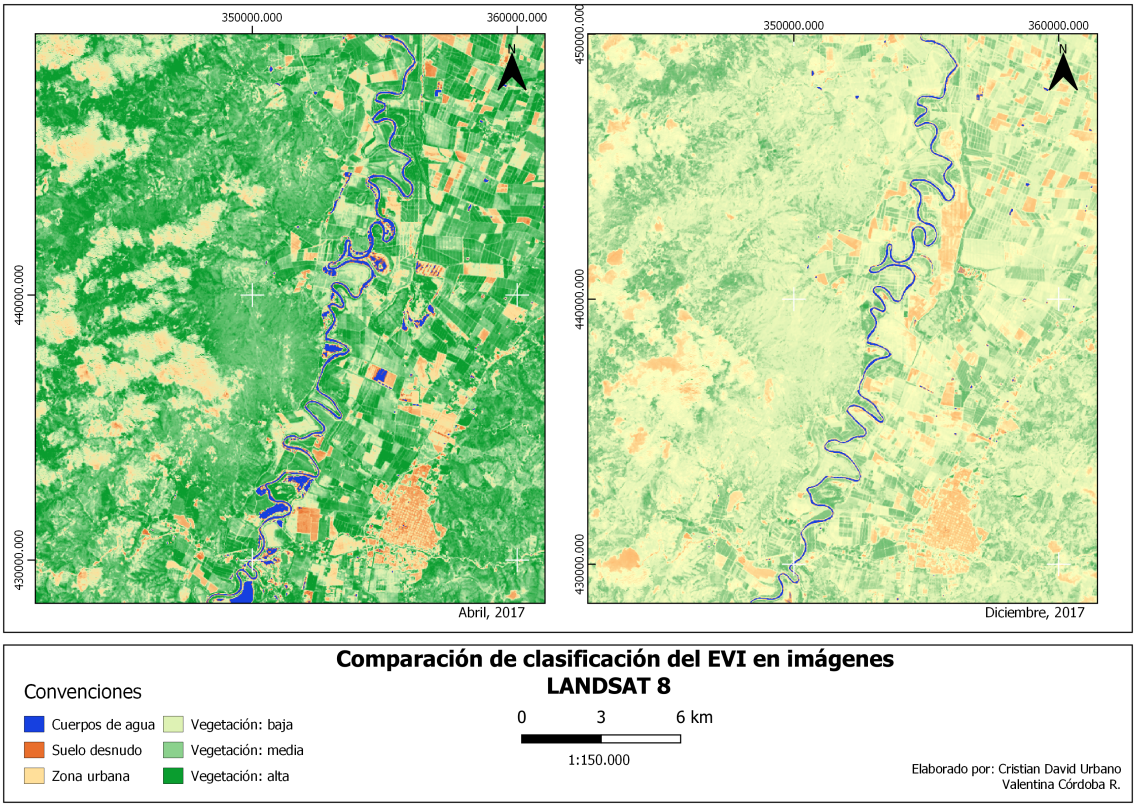


Figura 6.14: Aplicación EVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Al aplicar el comportamiento espectral de los cuerpos de agua a la ecuación del índice se obtuvo que el GNDVI debería representarlos entre -1 y 0. Los análisis de las muestras de puntos aleatorios para este índice mostraron que, para el mes de abril el valor máximo es de 0.794, valor medio 0.340 y mínimo -0.226. Para este conjunto de datos, el 84 % de ellos (46 puntos) resultaron positivos y el 16 % negativos (9 puntos). Para el mes de diciembre se obtuvo como valor máximo 0.796, promedio 0.373 y mínimo de -0.262, contando con un total de 43 puntos con valor de índice positivo (78 %) y 12 puntos con GNDVI negativo (22 %), por esta razón se procedió a realizar la verificación de la posición de los puntos sobre la cobertura. Se encontró que, efectivamente los puntos se encontraban dentro de los polígonos de agua, pero debido a la disminución de los niveles de los cuerpos de agua, los puntos en las imágenes eran realmente vegetación

o suelo.

A pesar de que, los conjuntos de datos presentaron una correlación del 0.707, fue necesario aclarar el comportamiento anteriormente descrito, ya que, al realizar una comparación de la teoría con los resultados obtenidos, no corresponderían a agua. Con la finalidad de aclarar este comportamiento, se procedió a extraer muestras en masa de agua extensas, y efectivamente los resultados que entrega este índice para agua son menores a cero. Adicionalmente, de los conjuntos de datos iniciales, se verificó los resultados negativos obtenidos y estos correspondieron exactamente agua, donde las fluctuaciones entre temporadas climáticas no influyeron sobre ellos.

De manera general, se puede decir que este índice delimita de manera aproximada las fuentes hídricas, constatado con las formas ofrecidas por el mapa de coberturas de la C.V.C.

Las coberturas vegetales en el índice, basados en su comportamiento espectral y en la ecuación del índice, deberían encontrarse clasificadas en el rango del 0- 1, siendo 1 el valor que representaría aquellas más sanas, vigorosas y abundantes. Al analizar el conjunto de datos tomados para las 3 clasificaciones de esta cobertura se encontró que el 100 % de los datos eran positivos, con valor máximo de 0.814, valor mínimo de 0.064 y un promedio de 0.550.

Apoyados en estadísticos se determinó que el 47 % de los datos pertenecientes al mes de abril son mayores que los de diciembre en bosque. Las áreas de bosque densas son bien definidas por el GNDVI, acercándose en gran medida a lo observado en el mapa de coberturas de la C.V.C.

Dentro de los conjuntos de datos de cultivos se encontró que el 58 % de los valores del mes de abril resultaron mayores que los datos del mes de diciembre. Se encontraron valores bajos, que diferían en gran medida entre ambas épocas, por lo cual se verificó este comportamiento, determinado que la presencia de nubes tiende a disminuir el valor del índice, pero sin llevarlo a negativo, además de las diferencias de desarrollo de los cultivos entre ambas épocas.

En cuanto a las vegetaciones bajas, como pastizales o herbazales, se encontró que

estos conjuntos de datos presentan baja correlación (0.035). Esto quiere decir que los datos difieren en gran medida de una época a la otra. La diferencia entre ambas épocas mostró que el 31 % de los datos correspondientes al mes de abril son mayores a los del mes de diciembre. A pesar de que este índice de vegetación es mucho más sensible a las variaciones de clorofila, los resultados obtenidos reflejan ciertos valores bajos, que, al tratarse de una cobertura de vegetación baja, el valor del VI estaría fuertemente distorsionado por la reflectancia del suelo.

Realizando una comparación de la teoría con los resultados de obtenidos, se encuentra que el índice efectivamente obtiene valores positivos en los lugares donde hay actividad fotosintéticamente activa. A pesar de que este índice según la teoría es más resistente a los efectos atmosféricos, no es efectivo en nubes densas, mientras que en nubes poco densas el índice funciona relativamente bien. Finalmente, se determinó que al aplicar este índice sobre vegetaciones libres de nubes se esperaría obtener valores superiores a 0.5.

Los suelos desnudos en el índice deberían representarse con valores mayores a cero, pero muy bajos. Según los estadísticos para los puntos de muestreo tomados en las zonas de suelo desnudo de las coberturas de la C.V.C el mes de abril mostró un valor promedio de 0.466, máximo de 0.671 y mínimo 0.056. El mes de diciembre, mostró como valor máximo 0.734, promedio 0.356 y mínimo 0.062, al igual que el mes de abril no se observaron valores negativos, donde los valores del mes de abril en la gran mayoría están por encima de los del mes de diciembre. Se observaron valores considerablemente altos, por esta razón se verificó este comportamiento, debido a que, estos valores corresponden a vegetación vigorosa. De los valores explorados, el suelo desnudo mostró un rango entre 0.3 y 0.4. A pesar de que este VI es más sensitivo a los cambios de clorofila, tiende a generarse confusiones entre suelo desnudo y vegetación dispersa.

Finalmente, se encontró que el GNDVI clasificaría de manera similar el suelo desnudo y las zonas urbanas. Para el mes de abril los estadísticos mostraron como valor máximo 0.729, valor medio 0.469 y valor mínimo de 0.089. De las 63 muestras analizadas, ningún dato fue inferior a cero. En el mes diciembre, el valor máximo fue de 0.790, promedio 0.466 y mínimo de 0.121. Entre épocas la correlación de datos analizados es de 0.742, es decir poca variación del tejido urbano por precipitaciones. Respecto al rango de valores se determinó, apoyados en análisis cualitativos de las imágenes que este índice y para

esta cobertura, tiene un rango entre el 0.33 y 0.36.

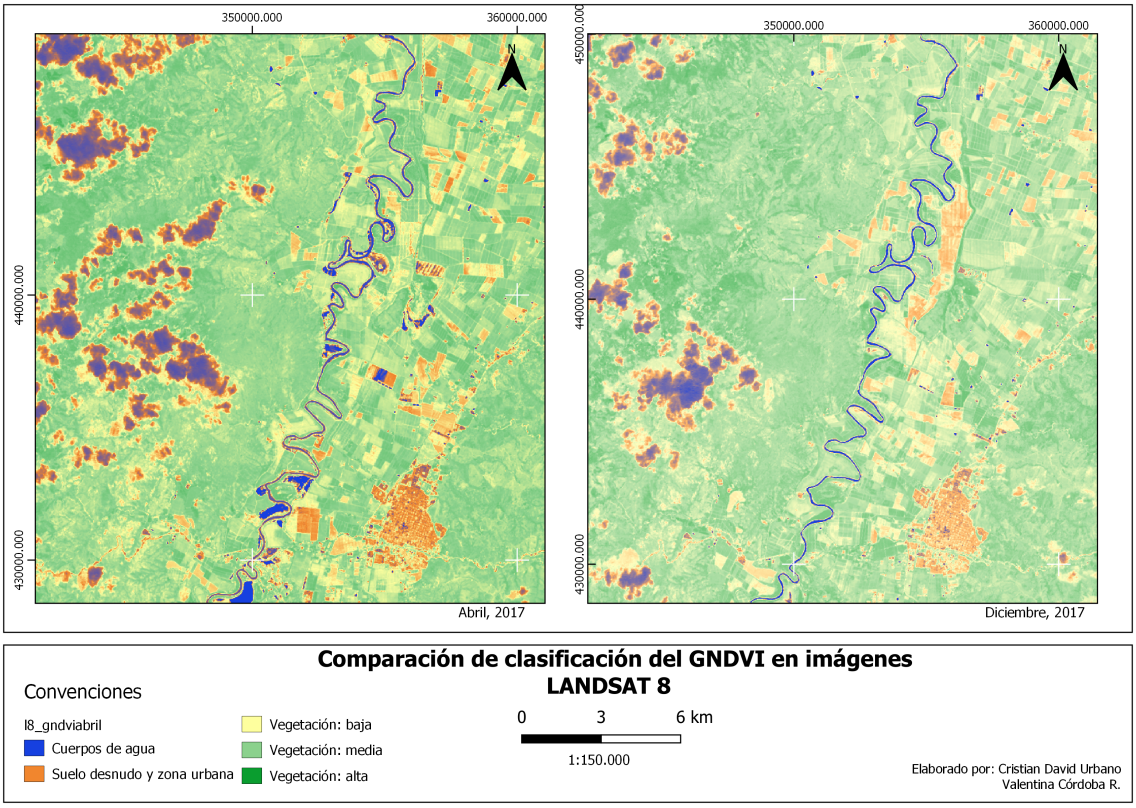


Figura 6.15: Aplicación GNDVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Difference Vegetation Index (DVI)

Basados en el comportamiento espectral del agua y teniendo en cuenta la ecuación (4.14), los valores del DVI para el agua pura o limpia entregados por el índice, deberían ser menores a 0, donde entre más bajo sea el valor del índice, mejor será el estado del cuerpo de agua evaluado. El análisis de los puntos de muestreo para el mes de abril en agua, presentó un valor máximo de 2.139, un valor mínimo de -0.290 y un valor promedio de 0.582. Para el mes de diciembre se obtuvieron valores de 0.654, -0.078 y 0.218 para valor máximo, mínimo y promedio respectivamente. Adicionalmente, se efectúa una diferencia entre los valores de abril y diciembre, permitiendo una identificación de los puntos en donde se presentan las mayores variaciones.

Los datos del mes de abril son más elevados respecto a los del mes de diciembre. Se presume, que este patrón puede atribuirse a las temporadas de lluvia y no lluvia, que en el país son bastante marcadas. El análisis también mostró puntos en medio de corrientes de agua, que en el mes de abril las pequeñas islas se encuentra inundadas, mientras que en el mes de diciembre el montículo de tierra se encontraba expuesto. Este mismo comportamiento se observó en valores tomados en el borde de los ríos que en el mes de abril pueden presentar desbordamientos, pero en el mes de diciembre regresaban a su curso normal o incluso disminuían su sección transversal.

Tal como se esperaba el índice clasificó los cuerpos de agua en el rango de valores menor a 0 permitiendo delimitar de manera muy aproximada la forma de las fuentes hídricas sin importar su extensión. Sin embargo, en el mes de abril las masas de agua son mucho más claras.

Para las coberturas de tipo vegetal se esperaría valores de DVI mayores a 0, que basados en la literatura tienden a ser altos, siempre y cuando la densidad de la vegetación sea alta y su estado sea sano. El estudio de los puntos de muestreo para todas las coberturas vegetales arrojó que el 100 % de sus muestras, tanto para abril como para diciembre, resultaron mayores a cero, además que los valores de abril eran más altos respecto a diciembre.

Analizando los valores obtenidos al efectuar la diferencia entre épocas, se encontró que el 38 % de los datos (33 puntos) presentan una variabilidad mayor a 1. Empleando el análisis cualitativo se encontró que estos puntos se localizan en vegetación extremadamente baja y dispersa. Relacionando estos resultados con las estaciones climáticas del país, es claro que en meses lluviosos la densidad de la cobertura vegetal aumenta y en verano se reduce, dando lugar a las diferencias considerables encontradas.

Las zonas de bosque de poca extensión pueden sufrir perturbaciones por factores circundantes, en este caso, los bosque se encuentran en medio de cultivos temporales, que al desaparecer hacen que el brillo del suelo aparezca modificando la reflectancia capturada por el sensor. Este mismo factor aplica para actividades de deforestación, debido a que en el mes de abril la cobertura boscosa era de extensión considerable, pero en diciembre del mismo año las parches de deforestación aparecen en las zonas

en cuestión. Adicionalmente, la zona montañosa contaba con presencia considerable de nubes y de sus sombras generando variaciones hasta de una unidad de DVI en comparación con una escena libre de estas perturbaciones.

En los cultivos se presentó mayor variación entre las épocas. Se encontró que el 42 % de los puntos (36) presentaban una variación mayor a 1, debido principalmente a las diferencias de estado de crecimiento de los cultivos plantados. En análisis cualitativo mostró que las zonas de cultivos se distinguen claramente en el mes de abril, mientras que en el mes de diciembre existe la desaparición de estos. Por esta razón este índice podría funcionar para realizar monitoreo de crecimiento de cultivos.

Dentro del conjunto de datos analizados para la cobertura urbana el 100 % de ellos resultaron mayores a cero, tanto en abril como en diciembre. En el mes de abril, los resultados del VI muestran como valor máximo 1.655, promedio 0.798 y mínimo de 0.129. Para el mes de diciembre, el exploratorio de datos arrojo un valor máximo de 0.591, valor promedio 0.234 y valor mínimo 0.073. Al igual que en las coberturas anteriores, los valores del DVI del mes de abril resultan ser mayores que los del mes de diciembre en el 97 % de los datos.

Finalmente, los suelos desnudos se representan en el DVI con valores mayores a cero, pero muy próximos a él, lo que se confirma al analizar los puntos de muestreo, en los que el 100 % de los datos eran mayores a cero. El exploratorio de datos mostró un valor máximo de 1.390, medio 0.596 y mínimo 0.166 para abril y para diciembre un máximo de 0.462, promedio 0.189 y mínimo 0.074.

La diferencia entre épocas muestra que sólo el 4 puntos (6 %) exhiben una variación mayor a 0.9. Esto significaría que la diferencia entre épocas afecta en menor proporción a los estudios realizados sobre suelo. Los puntos que mostraron una variación mayor a 0.9 se verificaron mediante análisis cualitativo. Apoyados en los stacks de las imágenes de abril y diciembre en color verdadero RGB, se corrobora que el valor de variación de estos se debe a la ubicación. Estos recaen sobre drenajes colectores, que por consiguiente, en épocas de lluvia la oferta hídrica será mayor en este punto.

En el análisis cualitativo se encontró que este índice no permite discriminar de manera efectiva los suelos desnudos, por esta razón no es aconseja trabajar este tipo

de cobertura con este índice. Adicionalmente se destaca que los valores máximos presentados no hacen referencia a suelo completamente desnudo sino con presencia de vegetación.

En resumen el DVI no permite distinguir de manera exacta la vegetación, ya que tiende a confundirse con suelo desnudo, por consiguiente no es aconsejable efectuar estudios de seguimiento de este tipo de coberturas. Además, en la figura 6.16 se evidencia la diferencia específicamente en vegetación entre la clasificación de abril y diciembre, a pesar de tratarse de una misma zona.

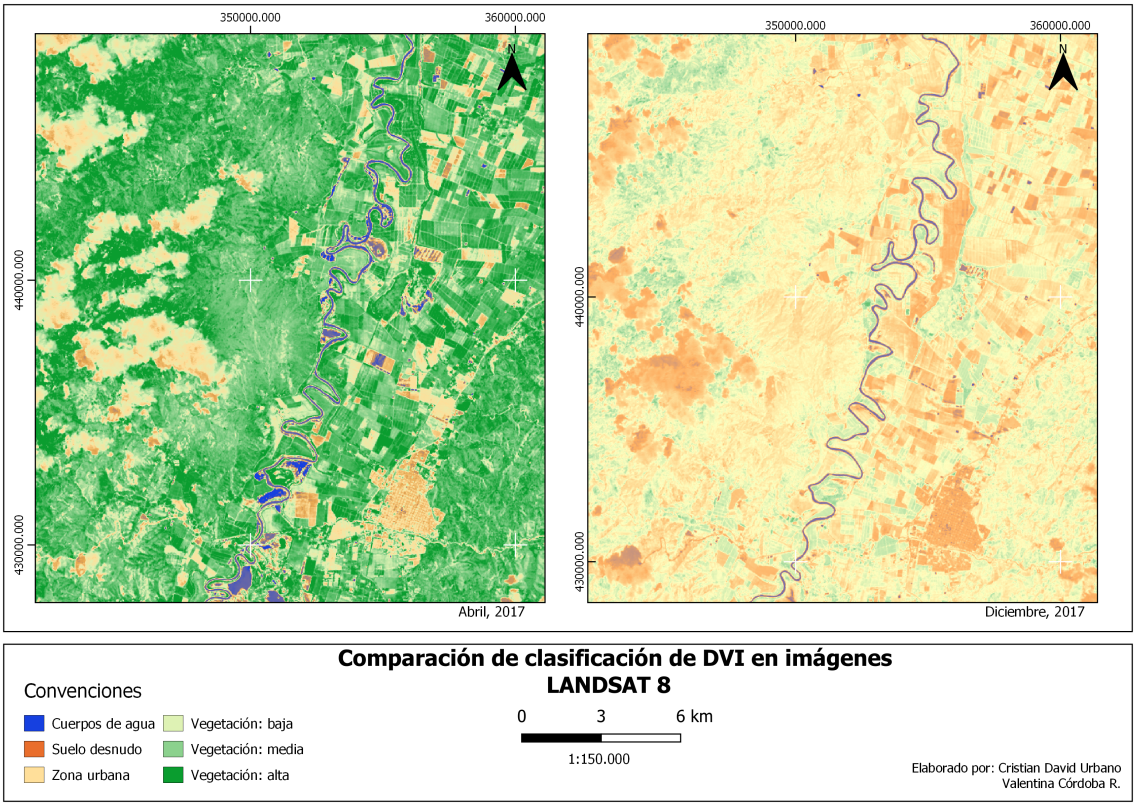


Figura 6.16: Aplicación DVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

Transformed Vegetation Index (TVI)

El Índice de Vegetación Transformada, es un índice diseñado específicamente para el monitoreo de coberturas vegetales. En este estudio se evalúan coberturas de diferentes

tipos, como vegetación, territorios artificializados y cuerpos de agua. Si se analiza la ecuación (4.16), se concluye que, en cuerpos de agua sin ningún tipo de contaminación, lo valores del interior de la raíz de la ecuación tvi deberían ser negativos a pesar de la constante 0.5 que incluye Tucker (1978).

Sin embargo, para este análisis en la cobertura agua, en el mes de abril se obtuvo un valor máximo de 1.135, medio de 0.854 y mínimo de 0.436: no se observaron valores negativos. En diciembre, el valor máximo fue de 1.156, promedio de 0.937 y mínimo de 0.439: no se observaron valores negativos en la muestra. El análisis cualitativo mostró que los cuerpos de agua son delimitados, sin embargo, esta clasificación puede ser confundida con nubes. El análisis de punto exactos mostró que este índice en este caso mostró un rango de valores de operación entre 0.550 y 0.700.

Las coberturas vegetales presentaron como valor máximo 1.170, un mínimo de 0.730 y promedio de 1.019: no se obtuvieron valores negativos. Para bosques se encontró que este índice no los diferencia de manera adecuada, clasificándolos dentro de una misma categoría. En el análisis cualitativo se estudiaron regiones puntuales de bosque, donde los valores encontrados para este índices son superiores a 1.200, valores que coinciden con el análisis realizado en la ecuación (4.16).

Para la cobertura cultivos, en el mes de abril se obtuvo un valor máximo de 1.128, medio de 1.048 y mínimo de 0.831. En diciembre el valor máximo fue d 1.170, promedio de 1.069 y mínimo de 0.919. Según el análisis de los conjuntos de datos se identifico que el 65 % los valores de diciembre eran mayores a abril. Al evaluar la forma en que clasifica dichas zonas se encontró que el índice segmenta de manera sobresaliente las áreas cultivadas y no cultivadas, además que se logra reconocer los surcos y que entre más sana, vigorosa o frondosa fuera, mayor sería su valor de clasificación

En vegetación baja en el mes de abril, se encontró un valor máximo de 1.132, medio de 0.989 y mínimo de 0.734. Para diciembre el valor máximo fue de 1.154, promedio de 1.032 y mínimo de 0.737. Se determinó al igual que en cultivos que los valores correspondientes al mes de diciembre en general son mayores a los de abril. El análisis de la aplicación del índice en las imagenes para las dos temporadas, figura 6.17, mostró que esta cobertura figura en tonalidades más claras que los bosques y los cultivos, es decir en un rango intermedio de clasificación de vegetación. El análisis de sitios

puntuales sobre esta cobertura oscila entre 0.950 y 1.110.

En suelos para el mes de abril se encontró valor máximo de 1.068, medio de 0.920 y mínimo de 0.723. En diciembre el valor máximo fue de 1.138, promedio de 0.904 y mínimo de 0.731. En esta cobertura el 51 % de los valores correspondientes al mes de abril resultaron mayores a diciembre. A pesar, de que se observó una porcentaje de valores 50/50 para épocas, los conjuntos de datos mostraron un índice de correlación bajo. Los estadísticos explorados mostraron que estos datos difieren en gran medida, hecho que llevó a analizar sitios puntuales, encontrando que en el mes de diciembre las zonas de suelo son más claras, mostrando valores más altos. En zonas puntuales el índice mostró un rango de valores entre el 0.692 y el 0.810.

Para la cobertura urbana en el mes de abril, el valor máximo encontrado fue de 1.102, medio de 0.942 y mínimo de 0.748. Sin valores negativos. En el mes de diciembre el valor máximo fue de 1.161, promedio de 0.965 y mínimo de 0.764. En general los valores del mes de diciembre son mayores que los del mes de abril en un 78 %. A pesar esta diferencia, se obtuvo un índice de correlación del 0.791. Al igual que en otros índices las coberturas de tipo urbano mantienen una alta correlación esto significaría que el valor del índice sobre construcciones no se ven afectadas por el cambio de temporada (lluvia- no lluvia). El análisis mostró que este índice no logra diferenciar entre suelo desnudo y la cobertura urbana, debido a que el estudio del las muestras indicó que el rango de valores para esta cobertura oscila entre 0.800 y 0.89 aproximadamente.

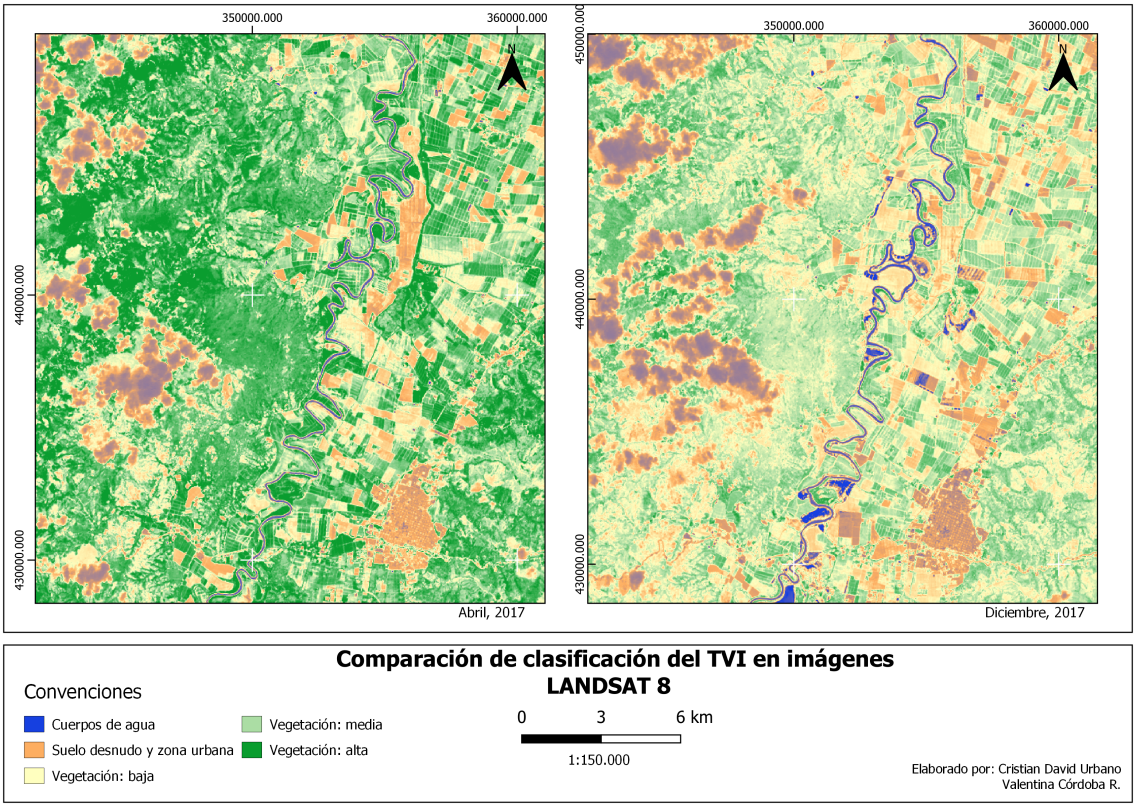


Figura 6.17: Aplicación TVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

En la figura 6.18 se presenta el mapa de coberturas generado a partir de la información extraída del visor avanzado de la C.V.C de la zona correspondiente a las figuras anteriormente presentadas. Se decide presentar una parte específica del total de la zona de estudio con el fin de que se lograra visualizar detalladamente la clasificación realizada por cada uno de los índices, la zona seleccionada para presentar los resultados está compuesta por todas las coberturas que aquí se estudiaron.

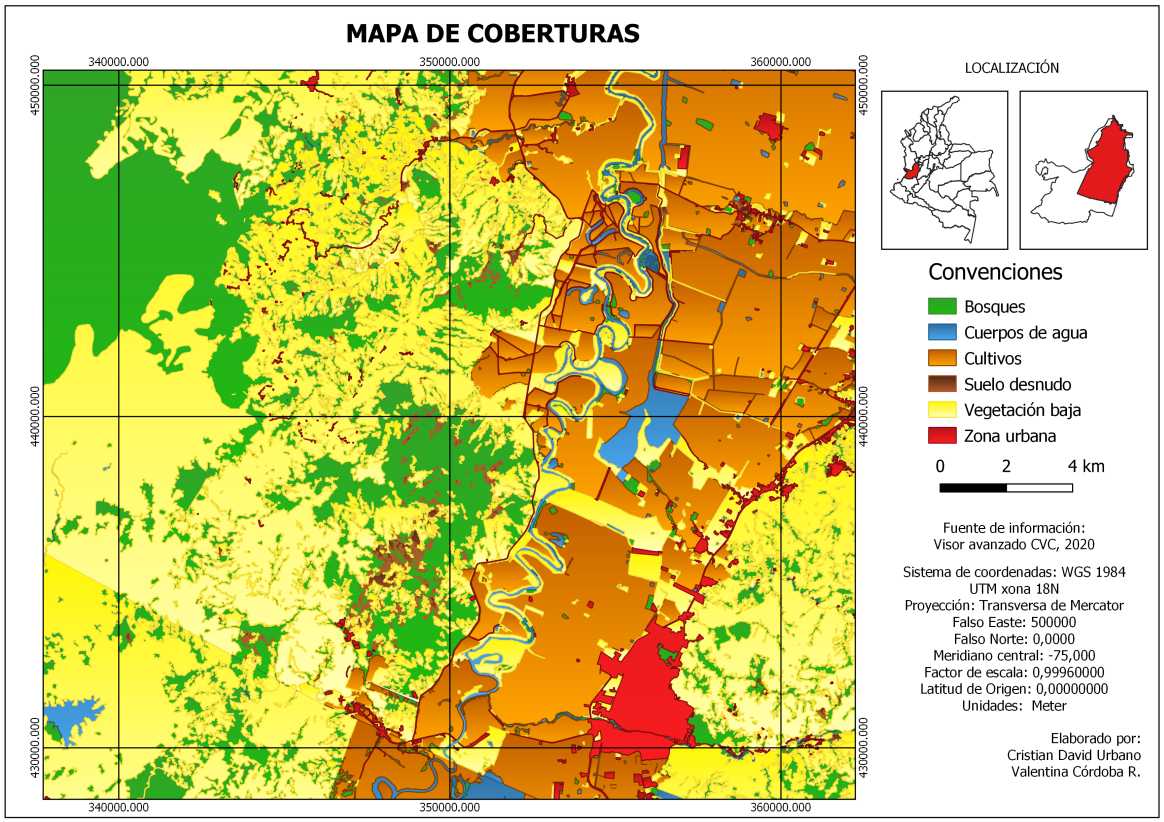


Figura 6.18: Aplicación TVI en imágenes Landsat 8. Fuente: autores

6.1 Comparación índices por cobertura

6.1.1 Cuerpos de agua

La zona de estudio estaba compuesta por diferentes cuerpos de agua desde ríos hasta embalses, que en la mayoría de los índices fueron correctamente delimitados a excepción del YVI en el que todas las coberturas se mezclaban y no había forma de distinguirlo ni cualitativa ni cuantitativamente, además entre épocas el comportamiento no presentaba correspondencia a diferencia del resto de los índices donde entre un mes y otro las datos representan y demuestran una mejor relación.

En cuanto a clasificación de este tipo de coberturas a partir de una metodología

remota se establecen dos grupos de índices de acuerdo al objetivo de estudio. El primer grupo está conformado por los índices que permiten clasificar de forma detallada los cuerpos de agua, para este caso se recomiendan aplicar índices cuyas ecuaciones estén conformadas únicamente por las reflectancias de los canales rojo e infrarrojo, que por su estructura tan sencilla distingue los picos necesarios para la identificación de aguas de forma precisa. El segundo grupo son todos aquellos índices en los que en sus ecuaciones encontramos las reflectancias de más de dos canales, estos permiten obtener mayor detalle cuantitativo de los componentes o identificar los elementos suspendidos en ellos.

Dentro del primer grupo se encuentran índices como: RVI, NDVI, GNDVI, PVI, SAVI, MSAVI, DVI, TVI de los que el DVI y PVI se destacan por presentar mayor diferencia entre épocas, lo que se debe a la estructura de su modelo, donde uno es la diferencia entre los dos canales y el otro está basado en el concepto de línea del suelo, por lo que se recomiendan para estudios multitemporales. El segundo grupo está conformado por índices como: ARVI, GEMI, GARI y EVI.

6.1.2 Cobertura tipo vegetal

Las coberturas de tipo vegetal se clasificaron en tres tipos: boscosas, cultivos y vegetaciones bajas como herbazales y pastizales. Esto con el fin de determinar la capacidad de los índices de estudiarlos y detallarlos. Índices como el RVI y TVI clasifica correctamente este tipo de coberturas pero en un rango de valores muy pequeño por lo que diferenciar entre las tres clasificaciones resulta más complicado, a diferencia de índices como GNDVI, NDVI, PVI, SAVI, MSAVI en los que los rangos de clasificación son mucho más amplios y es posible segmentarlo de acuerdo a las características de cada cobertura vegetal.

6.1.2.1 Bosque

A excepción del YVI todos los índices identificaron las zonas boscosas aunque unos con más precisión que otros. El DVI y el PVI destacaron por diferenciar más el estado de la cobertura entre las dos épocas de estudio, seguido de índices como SAVI, GNDVI, NDVI. Por otra parte índices como el GARI y ARVI, permitieron identificar zonas

boscosas cubiertas por nubes no muy densas, herramienta de gran ayuda para estudiar zonas montañosas o zonas comúnmente perturbadas por nubes. Finalmente el EVI tiende a confundir las áreas boscosas con vegetaciones bajas por lo que segmentar estas dos clasificaciones a partir de este índice no es posible, pero aún así es una buena herramienta si de identificar zona de vegetación se trata.

6.1.2.2 Cultivos

Las áreas definidas como cultivos estaban compuestas por diferentes tipos de coberturas a diferentes niveles de desarrollo, en el se encontraban desde suelos preparados, cultivos en desarrollo hasta cultivos completamente desarrollados, por lo que el nivel de detalle de clasificación era más complejo, pero a pesar de ello los índices que más destacaron fueron aquellos que el concepto de su creación se basó en la línea del suelo tales como: PVI, MSAVI, SAVI que permitían definir incluso los surcos y estudiar la evolución a partir de un estudio multitemporal del área de interés en donde los datos entre un mes y otro fueron clasificados con diferencias significativas.

6.1.2.3 Vegetación baja

Los herbazales y pastizales fueron la cobertura de entre las de tipo vegetal más difícil de segmentar por los índices, ya que se confundía por zonas boscosas o suelos desnudos, a pesar de no ser tan frondosos y densos como un bosque ni tan secos como un suelo. Esto se puede deber a dos situaciones que afectaban la respuesta espectral de la cobertura, la primera de ellas el nivel de precipitación que hace que su valor incremente y sea clasificada como zona boscosa y la segunda las perturbaciones ocasionadas por la reflectancia del suelo desnudo.

Los índices que mejor lograron clasificar las vegetaciones bajas fueron: NDVI, PVI, MSAVI, ARVI, TVI y EVI.

6.1.3 Suelo desnudo

La evaluación de los suelos desnudos estuvo condicionada por tres factores: nubes, presencia de vegetación circundante y la extensión del suelo. Los índices que mejor logran destacar esta cobertura bajo estas condiciones son: NDVI, PVI, SAVI, GARI, ARVI, TVI y EVI. En el momento en que las condiciones anteriormente mencionadas cambien y se analice una cobertura más pura el listado propuesto de índices que destaca el suelo desnudo podría variar.

6.1.4 Zona urbana

A raíz de que las zonas urbanas cuentan con un factor de cambio lento, los valores de los índices presenta poca variación entre épocas, además en la mayoría de los índices se encontró que su rango de clasificación era muy aproximado al de suelo desnudo o hasta se encontraban dentro de los mismos valores. Los índices que mejor logran detallar tanto las zonas urbanas como las carreteras fueron: RVI, NDVI, GNDVI, MSAVI, SAVI, ARVI y TVI. Esta cobertura se caracterizó por presentar alta correlación entre las dos épocas de estudio, por lo que su comportamiento espectral no se ve afectado por los diferentes niveles de precipitación.

Tabla 6.2: Índices recomendados por cobertura. Fuente: autores

Cobertura	**Índices recomendados**	**Observaciones**
Cuerpo de agua	RVI, NDVI, GNDVI, PVI, SAVI, MSAVI, DVI, TVI, ARVI, GEMI, GARI, EVI	▪ El PVI y DVI destacan por presentar mayor diferencia entre épocas ▪ Los modelos de ARVI, GEMI, GARI y EVI al estar compuesta por más de dos bandas permiten distinguir en su clasificación elementos en el agua
Vegetación	RVI, TVI, GNDVI, NDVI, PVI SAVI, MSAVI	▪ El RVI y TVI clasifican la vegetación en un rango de valores muy pequeño, por lo que no es recomendable para diferenciar entre tipos de vegetaciones ▪ El PVI y DVI se recomiendan para diferenciar el estado o desarrollo de la vegetación entre épocas ▪ GARI y ARVI se recomienda para estudiar zonas montañosas con cobertura de nubes no muy densas

Cobertura	Índices recomendados	Observaciones
Suelo	NDVI, PVI, SAVI, GARI, ARVI, TVI, EVI	El PVI y SAVI son los que más se recomiendan para clasificar este tipo de coberturas, debido a que su concepto se basa en la línea del suelo y logra diferenciar mejor hasta zonas pequeñas como los surcos de los cultivos
Zona Urbana	RVI, NDVI, GNDVI, MSAVI, SAVI, ARVI, TVI	A pesar de que casi todos los índices clasifican correctamente las zonas urbanas, se recomiendan estos ya que son aquellos que mejor delimitan tanto el área urbana continua como discontinua

6.2 Valores propuestos

Finalmente en la tabla 6.3 se presentan los rangos de clasificación de las coberturas para los VI estudiados, donde las de tipo vegetal se agruparon en una categoría debido a la limitación que se presentó de establecer diferentes rangos para segmentarla de acuerdo a su frondosidad o densidad. Cabe destacar que el resultado de aplicación de los índices varia de acuerdo al tipo de zona en la que se estudie, los valores aquí presentados no son absolutos.

Tabla 6.3: Rango clasificación de coberturas para índices estudiados. Fuente: autores

Cobertura	Agua	Suelo desnudo	Vegetación	Zona urbana
RVI	0.9 - 1.6	0.380 - 0.45	0 - 0.38	0.45 - 0.8
NDVI	-1 - 0	0 - 0.45	0.5 - 1	0 - 0.2
YVI	$N.A$	$N.A$	$N.A$	$N.A$
PVI	<0	-0.22 - 0.15	0.25 - 1.5	-0.22 - 0.2
SAVI 0.25	<0	0.35 - 0.45	0.5 - 1	0.200 - 0.280
SAVI 0.5	-0.190 - 0.020	0.16 - 0.24	0.5 - 0.9	0.14 - 0.23

Cobertura	Agua	Suelo desnudo	Vegetación	Zona urbana
SAVI 1	−0.080 - 0.242	0.113 - 0.210	0.568 - 1.013	0.130 - 0.267
ARVI	−1 - 0	0 - 0.24	0.4 - 1	0 - 0.4
GEMI	<0.2	0 - 0.5	0.5 - 1	0 - 0.5
MSAVI	<0	0 - 0.4	0.4 - 0.9	0 - 0.4
GARI	<0	0 - 0.32	0.5 - 1	0 - 0.5
EVI	−0.129 - 0.039	0.110 - 0.210	0.70 - 1.3	0.28 - 0.474
GNDVI	<0	0.3 - 0.4	0.5 - 1	0.33 - 0.36
DVI	<0	0.197 - 0.300	>0.750	0.130 - 0.410
TVI	0.55 - 0.700	0.692 - 0.810	0.730 - 1.170	0.800 - 0.890

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

Para la correcta interpretación de los índices de vegetación es necesario conocer tanto las regiones del espectro electromagnético, como el comportamiento espectral de las superficies, con el fin de identificar la forma en que los modelos pueden destacar características claves de las coberturas. El dominio sobre los temas anteriormente mencionados, no solo permiten aprovechar el potencial de los VI, sino que, también permiten plantear hipótesis sobre los posibles valores de los índices en determinadas coberturas y por consiguiente saber como se esta comportando la reflectancia en cada una de las bandas empleadas.

Uno de los principales objetivos de este estudio fue reconocer los fundamentos sobre los cuales se fundamentan los VI estudiados. Durante este proceso se encontró que no existe un sólo artículo que logre sintetizar los VI de la forma mencionada. En este trabajo se logró agrupar los conceptos matemáticos y los resultados obtenidos en diferentes aplicaciones. Adicionalmente, se buscó que este nuevo compilado de teoría y resultados se encuentre un términos que cualquier persona con conocimientos básicos en percepción remota logre entender y poner en práctica.

El método empleado para observar la variación de los valores de los índices de vegetación, fue el uso de una escena con mismo $path/row$ en diferentes fechas: abril y diciembre. Esta metodología permitió conocer como las diferentes condiciones climáticas pueden afectar los valores obtenidos en los VI. Para este estudio se determinó que la mayoría de los VI tienden a mostrar un aumento en sus valores en el mes de abril, temporada en la que se cuenta con mayor nivel de precipitación, mientras que en el mes de diciembre los valores de los VI son menores. Sin embargo, cuando se analizó el SAVI se encontró que este presenta un comportamiento inverso al anteriormente descrito.

En total en este trabajo de investigación se analizaron 13 índices de vegetación,

dejando como resultado que no existe un índice de vegetación ideal, como el definido por (Jackson y cols., 1983), por esta razón una vez terminada la revisión bibliográfica, se decidió no dejar por fuera ninguno de los VI, por consiguiente el índice de vegetación ideal es aquel que se ajuste de mejor manera al trabajo que se busque realizar.

Los rangos de clasificación aquí presentados son aproximaciones y no deben considerarse como valores absolutos, sin embargo, pueden ser tenidos en cuenta como una base para la aplicación, estudio e interpretación de VI obtenidos a partir de imágenes satelitales Landsat 8.

A pesar de que el Valle del Cauca cuenta con una Corporación Autónoma Regional (CAR) encargada de producir y actualizar la información cartográfica básica y temática de todo el departamento, se presentaron diferencias localizadas entre las coberturas clasificadas por la CVC y las presentes en la imagen, a pesar de que se trató de aplicar el estudio en el año para el que fueron realizadas las coberturas.

El desarrollo de la interfaz gráfica permitió automatizar los procesos de conversión de ND a valores físicos medibles (reflectancias), corrección radiométrica, atmosférica por ángulo de incidencia solar y finalmente el respectivo cálculo de los VI. Esta herramienta proporciona ventajas como: un método seguro para las correcciones anteriormente mencionadas, una interfaz de fácil operación, procesamiento y almacenamiento de datos rápido y seguro, y un método para calcular 13 diferentes índices de vegetación.

7.2 Recomendaciones

- Con el fin de complementar las fuentes de información empleadas en este análisis, se recomienda realizar estudios de campo de las coberturas que componen la zona de interés, con la intención de mejorar la precisión de los rangos de clasificación.
- Integrar a esta metodología el uso de datos tomados a partir de espectro radiómetro para mejorar los rangos de clasificación por cobertura.
- Replicar el estudio aplicando insumos de mejor resolución espacial como imágenes satelitales y aéreas sobre zonas con menor porcentaje de nubosidad, debido a que

este es un problema constante en las imágenes ópticas, limitando el estudio y análisis de datos.

- En el momento de realizar estudios de coberturas a partir de la aplicación de índices de vegetación, es importante realizar de manera paralela la tarea de analizar tanto las firmas espectrales como el modelo del índice, con el fin de identificar anomalías en los valores entregados.

Anexos

Anexo A

A continuación, se presentan las principales partes que componen la interfaz de cálculo de índices de vegetación. En la figura 7.1 se presenta la pantalla de bienvenida.

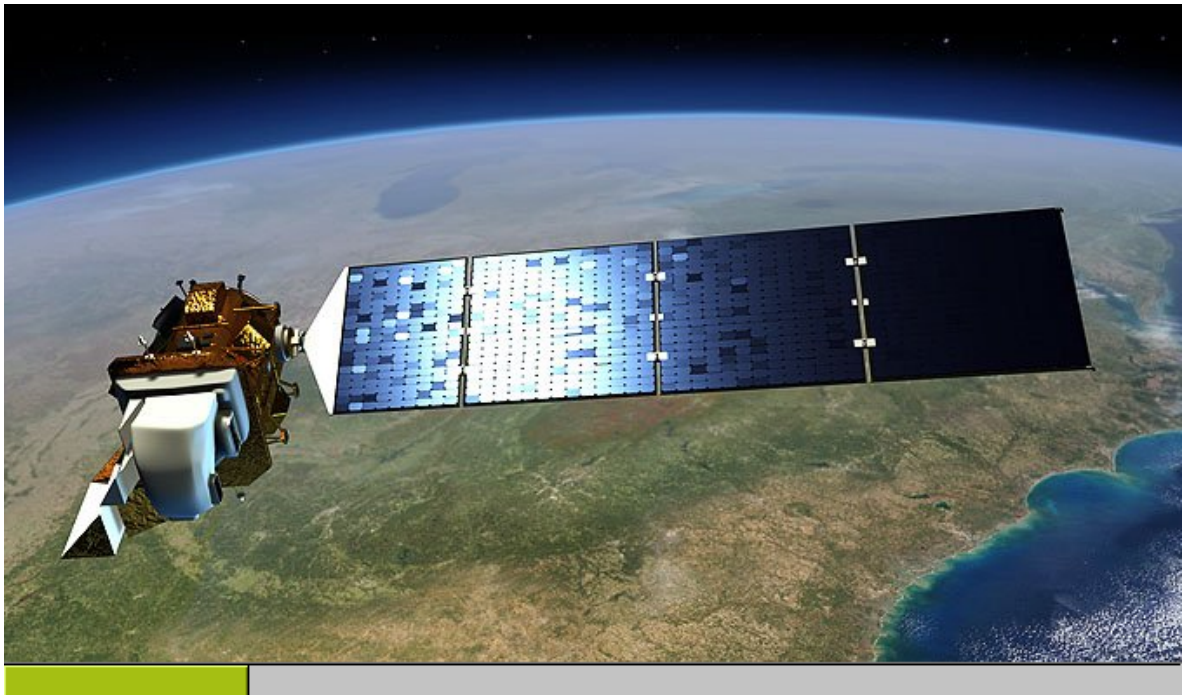


Figura 7.1: Inicio de la interfaz

Mientras que en la figura 7.2 se presentan los diferentes módulos con los que esta cuenta.

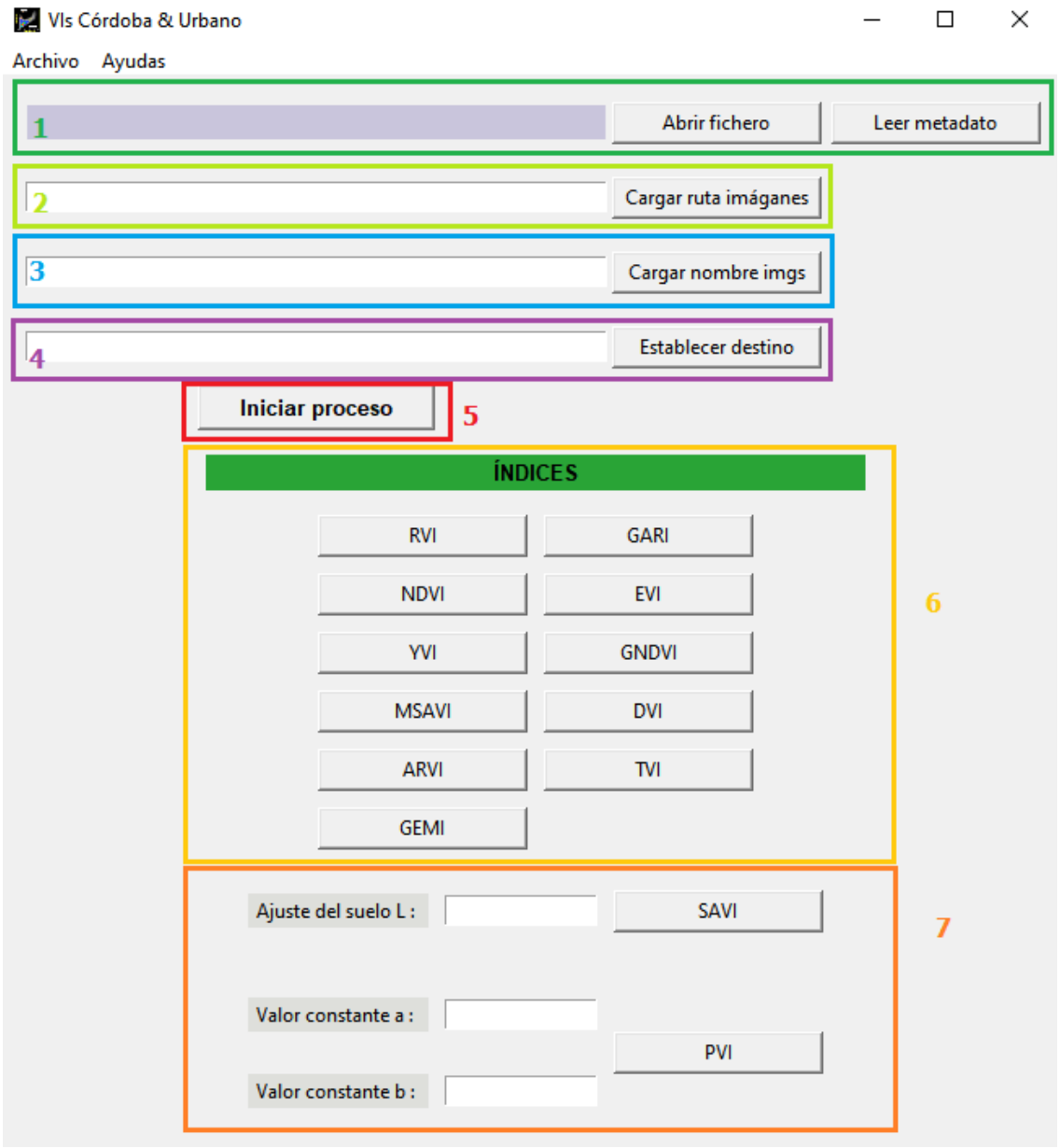


Figura 7.2: Interfaz

Esta interfaz cuenta con su respectivo nombre *"VIs Córdoba & Urbano"* y diferentes módulo que son descritos a continuación.

1. En el primer módulo (verde oscuro), se realiza la importación del metadato de la imagen (mtl.txt). Posteriormente, se cuenta con un botón de lectura del mismo,

quedando así guardados los datos de la imagen en la variables internas del algoritmo para su posterior uso.

2. El módulo dos (2, verde claro), corresponde a la ruta donde se encuentran las imágenes. La ruta debe se debe copiar completa para que el algoritmo funcione correctamente.Posteriormente haga clic en el botón *"Cargar ruta imágenes"*.

3. El módulo tres (3, azul), corresponde a la sección donde se debe ingresar (pegar) el nombre genéricos de las imágenes, es decir antes de _B#.TIF. Posteriormente haga clic en el botón *"Cargar nombre imgs"*.

4. El módulo cuatro (4, morado), corresponde a la entrada de la ruta donde se almacenarán los resultados. Esta carpeta debe ser creada previamente. Una vez establecido el destino de los productos haga clic en el botón *"Establecer destino"*

5. El módulo cinco (5, rojo), corresponde al botón que inicia el proceso de conversión de ND a reflectancia, correcciones *(ver sección 2.4)* y posteriormente el almacenamiento de las bandas corregidas.

6. El módulo seis (6, amarillo), realiza el cálculo de los índices que no requieren parámetros adicionales. Para el cálculo de los VI solo basta con hacer clic en el índice deseado, al finalizar el proceso, la interfaz mostrará un mensaje de *"Índice calculado"*.

7. El módulo siete (7, naranja), calcula los VI que requieren de parámetros adicionales: factor de ajuste del suelo, a o b. Una vez ingresados estos valores se hace clic en el índice deseado y al finalizar el proceso, la interfaz mostrará un mensaje de *"Índice calculado"*.

Para que el código funcione es necesario que el usuario cuente con python o es su defecto un entorno de desarrollo de código abierto para programación en lenguaje python, como spyder. Además es necesario que previamene instale las siguientes librerías: numpy, gdal, os, sys, math, tkinter.

El código se encuentra en un repositorio, el siguiente enlace le permite dirigirse a el: https://github.com/valencr12/Interfaz-indices-de-vegetacion

Adicionalmente, la interfaz cuenta con una guía de usuario. Esta se encuentra en el apartado ayudas: *ver figura 7.3*

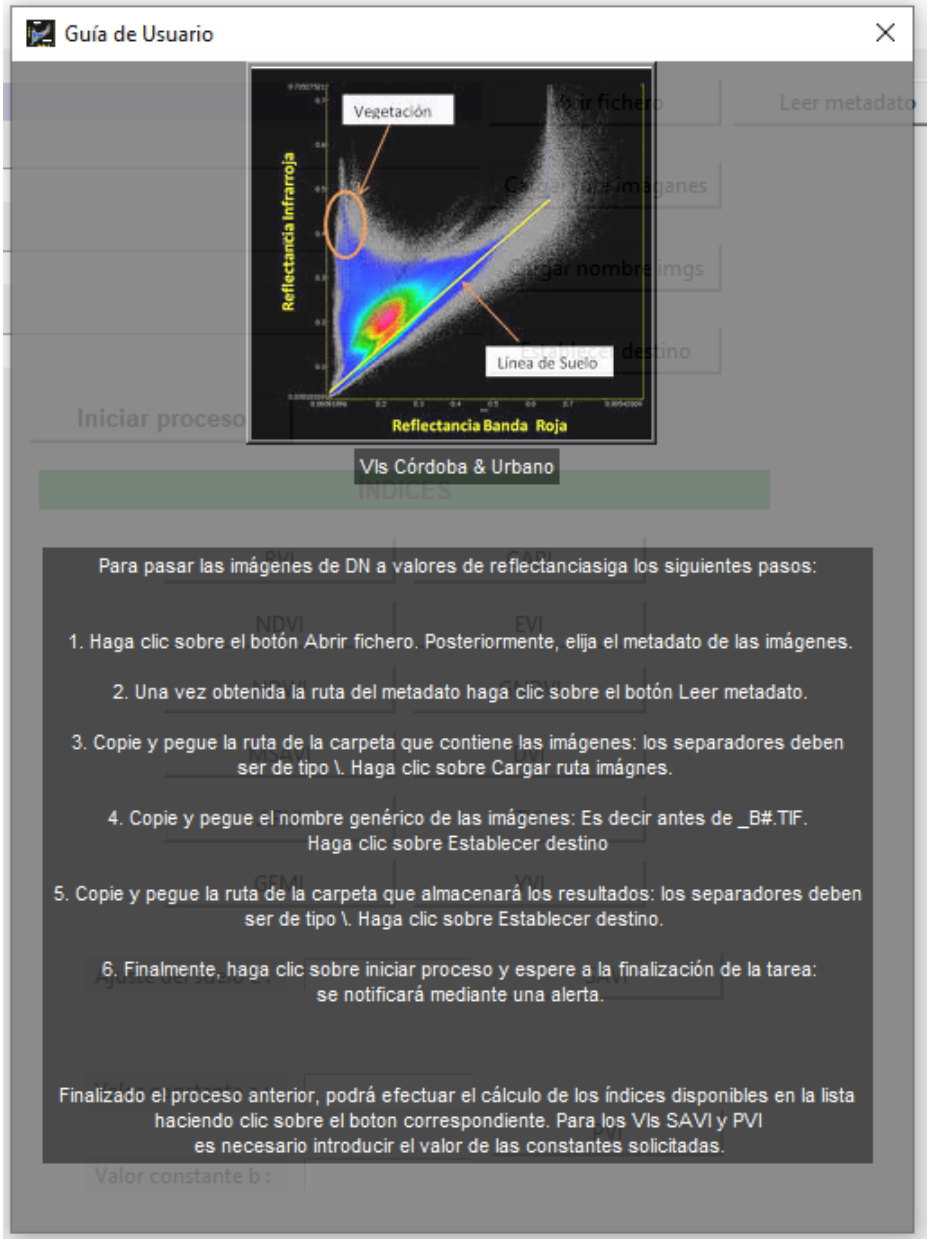


Figura 7.3: Guía de usuario

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, J. (2016). Análisis comparativo de índices de vegetación para la identificación de la variación espectral de las coberturas naturales a partir de imágenes landsat 8.

Ambrosio, G., González, J., y Arévalo, V. (2002). Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal. *Málaga, España*.

Ariza, A. (2013). Descripción y corrección de productos landsat 8 ldcm (landsat data continuity mission). *Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi*.

Arkebauer, T. J. (2005). Leaf radiative properties and the leaf energy budget. *Micrometeorology in Agricultural Systems*, *47*, 93–103.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., y Huete, A. (1995). A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, *13*(1-2), 95–120.

Brown, L. G. (1992). A survey of image registration techniques. *ACM computing surveys (CSUR)*, *24*(4), 325–376.

Campo de Ferreras, A. M., Peña, O., Gandullo, R., y Cal, R. d. l. (2011). Análisis de la vegetación de un humedal "mallín" localizado en una zona semiárida de la provincia de neuquén (argentina). *Papeles de geografía, Nº 53-54, 2011*.

Carvacho, L., y Sánchez, M. (2010). Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes modis en la región del libertador bernardo o higgins, chile, en el período 2001-2005. En *Congreso nacional de tecnologías de la información geográfica (14. 2010. sevilla)(2010), p 728-737.*

CVC. (2004). Guía explicativa de la temática de cobertura y usos del suelo.

Deering, D. (1975). Measuring forage production of grazing units from landsat mss data..

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, *8*(1), 1–10.

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., y Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from eos-modis. *Remote sensing of Environment*, *58*(3), 289–298.

Gómez, M. (2004). Indice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del perú a partir de imágenes satelitales.

Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales landsat 7 etm+ y aster para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de loja, ecuador* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional de La Plata.

Huete, A. (1988). Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. *Theory and applications of optical remote sensing*, 107–141.

IDEAM. (2007). Las coberturas vegetales, uso y ocupación del espacio de colombia.

IDEAM. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. metodología corine land cover adaptada para colombia escala 1:100.000. instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.

IDEAM, IGAC, y CORMAGDALENA. (2008). Mapa de cobertura de la tierra cuenca magdalena-cauca: Metodología corine land cover adaptada para colombia a escala 1:100.000. instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, instituto geográfico agustín codazzi y corporación autónoma regional del río grande de la magdalena.

Jackson, R., Slater, P., y Pinter Jr, P. (1983). Adjusting the tasselled-cap brightness and greenness factors for atmospheric path radiance and absorption on a pixel by pixel basis. *International journal of remote sensing*, *4*(2), 313–323.

Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, *50*(4), 663–666.

Juzga, M. A. (2016). Comparación de índices de vegetación en el cerro de la conejera de la ciudad de bogotá.

Kardoulas, N., Bird, A., y Lawan, A. (1996). Geometric correction of spot and landsat imagery: a comparison of map-and gps-derived control points. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *62*(10), 1173–1177.

Kaufman, Y. J., y Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (arvi) for eos-modis. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*(2), 261–270.

Kauth, R. J., y Thomas, G. (1976a). The tasselled cap–a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by landsat. En *Lars symposia* (p. 159).

Kauth, R. J., y Thomas, G. (1976b). The tasselled cap–a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by landsat. En *Lars symposia* (p. 159).

Koepke, P. (1989). Removal of atmospheric effects prom avhrr albedos. *Journal of*

Applied Meteorology, *28*(12), 1341–1348.

Liu, H. Q., y Huete, A. (1995). A feedback based modification of the ndvi to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *33*(2), 457–465.

Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., y Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (evi) and normalized difference vegetation index (ndvi) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, *7*(11), 2636–2651.

Muñoz, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación.

Paz, F., Romero Sanchez, M. E., Palacios Vélez, E., Bolaños González, M., Valdez Lazalde, J. R., y Aldrete, A. (2015). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoamericana*, *33*(1), 27–49.

Pellat, F. P., Vélez, E. P., Sáenz, E. M., Menes, M. M., y Sánchez, L. A. P. (2005). Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia*, *39*(3), 293–301.

Pereda, M. A. (2013). Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de navarra. *de"material y métodos", Navara, España., Universidad Pública de Navarra-UPNA*, 11–12.

Pérez, C., y Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. carlos perez.

Person, R., y Miller, L. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie. En *Proceeding of the 8th international symposium on remote sensing of the environment* (Vol. 2, pp. 1355–1379).

Pinty, B., y Verstraete, M. (1992). Gemi: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, *101*(1), 15–20.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., y Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index.

Richards, J. A., y Richards, J. (1999). *Remote sensing digital image analysis* (Vol. 3). Springer.

Richardson, A. J., y Wiegand, C. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, *43*(12), 1541–1552.

Rouse Jr, J. (1972). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... others (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, *145*, 154–172.

Sánchez, E., Torres Crespo, M. Á., Fernández-Palacios Carmona, A., Aguilar Alba, M., Pino Serrato, I. L., y Granado Ruiz, L. (2000). Comparación del ndvi con el pvi y el savi como indicadores para la asignación de modelos de combustible para la estimación del riesgo de incendios en andalucía. En *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible: Congreso del grupo de métodos cuantitativo, sig y teledetección (9º. 2000. alcalá de henares)*.

Tucker, C. (1978). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.

Tucker, C., Miller, L., y Pearson, R. (1976). Spectral mapping of shortgrass prairie biomass. *Phot. Engineering and Remote Sensing*, *42*, 317–323.

Tucker, C., y Sellers, P. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International journal of remote sensing*, *7*(11), 1395–1416.

Villegas, H. (2008). Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas. *INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS*.

Watson, D. J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of botany*, *11*(41), 41–76.

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., ... others (2019). Current status of landsat program, science, and applications. *Remote sensing of environment*, *225*, 127–147.

Xue, J., y Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, *2017*.