

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

**IDENTIFICAR ÁREAS DE CULTIVO DE CAFÉ, POR MEDIO DE UNA
CLASIFICACIÓN SEMI SUPERVISADA CON IMÁGENES SATELITALES
MULTIESPECTRALES, PARA EL CANTÓN DE PÉREZ ZELEDÓN.**

ANDREA LORÍA SOLANO

CARTAGO, 2018

IDENTIFICAR ÁREAS DE CULTIVO DE CAFÉ, POR MEDIO DE UNA
CLASIFICACIÓN SEMI SUPERVISADA CON IMÁGENES SATELITALES
MULTIESPECTRALES, PARA EL CANTÓN DE PÉREZ ZELEDÓN.

Andrea Loría Solano.

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Ing. Fernando Watson Hernández

Asesor

Ing. Marvin Villalobos Araya

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2018

DEDICATORIA

A mis padres Eddy Loría y María Solano, por su apoyo incondicional que me han brindado siempre, creer en mí y darme fuerzas para seguir adelante con el inmenso amor que me regalan día a día.

A mi hermano Alexánder Loría, por todo el apoyo y ser parte fundamental en mí vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen gracias por permitirme tener las fuerzas y salud necesaria para poder culminar esta gran etapa de mi vida y poder concretar mis estudios para emprender mi camino como futura profesional.

A mi pareja Javier Córtes, por el apoyo, dedicación y paciencia que me ha brindado durante este proceso.

A mi familia por estar siempre presentes en tan arduo camino y brindarme su apoyo, y con mucho cariño a Hortensia y Oscar por su hospitalidad y atención durante la realización del proyecto.

A mis compañeros y amigos que gané en este proceso universitario. A mis profesores y personal administrativo de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, por todos los conocimientos y apoyo brindado durante mis años de carrera, en especial al profesor Fernando Watson Hernández por su dedicación y brindarme de su valioso tiempo para culminar con éxito este trabajo.

Finalmente, al personal del ICAFE por darme la oportunidad de elaborar mi TFG en tan prestigiosa institución. En especial a Vanessa Rojas por el apoyo brindado en el paso por dicha institución.

De corazón muchas gracias a todos.

CONTENIDO

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 Objetivo General:.....	4
1.1.2 Objetivos Específicos:.....	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	5
2.1 Cultivo de Café	6
2.2 Características del área de estudio.	6
2.3 Cobertura del suelo	7
2.4 Composición de una imagen satelital óptica (Imágenes Multiespectrales)	7
2.5 Teledetección	8
2.6 Resolución de un sistema sensor	9
2.7 Características de imágenes LANSAT y SENTINEL	10
2.7.1 LANSAT	10
2.8 Visualización RGB (Rojo, Verde, Azul).	12
2.9 Índices de vegetación	14
2.10 Corrección atmosférica	14
2.11 Clasificación supervisada de imágenes satelitales	15
2.12 Áreas de entrenamiento (ROIs)	16
2.13 Firmas espectrales	16
2.14 Similitud de la clasificación de la cobertura.	17
2.15 Proyectos realizados del tema de estudio.	18
3. METODOLOGÍA.	20
3.1 Ubicación de la zona de estudio.	21
3.2 Procesamiento inicial de las imágenes.	22
3.3 Selección y adquisición de las imágenes	23
3.4 Cálculo de índice de Vegetación (NDVI).	24
3.5 Clasificación semi supervisada.	25
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
4.1 Procesamiento inicial	29

4.1.1	Descarga de imágenes espectrales.	29
4.1.2	Calculo de índice de vegetación diferenciada en imágenes SENTINEL 2 Y LANDSAT 8	29
4.2	Recorte o extracción del área de estudio	31
4.3	Composición de conjunto de bandas.	31
4.4	Creación de áreas de entrenamiento (ROI)	33
4.5	Firmas espectrales	35
4.6	Resultados de uso de cobertura.....	37
4.7	Cálculo de área de cobertura de café.....	39
4.7.1	SENTINEL 2:	40
4.7.2	LANDSAT 8:	44
4.8	Similitud de los datos obtenidos de la clasificación.....	46
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
5.1	Conclusiones.....	51
5.2	Recomendaciones.....	52
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	53
7.	ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Información por banda de las imágenes LANDSAT 8.	11
Cuadro 2.	Información por bandas de las imágenes SENTINEL 2.	12
Cuadro 3.	Parte de información brindada de la imagen seleccionada.	24
Cuadro 4.	Áreas en hectáreas de la cobertura del cultivo de café de los distritos de Pérez Zeledón, para el año 2012.	40
Cuadro 5.	Área en hectáreas de cobertura del cultivo de café de los distritos de Pérez Zeledón, por medio de la clasificación semi supervisada con el producto Sentinel 2, para una imagen satelital del año 2017.....	41
Cuadro 6.	Área en hectáreas por cobertura para el producto Sentinel 2, de los distritos de Pérez Zeledón.....	42

Cuadro 7. Información de los resultados de las áreas de la cobertura de suelo por macro clase en Sentinel 2.....	43
Cuadro 8. Información de los resultados de la cobertura de suelo por macro clase en Landsat 8.	44
Cuadro 9. Porcentajes de los puntos de muestra de café asignados según la clasificación realizada, para de las macro clases café bosque y vegetación.	46
Cuadro 10. Información de las áreas de la cobertura del cultivo de café para los distritos, San Isidro, General y Daniel Flores, simulada y observada en hectáreas.....	47
Cuadro 11. Porcentajes obtenidos en los puntos de muestra asignados según los valores de la clasificación realizada, para las macro clases en el producto Sentinel 2.	69
Cuadro 12. Área en hectáreas de cobertura del cultivo de café de los distritos de Pérez Zeledón, por medio de la clasificación semi supervisada con el producto Landsat 8, para una imagen satelital del año 2017.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de una imagen satelital óptica.	8
Figura 2. Combinaciones de bandas en Color Verdadero y Falso Color.	13
Figura 3. Área de estudio (Pérez Zeledón).	21
Figura 4. Esquema de la metodología del procesamiento inicial de las imágenes.	22
Figura 5. Previsualización de la imagen seleccionada.	23
Figura 6. Bandas 8, 10, 12 SENTINEL 2 de la imagen multiespectral L1C_T16PHR_20170126T160504.....	29
Figura 7. Índice de vegetación diferenciada para las imágenes SENTINEL 2 y LANDSAT 8.	30
Figura 8. Extracción del área de estudio de la banda 11.	31
Figura 9. Producto Color natural.....	32
Figura 10. Producto Infrarrojo.	33
Figura 11. Áreas de entrenamiento para cada una de las clases creadas en del satélite Sentinel 2 configurada en la combinación de bandas 3-2-1 (color natural).....	34
Figura 12. Firmas espectrales para el cultivo de Café.	35

Figura 13. Valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas Café, Vegetación y Bosque.	36
Figura 14.. Mapa de cobertura vectorizado de la zona de estudio del producto Sentinel 2.	37
Figura 15. Mapa de cobertura vectorizado de la zona de estudio del producto Landsat 8.	38
Figura 16. Cobertura de Café para la zona de Pérez Zeledón para el año 2012, datos brindados por el ICAFE.	39
Figura 17. Gráfico de comparación de la cobertura de Café del 2012 respecto a los productos Landsat 8 y Sentinel 2, por distritos.	45
Figura 18. Características de las bandas B11 y B12.	58
Figura 19. Características de las bandas B9 y B10.	58
Figura 20. Características de las bandas B08 y B08A.	59
Figura 21. Características de las bandas B06 y B07.	59
Figura 22. Características de las bandas B04 y B05.	60
Figura 23. Características de las bandas B02 y B03.	60
Figura 24. Características de la banda B01.	61
Figura 25. Firma espectral para bosque.	61
Figura 26. Firma espectral para vegetación (pastos y cultivos).	62
Figura 27. Firma espectral para suelo.	62
Figura 28. Firma espectral para techos.	62
Figura 29. Firma espectral para agua.	63
Figura 30. Firma espectral para caminos	63
Figura 31. Máximos y mínimos de las bandas para el producto Sentinel 2, del cultivo de Café.	64
Figura 32. Valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas Vegetación y Café.	65
Figura 33. Valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas Bosque y Café.	65
Figura 34. Firma espectral para el cultivo de café.	66
Figura 35. Firma espectral para bosques.	66
Figura 36. Firma espectral para Vegetación (pastos y cultivos).	67

Figura 37. Firma espectral para techos.	67
Figura 38. Firma espectral para carreteras.	68
Figura 39. Firma espectral para agua.	68

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Características de las bandas 1,2,3,4,5,6,7,8,8A,9,10,11,12 del producto Sentinel 2.	58
Anexo 2. Firmas espectrales de las macro clases asignadas en la clasificación semi supervisada en el producto Sentinel 2.....	61
Anexo 3. Valores máximos y mínimos de las firmas espectrales del cultivo de café.	64
Anexo 4. Comportamiento de los valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas con las que se confunde el Café (Vegetación, Bosque).	65
Anexo 5. Firmas espectrales de las macro clases asignadas en la clasificación semi supervisada en el producto Landsat 8.	66
Anexo 6. Porcentaje de similitud por cobertura de los puntos de muestra según los valores de la clasificación realizada, del producto Sentinel 2.	69
Anexo 7. Áreas de la cobertura de café por distrito para el producto Landsat 8, para una imagen satelital 2017.	69

Resumen

El estudio de los sectores cafetaleros es trascendental para el Instituto de Investigación del Café de Costa Rica (ICAFFE), para reconocer y regular la distribución de la producción en las diferentes regiones del país, y poder así mantener una supervisión y control de estas, para diferentes finalidades.

Por lo que, el presente estudio, consiste en el reconocimiento de coberturas de suelo por medio de una clasificación semi supervisada para el cantón de Pérez Zeledón, principalmente la detección y clasificación del cultivo de café en la zona. Para esta clasificación se utilizaron imágenes de la plataforma Sentinel 2 y Landsat 8, realizando un comparativo entre ambos.

Con el producto Sentinel 2, se obtuvo que el mayor porcentaje de cobertura fue la vegetación el cual comprendió 67880,52 ha, seguido de la cobertura de café con 57798,14 ha, por medio del programa Qgis, con la herramienta de clasificación semi automática.

Además, se verificó la similitud entre los resultados, en donde se obtuvo un porcentaje de concordancia entre los valores simulados y los recolectados en el campo del 59% de cobertura de café, por medio de la técnica de regresión se obtuvo un coeficiente de correlación para el producto Landsat 8 de 0,9604 y con Sentinel 2 de 0,8614, determinando un alto grado de relación entre los valores simulados y los valores observados para el año 2017.

Palabras Clave: Clasificación, Bandas, Firmas espectrales, Sentinel, Landsat.

Abstract

The study of the coffee sectors is transcendental for the Coffee Research Institute of Costa Rica (ICAFE), to recognize and regulate the distribution of production in the different regions of the country, and thus be able to maintain a supervision and control of these, for different purposes.

Therefore, the present study consists of the recognition of land cover through a semi-supervised classification for the Pérez Zeledón canton, mainly the detection and classification of coffee cultivation in the area. For this classification images of the Sentinel 2 and Landsat 8 platform were used, making a comparison between both.

In this process, a greater percentage of vegetation coverage was obtained, which included 67880.52 ha, followed by coffee coverage with 57798.14 ha, through the Qgis program, with the Semi-Automatic Classification Plugging tool.

In addition, the similarity between the results was verified, where a percentage of concordance between the simulated values and those collected in the field of 59% of coffee coverage was obtained, by means of the regression technique a correlation coefficient was obtained for the Landsat 8 product of 0.9604 and with Sentinel 2 of 0.8614, determining a high degree of relationship between the simulated values and the values observed for the year 2017.

Keywords: Classification, Bands, Spectral signatures, Sentinel, Landsat.

1. INTRODUCCIÓN.

Hoy día, en la aplicación de la ingeniería agrícola se integran temas relacionados con la hidrología, hidráulica, conservación de suelos, así como la implementación de agricultura de precisión, entre otros; donde una de las limitantes en diferentes proyectos a fines, es el problema al acceso de datos en las diferentes disciplinas del área agrícola, como mapas territoriales, zonas específicas con cultivos, rendimientos de cosecha de cultivos en diferentes lotes, desconocimiento del comportamiento así como de caudales máximos y mínimos de cuencas, usos de suelos en determinadas zonas, entre otros, que limitan la interacción multidisciplinaria del conjunto de elementos de diferentes tecnologías, que facilitan la comprensión y el análisis de parámetros relacionados al campo agrícola.

Por lo que es importante contar con herramientas que ayuden a procesar datos necesarios para diversos estudios, como los sistemas de información geográfica que permiten, realizar análisis y modelación de grandes cantidades de datos georreferenciados procedentes de la vida cotidiana, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, y con ello simplificar la comprensión de datos, y con ayuda de procesos estadísticos analizar la información obtenida, que conducen al profesional a la toma de decisiones de una manera más eficaz con los resultados de todas estas operaciones.

En el presente proyecto se desarrollará por medio del Sistema de Información Geográfica (QGIS), que permite manejar datos en distintos formatos, complementos y herramientas. Uno de los complementos importantes para la elaboración de este estudio, es la Herramienta de clasificación semi automática conocida por sus siglas en inglés SCP; que tiene toda una serie de herramientas para el procesamiento de imágenes satelitales, con la cual se va a realizar una clasificación semi supervisada de diferentes usos de suelo, permitiendo así el análisis espectral de la cobertura de café para cada uno de los distritos del cantón Pérez Zeledón, de la Zona Sur de Costa Rica.

El proyecto se llevará a cabo en el Centro de Investigación del Café de Costa Rica (ICAFE), el cual: *es una institución pública de carácter no estatal, fundada en 1933 como rectora de la caficultura costarricense* (ICAFE, 2017). Ubicada en San Pedro de Barva de Heredia.

Dicha institución requiere crear información actualizada que les permita contar con la extensión total de siembra de este cultivo, para generar datos por medio de herramientas estadísticas como algoritmos de predicción, que facilite a diferentes entidades ya sean públicas o privadas relacionadas con la actividad cafetalera, poder realizar o ajustar las estrategias relacionadas con el sector, como analizar los fidecomisos brindados a los productores, los cuales se refieren, tramitar cantidades de dinero (préstamos), tomando en cuenta los bienes o producción con que cuente el productor, para que este lo administre o invierta en beneficio propio referente a la actividad.

Esta entidad, cuenta con datos desactualizados de cantidad de siembra de la zona de estudio, realizados en el año 2012, de ahí la importancia de la realización del proyecto para recolectar la información necesaria, implementando nuevos métodos en la definición de zonas de cultivo de café, mediante el uso de nuevas tecnologías, que permitan la agilización y la disminución de tiempo así como presupuesto invertido, como lo son los análisis de datos obtenidos con sensores remotos, en este caso de imágenes multiespectrales.

Siendo fundamental el estudio de los sectores cafetaleros para estar al tanto de la distribución de la producción del cultivo en las diferentes regiones del país, y poder así mantener una supervisión y control del mismo, para los diferentes estudios que se requieran realizar.

Conjuntamente, con la elaboración de este proceso se pueden recolectar firmas espectrales del café, que son importantes para determinar varios parámetros de la planta que se detectan por medio de la reflectancia electromagnética a lo largo de la longitud de onda, siendo relevante para determinar diferentes propiedades agronómicas del cultivo de café, así mismo con estas firmas poder comparar el tipo de cobertura con que más se confunde el cultivo de café. *Las firmas espectrales hacen referencia al perfil específico de radiancia emitida por los objetos situados en la superficie de la tierra. Unos valores de emisión específicos en función del tipo de objeto, su temperatura o la textura entre otros factores* (Ferrerías, 2015). Sin embargo, para efectos del proyecto se analizará únicamente el comportamiento de las firmas a lo largo de las bandas, realizando un análisis estadístico en sus valores, y determinar con qué tipo de cobertura se confunde el cultivo de café según la similitud en las firmas, debido a que la parte agronómica es un tema muy amplio, y correspondiente a personas expertas en el tema.

Para llevar a cabo este proyecto es necesario la determinación de los objetivos que se presentan en el siguiente apartado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General:

- Identificar áreas destinadas al cultivo del café en la zona Sur de Costa Rica, Cantón Pérez Zeledón, aplicando una metodología de clasificación semi supervisada con imágenes multiespectrales.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Analizar los valores por banda que caracterizan al cultivo de café para definir una firma espectral general del comportamiento de bandas del cultivo.
- Analizar las firmas espectrales de diferentes coberturas para identificar las bandas que permitan separar al cultivo del café de los demás usos de suelo.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos mediante la comparación de áreas del Cultivo de Café para los años 2012 y 2017, y de los muestreos realizados en el campo, y análisis estadísticos para definir la efectividad del proyecto.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Cultivo de Café

Según Alvarado y Rojas (2007), la introducción de este cultivo en América es un hecho propio del siglo XVIII. Además, mencionan que en 1723 fue que se introdujeron las primeras plantas en la isla de Martinica y que de ellas descienden los cafetos de las Antillas y el Brasil. En cuanto a Costa Rica, no existen evidencias concretas sobre la existencia de las plantaciones de café antes de 1816, fecha que corresponde al testamento del presbítero Félix Velarde, en el que declara, entre sus bienes, ser poseedor de un sembrado de café.

Desde entonces ha existido interés por este cultivo por parte de los costarricenses, se ha adaptado en muchas zonas productoras según a las características de cada lugar, gracias a la tecnología avanzada que es utilizada por los productores, presentando un impacto directo en la economía del país, abriendo paso en el mercado de este producto tanto nacional como internacional por medio de las exportaciones del mismo.

En Costa Rica la comercialización de café se encuentra en manos del sector privado; sin embargo, el Estado mantiene la supervisión y control por medio del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE), en cuya Junta Directiva están representados todos los actores que intervienen en la actividad cafetalera.

2.2 Características del área de estudio.

La extensión del Cantón de Pérez Zeledón es de 1905.51 kilómetros cuadrados, la cual representa un 38.42 % del territorio de la provincia San José y a su vez un 3.33% del Territorio Nacional. Comprende los distritos San Isidro de El General, Daniel Flores, General, Rivas, San Pedro, Platanares, Pejibaye, Cajón, Barú, Río Nuevo, Páramo y La Amistad. La ciudad Cabecera, San Isidro de El General, está situada a 136 km de San José, Capital de Costa Rica (Municipalidad de Pérez Zeledón, s.f.)

Según el VI Censo Nacional Agropecuario 2014 realizado en Pérez Zeledón, hay 8059 fincas dedicadas a la agricultura y la ganadería, con una extensión de 97 mil hectáreas (12 hectáreas, como promedio), en la producción de café, el censo identificó 26 527 fincas que poseen 84 133,1

hectáreas sembradas en el año agrícola, Pérez Zeledón aporta el 41,9% de estas fincas (INEC, 2015).

2.3 Cobertura del suelo

La cobertura del suelo comprende todos los aspectos que forman parte del recubrimiento de la superficie terrestre, de origen natural o cultural, que sean observados y permitan ser medidos con fotografías aéreas, imágenes de satélite u otros sensores remotos (Fallas, 2016).

Como se evidencia, el conocimiento de la cobertura y uso de suelo es de índole importancia en diferentes áreas para establecer por ejemplo el ordenamiento territorial que es indispensable para categorizar los terrenos, así como, para identificar los cambios y evolución de los suelos, para los diferentes estudios. *“El conocimiento de cobertura del suelo y la detección de sus cambios es un paso fundamental para la gestión sustentable de los recursos naturales y el desarrollo de la agricultura a diferentes escalas, la conservación de la biodiversidad, ordenamiento territorial, entre otros”* (FAO, 2015).

2.4 Composición de una imagen satelital óptica (Imágenes Multiespectrales)

De acuerdo con Medina (2018), estas, son el resultado de la captura de los niveles de radiancia de la superficie terrestre a través de los sistemas de percepción pasivos de energía reflejada por medio de sensores fotoeléctricos. Así mismo, menciona que la radiancia es transformada en valores numéricos digitales y segmentados en bandas individuales para las diferentes regiones del espacio visible, infrarrojo y térmico, representada en una matriz de pixeles. En la Figura 1, se muestra un ejemplo de una composición de una imagen satelital óptica.

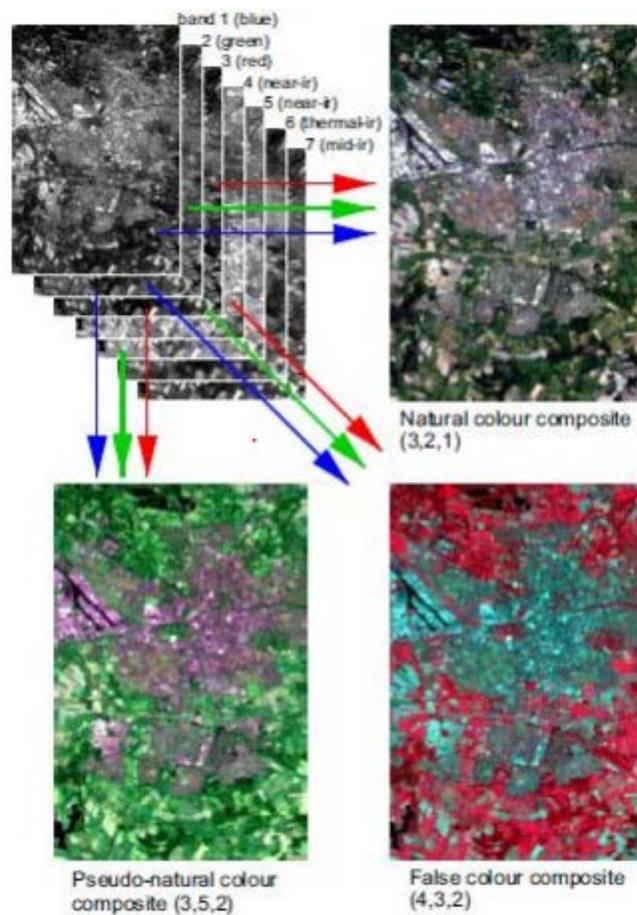


Figura 1. Composición de una imagen satelital óptica.

Fuente: (Medina, 2018)

2.5 Teledetección

Es un proceso donde las imágenes se captan por un sensor que observa la tierra desde una órbita estable y repetitiva. Es decir, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. La cadencia de observación dependerá del ciclo orbital de la plataforma y del campo de visión del sensor, si bien en términos prácticos los sensores ópticos también limitan su frecuencia real de adquisición en función de la cobertura nubosa (Chuvieco, 1998).

En el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomada desde los satélites artificiales (Chávez, 2007).

Por otra parte Medina (2018), refiere que la teledetección y sus respectivas técnicas de procesamiento digital de imágenes ofrecen una diversidad de opciones para el mapeo y monitoreo de cultivo, presentando ventajas importantes frente a estudios de campo, y en particular han sido ampliamente usadas en labores de identificación de áreas sembradas, discriminación varietal, estimación de área foliar, estimaciones de productividad, entre otras.

2.6 Resolución de un sistema sensor

Las mediciones realizadas por un sensor (reflectancia electromagnética) son almacenadas en un elemento llamado pixel (unidad espacial mínima de observación en percepción remota), representado por un valor digital. Una imagen digital se concibe como una representación gráfica, en lo cual se han grabado a través de niveles digitales los rasgos de superficie terrestre o acuática.

Un sistema sensor posee diferentes grados de discriminación de los objetos, a esta particularidad se le conoce como resolución y pueden ser de tipo espacial, espectral, radiométrica, temporal o angular. Estas particularidades caracterizan las imágenes para diferentes aplicaciones. (Moraga, et al, 2011)

El autor hace una breve referencia de cada una de estas, se mencionan a continuación:

- **Resolución espectral:** Indica el número y la anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.
- **Resolución radiométrica:** Hace mención a la sensibilidad del sensor, es decir, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. El número de valores que incluye ese rango esto -es, el número máximo de niveles digitales de la imagen- suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor.

- **Resolución temporal:** Alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.
- **Resolución angular:** Es un término relativamente reciente y se refiere a la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos.

2.7 Características de imágenes LANSAT y SENTINEL

2.7.1 LANSAT

Son una serie de imágenes satelitales multiespectrales que iniciaron con el LANSAT 1 en 1972, y que de forma continua han puesto en órbita diferentes misiones, en la actualidad está en funcionamiento el LANSAT 8 puesto en órbita en el 2013.

El autor Mena (2014), menciona que el satélite Landsat 8 dispone de dos instrumentos fundamentales el Imagen de Tierra Operacional, conocido por sus siglas en inglés (OLI) y el Sensor de Infrarrojos Térmicos conocido por sus siglas en inglés (TIRS), los cuales se detallan seguidamente:

2.7.1.1 Imagen de Tierra Operacional

Capta el espectro visible, infrarrojo cercano (NIR), e infrarrojo de onda corta (SWIR), tiene una resolución espacial de 15 metros en el canal pancromático y de 30 metros en los canales multiespectrales.

2.7.1.2 Sensor de Infrarrojos Térmicos

Mide la temperatura de la superficie terrestre mediante dos bandas del infrarrojo térmico (bandas 10 y 11). Los datos generados por este sensor tienen una resolución espacial de 100

metros y son de gran valor para medir la evapotranspiración y el consumo de agua en agricultura. En el Cuadro 1, se presenta información importante para el uso del producto LANDSAT.

Cuadro 1. Información por banda de las imágenes LANDSAT 8.

Landsat – 8 OLI and TIRS Bands (μm)			
Band 1	30m	Coastal / Aerosol	0,435-0,451
Band 2	30m	Azul	0,442-0,512
Band 3	30m	Verde	0,533-0,590
Band 4	30m	Rojo	0,636-0,673
Band 5	30m	Infrarrojo cercano (NIR)	0,851-0,879
Band 6	30m	Infrarrojo de onda corta (SWIR-1)	1,566-1,651
Band 7	30m	Infrarrojo de onda corta (SWIR-2)	2,107-2,294
Band 8	15m	Pancromático (Pan)	0,503-0,676
Band 9	30m	Cirrus	
Band 10	100m	Sensor infrarrojo térmico (TIR-1)	10,60-11,19
Band 11	100m	Sensor infrarrojo térmico (TIR-2)	11,50-12,51

Fuente: (Watson, 2017)

2.7.2 SENTINEL

Las imágenes Sentinel son producto del programa de captura de imágenes multiespectrales administrado por la Unión Europea y por la Agencia Espacial Europea (ESA), la versión SENTINEL 2A se lanzó en el 2015 y la SENTINEL 2B en marzo del 2017.

SENTINEL 2 posee un instrumento óptico que presenta 13 bandas espectrales: 4 bandas de 10m, 6 bandas de 20m y 3 bandas de 60m (Bustos y Gonzaba, 2017). En el Cuadro 2, se detalla información de cada una de las bandas.

Cuadro 2. Información por bandas de las imágenes SENTINEL 2.

Resolución	Banda	Nombre
10m	B02	Blue
	B03	Green
	B04	Red
	B08	NIR
20m	B05	Red Edge 1
	B06	Red Edge 2
	B07	Red Edge 3
	B08A	Red Edge 4
	B11	SWIR 1
	B12	SWIR 2
60m	B09	Aerosol
	B07	Water Vapor
	B10	Cirrus

Fuente: (Watson, 2017)

2.8 Visualización RGB (Rojo, Verde, Azul).

El RGB conocido por sus siglas en inglés (RED, GREEN, BLUE), es un modelo de color basado en la síntesis aditiva., con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores de luz primarios (Castilla, 2016).

La combinación de bandas es importante, debido a que nos permiten visualizar lo que a simple vista no se puede observar sin necesidad de realizar algún proceso.

En la Figura 2, se presentan algunas combinaciones de las bandas de falso color y color verdadero para LANDSAT 8.

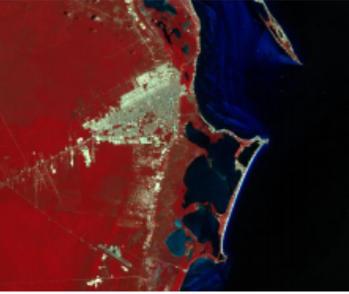
Bandas (R, G, B)	Aplicación	Ejemplo
(3,2,1)	<p>Esta combinación utiliza las bandas de la porción visible del espectro electromagnético, es la que más se aproxima a los colores reales. Es ideal para enfatizar información del agua: turbidez, corrientes y sedimentos en suspensión. En esta imagen las tonalidades de color azul claro representan aguas costeras y con sedimentos en suspensión, mientras que los tonos azul oscuro representan aguas más profundas y con pocos sedimentos en suspensión. Las áreas urbanas aparecen en tonalidades marrón claro y la vegetación en tonos verdes.</p>	
(4,3,2)	<p>La banda 4 (infrarrojo cercano) es útil para identificar los límites entre el suelo y el agua. Los cuerpos de agua con sedimentos en suspensión aparecen en tonos azul claro y los que poseen pocos sedimentos en suspensión en azul oscuro. Las áreas urbanas y el suelo expuesto aparecen en tonos azul. También la banda 4 es sensible a la clorofila, permitiendo que se observen variaciones de la vegetación, que aparecen en tonos rojos.</p>	
(5,4,3)	<p>Esta combinación con dos bandas en la región del infrarrojo muestra una mayor diferenciación entre el suelo y el agua. La vegetación se muestra en diversas tonalidades de verde y rosa, que varían en función del tipo y de las condiciones de ubicación. Las áreas urbanas y el suelo expuesto se presentan en tonos rosados. El agua, independiente de la cantidad de sedimentos en suspensión, aparece en negro.</p>	

Figura 2. Combinaciones de bandas en Color Verdadero y Falso Color.

Fuente: (Castilla, 2016)

2.9 Índices de vegetación

Un índice de vegetación puede definirse como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones como debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas. (Rodríguez, 2012)

Este método de clasificación es exclusivo para el tratamiento de imágenes ópticas denominados, “clasificación orientada a pixel”, el cual es utilizado en el proyecto para la identificación o detección agrícola, en este caso específicamente plantaciones de café.

El índice de vegetación normalizada, conocido por sus siglas en ingles NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), permite diferenciar cobertura vegetal, suelo desnudo y masas de agua, por medio de asignación de valores estandarizados basados en la energía absorbida o reflejada por el tipo de cobertura. (Watson, 2017)

Al respecto los autores Gilabert, Gónzales, y García (1997), mencionan que (NDVI) es la diferencia normalizada de las dos bandas Infrarrojo cercano (IRC) y la roja (R), y cuyo rango de variación, al estar normalizado queda comprendido entre -1 y +1.

Según los autores citados, el NDVI se calcula como se muestra en la Ecuación 1 a continuación:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \dots (1)$$

2.10 Corrección atmosférica

En cuanto a este apartado Chávez (2007), detalla que la radiancia que recibe el satélite no es la misma que sale del suelo, donde especifica que es la que interesa medirle la reflectividad de la cubierta, no la que influye por la atmósfera. Para calcular la reflectividad de la superficie se necesita estimar la transmisividad de la atmósfera (descendente, y ascendente), la irradiancia difusa y la irradiancia atmosférica debida a la dispersión.

Además, indica que los métodos de corrección atmosférica pueden ser divididos en dos grupos, los que usan métodos complejos tales como modelos numéricos de transferencia

radiactiva y aquellas que usan modelos más simples para la eliminar la dispersión y la turbidez atmosférica a través de la sustracción del valor del píxel oscuro.

2.11 Clasificación supervisada de imágenes satelitales

Referente a la clasificación supervisada Fallas (2016), alude que es un proceso, en que pixeles de identidad conocida, se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida. La clasificación supervisada incluye etapas de entrenamiento, selección del algoritmo de clasificación y operaciones después de la clasificación.

La clasificación supervisada está referida a un análisis visual, la cual consiste en una técnica que examina la imagen analógica, con el propósito de identificar los diferentes componentes del paisaje, basándose en criterios visuales de tono, color, y textura (Condori, et al, 2018).

La autora Monferrer (s.f), define los criterios visuales mencionados por Condori, (2018), de la siguiente forma:

Tono: el tono hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor en una determinada banda del espectro. En una fotografía los tonos oscuros indican áreas sobre las que el sensor detectó una señal baja, mientras que las áreas claras indican altos valores de radiancia. En una imagen los tonos oscuros y claros varían su significado de acuerdo a la banda del espectro en la que se encuentra la respuesta espectral.

Color: respecto a este apartado menciona que, varios autores han propuesto que el ojo humano está más capacitado para percibir las variaciones cromáticas que las variaciones de la intensidad luminosa. Si a ello añadimos el aumento de información que supone la mezcla de varias bandas del espectro, entonces se comprende fácilmente que el color resulta un elemento básico para la interpretación visual de imágenes.

Como se sabe el color que aprecian nuestros sentidos es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda. Aquellas superficies con alta reflectividad en longitudes de onda cortas, y baja en el resto, aparecen en color azul, mientras ofrecen un tinte rojo si absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. Nuestros ojos solo perciben las

longitudes de onda comprendidas entre 0,4 y 0,7 μm , separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras. Esos tres componentes son los denominados colores primarios: rojo, verde y azul, a partir de los cuales pueden componerse cualquier otro color.

Textura: esta cualidad se refiere a la aparente rugosidad o suavidad de una región de la imagen. Esto significa el contraste espacial entre los elementos que la componen. La textura de la imagen procede de la relación entre el tamaño de los objetos y la resolución del sensor. Alude, que la textura también está influenciada por el ángulo de observación y de iluminación. Estos elementos son especialmente importantes en superficies rugosas como es el caso del bosque natural, que ofrece una textura muy variada a lo largo del año, en función de las condiciones de adquisición. En cualquier caso, el criterio de textura es muy importante para discriminar determinadas cubiertas que pueden ofrecer un comportamiento espectral uniforme.

2.12 Áreas de entrenamiento (ROIs)

Son áreas de interés que el usuario define para procesos de extracción de estadísticas de la imagen o para operaciones como clasificación y crear mascarar que pueden ser usadas para recortar zonas dentro de una imagen, y con esto generalizar toda un área de estudio (Araya, 2009).

Los ROIs son áreas con cobertura conocida o identificable delimitada por un polígono, de estas áreas se extraerá la información de la imagen para utilizar como patrón y generalizar en toda la zona de estudio (Watson, 2017).

2.13 Firmas espectrales

La combinación de los distintos materiales sobre la superficie terrestre combinado por la influencia que, en ellos ejerce los factores externos y las variaciones medio ambientales, se plasma en la denominada respuesta o firma espectral cuya rubrica, representa la energía electromagnética reflejada o emitida en diferentes longitudes de onda y registrada por el sensor durante su trayecto. Se diseñan curvas o firmas espectrales para cada una de las cortezas

terrestres en función de su longitud de onda, determinadas con sus características físicas y químicas internas, para decidir con cierto grado de certeza las bandas o longitudes de ondas más adecuadas para utilizarse, con el fin de tener un eficiente procesamiento de imágenes de interés. El análisis y evaluación de estas curvas, reflejara el comportamiento de la reflectancia de cualquier material expuesto en la superficie, las declinaciones observadas, como la posición de los rangos de absorción se constituye en los principales parámetros de diagnóstico tanto de minerales, suelos, vegetación o cualquier material sobre la superficie terrestre (Chávez, 2007).

2.14 Similitud de la clasificación de la cobertura.

En cualquier estudio de investigación es importante contar con datos confiables y validar si los resultados obtenidos son representativos por medio de cálculos, para valorar si el proyecto es fiable o no. Esto se puede realizar por estimaciones estadísticas, matrices o uso de índices, con el fin de obtener información de la simulación realizada.

Se hizo uso de la herramienta de muestreo de puntos, el cual consiste en recopilar atributos de una capa vectorial de tipo polígono y valores de una imagen ráster a partir de una serie de puntos de muestreo. Donde se crea una nueva capa de puntos en la que se guardaran los atributos o valores tomados de esa imagen o capa vectorial tipo polígono, con ello se puede verificar cuantos puntos del muestreo tomados, la clasificación está identificando correctamente.

Además, para este estudio se implementó el desarrollo de algoritmos de predicción, se utilizó la técnica estadística de regresión, la cual consiste en el estudio de la naturaleza de la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. Esta relación se representa por un modelo matemático, dado por la ecuación de regresión, que en la mayoría de los recursos básicos de la estadística se supone lineal y simple, es decir existe una única variable independiente y la ecuación de regresión es una recta. El análisis de regresión se efectúa con el objeto de, por un lado, obtener una descripción de la relación entre las variables, como una indicación de causalidad, y por otro a fin de obtener un predictor de la variable respuesta (dependiente), a partir de los valores de la/s variable/s independientes.

Paralelamente se trabaja con el análisis de correlación que consiste en medir la intensidad de la relación entre las variables analizadas con la determinación de un valor numérico llamado coeficiente de correlación. Esto es, el análisis de correlación tiene que ver con la fuerza o intensidad de las relaciones existentes entre las variables. El valor de coeficiente de correlación oscila siempre entre -1 y 1. A medida que el valor absoluto de este coeficiente a 1 mayor es el ajuste de los puntos a la recta y por lo tanto mejor serán las predicciones usando la recta (Mallea, et al, s.f.).

2.15 Proyectos realizados del tema de estudio.

Ante este apartado se presentan algunos estudios relacionados al tema de clasificaciones de cobertura por medio de imágenes multiespectrales, dentro de estos se puede mencionar los siguientes:

- Evaluación de la capacidad de las imágenes de Radar de Apertura Sintética para la detección del cultivo de Café en Pitalito Huila.

Investigación realizada por Medina (2018), esta consistió en el aprovechamiento de las propiedades de la radicación coherente de los sensores SAR en el reconocimiento de características morfológicas y estructurales de la vegetación agrícola como insumo principal en la detección y clasificación del café a libre exposición solar, con densidad media de sombra y alta densidad de sombra. Donde los resultados acerca de la exactitud se midieron por medio de la matriz de confusión obteniendo un resultado global de 81,2% (enfoque monosensor) y 89,65% (enfoque multisensor). Datos por arriba del porcentaje mínimo planteado por Foody (2002), citado por el Autor, que sugiere que la precisión debe ser mayor o igual al 85% para ser considerada como satisfactoria.

- Análisis de la evolución de los usos del suelo, recursos y parámetros físicos mediante técnicas de teledetección y SIG.

Este estudio es proveniente del autor García (2016), el cual consistió en analizar la evolución del área de estudio, así como cambios en los usos del suelo por medio del paquete

Qgis. Donde aplicó técnicas de teledetección en una serie de imágenes de la zona (Andalucía), de diferentes estaciones climatológicas y años para determinar el Índice de Vegetación, Índice de Humedad, y un estudio clasificatorio de la evolución de los usos del suelo. En dicho estudio el autor concluye que la utilización de los SIG y la teledetección resultan interesantes en este tipo de estudios, no sólo a nivel de evaluación de los efectos, sino también a nivel de prevención, estimando el estado de la vegetación y la humedad del suelo, en tiempo real, así como en estudios de mayor detalle identificando cubiertas que puedan actuar como combustible. Mencionando, además, que la mejora de resolución de los sensores contribuirá a la utilidad de estos estudios.

- Cobertura del suelo del año 2016 del cantón Tarrazú, San José, Costa Rica.

Este proyecto fue elaborado por Fallas (2016), el mismo consistió en la clasificación de la cobertura del suelo del cantón de Tarrazú. Se utilizaron 3 imágenes LANDSAT 8, las cuales se utilizaron de forma conjunta para realizar la clasificación final, además se validó la clasificación, donde refiere que la exactitud general de la clasificación alcanzó un 86,86% teniendo en cuenta cinco clases analizadas con la matriz de error, concluyendo que la clasificación realizada fue satisfactoria.

3. METODOLOGÍA.

3.1 Ubicación de la zona de estudio.

El proyecto de la modelación se desarrolló para la zona Sur de Costa Rica específicamente en Pérez Zeledón, con el fin de recolectar la información requerida, por parte de la institución del ICAFE identificando áreas cafetaleras del lugar, así como la identificación de firmas espectrales con las que se confunde el cultivo de café, por medio de herramientas SIG, que permiten determinar dichas áreas, la extensión total sembrada por proyecciones estadísticas, y generar firmas espectrales de las diferentes coberturas.

Pérez Zeledón está ubicado en el extremo sur del país, en la región Brunca, entre las coordenadas dadas por 9° 05' 37" latitud norte y 83° 26' 83" longitud oeste. En la Figura 3, se muestra la ubicación del área en estudio.

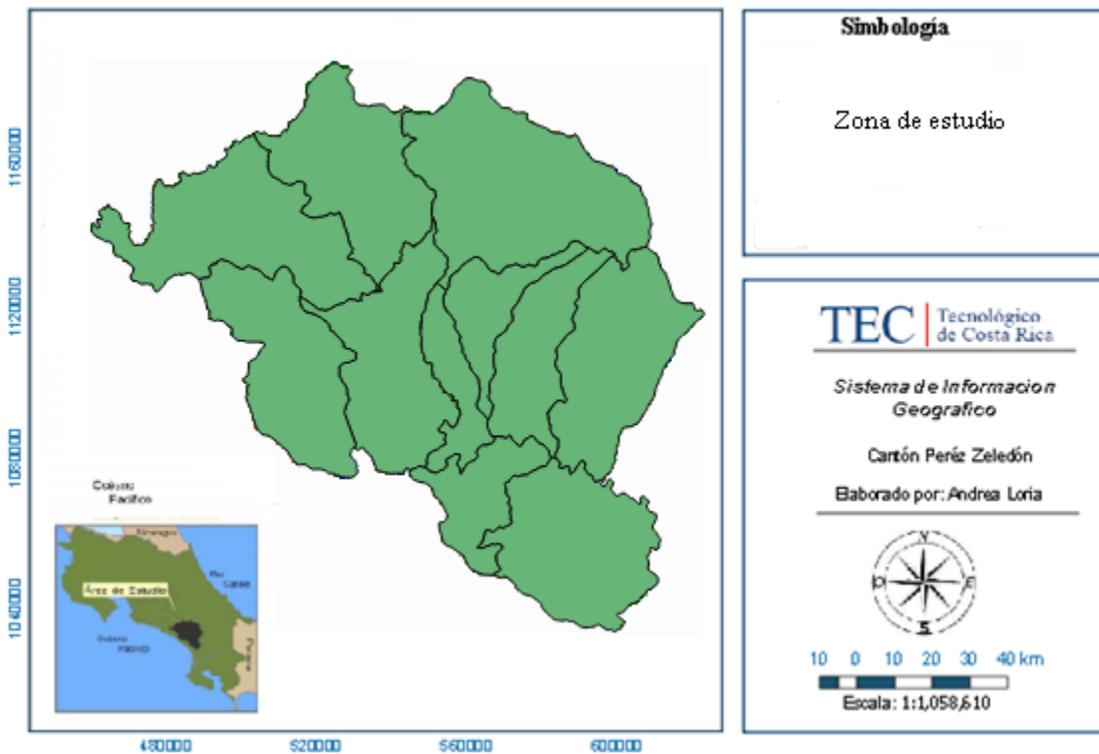


Figura 3. Área de estudio (Pérez Zeledón).

- Analizar los valores por banda que caracterizan al cultivo de café para definir una firma espectral general del comportamiento de bandas del cultivo.

3.2 Procesamiento inicial de las imágenes.

Para la elaboración de este proyecto fue necesario elaborar una serie de pasos para procesar las imágenes crudas obtenidas de la plataforma, donde se realizaron las correcciones necesarias para iniciar los procesamientos y análisis sobre las mismas.

En la Figura 4, se detalla un resumen de la metodología empleada para el procesamiento inicial de las imágenes satélites para la detección del cultivo del Café.

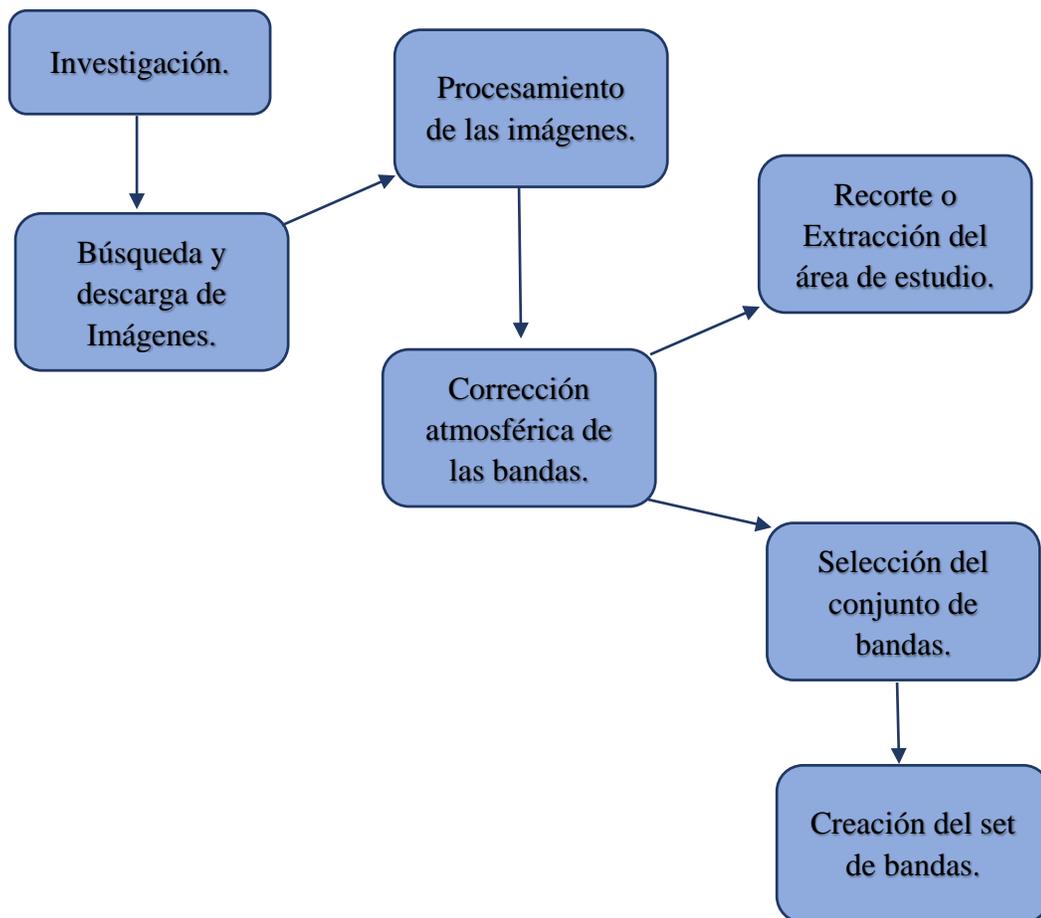


Figura 4. Esquema de la metodología del procesamiento inicial de las imágenes.

3.3 Selección y adquisición de las imágenes

Se inició realizando la selección de imágenes satelitales desde la plataforma EarthExplorer Home USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), de los productos existentes en el área de búsqueda, donde se seleccionó el producto Sentinel-2, se visualizaron varias opciones y se aseguró que estas abarquen el área de Pérez Zeledón, realizando el estudio con una imagen del año 2017, tomando en cuenta la calidad de imagen, el porcentaje de nubosidad, (que sea menor al 10%). Se realizó la búsqueda en las fechas del mes de enero a marzo del año 2017, época aproximada de verano para una mejor visualización del cultivo en estudio (Café). En la Figura 5, se muestra la previsualización de la imagen seleccionada, y en el Cuadro 3 se detalla parte de la información de la imagen elegida.



Figura 5. Previsualización de la imagen seleccionada.

Fuente: Plataforma Earth Explorer.

Cuadro 3. Parte de información brindada de la imagen seleccionada.

Atributo de conjunto de datos	Valor de atributo
Fecha de inicio de la adquisición	L1C_T16PHR_A008345_20170126T160504
Fecha de finalización de la adquisición	2017-01-26T16:11:12.449Z
Número de azulejo	T16PHR
Cubierta de nubes	2.2684
Agencia	ESA
Plataforma	SENTINEL-2A
Vendedor	MTI_
ID del proveedor	L1C_T16PHR_A008345_20170126T160504
Número de órbita	54
Dirección de la órbita	Órbita descendente
Vendedor Software versión	02.04
Fecha de producción	2017-01-26T16:05:04.000000Z

Fuente: Plataforma Earth Explorer.

3.4 Cálculo de índice de Vegetación (NDVI).

Realizado la descarga, se utilizó el programa de Sistema de Información Geográfica (QGIS), y se creó la capa ráster de índice de vegetación (NDVI), utilizando la imagen SENTINEL-2, con las bandas de interés, que corresponden a la banda roja (RED) y la banda de infrarrojo cercano (NIR). Para ello, se hizo uso de la calculadora ráster y se aplicó la ecuación uno anteriormente descrita.

- Analizar las firmas espectrales de diferentes coberturas para identificar las bandas que permitan separar al cultivo del café de los demás usos de suelo.

3.5 Clasificación semi supervisada.

Para realizar la clasificación semi supervisada se determinó por medio del programa Qgis y la herramienta complemento de clasificación semi automático (SAP).

Debido a que no se contó con recursos necesarios para realizar visitas al campo, y establecer una buena metodología de muestreo de puntos, lo que se realizó fue establecer una ruta a lo largo del cantón de Pérez Zeledón tomando puntos georreferenciados por medio de un GPS, de zonas cafetaleras cercanos a los caminos de la ruta establecida, se tomaron 82 puntos en total, con el fin de procesarlos e identificar la similitud de los datos en la clasificación semi supervisada realizada con el programa, y con estos determinar el porcentaje por cobertura que identifica la clasificación de los puntos del cultivo de café en otras coberturas.

Se crearon áreas de entrenamiento (*ROI*), en la opción *Entrada de entrenamiento*. Continuamente con la barra de herramientas *RGB*, se asignó la composición que se ajuste mejor según a la clasificación de los *ROIs*, donde se seleccionó un juego de bandas en el *RGB*, creándose un archivo temporal de set de bandas, en este proceso hizo uso de principalmente la combinación de bandas, de color natural, para facilitar la observación de las diferentes coberturas presentes.

En el panel de Clasificación, se definió las macro clases (Café, Vegetación, Construcción y Agua) y las clases de la cobertura de suelo (C1, Techos, Caminos, Bosques, Pastos-Cultivos, y Agua), con ayuda de shapes de fincas cafetaleras brindados por el ICAFE se fueron creando los *ROIs* en las zonas con cultivo de café.

La creación de los polígonos (*ROI*), se basó en la interpretación visual haciendo uso el GoogleEarth y la imagen de los productos Sentinel 2 y Landsat 8.

Una vez, finalizado la creación de los *ROI*, se realizó una vista previa de los resultados

de la clasificación, y se hicieron las correcciones necesarias, hasta estar satisfechos con los resultados generados.

Obtenido el paso anterior, se crearon firmas espectrales del cultivo del café, por medio del *Gráfico firma espectral*, con el fin de recolectar información del comportamiento de los valores en las bandas a lo largo de la longitud de onda.

Conforme se elaboró la clasificación se fue identificando con qué tipo de cobertura se confunde el cultivo de café, por la similitud en las firmas espectrales, por consiguiente, se graficaron los promedios de los valores máximos y mínimos de las bandas de las coberturas de Vegetación y Bosque con las bandas del cultivo de Café, debido a que estas son las coberturas que presentan similitud en sus firmas espectrales, para identificar las bandas donde se diferencian entre sí.

- Realizar un análisis de los resultados obtenidos mediante la comparación de áreas del Cultivo de Café para los años 2012 y 2017, y de los muestreos realizados en el campo, y análisis estadísticos para definir la efectividad del proyecto.

Satisfechos con la clasificación, se procedió a eliminar píxeles inferiores entre un rango de 15 a 30 píxeles, esto se llevó a cabo mediante la herramienta ráster *Tamizar*, y en Umbral se asignó un valor del rango mencionado. Conformes con los resultados obtenidos, se generó el archivo de salida de la clasificación.

Se realizó el cálculo de áreas por cobertura, haciendo uso de la tabla de atributos, para ello se calculó el área de las diferentes macro clases del vector de la clasificación, dichos valores se llevaron a una hoja del programa Excel, y haciendo uso de una tabla dinámica se calculó el área por macro clase.

Además, se calculó el área de cobertura por distrito para ello fue necesario realizar una unión de las capas shape del polígono que representa al cantón de Pérez Zeledón por distrito, con el shape del vector de la clasificación semi automática realizada.

Cabe indicar, que la metodología mencionada, se realizó también con imágenes de LANSAT las cuales se procesaron y se comparó respecto a los resultados obtenidos de las imágenes SENTINEL.

El paso final consistió en la evaluación de la similitud de la clasificación para este se realizó una extracción de valores del ráster generado en el programa, mediante la herramienta de *Muestreo de puntos de conexión*, a los datos recolectados en el campo que fueron puntos tomados del cultivo de Café en los diferentes distritos del área de estudio, este proceso se realizó para la clasificación obtenida con el producto Sentinel 2.

Además, se aplicó la estadística haciendo uso de la técnica de regresión, siendo esta muy utilizada para interpretar situaciones reales, determinando la relación existente entre variables, para determinar este modelo de regresión es importante evaluar que tan adecuado es el modelo obtenido por lo que se hizo uso del coeficiente de correlación R, para ello se analizaron tres distritos del cantón de Pérez Zeledón los cuales son San Isidro, General y Daniel Flores.

Con la información de las áreas de cobertura que se tiene para cada uno de los distritos del año 2012, de manera observada se estableció la cobertura para el año 2017, corrigiendo la cobertura 2012 según los cambios observados agregando o eliminando áreas de café, por medio del uso del programa Qgis y Google Earth Pro con imágenes del año 2017.

Una vez obtenida el área real para el año 2017 de manera observada de los tres distritos mencionados, y con los datos obtenidos de la clasificación de estos distritos, se aplicó la técnica de regresión para determinar un modelo de regresión, graficando lo observado versus lo calculado, tanto para el producto Landsat 8 como para el producto Sentinel 2. Y posteriormente evaluando que tan adecuado es el modelo obtenido por medio del coeficiente de correlación R, se proyectaron valores para cada uno de los distritos del cantón en estudio, con la ecuación obtenida para ambos productos.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Procesamiento inicial

Se realizó el preprocesamiento y las correcciones de las imágenes respectivas de los datos crudos de los sensores SENTINEL 2, Fecha de adquisición 26/01/2017 Hora 05:04, Plataforma Sentinel 2A y LANDSAT 8, Fecha de adquisición 26/01/2017 Hora 6:15, Sensor OLI_TIRS.

4.1.1 Descarga de imágenes espectrales.

Se obtuvieron trece bandas del proceso de la descarga de imágenes SENTINEL 2, y 11 bandas de la descarga LANDSAT 8, del programa de captura de imágenes multiespectrales. En la Figura 6, se muestra tres de las bandas obtenidas.

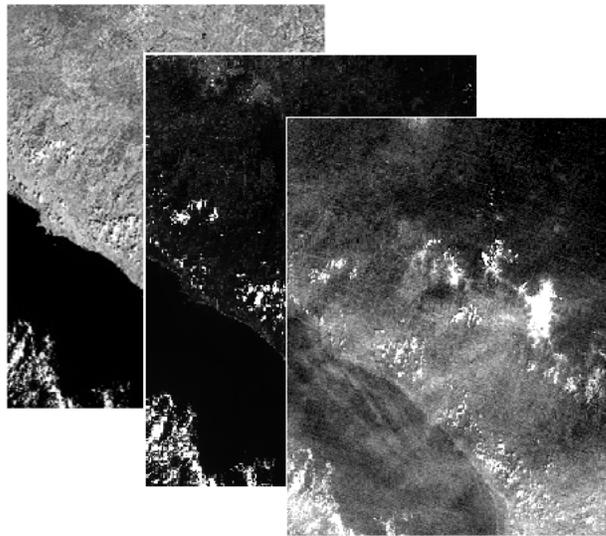


Figura 6. Bandas 8, 10, 12 SENTINEL 2 de la imagen multiespectral L1C_T16PHR_20170126T160504.

4.1.2 Calculo de índice de vegetación diferenciada en imágenes SENTINEL 2 Y LANDSAT 8

Continuo a las imágenes descargadas, se determinó el NDVI que permite diferenciar la cobertura vegetal, suelo desnudo y masas de agua, donde se muestra la presencia, y calidad de vegetación, por medio de valores basados en la energía absorbida o reflejada por el tipo de

cobertura, utilizando las bandas de interés 4 y 8, para las imágenes SENTINEL 2, y las bandas 4 y 5, para las imágenes de LANDSAT 8, (RED, y NIR) respectivamente. Se utilizó la función Clipper y se cortó el archivo ráster que representa la zona, haciendo uso del polígono del área de Pérez Zeledón, se modificó los colores para obtener mayor reflectancia en el área de estudio, obteniendo los resultados como se muestra en la Figura 7.

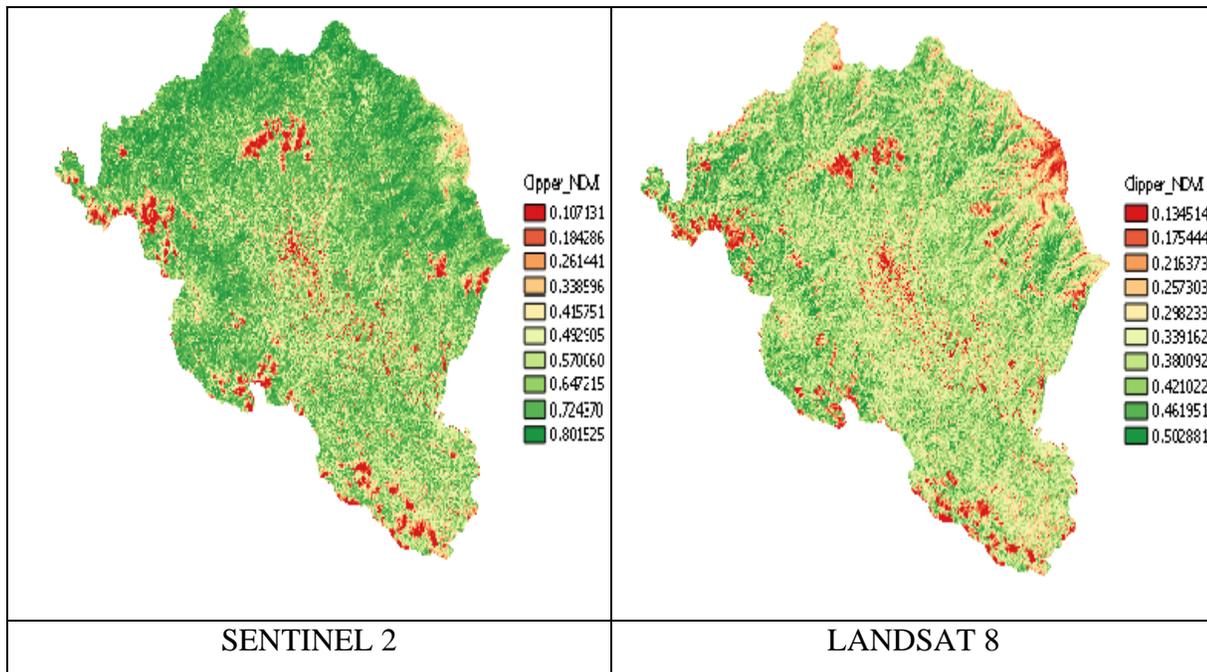


Figura 7. Índice de vegetación diferenciada para las imágenes SENTINEL 2 y LANDSAT 8.

Como se observa se usaron los colores verde y rojo, donde este último, representa suelos desnudos, o presencia de valores cercanos a cero, las tonalidades amarillas (transición), pueden indicar cobertura pobre y las variaciones más intensas de color verde diferencias en la condición del cultivo, se muestra que predomina tonalidades más oscuras en el NDVI obtenido de las imágenes procesadas del SENTINEL 2, reflejando mayor densidad de vegetación en comparación al NDVI del LANDSAT 8.

4.2 Recorte o extracción del área de estudio

Con la corrección atmosférica realizada a las imágenes, y haciendo uso del polígono que abarcó toda la zona de Pérez Zeledón, se recortaron todas las bandas obtenidas. En la Figura 8 se ejemplifica el proceso realizado a las bandas y su respectivo resultado.

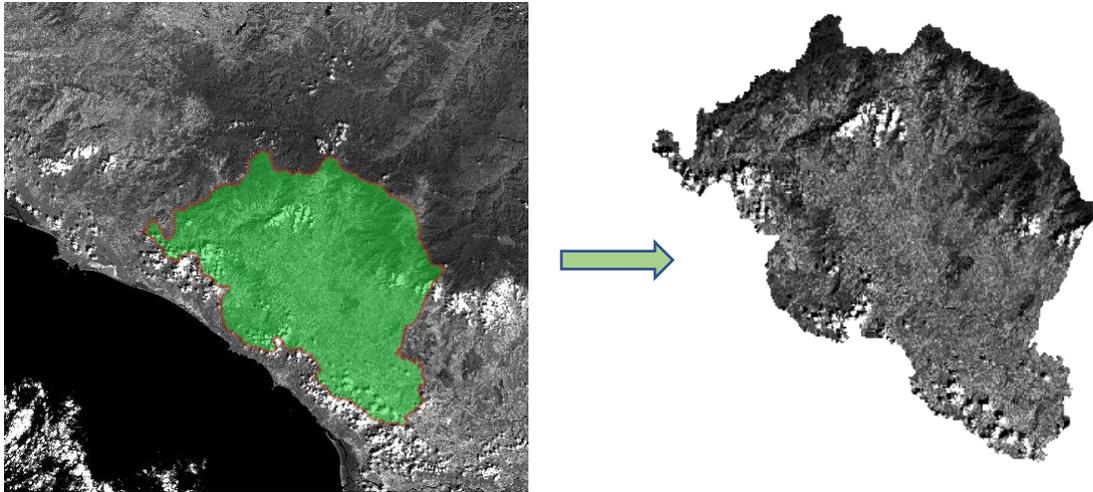


Figura 8. Extracción del área de estudio de la banda 11.

4.3 Composición de conjunto de bandas.

Este proceso permitió configurar una representación gráfica, intercambiando las diferentes bandas en el modelo RGB, que varía según las bandas seleccionadas, que cuentan con un color asignado, como se menciona en la sección 2.7. Las combinaciones ayudan a diferenciar distinta vegetación que se presenta al momento de realizar las áreas de entrenamiento para el análisis de las distintas coberturas de suelo presentes en el lugar.

- Color natural (3,2,1), con esta combinación de bandas se relejan colores muy próximos a los colores reales, donde presenta colores verdes para vegetación, colores marrones para la construcción, así mismo, estas bandas permitieron tener buena visualización de las masas de agua en tonos azules, lo que permite ubicarlas con facilidad. En la Figura 9, se muestra el RGB (3-2-1), para Sentinel 2 y Landsat 8.

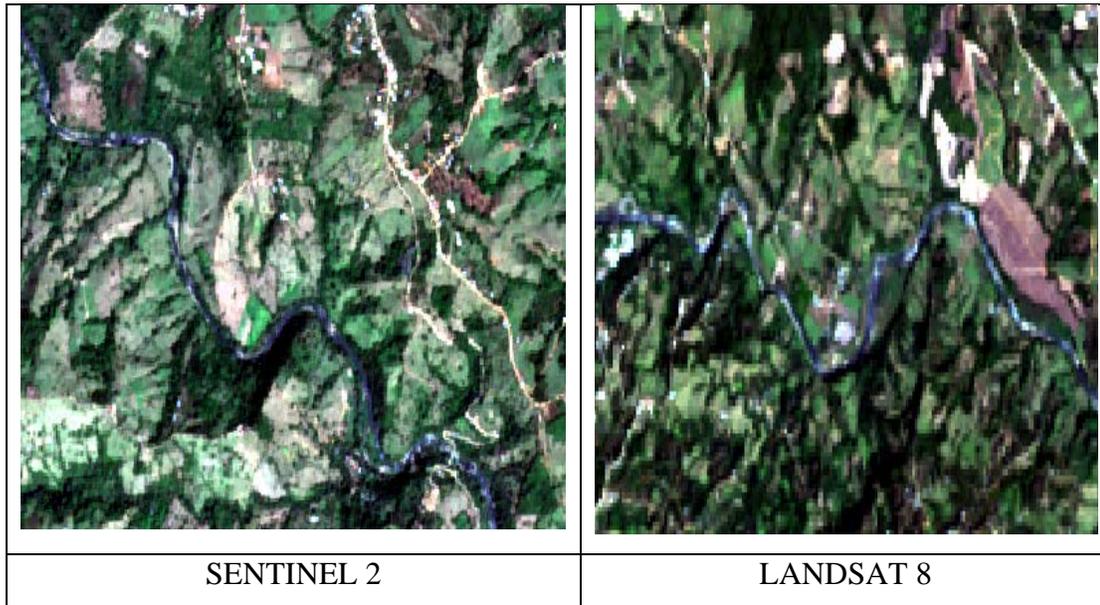


Figura 9. Producto Color natural.

- Infrarrojo en Sentinel 2 (8,4,3), para esta combinación se observa colores rojos para vegetación, celeste para suelos desnudos y construcción se notan tonalidades celestes claros. Esta combinación se visualiza en la Figura 10 la imagen al lado izquierdo.
- Infrarrojo en Landsat 8 (5,4,3), con esta composición se evidencia que los colores para la vegetación son tonos rosados y verdes, construcción y suelos desnudos colores rosados a morados, y para el agua tonalidades azul oscuras. En la Figura 10, se observa la representación de la combinación de bandas (5,4,3) imagen al lado derecho.

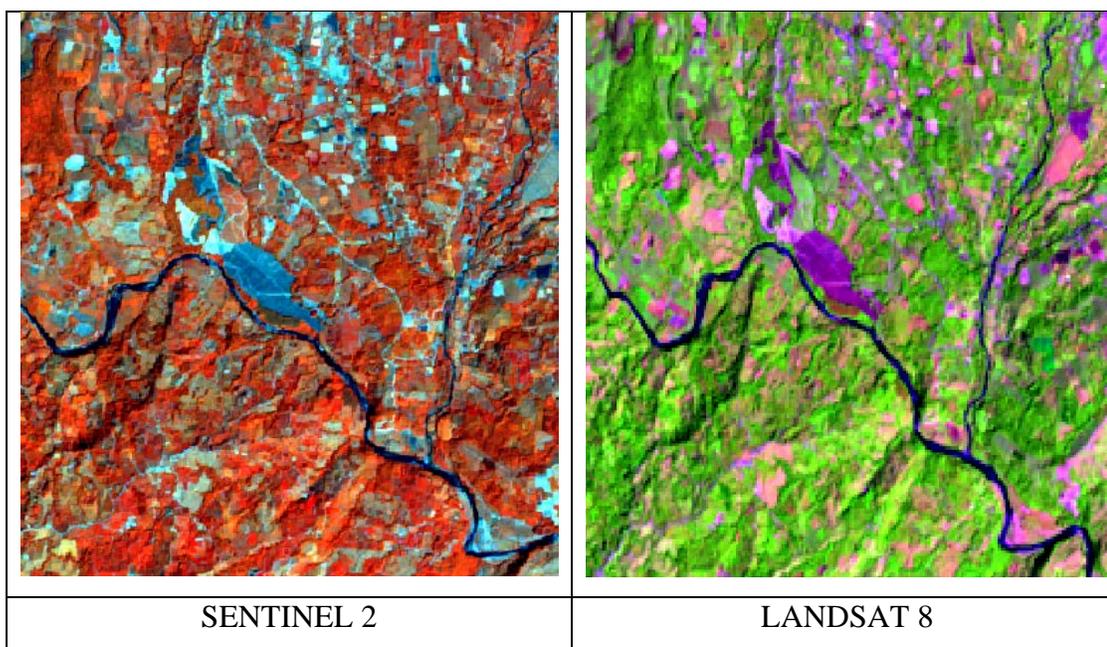


Figura 10. Producto Infrarrojo.

4.4 Creación de áreas de entrenamiento (ROI)

Se definieron las áreas de entrenamiento según el tipo de cobertura, creando las macro clases asignadas, (Café, Bosque, Vegetación, Construcción, Suelo, Agua) con el fin de determinar zonas con presencia de café por medio de la herramienta clasificación semi automática, para ello se utilizó la herramienta Google Satelital, además, de capas shapes de fincas cafetaleras; (información facilitada por el ICAFE), para identificar visualmente las respectivas coberturas, y marcar en las zonas de forma precisa la presencia de café facilitando el proceso.

En la Figura 11, se muestra algunas de las áreas de entrenamiento dibujadas, estas se presentan en color amarillo, según el tipo de cobertura presente.

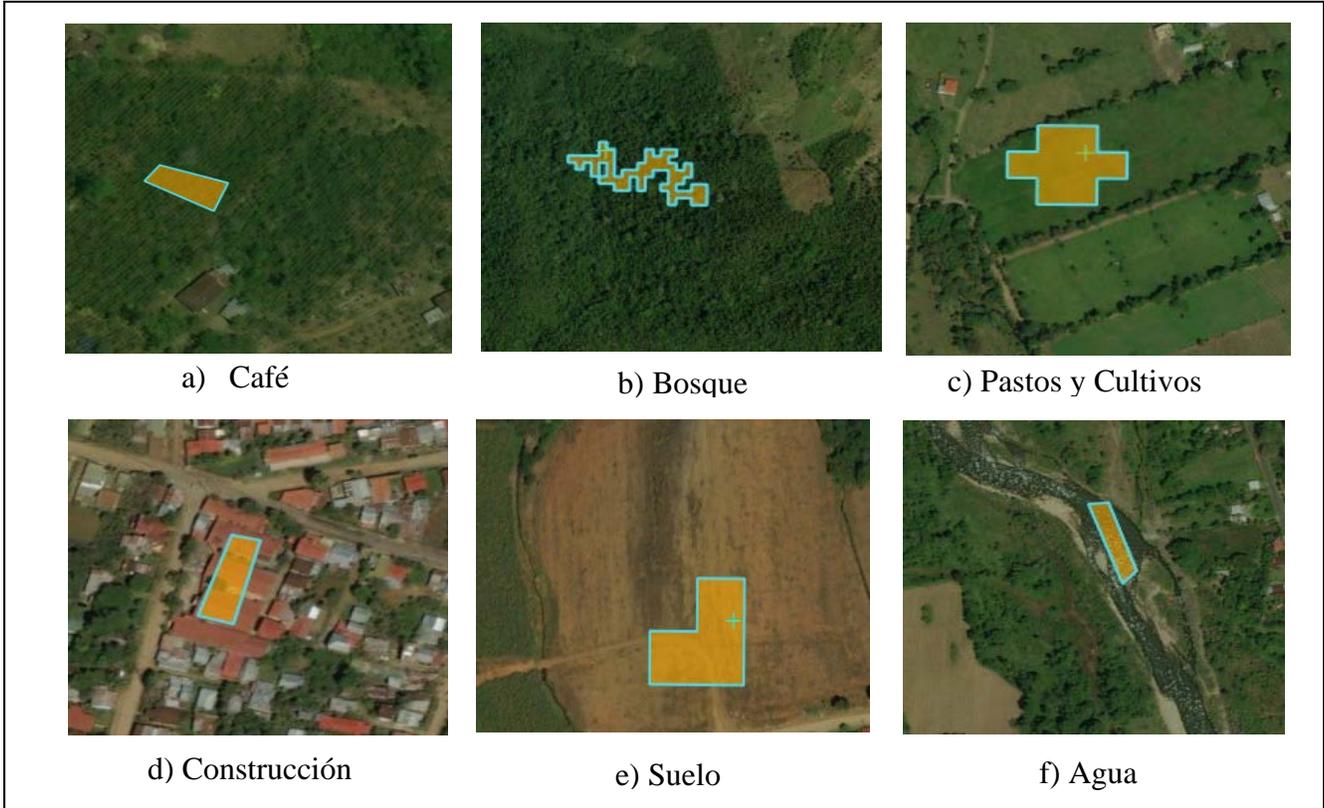


Figura 11. Áreas de entrenamiento para cada una de las clases creadas en el satélite Sentinel 2 configurada en una imagen multiespectral en tiempo real.

4.5 Firmas espectrales

Al finalizar la creación las áreas de entrenamiento se crearon las firmas espectrales para las respectivas coberturas. En la Figura 12, se muestran firmas espectrales generadas para el cultivo de café, en el producto Sentinel 2.

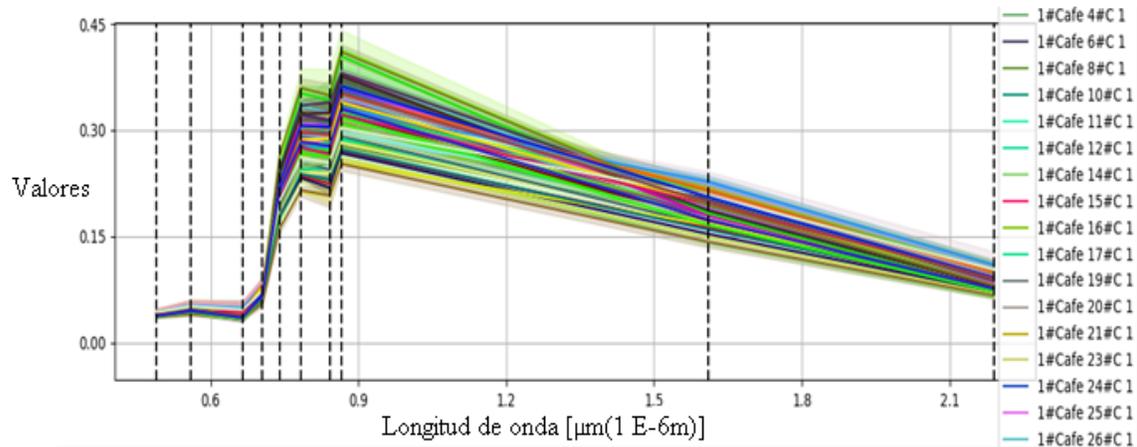


Figura 12. Firmas espectrales para el cultivo de Café.

Se observa que la firma espectral para café presenta un mínimo en la banda 1, y un valor máximo en la banda 8, del producto Sentinel 2, donde cada línea punteada en el gráfico representa una banda. De la banda 9 a la banda 10 sus valores son más constantes. Esta información se evidencia en la Figura 33 del Anexo 3, que contiene los valores máximos y mínimos de cada una de las bandas para este cultivo.

Al presentar similitud con las firmas de las coberturas de vegetación y bosque (Ver Anexo 2, Figuras 27 y 28), se realizó un análisis de las tres coberturas, para determinar el comportamiento de estas a lo largo de las bandas. En la Figura 13, se muestra la tendencia de los valores promedios de los máximos y mínimos reflejados en la firma espectral de las tres coberturas.

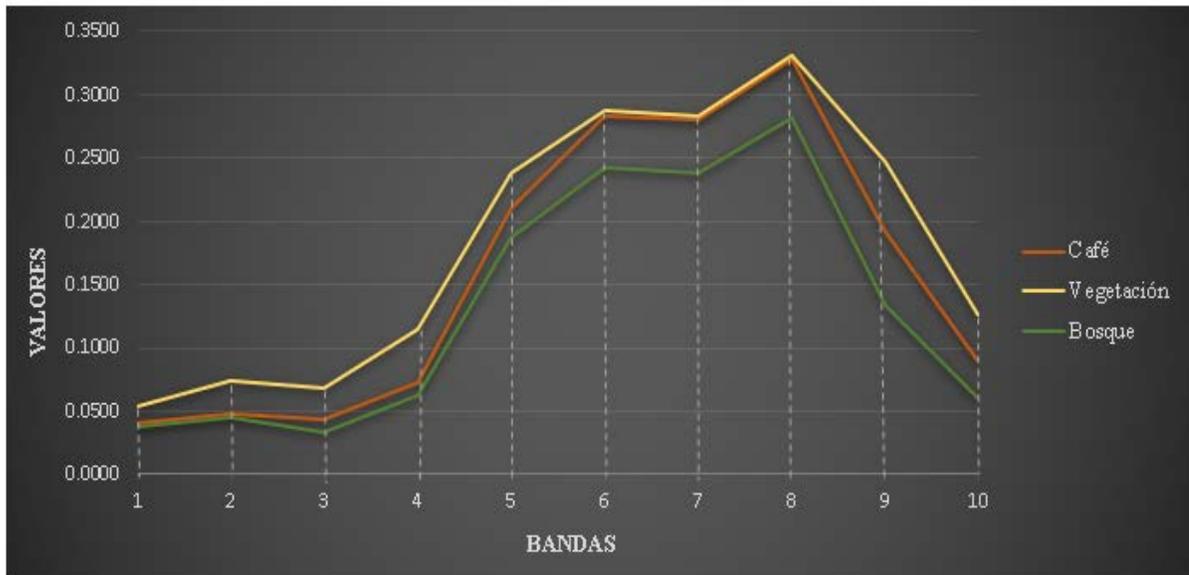


Figura 13. Promedios de los valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas Café, Vegetación y Bosque.

Como se observa la firma espectral del café tiende a sobreponer sus valores en las bandas 7 y 8 en la cobertura de vegetación, y en las bandas 1 y 2 en la cobertura de bosque, tienen un rango de valores semejantes, es decir que su energía electromagnética reflejada en diferentes longitudes de onda y registrada por el sensor es muy parecido en esa transición de bandas, se nota además, que la cobertura de café está en el medio de la cobertura de bosque y vegetación en las bandas 3 y 6, y en entre las bandas 8 y 10, por otro lado se evidencia que en las bandas 9 y 10, es donde presenta mayor grado de separación una de la otra, no se entrecruzan sus valores. Ante esta situación, en el algoritmo de clasificación se les dio más peso a las bandas 9 y 10 (Ver Anexo 1), para tratar de separar las zonas de café con las de bosque y vegetación, ya que estas son las bandas donde más se alejan las tres coberturas, como se observó en la Figura 13.

A lo largo del proceso se determina que las coberturas de Vegetación y Bosque, son con las que más se confunde este cultivo, por su similitud en las firmas espectrales reflejadas, como se visualiza en las Figuras 34 y 35 del Anexo 4.

4.6 Resultados de uso de cobertura

Conformes con los resultados obtenidos en la previsualización realizada, se procedió a generar el archivo de salida, estos se observan en la Figura 14, para Sentinel 2 y la Figura 15 para Landsat 8.

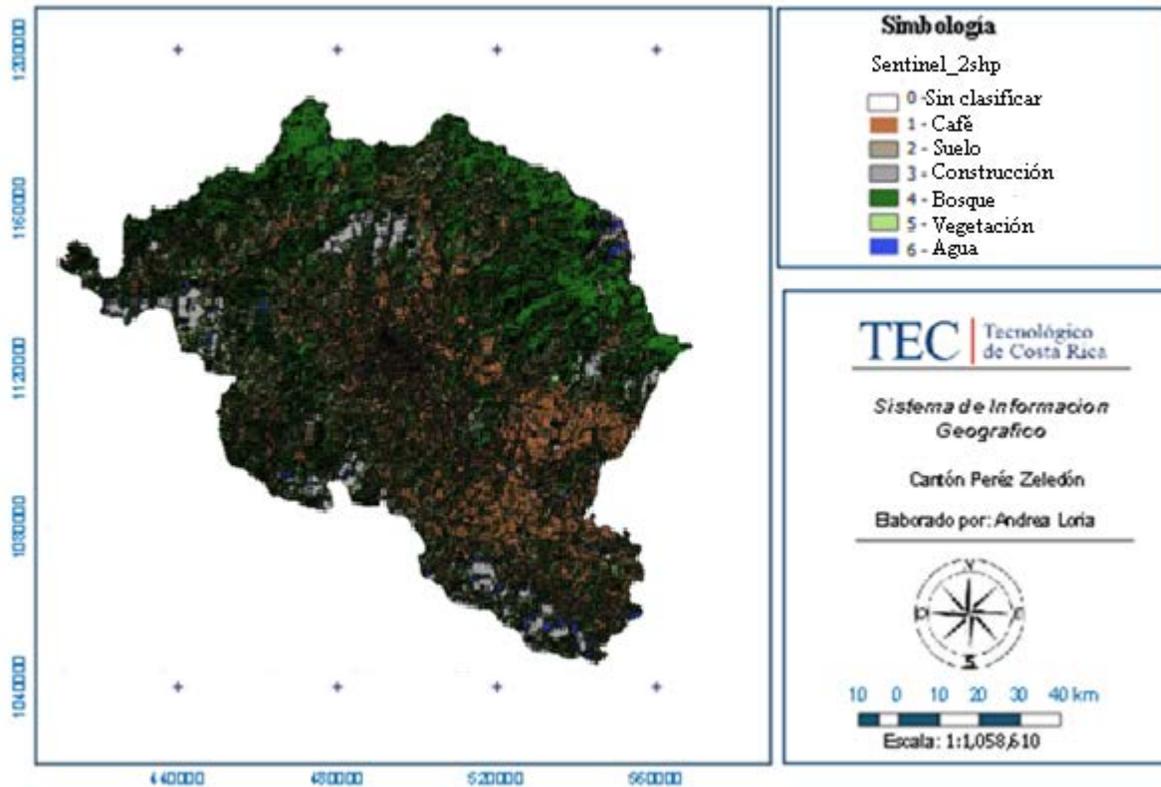


Figura 14.. Mapa de cobertura vectorizado de la zona de estudio del producto Sentinel 2.

En la Figura 14, del área por cobertura vectorizado, se tiene que las partes de color café representa el cultivo de café que representa una de las coberturas de mayor área 57798,15 ha, seguido de las áreas de color verde oscuro el bosque con 67880,52 ha, el color verde claro simboliza la vegetación, las zonas de color gris corresponden a construcción, café claro el suelo y con color azul el agua el cuál abarca 6285,74 ha que es la menor área de cobertura del lugar.

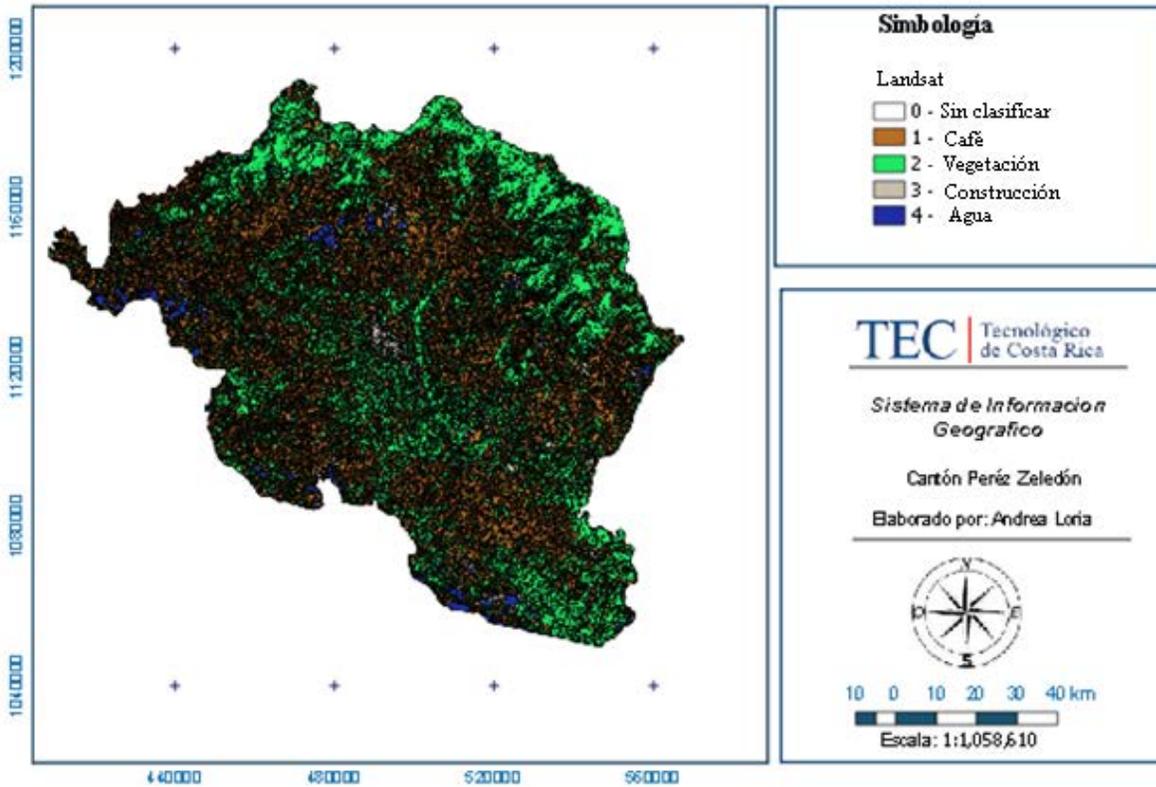


Figura 15. Mapa de cobertura vectorizado de la zona de estudio del producto Landsat 8.

En la Figura 15, las partes de color café representa el cultivo de café con un área de 80273,52 ha, las áreas de color verde claro representan la vegetación 91581,84 ha, esta macro clase contiene las coberturas de (pastos, cultivos, y bosques) y las zonas de color gris corresponden a construcción, y de color azul al agua.

En ambos productos Sentinel 2 y Landsat 8, las partes que presentan los colores que le corresponden a las macro clases del suelo, construcción y agua simultáneamente, son las zonas con presencia de nubes, que tiene valores próximos o menores a cero, y los datos de estas coberturas rondan a valores cercanos a cero, por lo que identifica estas coberturas en las nubes, ya que estas no se asignaron como una macro clase dentro de la clasificación realizada.

Para lograr analizar el comportamiento del área para el Cantón de Pérez Zeledón entre el año 2012 y 2017 se determinó lo siguiente:

4.7 Cálculo de área de cobertura de café.

El instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE), cuenta con registros del cultivo de café de la zona de Pérez Zeledón para el año 2012, esta recolección de datos fue realizada de forma manual por colaboradores haciendo visitas en el campo de las fincas cafetaleras y luego los datos obtenidos fueron procesados. En la Figura 16, se muestra la cobertura cafetalera en la zona de estudio. En Cuadro 4, se presenta las áreas en hectáreas de este cultivo para cada uno de los distritos pertenecientes al cantón.

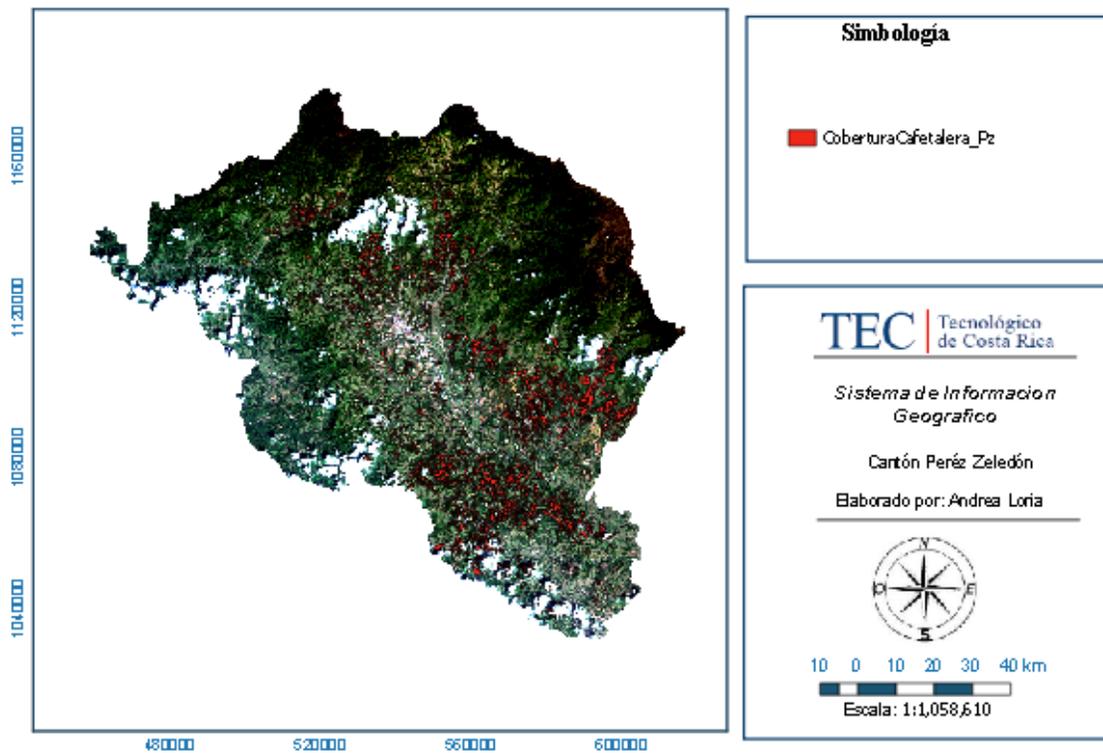


Figura 16. Cobertura de Café para la zona de Pérez Zeledón para el año 2012, datos brindados por el ICAFFE.

Cuadro 4. Áreas en hectáreas de la cobertura del cultivo de café de los distritos de Pérez Zeledón, para el año 2012, datos brindados por el ICAFE.

Distritos Pérez Zeledón	Área (ha)
San Pedro	2449,493
San Isidro del General	979,958
Río Nuevo	464,499
Rivas	1133,434
Platanares	1994,180
Pejibaye	2189,218
Paramo	1056,611
General	631,294
Daniel Flores	741,138
Cajón	1470,992
Baru	5,560
Total	13116,377

Como se detalla en el Cuadro 4, para el año 2012, el distrito con mayor cobertura de café corresponde a San Pedro con 2449,493 ha, y el distrito con menor cantidad de café le pertenece a el distrito de Barú con 5,560 ha. Con esta información se obtiene un área total de café de 13116,377 ha, en todo el cantón de Pérez Zeledón.

4.7.1 SENTINEL 2:

Se obtuvo la cantidad de cobertura del cultivo de café por medio del programa Qgis realizando una clasificación semi supervisada, donde se consiguió los resultados de la cobertura de este cultivo para cada uno de los distritos de la zona de estudio; con la cobertura vectorizada se prosiguió a calcular el área en hectáreas de cada una de las macro clases asignadas y con la herramienta Excel se procesaron los datos para obtener las áreas por cobertura para cada uno de los distritos como se representa seguidamente en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Área en hectáreas de cobertura del cultivo de café de los distritos de Pérez Zeledón, por medio de la clasificación semi supervisada con el producto Sentinel 2, para una imagen satelital del año 2017.

Distritos Pérez Zeledón	Área (ha)
San Pedro	6806,4481
San Isidro del General	6525,4362
Río Nuevo	7233,7782
Rivas	7760,5818
Platanares	3740,8785
Pejibaye	6791,5258
Paramo	4344,6314
General	2865,4634
Daniel Flores	2279,8482
Cajón	3842,9974
Baru	5606,5581
Total	57798,1472

Ante dichos resultados se tiene que la cobertura en la clasificación semi supervisada, de mayor área del cultivo de café es la del distrito Rivas con 7760,5818 ha, y con menor el distrito Daniel Flores con 2279.8482 ha

Como se observa hay gran variación con respecto a esta cobertura, entre los datos presentes del año 2012 a los datos obtenidos por medio de la clasificación para el año 2017, esto se puede presentar debido a que la manera de obtener los resultados no fue la misma que se utilizó para ambos años, como se ha mencionado los datos del 2012 se realizaron de forma manual por colaboradores donde fueron al campo y con planos catastro delimitaron las fincas que visitaban. Ante esta situación no se puede comparar de forma directa lo que se obtuvo por medio del programa, ya que la concordancia de los métodos variaría, debido que, hay que tomar en cuenta que la metodología empleada no está calibrada.

En el Cuadro 6, se muestra los resultados para cada una de las macro clases asignadas en la clasificación semi supervisada con el producto Sentinel 2, imagen 2017, por distrito.

Cuadro 6. Área en hectáreas por cobertura para el producto Sentinel 2, de los distritos de Pérez Zeledón.

Distrito	Cobertura	Area (ha)	Distrito	Cobertura	Area (ha)
BARU	Café	5606.56	PLATANARES	Café	3740.88
	Bosque	7116.74		Bosque	1470.53
	Vegetación	3762.42		Vegetación	2296.93
	Suelo	1708.96		Suelo	419.47
	Construcción	752.64		Construcción	714.45
	Agua	659.85		Agua	324.18
CAJON	Café	3843.00	RIO NUEVO	Café	7233.78
	Bosque	4548.65		Bosque	9980.42
	Vegetación	1859.50		Vegetación	3885.52
	Suelo	396.92		Suelo	904.22
	Construcción	1134.83		Construcción	829.15
	Agua	153.45		Agua	1322.23
DANIEL FLORES	Café	2279.85	RIVAS	Café	7760.58
	Bosque	717.21		Bosque	16659.06
	Vegetación	1625.50		Vegetación	3685.65
	Suelo	360.62		Suelo	1096.04
	Construcción	1405.10		Construcción	748.95
	Agua	56.30		Agua	1185.20
GENERAL	Café	2865.46	SAN ISIDRO DEL GENERAL	Café	6525.44
	Bosque	2581.76		Bosque	4076.40
	Vegetación	1483.26		Vegetación	5079.64
	Suelo	146.51		Suelo	1061.72
	Construcción	553.73		Construcción	2289.06
	Agua	21.59		Agua	291.49
PARAMO	Café	4344.63	SAN PEDRO	Café	6806.45
	Bosque	10882.16		Bosque	7767.17
	Vegetación	2354.35		Vegetación	3108.52
	Suelo	1521.43		Suelo	1027.71
	Construcción	618.63		Construcción	1350.66
	Agua	753.24		Agua	580.74
PEJIBAYE	Café	6791.53			
	Bosque	2631.99			
	Vegetación	6167.33			
	Suelo	2092.70			
	Construcción	2237.83			
	Agua	934.34			

En el Cuadro 6, muestra los resultados del análisis de cobertura para la zona de estudio Pérez Zeledón con Sentinel 2. Se puede observar que la cobertura de bosque, resultó como la clase con mayor área en el distrito de Rivas con 16659,055 ha, acompañado de la cobertura del cultivo de café con 7760,582 ha.

El distrito con menor cantidad de este cultivo lo presenta el distrito Daniel Flores con 2279,848 ha.

Respecto a la cobertura de Vegetación (pastos y cultivos), el distrito con más cantidad de esta clase le pertenece a Pejibaye con 6167,331 ha y con menor cantidad General con 1483,265 ha.

En cuanto a la cobertura asignada como suelo la mayor área lo representa Pejibaye con 2092,697 ha, y en menor cantidad Daniel flores con 360, 617 ha.

La zona con mayor construcción (Techos y calles), le corresponde a San Isidro General con 2289, 059 ha, y el distrito General cuenta con menor construcción 553,729 ha, además en este distrito se encuentra la menor cantidad de la clase agua con 21,589 ha.

Y con mayor representación de agua 1322,229 ha le corresponde al distrito Río Nuevo.

En el Cuadro 7, se muestran los resultados de cobertura en toda la zona por macro clase, (café, bosque, vegetación, suelo, construcción y agua respectivamente), haciendo uso del producto de Seninel 2.

Cuadro 7. Información de los resultados de las áreas de la cobertura de suelo por macro clase en Sentinel 2.

Macro clase	Área (ha)
Café	57798,14
Bosque	67880,52
Vegetación	35309,96
Suelo	10741,32
Construcción	12637,62
Agua	6285,74

Se puede observar que la macro clase con mayor cobertura es la vegetación con 67880,52 ha, seguido la del cultivo de café con 57798,14 y la cobertura del agua en menor cantidad con 6285, 74 ha.

4.7.2 LANDSAT 8:

En el Cuadro 8, se muestran los resultados de cobertura por macro clase, (café, vegetación, construcción y agua respectivamente), haciendo uso del producto de Landsat 8, con una imagen del año 2017.

Cuadro 8. Información de los resultados de la cobertura de suelo por macro clase en Landsat 8.

Macro clases	Área (ha)
Café	80273,52
Vegetación	91581,84
Construcción	11189,98
Agua	5473,8

Como se observa en la información anterior la mayor área de cobertura lo representa la macro clase de Vegetación que contempla las clases de (Bosque, Pastos y cultivos) con 91581, 84 ha, seguido el cultivo de café con 80273,52 ha, y menor área de cobertura el agua con 5473,8 ha. En el Anexo 7, se encuentra el área de la cobertura de café por distrito, con el producto Landsat 8.

En la Figura 17, se presenta el comportamiento de la cobertura del cultivo de Café del año 2012, respecto a los productos Sentinel 2 y Landsat 8.

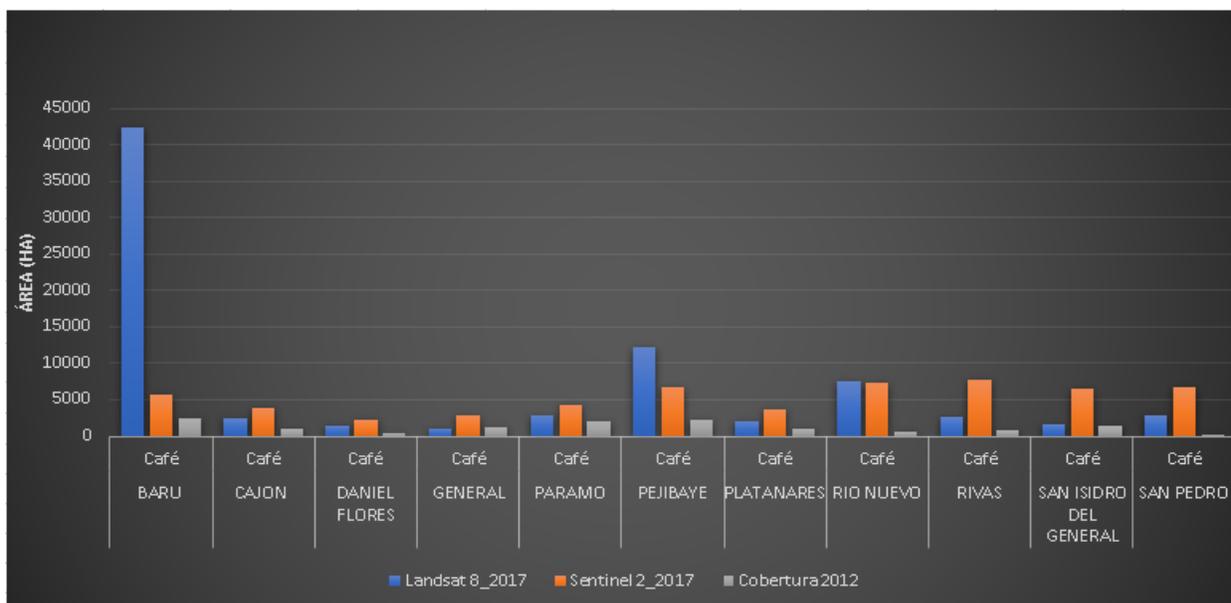


Figura 17. Gráfico de comparación de la cobertura de Café del 2012 respecto a los productos Landsat 8 y Sentinel 2 imagen 2017, por distritos.

Como se muestra en la Figura 17, hay un aumento en las áreas de cobertura de café en la zona de estudio, según a los valores obtenidos, tanto en el producto Sentinel 2, como en Landsat 8, sin embargo, se observa que existen variaciones de los valores entre ambos productos, esto se puede dar debido a que en Landsat 8 la resolución espacial es de 15 metros en el canal pancromático y de 30 metros en los canales multiespectrales, mientras en las imágenes de Sentinel 2, cuenta con bandas de 10, 20 y 60 m de resolución, lo que dan un mayor grado de visualización de los espectros captados por el sensor.

No se puede comparar directamente los resultados de la cobertura del año 2012 con respecto a los productos Sentinel 2 y Landsat 8, debido a que los parámetros de obtención de los resultados no son el mismo.

Se observa que el distrito que presenta una similitud en el área de cobertura de Café es Río Nuevo con 7634.16 ha en Landsat 8 y 7233.78 ha en Sentinel 2.

Respecto al producto Landsat 8, el distrito con mayor presencia de este cultivo le corresponde a Barú con 42439.77 ha, donde se observa que en este distrito se está proyectando un valor mayor de la cobertura de café, lo que puede estar sucediendo que está identificando la

cobertura de vegetación (bosque, pastos y cultivos), como cobertura de café, así mismo, se muestra que la menor área de cobertura lo representa el distrito General con 1098.36 ha.

4.8 Similitud de los datos obtenidos de la clasificación.

Se realizó el análisis de concordancia de los resultados, mediante la clasificación semi supervisada, haciendo uso de la información del ráster de la clasificación realizada, extrayendo valores de este para los puntos tomados en el campo por medio de GPS, los cuales se procesaron en Qgis haciendo uso de la *herramienta de muestreo de puntos de conexión*. Es decir, los datos en esta nueva capa son los valores en que se clasifica los puntos tomados en el campo, lo cuales fueron de cobertura de café, según los atributos o valores del ráster de la clasificación.

En el Cuadro 9, se presentan los porcentajes para las macro clases (café, bosque y vegetación), en las que se clasificaron los puntos del cultivo de café tomados en el campo según la clasificación semi supervisada realizada con el producto Sentinel 2.

Cuadro 9. Porcentajes de los puntos de muestra de café asignados según la clasificación realizada, para de las macro clases café bosque y vegetación.

1	Café	59%
2	Bosque	5%
3	Vegetación	24%

En este proceso se determina mediante la información obtenida es que el 59% de los puntos tomados en el campo; la clasificación los detecto como cobertura de café, el 5% como bosque y el 24% vegetación. Y el resto del porcentaje en las coberturas de suelo, construcción y agua (Ver Anexo 6). Es importante tomar en cuenta que se está representando un error del 41% en el cálculo del área lo que se debe tener cautela en usar la metodología para presupuestar, gestionar o tomar decisiones.

Estos resultados se pudieron haber dado según la similitud de las firmas espectrales de dichas coberturas debido a que las bandas que únicamente se separan entre sí son la banda 9 y la banda 10, como se detalló anteriormente, en el apartado 4,5.

Se hizo uso de algoritmos de predicción, para determinar la cobertura real proyectada a partir de los valores de la simulación y los observados, para ello fue necesario graficar la cobertura cafetalera de la simulación versus la cobertura cafetalera de manera observada de los distritos San Isidro, General y Daniel Flores para el año 2017, y con la técnica de regresión se obtuvo un modelo de regresión y el coeficiente de correlación, que son útiles para pronosticar valores futuros, por medio del estudio de la relación existente entre las dos variables.

Como se mencionó se graficaron los datos observados para el año 2017, versus los valores obtenidos de la clasificación semi supervisada, del producto Landsat 8, para cada uno de los tres distritos (Ver Cuadro 10), y se aplicó una regresión lineal, para analizar el comportamiento o relación existente entre las dos variables, esta relación se muestra en la Figura 18. Además, se realizó para el producto Sentinel 2, dicho gráfico se muestra en la Figura 19.

Cuadro 10. Información de las áreas de la cobertura del cultivo de café para los distritos, San Isidro, General y Daniel Flores, simulada y observada en hectáreas.

Distrito	Café 2017 (ha)	Café 2017 (ha)	Café 2017 (ha)
	Landsat 8	Sentinel 2	Observado
San Isidro	1660,32	6525,44	1082,68
General	1098,36	2865,46	666,94
Daniel Flores	1345,59	2279,85	775,35

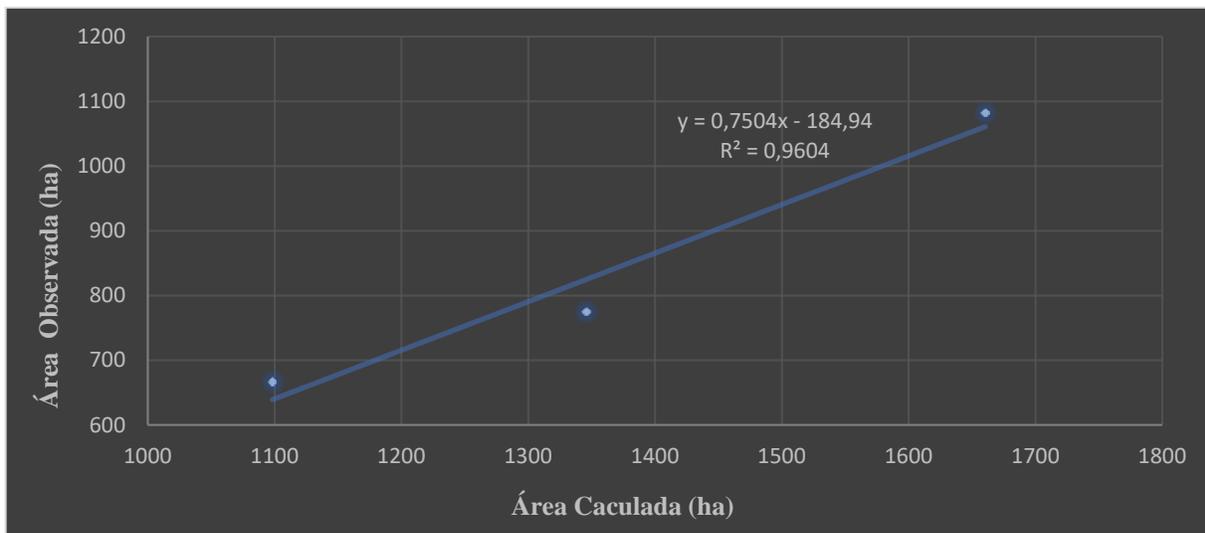


Figura 18. Gráfico del modelo de regresión del área de cobertura de café del producto Landsat 8 (calculado) versus los valores observados para los distritos San Isidro, General y Daniel Flores para el año 2017.

En la Figura 18, se observa que la línea de tendencia es muy uniforme sus valores se aproximan a ella, por lo que su ecuación es bastante buena para los valores estudiados, además su índice de correlación está dando 0,9604 lo que hace ver que el grado de correlación entre los datos son excelente, debido a que este valor entre más cercano sea a uno, mejor es la proyección del modelo de la ecuación, lo que nos indica que la simulación es bastante acertada para lo que se requiere.

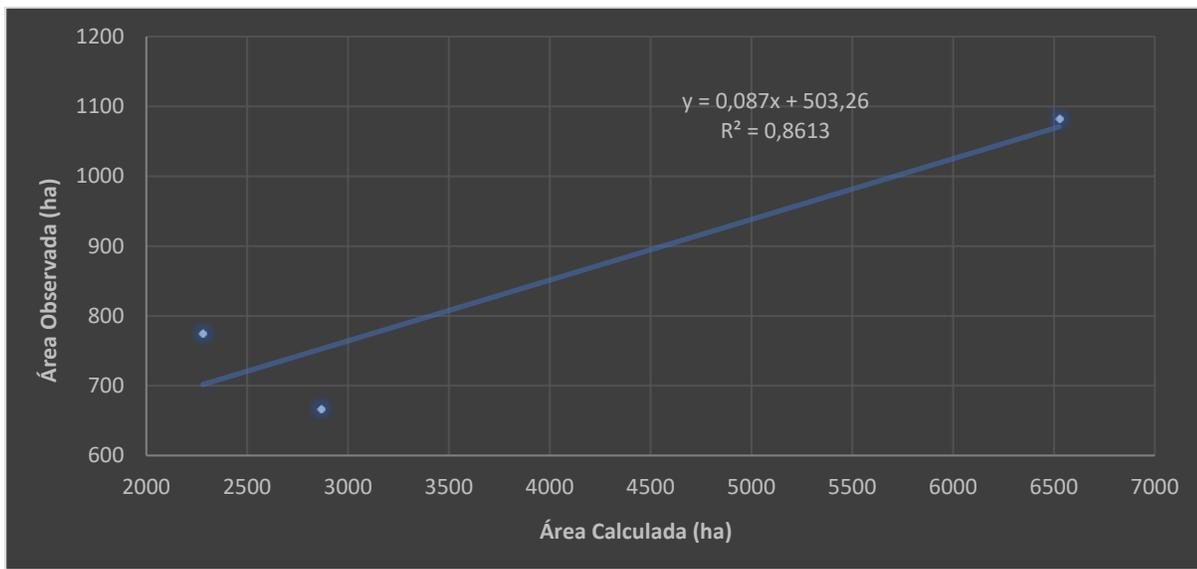


Figura 19. Gráfico del modelo de regresión del área de cobertura de café del producto Sentinel 2 (calculado) versus los valores observados para los distritos San Isidro, General y Daniel Flores para el año 2017.

Como se observa en la Figura 19, los valores observados del año 2017 versus los valores calculados del producto Sentinel 2, se encuentran más dispersos de la línea de tendencia sin embargo su índice de correlación es de 0,8613, valor próximo a uno, midiendo que el grado de relación existente en las variables es bueno, indicando que el modelo de regresión es adecuado para estimar o dar proyecciones de valores futuros de interés.

Se obtuvo que está dando un mejor modelo de regresión los datos del producto Lansat 8 debido a que su valor de correlación es de 0,9604 aproximándose más a uno, siendo más alto el grado de correlación en comparación del valor obtenido en el producto Sentinel 2 de 0,8613, sin embargo, es importante considerar que entre más valores se estudien y se aplique una tendencia mejor va hacer el ajuste del modelo de regresión, es decir está ecuación será más precisa, y por tanto serán más eficientes los valores reales proyectados, además, es importante agregar más valores de áreas por distrito, para verificar si la tendencia varía o continua siendo semejantes en ambos productos, o de lo contrario determinar si el coeficiente de correlación del producto Lansat decrece y Sentinel mejore.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

En la clasificación semi supervisada realizada para la zona de estudio, a lo largo de la creación de las áreas de entrenamiento, y previsualización de los resultados del proceso y por medio de las firmas espectrales de las coberturas, se determinó que el tipo de cobertura con las que más se confunde el café, es con la cobertura que representa la vegetación (pastos y cultivos), y con la cobertura de bosque, debido a que sus valores máximos y mínimos andan cercanos por la reflectancia de ondas medidos para algunas de las bandas.

Considerar la similitud de los resultados de la investigación, ayuda a tener una noción de la validez de estos, ante este proceso se obtuvo que la clasificación que se realizó mediante el programa Qgis detectó en un 59% como cobertura de café los puntos de muestra tomados en el campo, y el 41% restante distribuidos en las demás coberturas, donde existe un porcentaje de error, en la clasificación realizada, presentando que estos resultados no sean precisos, que se debe de considerar para presupuestar, gestionar o tomar decisiones, respecto a ellos.

Se obtiene que hay un incremento en el cultivo de café según los resultados obtenidos del modelo en comparación a la información del año 2012, esta diferencia con respecto al producto Sentinel 2 es de 44681,77 ha, y respecto al producto de Landsat 8 es de 67157,14 ha, hay que tomar en cuenta que el procedimiento realizado para determinar dicha cobertura en ambos procesos no es el mismo, por lo que los resultados no son buen punto de comparación, sin embargo, no es trascendental la magnitud de los valores, sino tener la forma de corregir estos valores al estimado real.

Los valores obtenidos con el modelo tanto del producto Sentinel 2, como Landsat 8 pueden ayudar a determinar valores reales proyectados, por medio de desarrollo de algoritmos de predicción., haciendo uso de datos reales para el año 2017.

Con los resultados observados de los coeficientes de correlación obtenidos con los productos de Landsat 8 y Sentinel 2, se presenta que Landsat está dando mejores resultados, sin embargo,

es importante realizar esto para un mayor un número de distritos y obtener más puntos para determinar si la correlación continua o está varía.

5.2 Recomendaciones.

Se recomienda incorporar en el proceso de validación de cobertura, el uso de imágenes de alta resolución, como también la verificación en el campo, a fin de lograr mayor confiabilidad en los resultados.

Se recomienda hacer investigaciones previas, en donde se logren seleccionar áreas pequeñas y si se puedan dividir los usos de suelo como café y los que se encuentren en esta área, y aplicar la metodología de clasificación semi supervisada y con los datos de campo poder calibrar el modelo.

Es recomendable obtener datos de campo áreas reales para la misma fecha de imagen, con el objetivo de tener un parámetro de calibración. Por lo que es significativo realizar esta investigación para años futuros y poder tener así una medida de comparación de parámetros iguales, siendo la metodología correcta, sin embargo, de mucho más consumo de recursos.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- Alvarado, M., y Rojas, G. (2007). El cultivo y beneficiado del Café. Obtenido de https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=15qrSG-5114C&oi=fnd&pg=PR7&dq=+cultivo+que+siembran+en+lugar+del+café+en+Perez+Zeledon+Costa+Rica&ots=OfX8n6O65M&sig=rJ8dJ2xZWbb586ioU3IhObwJkkk&redir_esc=y#v=onepage&q=cultivo+que+siembran+en+lugar+del+café+en+Perez+Zeledon+Costa+Rica&f=true
- Araya, E. (2009). Manual de procesos en fotografías aéreas e Imágenes de satélite. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-0985.pdf>
- Bustos, Y., y Gonzaba, K. (2017). APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL ÓPTICA Y DE RADAR PARA EL ANÁLISIS GEOLÓGICO EN LA CONCESIÓN SANTA MARTHA, CANTÓN ZARUMA. Obtenido de https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:bBb7Zg6iVS4J:scholar.google.com/+RGB+de+del+conjunto+de+bandas+en+QGIS&hl=es&as_sdt=0,5
- Castilla, J. (2016). IPICIM: Módulo Clasificador de Imágenes Ópticas Multiespectrales Aplicado al Área de Georreferencias. Obtenido de <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/3010/TMIPICYTC3I62016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chávez, T. (2007). DETERMINACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN EN LA MICROCUENCA DEL RIO DELFÍN - POZUZO. Obtenido de <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/452/T.CSA-8.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambio. Retrieved from http://telenet.uva.es/promotores/revista/revista_10/AET10_4.pdf
- Condori, I., Loza, M., Mamani, F., Solíz, H. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la Sub-cuenca del río Coroico - Provincia Caranavi en los años 1989 – 2014. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/pdf/jsars/v9n1/v9n1_a03.pdf
- Fallas, M. (2016). Cobertura del Suelo del año 2016 del Cantón Tarrazú, San José, Costa Rica. Obtenido de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9342/cobertura_suelo_año_canton_tarrazu.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- FAO. (2015). Atlas de Cobertura del Suelo del Uruguay. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i4372s.pdf>

- Ferreras, R. (2015). Firmas espectrales en el análisis de imágenes con drones. Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/firmas-espectrales-drones/>
- Gilabert, A., Gonzáles, P., y García, J. (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/MA_Gilabert/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion/links/00b7d5187635eb5a1a000000/Acerca-de-los-indices-de-vegetacion.pdf
- García, J. (2016). Análisis de la evolución de los usos del suelo, recursos y parámetros físicos mediante técnicas de teledetección y SIG. Obtenido de http://tauja.ujaen.es/jspui/bitstream/10953.1/4642/1/TFG_Garc%C3%ADa_Alguacil_Jonathan.pdf
- INEC. (2015). Pérez Zeledón es el cantón más equitativo. Obtenido de <http://www.perezzeledon.net/perez-zeledon-es-el-canton-mas-equitativo/>
- Medina, J. (2018). Evaluación de la capacidad de las imágenes de Radar de Apertura Sintética para la detección del cultivo del Café en Pitalito Huila. Obtenido de http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2068/Jorge_Alberto_Medina_Valderrama.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mallea, A., Herrera, M., Ruiz, A, (s.f.). Estadística en el nivel Polimodal, Propuesta didáctica en las distintas modalidades. Obtenido de https://books.google.co.cr/books?id=vdHXy7Zd3pEC&pg=PA91&dq=Tecnica+de+regresion+y+correlacion&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwir-rPF5f_eAhWPk1kKHRWuC6kQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Tecnica%20de%20regresion%20y%20correlacion&f=false
- Mena, A. (2014). Procesamiento de Imágenes Multiespectrales. Obtenido de <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/13361/MemoriaPFC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moraga, J., Solano, M., y Cedeño, B. (2011). INTEGRACIÓN ESPACIAL Y ESPECTRAL DE IMÁGENES FOTOGRÁFICAS: EL CASO DE OROSI, PARAÍSO, CARTAGO – COSTA RICA. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/4517/451744670005.pdf>
- Monferrer, C. (s.f). Interpretación de imágenes analógicas. Obtenido de <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASH5bfe.dir/doc.pdf>

Municipalidad de Pérez Zeledón. (s.f.). Información del Cantón. Obtenido de https://www.perezzeledon.go.cr/index.php/102-canton/index.php?option=com_content&view=article&id=295

Rodríguez, W. (2012). Análisis Espacial y Multitemporal de la Cobertura y Uso del Suelo con Base en Imágenes de Satélites en la Subcuenca Río Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua (1993-2000-2011). Retrieved from <http://repositorio.una.edu.ni/1171/1/tnp30r696.pdf>

Sentinel Hub. (s.f.) Sentinel 2 EO products. Obtenido de https://www.sentinel-hub.com/develop/documentation/eo_products/Sentinel2EOproducts

Watson, F. (2017). Aplicaciones de SIG en Ingeniería Agrícola. Cartago, Costa Rica.

7. ANEXOS.

Anexo 1. Características de las bandas 1,2,3,4,5,6,7,8,8A,9,10,11,12 del producto Sentinel 2.

Bandas crudas



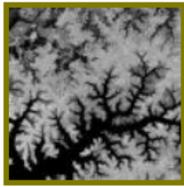
Figura 20. Características de las bandas B11 y B12.

Fuente: (Sentinel Hub, s.f.)



Figura 21. Características de las bandas B9 y B10.

Fuente: (Sentinel Hub, s.f.)



Banda B08 - NIR (infrarrojo cercano)

B08

Centinela - Banda B08

Resolución = 10m / px

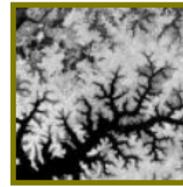
Longitud de onda central = 842 nm

Ancho de banda = 115nm

Propósito = infrarrojo cercano

Capacidades = Es bueno para mapear las líneas costeras y el contenido de biomasa, así como para detectar y analizar la vegetación.

Script personalizado: `return [B08];`



Banda B08A

B8A

Centinela - Banda B8A

Resolución = 20m / px

Longitud de onda central = 865nm

Ancho de banda = 20 nm

Propósito = Para clasificar la vegetación.

Script personalizado: `return [B8A];`

Figura 22. Características de las bandas B08 y B08A.

Fuente: (Sentinel Hub, s.f.)



Banda B07

B07

Centinela - Banda B07

Resolución = 20m / px

Longitud de onda central = 783nm

Ancho de banda = 20 nm

Propósito = Para clasificar la vegetación.

Script personalizado: `return [B07];`



Banda B06

B06

Centinela - Banda B06

Resolución = 20m / px

Longitud de onda central = 740nm

Ancho de banda = 15 nm

Propósito = Para clasificar la vegetación.

Script personalizado: `return [B06];`

Figura 23. Características de las bandas B06 y B07.

Fuente: (Sentinel Hub, s.f.)



Banda B05 (borde rojo)

B05

Centinela - Banda B05

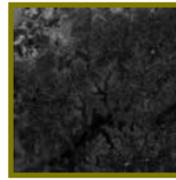
Resolución = 20m / px

Longitud de onda central = 705nm

Ancho de banda = 15 nm

Propósito = Para clasificar la vegetación.

Guión personalizado: `return [B05];`



Banda B04 (Rojo)

B04

Centinela - Banda B04

Resolución = 10m / px

Longitud de onda central = 665 nm

Ancho de banda = 30 nm

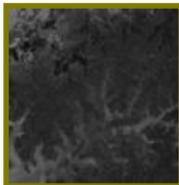
Propósito = Rojo

Capacidades = Se refleja bien en el follaje muerto y es útil para identificar tipos de vegetación, suelos y características urbanas (ciudad y pueblo). Tiene una penetración de agua limitada y no se refleja bien en el follaje vivo con clorofila.

Script personalizado: `return [B04];`

Figura 24. Características de las bandas B04 y B05.

Fuente: (Sentinel Hub, s.f.)



Banda B03 (Verde)

B03

Centinela - Banda B03

Resolución = 10m / px

Longitud de onda central = 560nm

Ancho de banda = 35nm

Propósito = Verde

Capacidades = Proporciona un excelente contraste entre agua clara y turbia (fangosa), y penetra bastante bien en el agua clara. Ayuda a encontrar aceite en la superficie del agua, y vegetación. Refleja más luz verde que cualquier otro color visible. Las características hechas por el hombre todavía son visibles.

Script personalizado: `return [B03];`



Banda B02 (Azul)

B02

Centinela - Banda B02

Resolución = 10m / px

Longitud de onda central = 490nm

Ancho de banda = 65 nm

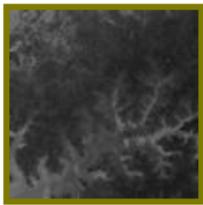
Propósito = Azul

Capacidades = Es útil para la discriminación de suelos y vegetación, mapeo de tipo de bosque e identificación de características hechas por el hombre. Dispersado por la atmósfera, ilumina el material en las sombras mejor que las longitudes de onda más largas, y también penetra en el agua clara mejor que otros colores. Es absorbido por la clorofila, lo que resulta en plantas más oscuras.

Script personalizado: `return [B02];`

Figura 25. Características de las bandas B02 y B03.

Fuente: (Sentinel Hub, s.f)



Banda B01

B01

Centinela - Banda B01

Resolución = 60m / px

Longitud de onda central = 443nm

Ancho de banda = 20 nm

Propósito = Para la detección de aerosoles.

Script personalizado: `return [B01];`

Figura 26. Características de la banda B01.

Fuente: (Sentinel Hub, s.f.)

Anexo 2. Firmas espectrales de las macro clases asignadas en la clasificación semi supervisada en el producto Sentinel 2.

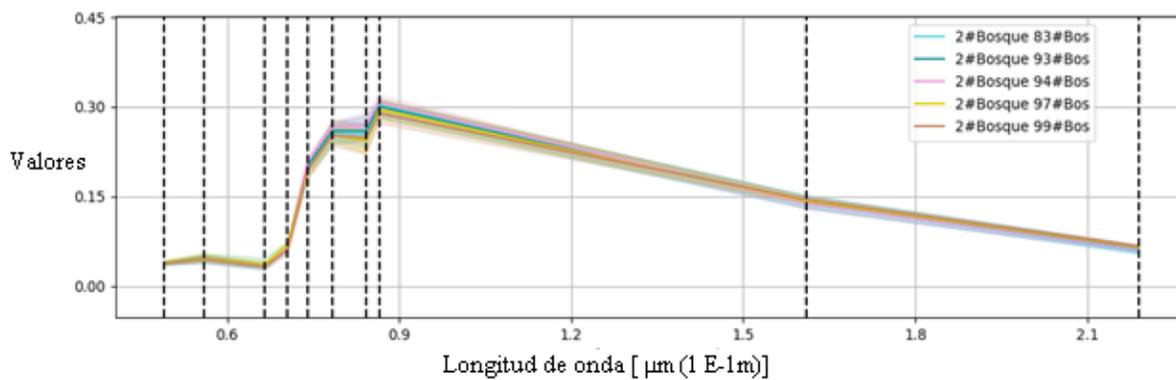


Figura 27. Firma espectral para bosque.

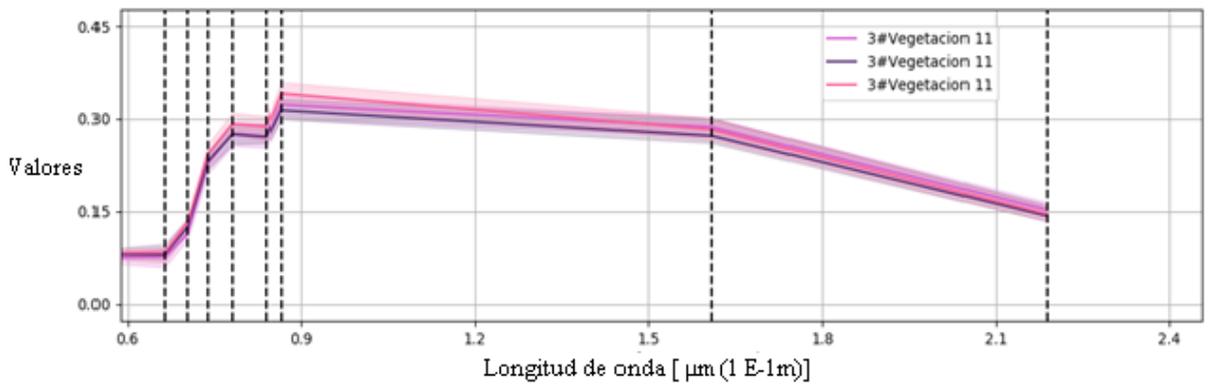


Figura 28. Firma espectral para vegetación (pastos y cultivos).

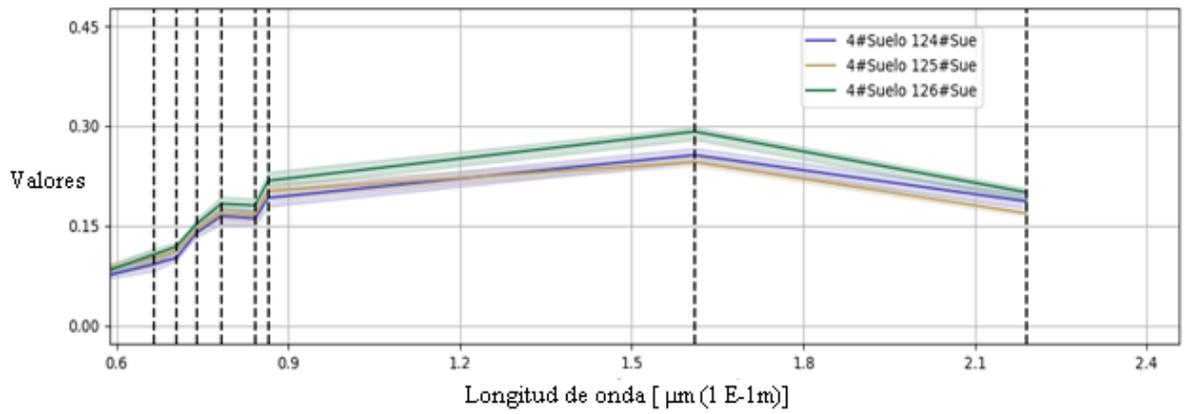


Figura 29. Firma espectral para suelo.

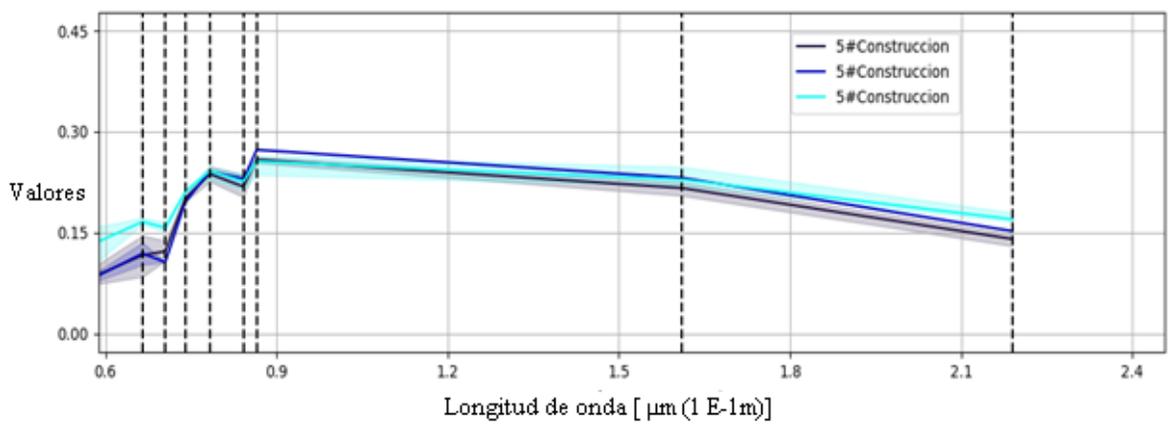


Figura 30. Firma espectral para techos.

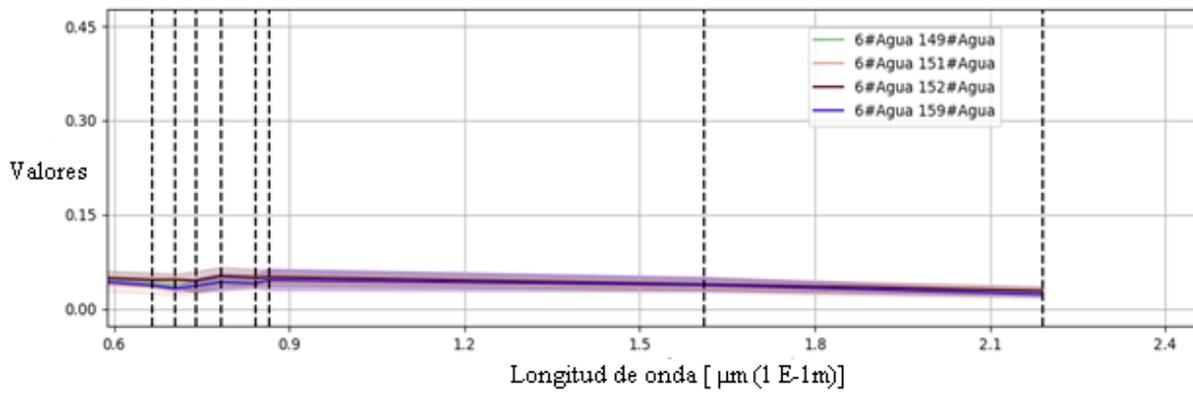


Figura 31. Firma espectral para agua.

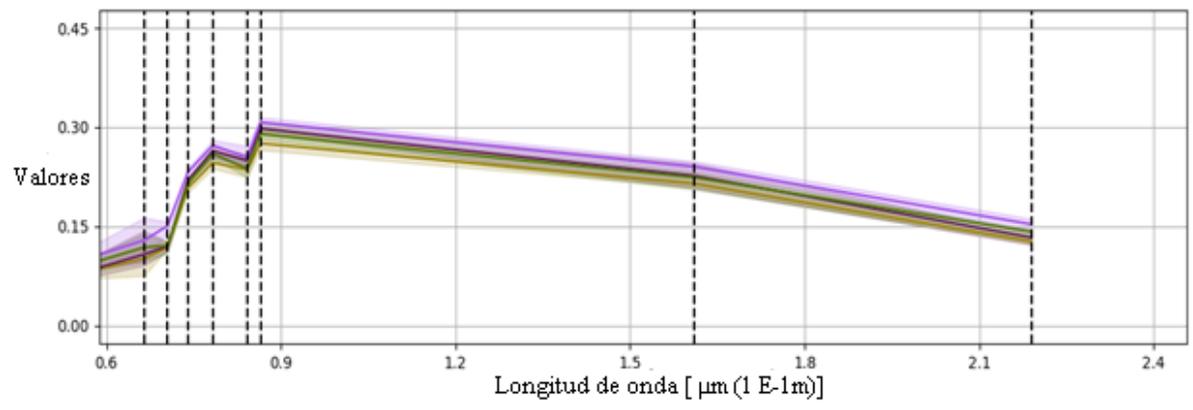


Figura 32. Firma espectral para caminos

Anexo 3. Valores máximos y mínimos de las firmas espectrales del cultivo de café.

Min B1	Max B1	Min B5	Max B5	Min B9	Max B9
0.0396999...	0.0417999...	0.1838999...	0.1838999...	0.1756999...	0.1756999...
0.0395999...	0.0412000...	0.1624000...	0.1624000...	0.1662999...	0.1662999...
0.0360999...	0.0428999...	0.1748999...	0.1798999...	0.1591999...	0.1601999...
0.0377999...	0.0394999...	0.2188999...	0.2245999...	0.1902999...	0.1969999...
0.0400999...	0.0440999...	0.2022999...	0.2091000...	0.2072999...	0.2206999...
Min B2	Max B2	Min B6	Max B6	Min B10	Max B10
0.0459000...	0.0498000...	0.2554000...	0.2554000...	0.0821999...	0.0821999...
0.0438000...	0.0476000...	0.2135999...	0.2135999...	0.0842000...	0.0842000...
0.0407999...	0.0482000...	0.2315999...	0.2410999...	0.0764999...	0.0771999...
0.0432000...	0.0473000...	0.3117000...	0.3147999...	0.0841000...	0.0877999...
0.0473000...	0.0531999...	0.2644000...	0.2775000...	0.0989999...	0.1058999...
Min B3	Max B3	Min B7	Max B7		
0.0375999...	0.0413999...	0.2450000...	0.2592000...		
0.0348999...	0.0371999...	0.1941999...	0.2182999...		
0.0310999...	0.0406999...	0.2254000...	0.2338999...		
0.0353999...	0.0427999...	0.3019999...	0.3296999...		
0.0402999...	0.0485999...	0.2709999...	0.2904999...		
Min B4	Max B4	Min B8	Max B8		
0.0684999...	0.0684999...	0.29459998...	0.29459998...		
0.0646999...	0.0646999...	0.25419998...	0.25419998...		
0.0582000...	0.0639000...	0.26649999...	0.27569997...		
0.0661000...	0.0720999...	0.36419999...	0.37599998...		
0.0731999...	0.0791999...	0.31549999...	0.32839998...		

Figura 33. Máximos y mínimos de las bandas para el producto Sentinel 2, del cultivo de Café.

Anexo 4. Comportamiento de los valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas con las que se confunde el Café (Vegetación, Bosque).

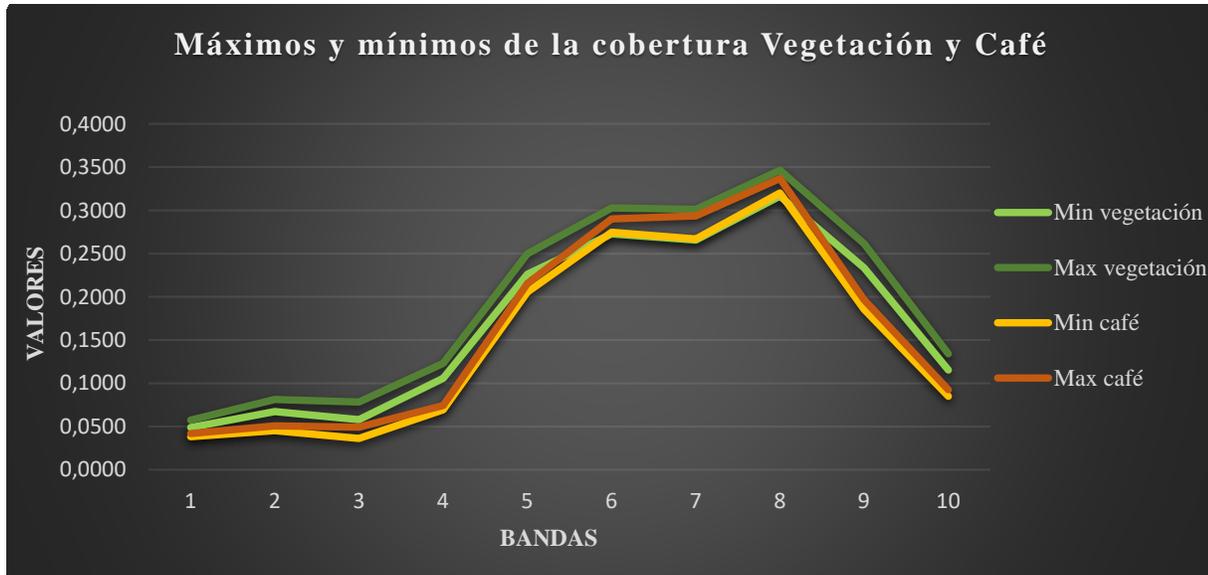


Figura 34. Valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas Vegetación y Café.

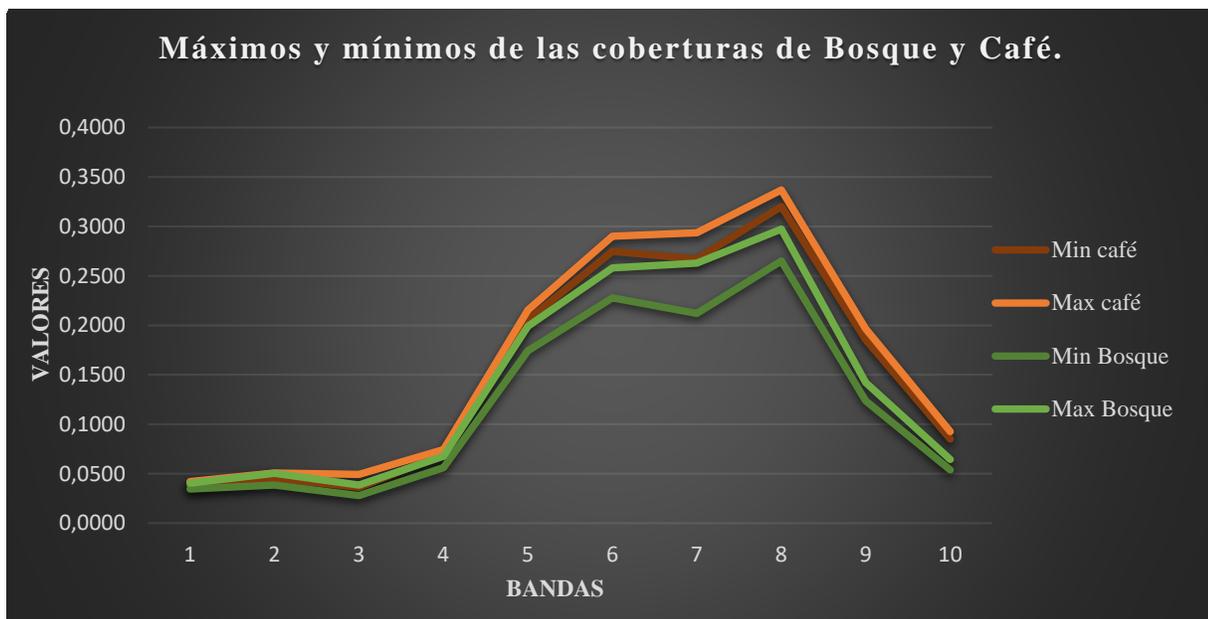


Figura 35. Valores máximos y mínimos de las firmas espectrales de las coberturas Bosque y Café.

Anexo 5. Firmas espectrales de las macro clases asignadas en la clasificación semi supervisada en el producto Landsat 8.

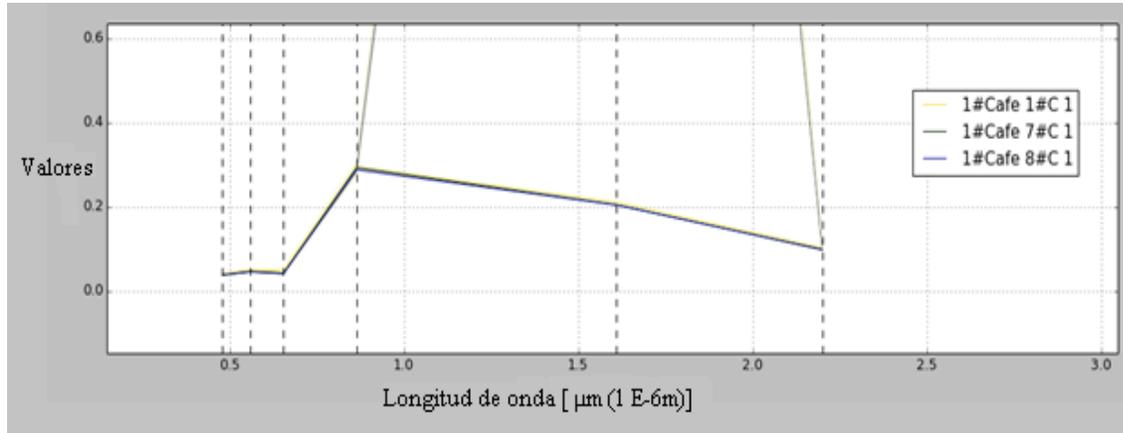


Figura 36. Firma espectral para el cultivo de café.

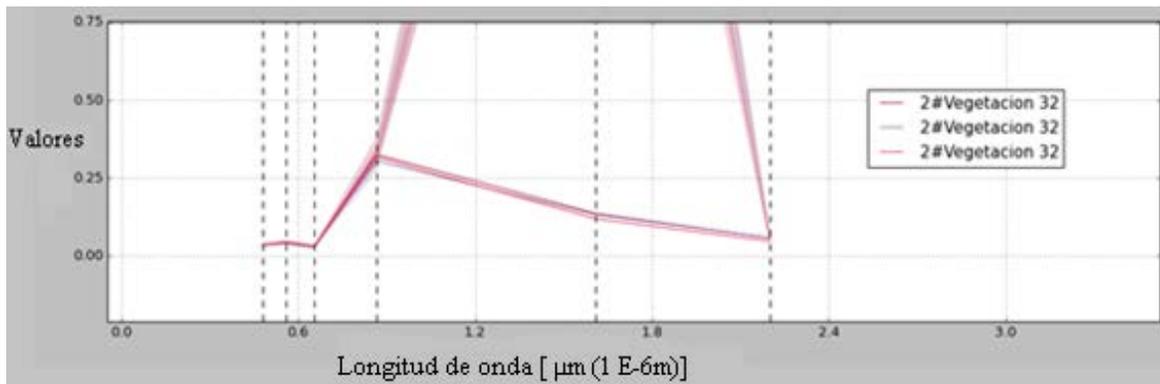


Figura 37. Firma espectral para bosques.

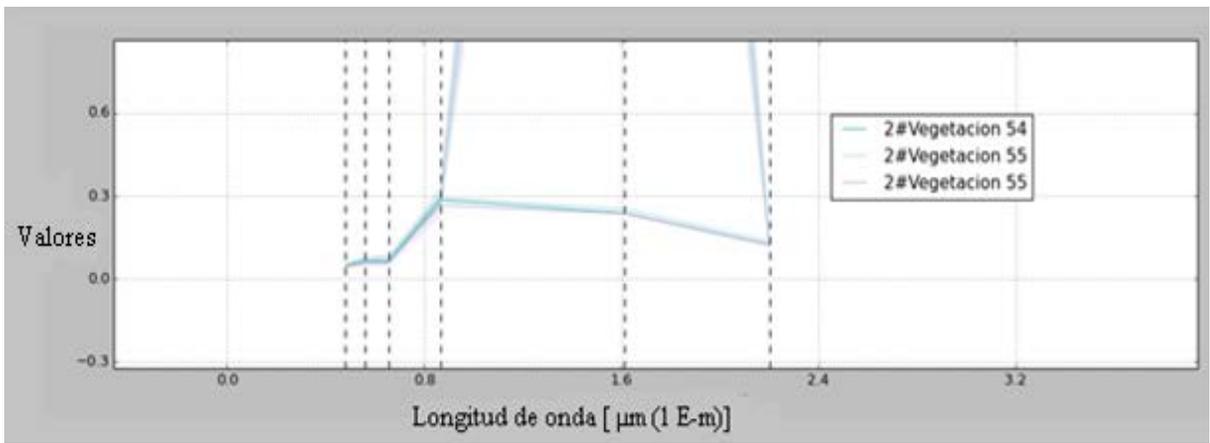


Figura 38. Firma espectral para Vegetación (pastos y cultivos).

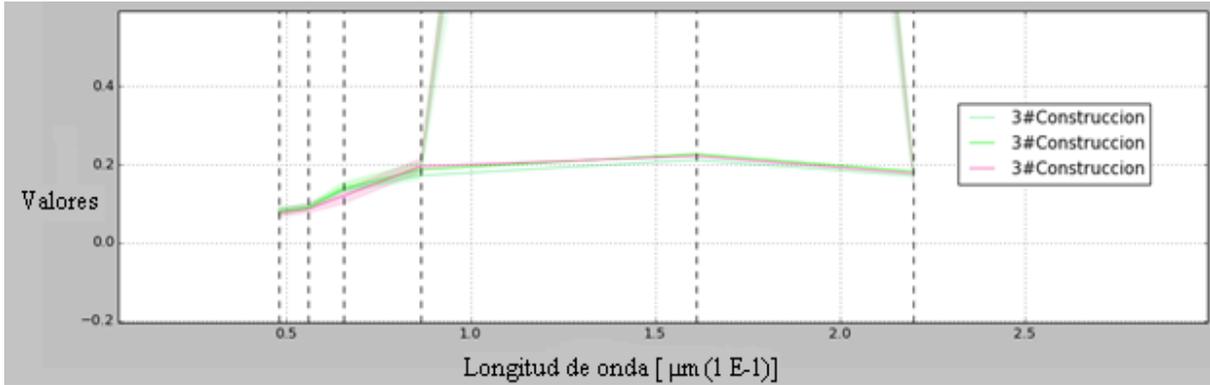


Figura 39. Firma espectral para techos.

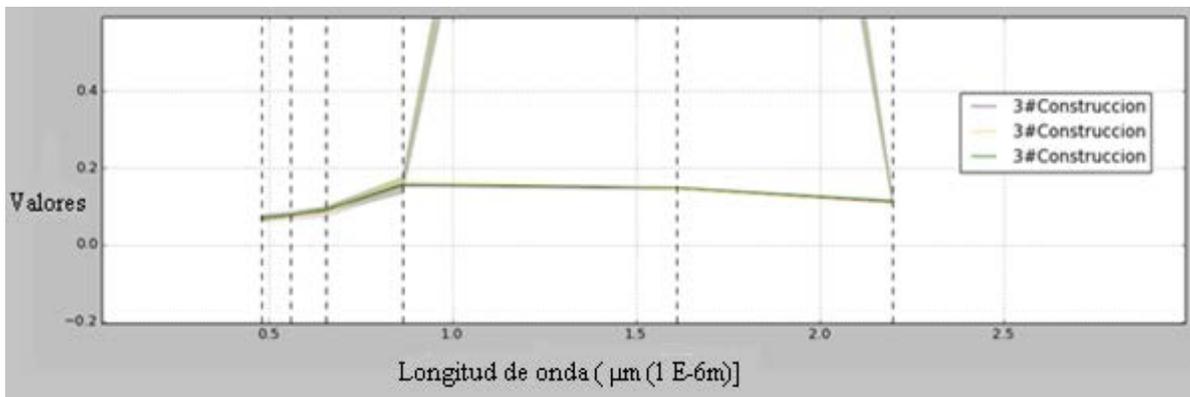


Figura 40. Firma espectral para carreteras.

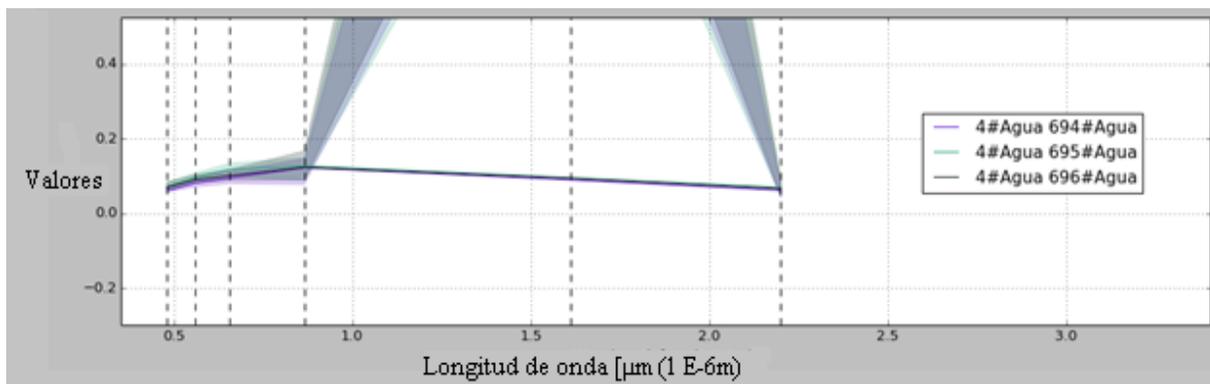


Figura 41. Firma espectral para agua.

Anexo 6. Porcentaje de similitud por cobertura de los puntos de muestra según los valores de la clasificación realizada, del producto Sentinel 2.

Cuadro 11. Porcentajes obtenidos en los puntos de muestra asignados según los valores de la clasificación realizada, para las macro clases en el producto Sentinel 2.

1	Café	59%
2	Bosque	5%
3	Vegetación	24%
4	Suelo	1%
5	Construcción	10%
6	Agua	1%

Anexo 7. Áreas de la cobertura de café por distrito para el producto Landsat 8, para una imagen satelital 2017.

Cuadro 12. Área en hectáreas de cobertura del cultivo de café de los distritos de Pérez Zeledón, por medio de la clasificación semi supervisada con el producto Landsat 8, para una imagen satelital del año 2017.

Distritos Pérez Zeledón	Área (ha)
San Pedro	2929,14
San Isidro del General	1660,32
Río Nuevo	7634,16
Rivas	2650,77
Platanares	1955,43
Pejibaye	12311,64
Paramo	2953,80
General	1098,36
Daniel Flores	1345,59
Cajón	2539,08
Baru	42439,77