

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
Máster Universitario en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería
y Arquitectura



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Identificación de cultivos ilícitos a través de procesamiento de imágenes y
visualización de resultados por medio de aplicación web

Tutores:

Diego González Aguilera
Benjamín Arias Pérez

Elaborado por:

Nicolas Ricardo Molano Rincón

Escuela Politécnica Superior de Ávila
2020

A los docentes del máster, en especial a mis tutores Diego González Aguilera y Benjamín Arias Pérez por su seguimiento y apoyo académico.

A mi suegro, Orlando Giraldo Gil por su conocimiento, apoyo y experiencia tanto profesional como personal, fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A mi esposa, por su apoyo y compañía incondicional que me trajo hasta aquí hoy.

Tabla de contenido

Resumen	1
Introducción	2
Objetivos	3
1. Contexto histórico	4
2. Descripción geobotánica del cultivo de hoja de coca	8
2.1. Productos derivados de la hoja de coca	9
3. Fundamentos de teledetección	10
3.1. Espectroscopia de la vegetación	11
3.1.1. Propiedades ópticas de las hojas	11
3.1.2. Reflectancia de la vegetación	12
4. Firmas espectrales del cultivo de coca	14
5. Área de estudio	19
6. Adquisición de imágenes	23
6.1. SENTINEL-2	23
6.1.1. Satélites que componen la misión SENTINEL-2	24
6.2. Metodología de adquisición	25
7. Procesamiento de las imágenes	30
7.1. Metodología de procesamiento	30
7.2. Problema de sobrestimación	51
8. Clasificación	61
8.1. Interpretación de resultados	70
9. Visualización de resultados	75
9.1. Leaflet	76
9.1.1. Formato GeoJSON	76
9.2. Diseño de la aplicación	77
Conclusiones	84
Bibliografía	87
Anexos	90

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Presencia de los grupos guerrilleros y paramilitares en relación con cultivos de coca en Colombia	5
Ilustración 2. Evolución de las actividades de erradicación en el periodo 2012-2017.....	6
Ilustración 3. Serie histórica de cultivos de coca en hectáreas, 2001-2018.....	6
Ilustración 4. Variación absoluta del área sembrada con coca, 2017-2018.....	7
Ilustración 5. Hoja, fruto y flor de la coca.....	8
Ilustración 6. Esquema básico del proceso de elaboración del Clorhidrato de cocaína	9
Ilustración 7. Esquema de un sistema de teledetección espacial.....	10
Ilustración 8. Patrones espaciales típicos o comunes de algunos cuerpos	11
Ilustración 9. Características de un espectro de vegetación sana (400-2500 nm)	13
Ilustración 10. Firmas espectrales de plantas en estado juvenil (n=10 plantas).....	15
Ilustración 11. Firmas espectrales de plantas en estado vegetativo (n=10 plantas)	16
Ilustración 12. Firmas espectrales de plantas en estado maduro (n=10 plantas).....	17
Ilustración 13. Comparación de firmas espectrales promedio por cada estado fenológico.....	18
Ilustración 14. Referencia espacial del departamento de Nariño.	20
Ilustración 15. Densidad de cultivos de coca para el año 2018 en el departamento de Nariño.....	21
Ilustración 16. Densidad de cultivos de coca para el año 2018 en el municipio de Tumaco	22
Ilustración 17. Enfoque de multisensoramiento remoto para la detección y verificación del área productiva con hoja de coca	23
Ilustración 18. Cobertura espectral del SENTINEL-2	24
Ilustración 19. Previsualización del AOI	26
Ilustración 20. Recubrimiento del AOI de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103	27
Ilustración 21. Recubrimiento del AOI de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019	27
Ilustración 22. Composición color natural para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103.....	30
Ilustración 23. Subset del AOI para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103.....	31
Ilustración 24. Niveles de resolución radiométrica	31
Ilustración 25. Resultados de la conversión a reflectividades para cada una de las bandas de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103	32
Ilustración 26. Histograma para la banda del rojo de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103.....	33
Ilustración 27. Gráfico para los valores del índice basado en la pendiente.....	34
Ilustración 28. Índices de vegetación aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103.....	36
Ilustración 29. Realces aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103	39
Ilustración 30. Delimitación preliminar de suelos en preparación de acuerdo con la respuesta espectral para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103	40
Ilustración 31. Mecanismo de aplicación del filtro de media y mediana	41
Ilustración 32. Composición color natural para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019.....	43
Ilustración 33. Subset del AOI para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019.....	44

Ilustración 34. Resultados de la conversión a reflectividades para cada una de las bandas de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019	45
Ilustración 35. Histograma para la banda del rojo de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019.....	46
Ilustración 36. Índices de vegetación aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019.....	47
Ilustración 37. Comparación del Índice de Vegetación de cociente RVI.....	47
Ilustración 38. Realces aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019	49
Ilustración 39. Delimitación preliminar de suelos en preparación de acuerdo con la respuesta espectral para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019	49
Ilustración 40. Ejemplo de sobrestimación en la identificación de cultivos de hoja de coca.....	51
Ilustración 41. Previsualización del AOI	52
Ilustración 42. Subset del AOI para la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS.....	55
Ilustración 43. Histograma para la banda del rojo de la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS.....	55
Ilustración 44. Índices de vegetación aplicados a la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS.....	56
Ilustración 45. Comparación de resultados para el índice de vegetación RVI.....	57
Ilustración 46. Realces aplicados a la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS (NIR-Red-Green).....	58
Ilustración 47. Realces aplicados a la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS (Red-NIR-Green).....	59
Ilustración 48. Estructura de la Personal Geodatabase.....	66
Ilustración 49. Clasificación e identificación de cultivos de hoja de coca para la imagen Sentinel-2 de fecha 2018/03/13	67
Ilustración 50. Clasificación e identificación de cultivos de hoja de coca para la imagen Sentinel-2 de fecha 2018/08/05	68
Ilustración 51. Clasificación e identificación de cultivos de hoja de coca para la imagen Planet de fecha 2018/03/13	69
Ilustración 52. Degradación de la cobertura de bosques	72
Ilustración 53. Comparativo en cuanto a clasificación de cultivo de hoja de coca	73
Ilustración 54. Presencia de cultivos de coca en zonas de manejo especial	75
Ilustración 55. Delimitación de la comunidad negra Alto Mira y Frontera dentro del AOI	76
Ilustración 56. Flujograma de diseño de aplicación web	77
Ilustración 57. Visualización en Notepad++ de un archivo en formato GeoJSON.....	78
Ilustración 58. Edición del archivo en formato GeoJSON para incorporar en la aplicación web	78
Ilustración 59. Visualización inicial de la aplicación web	79
Ilustración 60. Selector de capas de la aplicación web	79
Ilustración 61. Visualización de las imágenes satelitales base adicionadas en la aplicación web	80
Ilustración 62. Simbología para las capas de Análisis incluidas en la aplicación web	81
Ilustración 63. Visualización de los pop-up para cada capa en la aplicación web	82
Ilustración 64. Superposición de capas de análisis en la aplicación web.....	83

Índice de tablas

Tabla 1. Condiciones óptimas para cultivo de hoja de coca.....	8
Tabla 2. Sustancias químicas usadas para la obtención de productos a base de hoja de coca	9
Tabla 3. Estados fenológicos de la variedad de coca muestreada	14
Tabla 4. Metadatos del shapefile de Densidad de cultivos de coca en Colombia para el año 2018..	20
Tabla 5. Características principales SENTINEL-2A	25
Tabla 6. Parámetros para la búsqueda de imágenes satelitales	26
Tabla 7. Metadatos de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103.....	28
Tabla 8. Metadatos de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019.....	29
Tabla 9. Principales índices basados en distancia	35
Tabla 10. Ficha de ejemplo sobre el proceso de interpretación y delimitación de cultivos de hoja de coca en imágenes SENTINEL a partir del patronamiento visual en imágenes DigitalGlobe	38
Tabla 11. Tipos de realce PCI GEOMATICA	38
Tabla 12. Resultados al aplicar los filtros para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103.....	42
Tabla 13. Resultados al aplicar los filtros para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019.....	50
Tabla 14. Principales características del instrumento PS2 de la constelación PLANETSCOPE.....	52
Tabla 15. Metadatos de la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS.tif	53
Tabla 16. Ficha de ejemplo sobre el proceso de interpretación y delimitación de cultivos de hoja de coca en imágenes Planet a partir del patronamiento visual en imágenes DigitalGlobe	54
Tabla 17. Definición de características pictórico - morfológicas.....	64
Tabla 18. Coberturas por clasificar en el AOI.....	64
Tabla 19. Modelo de datos de la Personal Geodatabase	65
Tabla 20. Diccionario de datos para los Feature Class.....	66
Tabla 21. Resultados para la imagen SENTINEL-2 capturada el 2018/03/13	70
Tabla 22. Resultados para la imagen SENTINEL-2 capturada el 2018/08/05	71
Tabla 23. Resultados para la imagen Planet capturada el 2018/03/13	71
Tabla 24. Comparativo de áreas para cultivos de hoja de coca para cada una de las imágenes.....	74
Tabla 25. Capas incluidas en la aplicación web.....	78
Tabla 26. Atributos del pop-up para cada capa en la aplicación web	81

Índice de graficas

Grafica 1. Proporción de cada una de las coberturas para la imagen SENTINEL-2 capturada en 2018/03/13.....	70
Grafica 2. Proporción de cada una de las coberturas para la imagen SENTINEL-2 capturada en 2018/08/05.....	71
Grafica 3. Proporción de cada una de las coberturas para la imagen Planet capturada en 2018/03/13	72

Resumen

Desde la década de ochenta, en Colombia se ha visto un crecimiento exponencial en los cultivos de hoja de coca a lo largo del territorio, trayendo consigo grandes consecuencias a nivel económico, social y cultural. Para analizar este fenómeno, buscando una solución tecnológica que permitiera la clasificación, identificación y delimitación de cultivos de coca, de acuerdo con su respuesta espectral, es que se propone realizar este estudio haciendo uso de imágenes satelitales multiespectrales.

Para ello, se definió un área de estudio localizada en el municipio de Tumaco, departamento de Nariño, donde de acuerdo con los datos de densidad de cultivo de hoja de coca, se evidencio una gran afectación por este fenómeno. Definida esta zona, se obtuvieron dos imágenes tomadas en el mes de marzo y agosto del año 2018, en el marco de la misión Copernicus SENTINEL-2, donde el porcentaje de nubosidad fuera mínimo para poder realizar los análisis pertinentes. Con estas imágenes, se realizaron todas las operaciones, realces y mejoras para poder clasificar, identificar y delimitar los cultivos de hoja de coca, apoyado en las Fichas de ejemplo sobre el proceso de interpretación y delimitación de estos cultivos, elaboradas por la Dirección de Antinarcóticos de la Policía Nacional. De esta manera, se clasificaron las coberturas del uso del suelo en cinco categorías: Cultivos de coca, bosques, suelo desnudo, ríos y otro cultivo; para cada una de las imágenes, teniendo en cuenta el tiempo transcurrido entre la toma de estas, viendo diferencias significativas en los resultados obtenidos.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el sensor SENTINEL-2 cuenta con una resolución espacial de 10 metros, se evidencia que puede generarse un problema denominado sobrestimación, dado por la no delimitación precisa de área debido a la mezcla de diferentes tipos de coberturas vegetales que no corresponden a cultivo de coca, identificando así más área de la real. Para ello, y tratando de subsanar esta situación, se obtuvo una imagen capturada en la misma fecha del mes de marzo de 2018, por el instrumento PS2 que hace parte de la constelación PLANETSCOPE, que maneja una resolución espacial de 3 metros; donde luego de su procesamiento se realizó la clasificación con las mismas categorías mencionadas anteriormente, evidenciando una delimitación de cultivos más precisa, comparado con los datos obtenidos para la misma fecha con la imagen del sensor SENTINEL-2.

Una vez estructurados los resultados en un formato de almacenamiento de datos geográficos, y siendo consecuente con la política de datos abiertos y uso de la información del gobierno de Colombia, se diseñó una aplicación web haciendo uso de la biblioteca de JavaScript de código abierto denominada Leaflet, donde se presentan los resultados obtenidos con cada una de las imágenes en los diferentes periodos en cuanto a los cultivos de hoja de coca, así como también información de comunidades negras y predios rurales, para poder realizar análisis y comparaciones con los datos allí presentados, dando un valor adicional a los resultados obtenidos en esta investigación.

Como resultado de este estudio, se pudo evidenciar que el uso de imágenes satelitales multiespectrales permitió una buena identificación de los cultivos de hoja de coca, analizando así la dinámica tan cambiante que se da en este tipo de siembra a través de los meses. A nivel de la agricultura, se lograron identificar también zonas donde los suelos o bosques se han visto degradados, a raíz la quema o alteración de estos para establecimientos de este tipo de cultivos ilícitos, lo que permitirá en este campo fomentar políticas publicas en pro de mitigar esta situación y así restaurar los ecosistemas, parques o zonas con condicionantes ambientales, que se han visto ampliamente afectadas por este fenómeno.

Introducción

Colombia ha sido catalogado como uno de los mayores productores de hoja de coca del mundo y el principal productor de amapola de América, insumos básicos necesarios para la producción de cocaína y heroína. La década de los noventa se caracterizó por la expansión de los cultivos de coca pasando de 37.500 ha en 1992 a 144.807 ha en el 2001, situación que se ha estudiado por diversas ramas de las ciencias sociales, centrándose en sus causas y consecuencias (Diaz & Sanchez, 2004)

Esta situación para Colombia ha significado grandes problemas en diferentes sectores, como la seguridad y la economía, y es por esta razón que la identificación de estos cultivos siempre ha sido un tema importante a nivel nacional e internacional, para poder generar políticas de sustitución o erradicación en aquellas zonas afectadas por esta situación, y así mejorar la situación social y económica del país.

Otra afectación que trae el narcotráfico en los territorios está relacionada con el medio ambiente. En el año 2017, la deforestación asociada a cultivos de coca en Colombia, represento el 24% del total deforestado en el país, donde diariamente se deforestaron 137 hectáreas de bosque natural, trayendo consigo perdida y migración de fauna y flora, pérdida de estos suelos y aumento de la erosión y desertificación, con el consecuente incremento de deslizamientos, avalanchas y demás desastres asociados en el país, identificando también un impacto contundente a los Parques Nacionales Naturales, donde el 30% se vio afectado por la deforestación causada por cultivos de coca. Así mismo, según datos de la Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, la cocaína genera vertimientos derivados de residuos de mínimo 3,5 toneladas por hectárea al año de sustancias químicas que afectan los suelos y el agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

De allí radica la importancia de la identificación de cultivos ilícitos en Colombia, a través de diferentes técnicas que no impliquen un desplazamiento a terreno para la identificación puntual de las zonas afectadas, sino que a través de herramientas informáticas se pueda analizar de manera masiva. De acuerdo con esto, el procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales, se constituye una técnica bastante efectiva ya que permite de manera remota, generar la identificación de estas áreas realizando correcciones y operaciones a las imágenes, para así clasificar este tipo de coberturas del uso de la tierra, en zonas donde es difícil su acceso por condiciones geográficas o de seguridad.

Así mismo, siendo consecuente con la política de datos abiertos del gobierno nacional, y dado que este tema es relevante en diferentes sectores del país, es que se propone la visualización de los resultados a través de una aplicación web, para que el acceso a los datos sea sencillo, y pueda ser relacionado, por ejemplo, con la información predial nacional o zonas con condicionantes y restricciones ambientales, permitiendo al usuario analizar la información generada dándole un valor adicional a los resultados de la investigación.

Objetivos

General

Identificar cultivos de hoja de coca en una zona determinada de Colombia donde se evidencie afectación por este fenómeno, a partir del uso de imágenes satelitales multiespectrales.

Específicos

- Definir el área de estudio de acuerdo con los datos de densidad de cultivo de coca en el país, para así obtener las imágenes multiespectrales satelitales, indispensables para la delimitación e identificación de estos cultivos, teniendo en cuenta que no existe una temporalidad definida para su siembra.
- Procesar las imágenes satelitales obtenidas, aplicando las operaciones o realces necesarios, buscando facilitar la interpretación de las coberturas presentes en la zona.
- Identificar, clasificar y delimitar aquellas zonas dentro del área de estudio donde se evidencien cultivos de hoja de coca, teniendo en cuenta su respuesta espectral.
- Analizar el problema de la sobrestimación de cultivos, de acuerdo con la resolución espacial de los diferentes sensores satelitales capaces de capturar imágenes multiespectrales.
- Presentar los resultados obtenidos luego del procesamiento, identificación y clasificación de cada una de las imágenes, a través de una aplicación web.

1. Contexto histórico

Hacia la década de los setenta y principios de los ochenta, los principales traficantes de droga obtenían sus insumos de Bolivia y Perú. Al ver las elevadas ganancias que se obtenían a través de la producción, distribución y comercialización de sustancias ilegales, como la cocaína producida a base de hoja de coca, en Colombia se empezaron a establecer cultivos en zonas aisladas, en departamentos como Guaviare, Caquetá y Putumayo. De esta manera, al aumentar la participación de Colombia en el mercado de la droga a nivel mundial, se fortaleció y consolidó la industria del narcotráfico en el país, propiciando la formación de “carteles” como el de Cali, Medellín o la Costa, buscando monopolizar la producción en ciertas regiones del país. Estos se encargaban de todo el proceso productivo, abarcando el cultivo, comercialización y procesamiento de la hoja de coca en laboratorios para la posterior producción, transporte y distribución de la cocaína tanto a nivel nacional como internacional a través de sus redes ilegales (Díaz & Sánchez, 2004).

A finales de la década de los ochenta, se consideraba que en Colombia se explotaban cerca de 40.000 hectáreas (ha) para hoja de coca, lo que significó que se introdujeran una serie de reformas en el código penal, buscando mitigar esta situación y sus efectos secundarios que se podían evidenciar a nivel social, cultural, político y económico.

Al mismo tiempo, el fenómeno guerrillero y paramilitar en el país comenzó a cambiar a principio de la década de los noventa, expandiéndose a lo largo del territorio nacional y estableciéndose en regiones con alto potencial económico relacionado principalmente con los cultivos ilícitos, lo que representaba para estos grupos una de sus fuentes de riqueza principales. De esta manera, se identificó que en la mayoría de los territorios con presencia y actividad de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC), el Ejército de Liberación Nacional (ELN) y de las autodefensas ilegales, también presentaban producción de cultivos ilícitos, evidenciado así una relación directa entre la actividad ilegal de estos grupos guerrilleros y la producción de cultivos ilícitos (ver Ilustración 1).

Debido al crecimiento exponencial de los cultivos de hoja de coca a lo largo del territorio nacional, y la relación directa que tenía con actividades ilegales de grupos guerrilleros y paramilitares, el gobierno inició una serie de estrategias que buscaban disminuir esta situación, empezando con la erradicación manual y aérea de cultivos de coca. Estadísticas revelan que entre 1987 (cuando inició la erradicación) y 1994 nunca se erradicaron más de 1.000 ha por año (Uribe, 2020), lo cual no representaba un gran avance, teniendo en cuenta que para esta época se registraban en el país más de 50.000 ha cultivadas.

Luego de la muerte de Pablo Escobar, y durante el periodo comprendido entre el año 1995 al 2000, se identificó que el narcotráfico no había disminuido, las organizaciones criminales no se habían debilitado, la política nacional había sido infiltrada por dineros del narcotráfico, los esfuerzos de interdicción y erradicación eran insuficiente y se estaban consolidando los cultivos de coca en múltiples regiones, las mismas que hasta hoy son las mayores cultivadoras del país (Uribe, 2020).

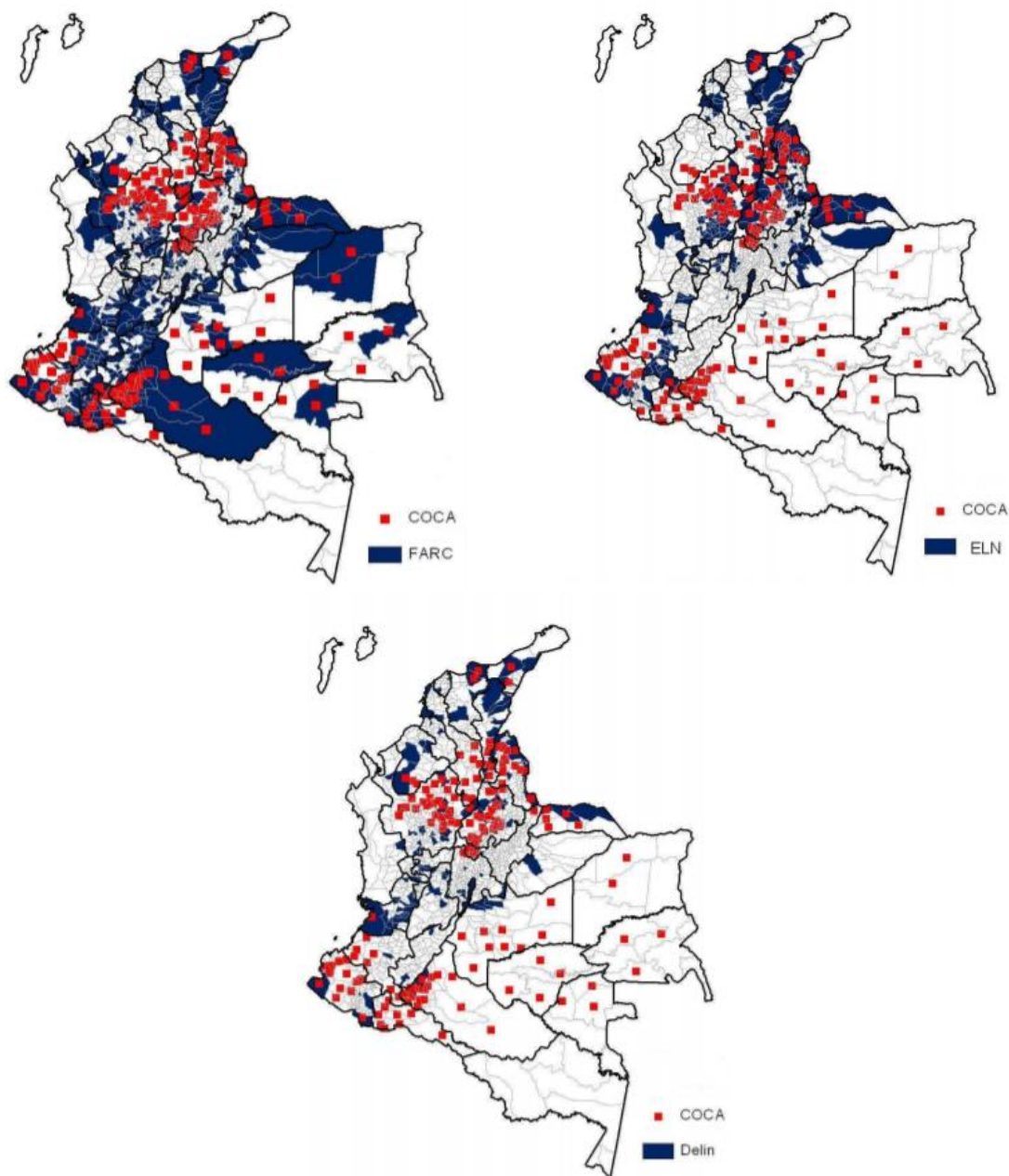


Ilustración 1. Presencia de los grupos guerrilleros y paramilitares en relación con cultivos de coca en Colombia
 Fuente: (Diaz & Sanchez, 2004)

Esto significó que los cultivos de coca en Colombia pasaran de 50.000 ha en el año 1995 a 137.000 en el año 2000, convirtiendo al país en ese momento en el mayor cultivador de hoja de coca en el mundo, y desbancando a países como Bolivia y Perú donde los cultivos habían disminuido en un 60% y 70% respectivamente.

La primera década del siglo XXI, trajo consigo el Plan Colombia que fue un acuerdo suscrito entre los gobiernos de Estados Unidos y Colombia, el cual dentro de sus objetivos específicos contemplaba crear una estrategia antinarcoóticos. Durante esta época, se fortaleció la aspersión aérea lo que significó que disminuyera la extensión de los cultivos de hoja de

coca, reduciendo el rendimiento de la hoja y por ende su producción. Del año 2010 a la fecha, teniendo en cuenta las diferentes posturas políticas, y el comienzo de los acuerdos de paz con las FARC, se vieron algunos efectos positivos y negativos en cuanto al cultivo de hoja de coca, aclarando que incluso la aspersión fue suspendida, por lo que las labores de erradicación se limitaban únicamente al trabajo manual.

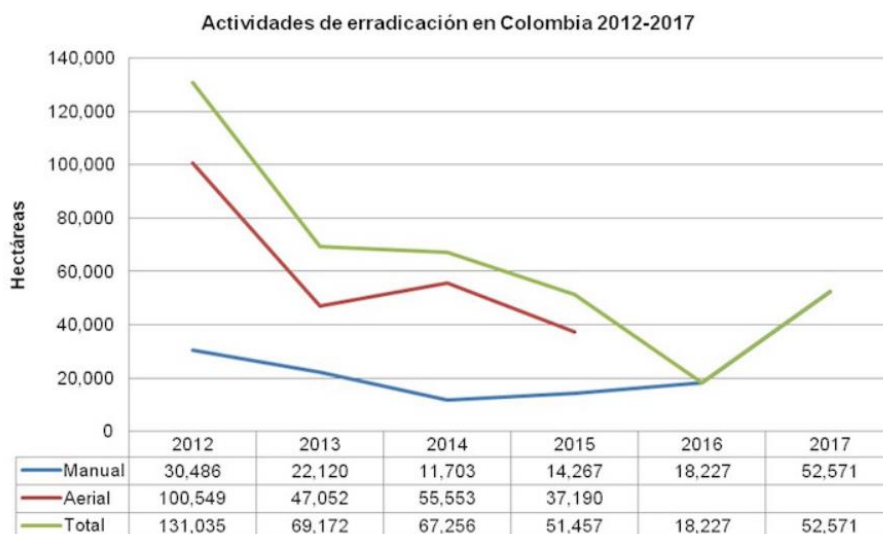


Ilustración 2. Evolución de las actividades de erradicación en el periodo 2012-2017
Fuente: (Uribe, 2020)

La suspensión de la aspersión lógicamente trajo efectos adversos aumentando los rendimientos de los cultivos y por ende la producción de cocaína. Según datos de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), durante el periodo comprendido entre los años 2013-2017, las hectáreas sembradas con hoja de coca crecieron 3.7 veces, llegando a un área total a nivel nacional de 171.000 ha.

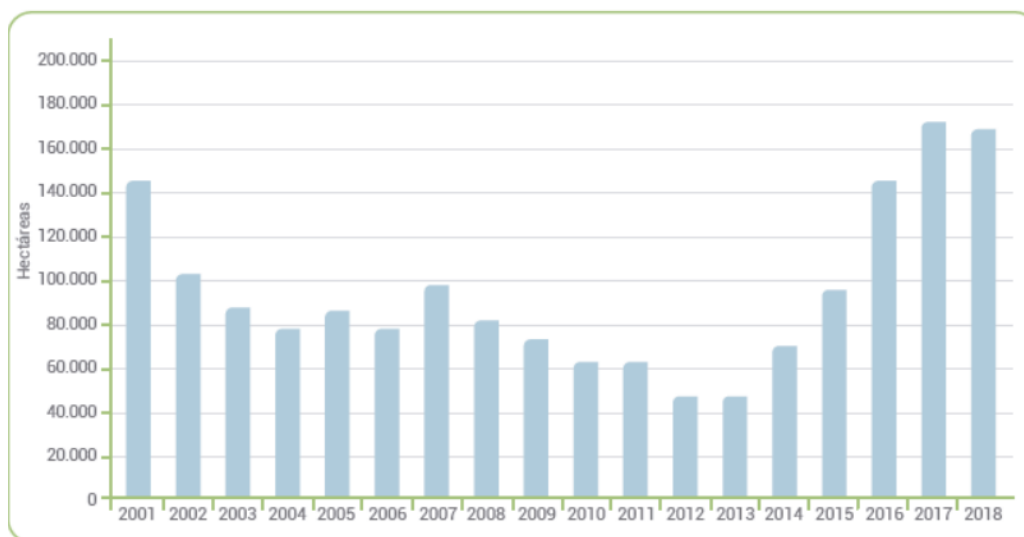


Ilustración 3. Serie histórica de cultivos de coca en hectáreas, 2001-2018
Fuente: (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, 2019)

Para el año 2018, comparado con los datos del año inmediatamente anterior, se evidencio una reducción de los cultivos del 1.2%, encontrando 169.000 ha e identificando que el 78% de los lotes detectados en 2018 ya estaban sembrados con coca en 2017. En cuanto a la concentración de estos cultivos, se encontró que estos ocupaban cerca de 39.152 km² a lo largo del territorio nacional siendo la zona más afectada el departamento de Nariño con una participación de 41.903 ha del total nacional, seguido por Putumayo, Meta y Choco (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, 2019).

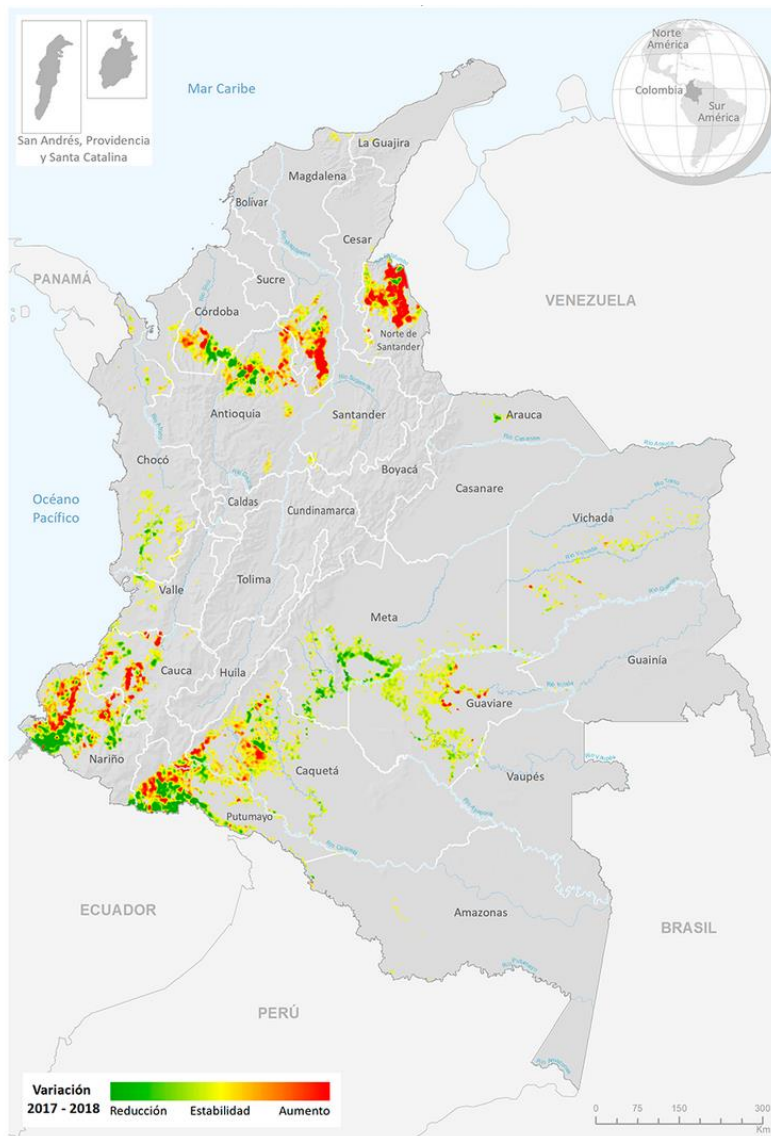


Ilustración 4. Variación absoluta del área sembrada con coca, 2017-2018
Fuente: (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, 2019)

2. Descripción geobotánica del cultivo de hoja de coca

Erythoxylum es un género pantropical que cuenta con alrededor de 230 especies, de las cuales cerca de 190 se encuentran en el Neotrópico. A este género pertenecen las comúnmente denominadas “plantas de coca”, que en Colombia incluye cerca de 40 especies (Galindo & Fernandez-Alonso, 2010).

Es un arbusto angiospermo y dicotiledóneo cuya altura puede alcanzar los 5 metros de altura. Sin embargo, se suelen cortar las guías con la finalidad de que no lleguen a medir más de 2 metros y así facilitar la recolección de las hojas. Su corteza es rugosa de color pardo rojizo, y tiene unas pequeñas flores axilares de color marfil, que miden aproximadamente 2 centímetros de diámetro. Las hojas que son la parte más importante normalmente están dispuestas en grupos de siete en cada tallo, son de forma ovalada y sus dimensiones varían entre los 4 y 8 centímetros de ancho. Son de un color verde brillante, carente de aroma y de sabor amargo y astringente, que al ser colocadas en la boca provoca una ligera sensación de adormecimiento y anestesia local (Krawczyk, 2008).

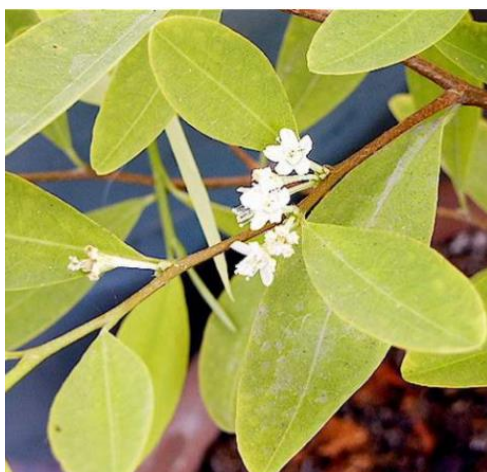


Ilustración 5. Hoja, fruto y flor de la coca
Fuente: (Krawczyk, 2008)

Las condiciones óptimas para su cultivo son:

Condición	Descripción
Climática	Es una planta sensible al frío, la temperatura media más adecuada para su cultivo es de 20°C, una humedad del 90% y suelos ricos en nitrógeno
Geográfica	Es originaria de la zona altoandina entre Perú y Bolivia, existiendo también plantaciones en Colombia, Brasil, norte de Chile y Argentina. Fuera de Suramérica, se pueden encontrar cultivos en Camerún, las Islas de Java y Sri Lanka, Taiwán, Pakistán e India
Cultivo	Zonas en las praderas de montaña o terrazas de altiplanos
Recolección	Se realiza 3 a 4 veces al año

Tabla 1. Condiciones óptimas para cultivo de hoja de coca
Fuente: (Krawczyk, 2008)

2.1. Productos derivados de la hoja de coca

El cultivo de coca en Colombia es considerado como ilícito, ya que a partir de la hoja se logra obtener la pasta básica de cocaína, la base de cocaína y el clorhidrato de cocaína, a través de diferentes procesos que se llevan a cabo en inmediaciones del cultivo, con el objetivo de evitar desplazamientos, ya que para obtener un kilo de pasta se necesitan alrededor de 125 kilos de hoja (Infodrogas, 2020).

Sin entrar al detalle en cuanto al proceso de elaboración de estos productos a base de hoja de coca, las sustancias químicas usadas para su obtención son:

Etapa	Sustancia Química	Sustituto
De la hoja de coca a la pasta básica	Queroseno Ácido sulfúrico Carbonato sódico	Gasolina, benceno, Carbonato de sodio, hidróxido sódico
De la pasta básica a la base de cocaína	Ácido sulfúrico Permanganato potásico	Ácido clorhídrico Dicromato de potasio Hidróxido sódico
De la base de cocaína al clorhidrato de cocaína	Éter etílico Acetona Ácido clorhídrico	Cloroformo Metimetilo acetona Gas cloruro de hidrogeno

Tabla 2. Sustancias químicas usadas para la obtención de productos a base de hoja de coca
Fuente: (Infodrogas, 2020)

Según (Oficinas de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, s.f.) al consolidar la información reportada por los cultivadores que procesan pasta básica o base de cocaína, se encontró que una arroba (equivalente a 25 libras) alcanza a producir un promedio de 18.5 gramos de pasta básica o 17.8 gramos de base de cocaína; es decir, con una tonelada de hoja de coca fresca se obtendrían 1.48 kg de pasta básica o 1.42 kg de base de cocaína.



Ilustración 6. Esquema básico del proceso de elaboración del Clorhidrato de cocaína
Fuente: <https://ciencybiologia.webnode.es/news/sistema-nervioso-y-drogas/>

3. Fundamentos de teledetección

De acuerdo con (Chuvienco, 2008) la teledetección se define como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales, asumiendo que entre el suelo y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial. Un sistema de teledetección espacial (ver ilustración 7) incluye los siguientes elementos:

- Fuente de energía: Corresponde al origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Cuando la energía proviene de un foco externo al sensor se habla de teledetección pasiva; y por el contrario cuando el haz energético es emitido por el sensor, se habla de teledetección activa.
- Cubierta terrestre: Formada por las distintas masas de vegetación, suelos, cuerpos de agua, etc.; que reciben la señal energética
- Sistema sensor: Compuesto por el sensor propiamente dicho y la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla, grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- Sistema de recepción – comercialización: Es donde se recibe la información transmitida por la plataforma, grabándose en un formato apropiado y que posterior a las correcciones realizadas, se distribuya a los interesados.
- Interprete: Aquel que convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, de cara a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- Usuario final: Es el encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que dé él se deriven.

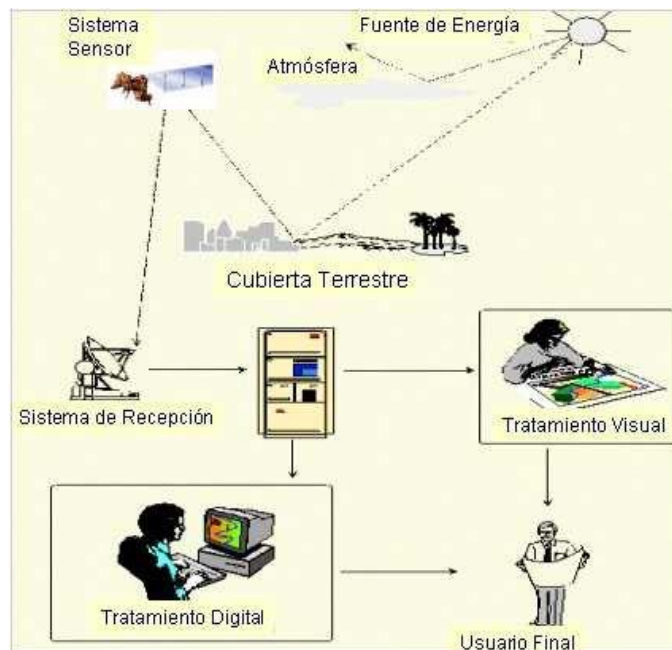


Ilustración 7. Esquema de un sistema de teledetección espacial
Fuente: (Chuvienco, 2008)

Así mismo, para reconocer cubiertas de interés o parámetros dentro de estas cubiertas, en su obra (Chuvienco, 2008) presenta que las firmas espectrales son fundamentales, por lo que se recomienda que sean punto de partida para la mayor parte de los trabajos de teledetección. La firma espectral es pues la medida cuantitativa de las propiedades espectrales de un objeto en una o varias bandas espectrales. También se le conoce como comportamiento espectral, cada tipo de objeto presenta a un nivel de respuesta específico en términos de: % radiación reflejada + % absorbida + % transmitida. La firma espectral hace referencia a la forma en que una cubierta refleja o emite su energía a distintas longitudes de onda y este comportamiento sirve para diferenciar unas coberturas de otras (Valbuena & Castro, 2013).

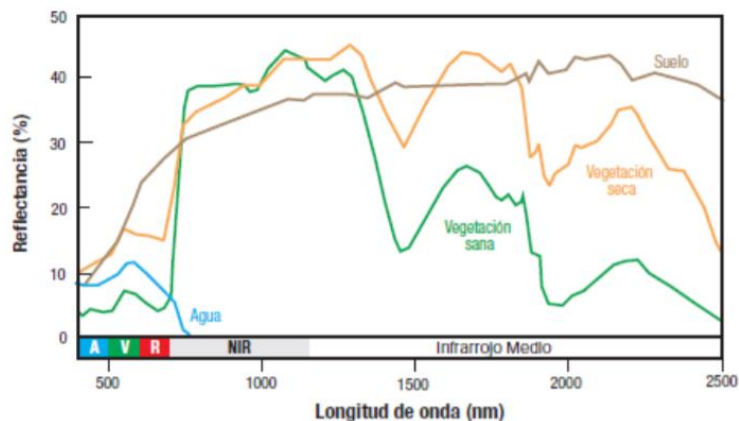


Ilustración 8. Patrones espaciales típicos o comunes de algunos cuerpos
Fuente: (Valbuena & Castro, 2013)

3.1. Espectroscopia de la vegetación

La espectroscopia y la espectrorradiometría brindan una herramienta importante para el monitoreo del estado ambiental de la vegetación, siendo eficiente tanto en el espacio como en el tiempo (Huber, Kneubuhler, Psomas, Itten, & Zimmermann, 2008). Cada individuo o planta tiene un comportamiento espectral propio, basado en la cantidad de energía reflectante a lo largo del espectro.

3.1.1. Propiedades ópticas de las hojas

De acuerdo con (Gates, Keegan, Schleter, & Weidner, 1965), las propiedades ópticas de las hojas dependen de: las condiciones de radiación, la especie vegetal, el grosor de las hojas, la estructura de la superficie foliar, los niveles de contenido de clorofila, y la estructura interna de la hoja. La radiación solar incidente es la fuente primaria de energía que permite la ejecución de los diferentes procesos biológicos y fisicoquímicos de las plantas y por lo tanto es el principal factor que influye en sus propiedades. La respuesta de las plantas a la luz solar puede evidenciarse a través de tres efectos específicos (Lopez, 2012):

- Efectos térmicos: Aproximadamente el 70 % de la radiación solar incidente, es absorbida por las plantas y convertida en calor para procurar y permitir el mantenimiento de la temperatura corporal de la planta y su proceso de transpiración.

- Efectos fotosintéticos: La radiación activa fotosintética (usada en el proceso de la fotosíntesis), es aproximadamente el 28 % de la energía absorbida por una planta, e interviene en la conversión y producción de componentes orgánicos altamente energéticos.
- Efectos fotomorfogénicos: La naturaleza y cantidad de energía absorbida, transmitida y/o reflejada depende de la longitud de onda, del ángulo de incidencia, la rugosidad de la superficie, las diferencias en las propiedades ópticas y los contenidos bioquímicos de las hojas.

3.1.2. Reflectancia de la vegetación

Las propiedades de la reflectancia en la vegetación, para el rango de 0.45 a 2.45 μm , dependen de cada una de las siguientes características (Jensen, 2000):

- Textura superficial de la hoja e índice de refracción de la sustancia cuticular de la epidermis superior: controla la reflectancia de la superficie superior de la hoja
- Composición, cantidad y distribución de los pigmentos: determina la absorción de la radiación en el rango visible del espectro
- Estructura interna de la hoja: la dispersión de la radiación depende de la disposición de las células y los tejidos
- Contenido de agua: determina la absorción en el rango infrarrojo del espectro

De acuerdo con (Lopez, 2012), el comportamiento de la reflectancia en la vegetación, de manera específica para cada rango del espectro es:

- Espectro visible (400-700 nm): la región visible del espectro de reflectancia de la vegetación está considerada por las bajas reflectancias y transmitancias debido a las fuertes absorciones por parte de los pigmentos foliares.
- Espectro rojo e infrarrojo cercano (670-780 nm): En la franja de transición entre el rango visible del rojo y el rango del infrarrojo cercano, se presenta una de las características de absorción más importante de las curvas de reflectancias de la vegetación, debido a que se da un contraste o fuerte cambio entre el rango rojo y el infrarrojo cercano, caracterizado por un valor de reflectancia extremadamente bajo en el visible rojo, seguido por altas reflectancias en el rango infrarrojo cercano, lo cual se asocia con la poca reflectancia de la luz roja de la clorofila, la estructura interna y contenido de agua foliar. Esta característica de absorción tiene un ancho aproximado de 30 nm, entre los 700 y 740 nm, conocida como red edge, se considera su punto de inflexión para realizar comparaciones entre curvas espectrales de diferentes especies vegetales, debido a que este punto es el de máxima pendiente de la absorción sobre la curva y considerado como indicador del estrés y senescencia vegetal.
- Rango espectral del infrarrojo cercano (700-1300nm): Las plantas tienen una alta reflectancia y transmitancia en el infrarrojo cercano; la cantidad de energía reflejada, absorbida o dispersada varía entre especies y depende de la estructura interna foliar, por lo tanto, el factor determinante de la respuesta espectral de las plantas en el rango infrarrojo cercano es esta estructura. La distribución de los espacios de aire, así

como la organización, tamaño y forma de las células, son características que influyen en el paso de la luz a través de las hojas.

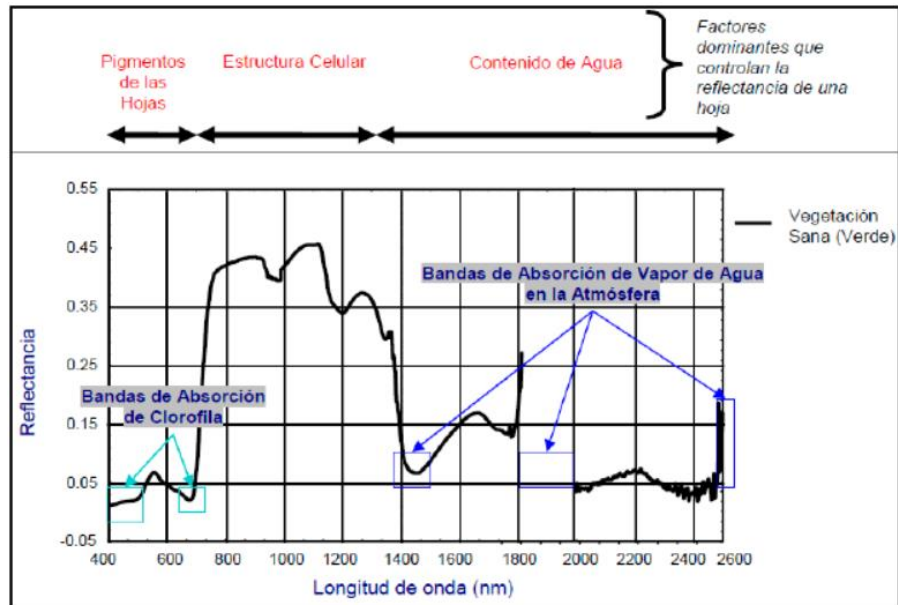


Ilustración 9. Características de un espectro de vegetación sana (400-2500 nm)

Fuente: (Lopez, 2012) adaptada de (Jensen, 2000)

4. Firmas espectrales del cultivo de coca

Las firmas espectrales que se presentaran en este trabajo corresponden al trabajo realizado por (Lopez, 2012) utilizando un espectro radiómetro HR4000, capaz de capturar firmas espectrales entre los rangos desde 200 hasta 1100 nanómetros. De esta manera se capturaron las firmas espectrales de los cultivos de coca en diferentes estados fenológicos: juvenil, vegetativo y maduro.




Estado fenológico	Foto	Especie taxonómica	Altura	Edad
Juvenil		Erythoxylum coca	0-20 cm	1-2 meses
Vegetativo			50-100 cm	6 meses
Maduro			>120 cm	> 1 año

Tabla 3. Estados fenológicos de la variedad de coca muestreada
Fuente: Autor adaptado de (Lopez, 2012)

Para esta toma, por cada estado fenológico se recolectaron 30 firmas espectrales en total, a 3 horas diferentes (9am, 12m, 3pm), considerando los distintos ángulos de incidencia de la radiación solar. El lente de captura del espectro radiómetro se sostuvo 50 cm por encima de la parte alta de cada planta, en posición nadir permitiendo asegurar que todas las mediciones se tomaran con el mismo ángulo entre la óptica de muestreo y el dosel, con un campo de visión constante de 25 grados (Lopez, 2012).

En este caso, se obtuvieron 10 firmas espectrales por cada estado fenológico, cuya interpretación de acuerdo con (Lopez, 2012) es:

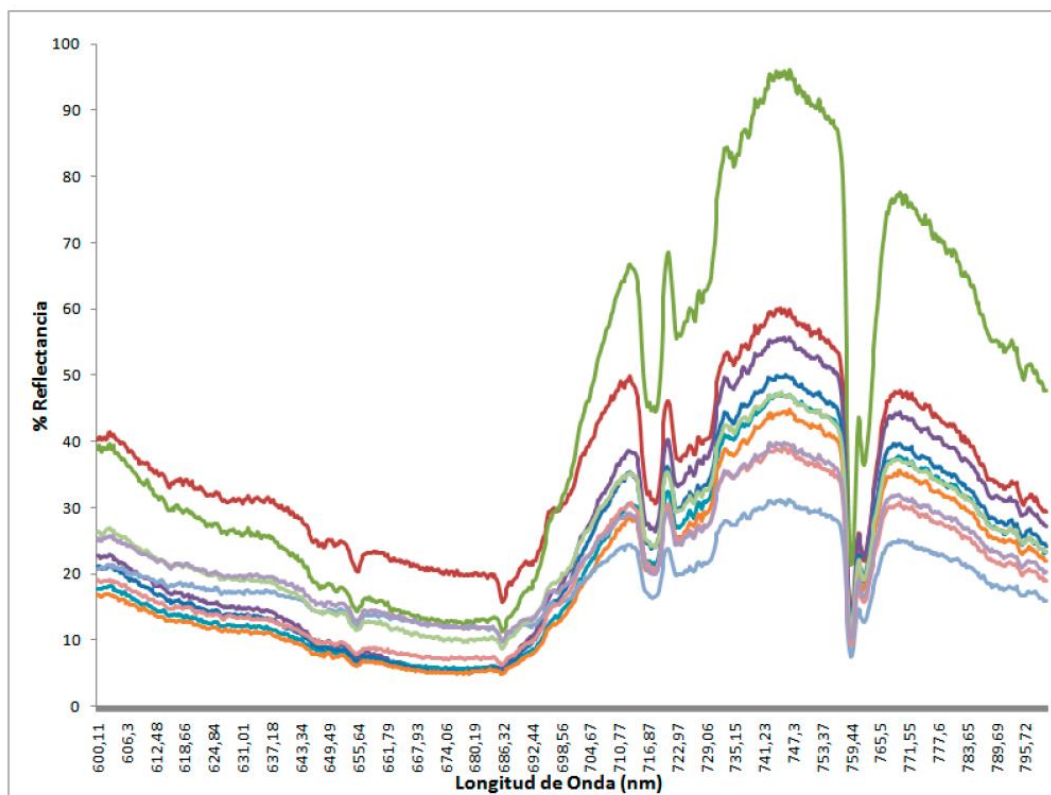


Ilustración 10. Firmas espectrales de plantas en estado juvenil (n=10 plantas)

Fuente: (Lopez, 2012)

Para el estado fenológico juvenil, se encontró un comportamiento similar entre sí, con valores de reflectancias en el espectro del infrarrojo entre un 30-50%, con una desviación estándar del 18%; en el rojo entre 5-30% de reflectancia, con una desviación estándar del 10%; y en el verde entre 15-25% (con mayor frecuencia en 20%) de reflectancia, con una desviación estándar del 6%.

Para el estado fenológico vegetativo, se observó un comportamiento más homogéneo en las respuestas de reflectancia de las plantas muestreadas, lo que indica una mayor densidad foliar en los individuos de esta edad que evita la influencia de la respuesta espectral del suelo. Al igual que el estado juvenil, en el rango del verde las reflectancias varían entre 10-30% pero con una desviación estándar del 2%; además difiere del estado juvenil en el rango del espectro rojo, donde la absorción es mayor con valores de reflectancia entre 5-10%, con una desviación estándar del 6%; al igual que se diferencian en el rango del infrarrojo cercano, debido a que las reflectancias son mayores que en una edad menor, con valores entre 45-70%, con una desviación estándar del 8%, evidenciando una curva con una caída de valores considerable en el espectro rojo versus un incremento de reflectancias en el infrarrojo cercano, indicando un mayor contenido de pigmentos clorofílicos, causantes de esa absorción y por lo tanto una mayor vigorosidad en las plantas.

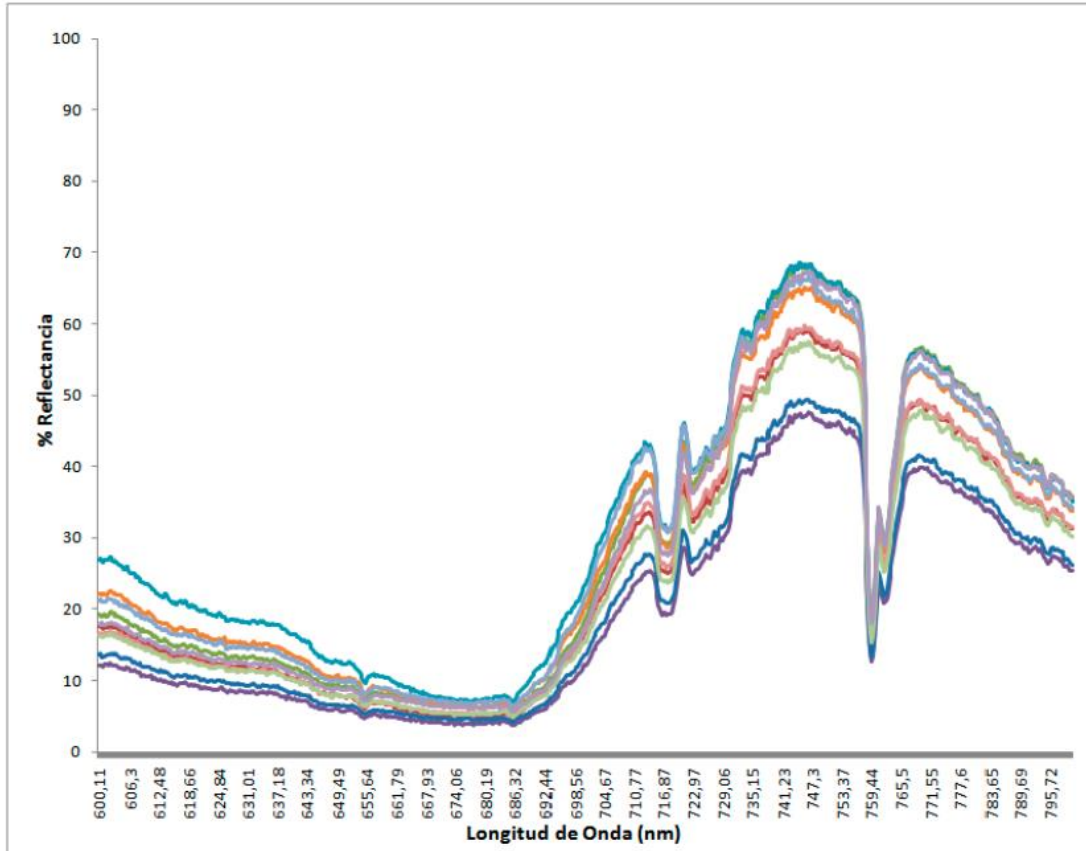


Ilustración 11. Firmas espectrales de plantas en estado vegetativo (n=10 plantas)
Fuente: (Lopez, 2012)

Por último, para el estado fenológico maduro, se observó mayor homogeneidad en las respuestas espectrales, ya que en este estado la cubierta foliar es máxima, y las otras coberturas como el suelo no influyen significativamente. A diferencia de las curvas de coca en estado vegetativo, los valores de reflectancia en el espectro verde, son mayores y están comprendidos en el rango entre 20-35%, con desviaciones estándar del 1%, lo que indica un mayor verdor en las hojas; para el espectro del rojo los valores se ubican en el rango del 5-10% con una desviación estándar del 5%; y por ultimo para el infrarrojo cercano los valores de reflectancia se ubican en el rango del 35-70% con una desviación estándar del 6%, encontrando valores de reflectancia similares al estado vegetativo tanto para el rojo como para el infrarrojo cercano, indicando una alta presencia de pigmentos clorofílicos y vigorosidad en las plantas.

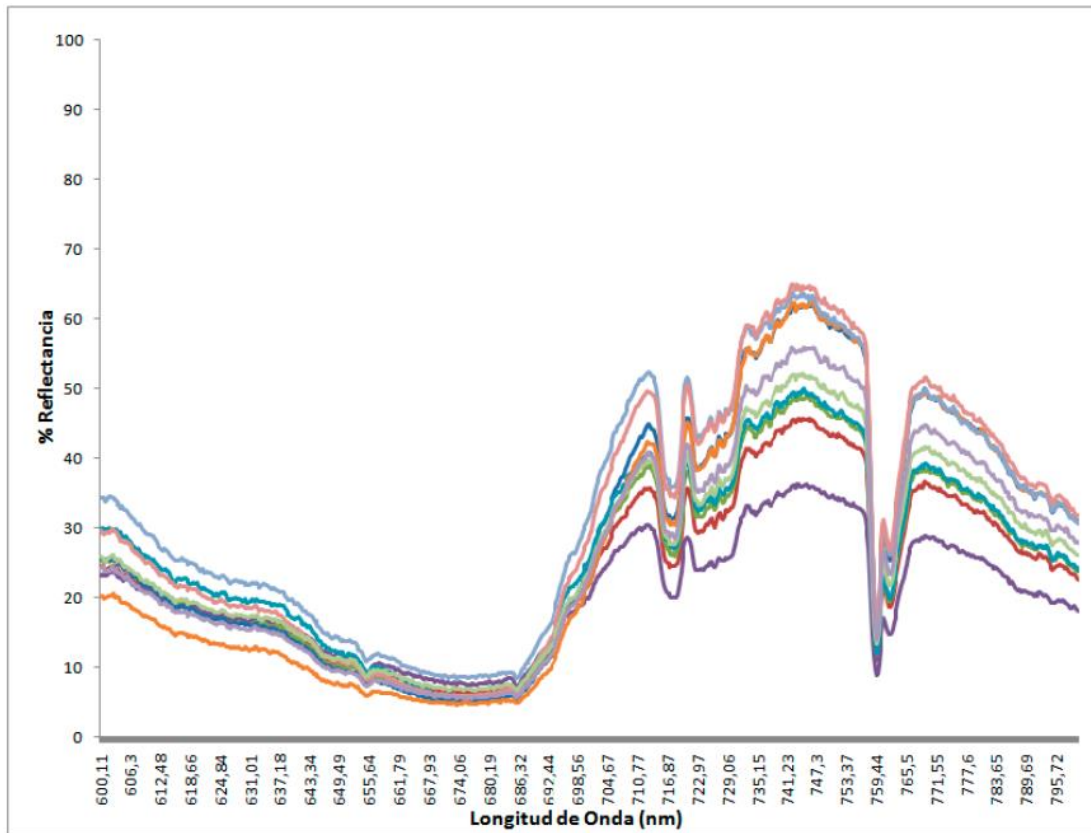


Ilustración 12. Firmas espectrales de plantas en estado maduro (n=10 plantas)
 Fuente: (Lopez, 2012)

Con base en las firmas espectrales para cada uno de los estados fenológicos, se obtuvo una que corresponde al promedio, de los muestreos realizados en campo. En las tres firmas promedio resultantes, se presentó una absorción en el rango comprendido entre 660-680 nm que se hace mayor a medida que avanza la edad en el cultivo; para los cultivos más maduros se encontró la máxima absorción de los tres estados, y para los cultivos juveniles la menor absorción, esto debido a los cambios en el área cubierta por el dosel. En el caso de la región del infrarrojo cercano (700-800 nm), los cultivos más maduros reflejan una mayor cantidad de la energía incidente, que aquellos de menor edad; esto debido a que las hojas sufren cambios anatómicos y fisiológicos internos a medida que avanza la edad, requiriendo menores cantidades de energía solar.

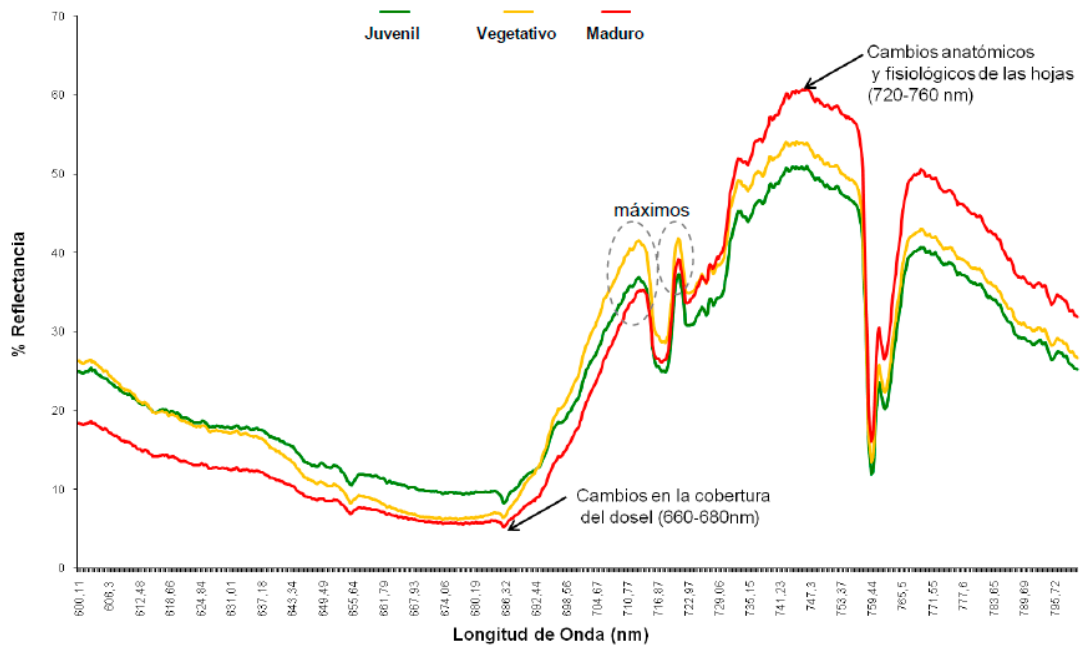


Ilustración 13. Comparación de firmas espectrales promedio por cada estado fenológico
 Fuente: (Lopez, 2012)

5. Área de estudio

Para la determinación del área de estudio, se trabajará con los datos provenientes del Observatorio de Drogas de Colombia – ODG. A través del catálogo de datos geográficos, pone a disposición del público en general, diferentes servicios como WMS (Web Map Service) y AGD (Map Server – ArcGIS) proyectados en cada una de las temáticas de oferta, consumo y criminalidad asociada, que explican el fenómeno de la problemática de las drogas en Colombia. El objetivo principal de este repositorio es proporcionar a la comunidad nacional e internacional, información objetiva, confiable, actualizada y comparable sobre la temática de las drogas y los delitos relacionados, de manera que permita una mejor comprensión del problema y que contribuya a la formulación y ajuste de políticas, toma de decisiones, diseño y evaluación de programas y proyectos (Observatorio de Drogas de Colombia - ODC, 2020).

Con el objetivo de obtener mejores resultados a la hora identificar cultivos ilícitos a través del procesamiento de las imágenes, se analizarán los datos correspondientes a la densidad de cultivos de coca en Colombia para el año 2018. Para ello, se utilizarán los datos espaciales de tipo vector generados en el marco del convenio de cooperación entre el Gobierno de Colombia y la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito a través del Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI). Los metadatos del shapefile a utilizar son:

Identificador	Descripción
Nombre del indicador	Densidad de cultivos de coca
Unidad de medida	hectáreas/km ²
Periodicidad del indicador	Anual
Periodo de referencia	31 de diciembre
Área temática	Análisis espacial
Escala geográfica del indicador	Nacional, regional, departamental
Descripción corta del indicador	Muestra el número de hectáreas sembradas con coca por kilómetro cuadrado
Alcance	Dinámica anual: aumento, reducción o mantenimiento del área sembrada con cultivos de coca al 31 de diciembre
Limitaciones	No da cuenta de las fluctuaciones de las áreas sembradas con cultivos de coca a lo largo del año; se realiza mediante herramientas automatizadas de análisis espacial en programas especializados de sistemas de información geográfica por lo tanto no tiene una fórmula de cálculo definida
Definición de las variables que componen el indicador	Cantidad de lotes por kilómetro cuadrado teniendo en cuenta el área sembrada con coca; valores cercanos a cero corresponden a menor cantidad de lotes y menor cantidad de área, si el valor aumenta significa que existe

	un mayor número de lotes o una mayor área sembrada de cultivos de coca por kilómetro cuadrado
Fuente de los datos	UNODC – SIMCI
Método de levantamiento o captura de datos	Interpretación visual de cultivos de coca en imágenes de satélite
Disponibilidad de los datos	Disponible en forma restringida a organismos públicos o privados mediante solicitud escrita.
Periodicidad de los datos	Anual

Tabla 4. Metadatos del shapefile de Densidad de cultivos de coca en Colombia para el año 2018

Fuente: (Observatorio de Drogas de Colombia - ODC, 2020)

De acuerdo con esta información, se pudo validar que la mayor concentración de cultivos de coca se encuentra en los departamentos de Nariño, Cauca, Putumayo, Caquetá, Córdoba, Antioquia, Bolívar y Norte de Santander.

Como se mencionaba anteriormente, el departamento de Nariño para el año 2018, aportaba un total de 41.903 ha con cultivos sembrados con coca, lo que equivale al 24,79% del total nacional. Siendo este el departamento donde más hectáreas sembradas de cultivos de coca se presentan en el país, el área de estudio para la descarga y procesamiento de las imágenes estará definido en esta región del país.

El departamento de Nariño está situado en el extremo suroeste de Colombia, colindando con la república de Ecuador. Cuenta con una extensión de 33.268 kilómetros cuadrados y limita por el norte con el departamento del Cauca, por el este con el departamento de Putumayo, por el sur con la república de Ecuador y por el oeste con el Océano Pacífico. En cuanto a su división administrativa, el departamento está dividido en 63 municipios, siendo Pasto la ciudad capital (Gobernación de Nariño, 2020).

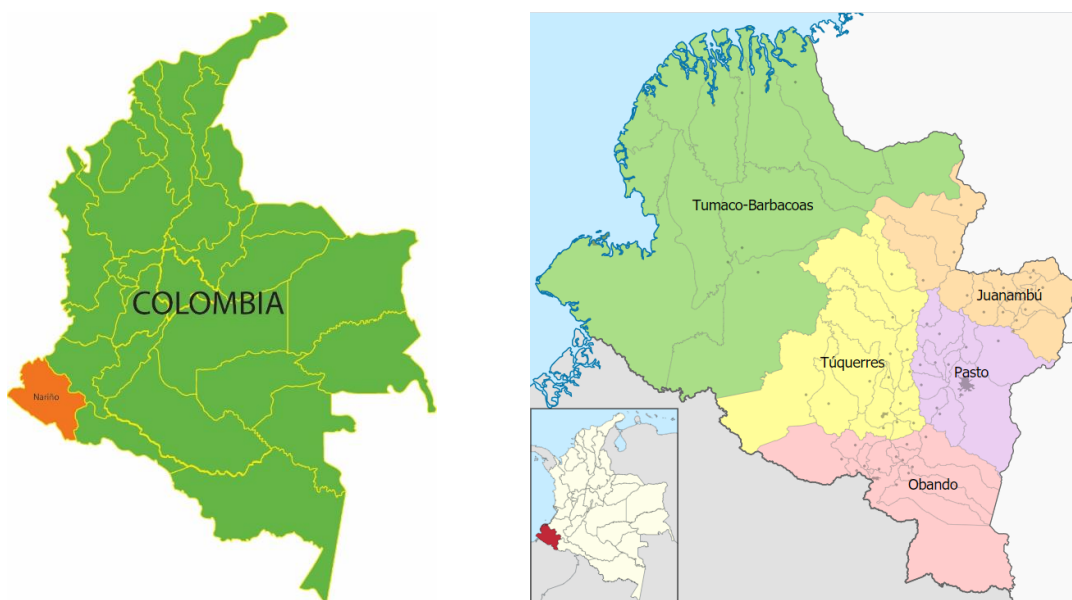


Ilustración 14. Referencia espacial del departamento de Nariño.

Izquierda: Ubicación espacial del departamento con respecto al país. Derecha: Provincias de Nariño

Fuente: Izq.: http://narino.cafedecolombia.com/narino/el_departamento/ubicacion_de_narino_en_colombia/. Der: https://es.wikipedia.org/wiki/Provincias_de_Nariño

Una vez definido el departamento a trabajar, se puede analizar la distribución de la densidad de cultivos de coca en el mismo. A escala departamental, los resultados obtenidos se aprecian en la siguiente ilustración.

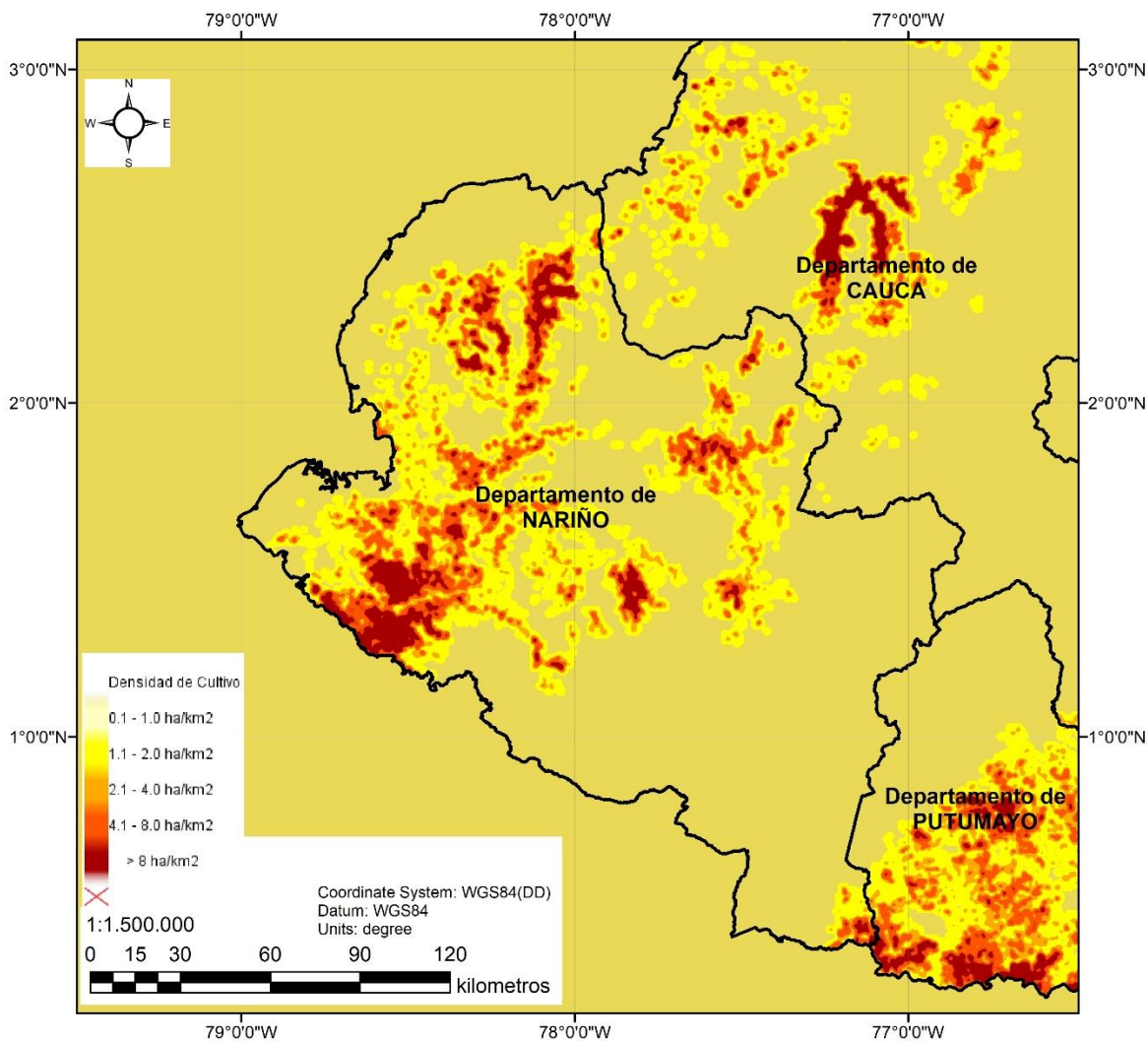


Ilustración 15. Densidad de cultivos de coca para el año 2018 en el departamento de Nariño
 Fuente: Autor con datos del GeoServer Web Map Service del Banco de Información Espacial del Proyecto SIMCI

De acuerdo con los datos presentados en la ilustración anterior, la mayor densidad de cultivos de coca se presenta hacia el costado sur oeste del departamento de Nariño, colindando con la republica de Ecuador y en cercanías al Océano Pacífico. Allí se ubica el municipio de Tumaco, que a lo largo de estos años se ha catalogado como la capital de la coca en Colombia, ya que por su ubicación estratégica es un punto privilegiado para el contrabando de los insumos necesarios para la transformación de la hoja de coca a través de la frontera, y por su cercanía al océano, permite que los cargamentos salgan hacia diferentes continentes de una manera mucho más rápida.

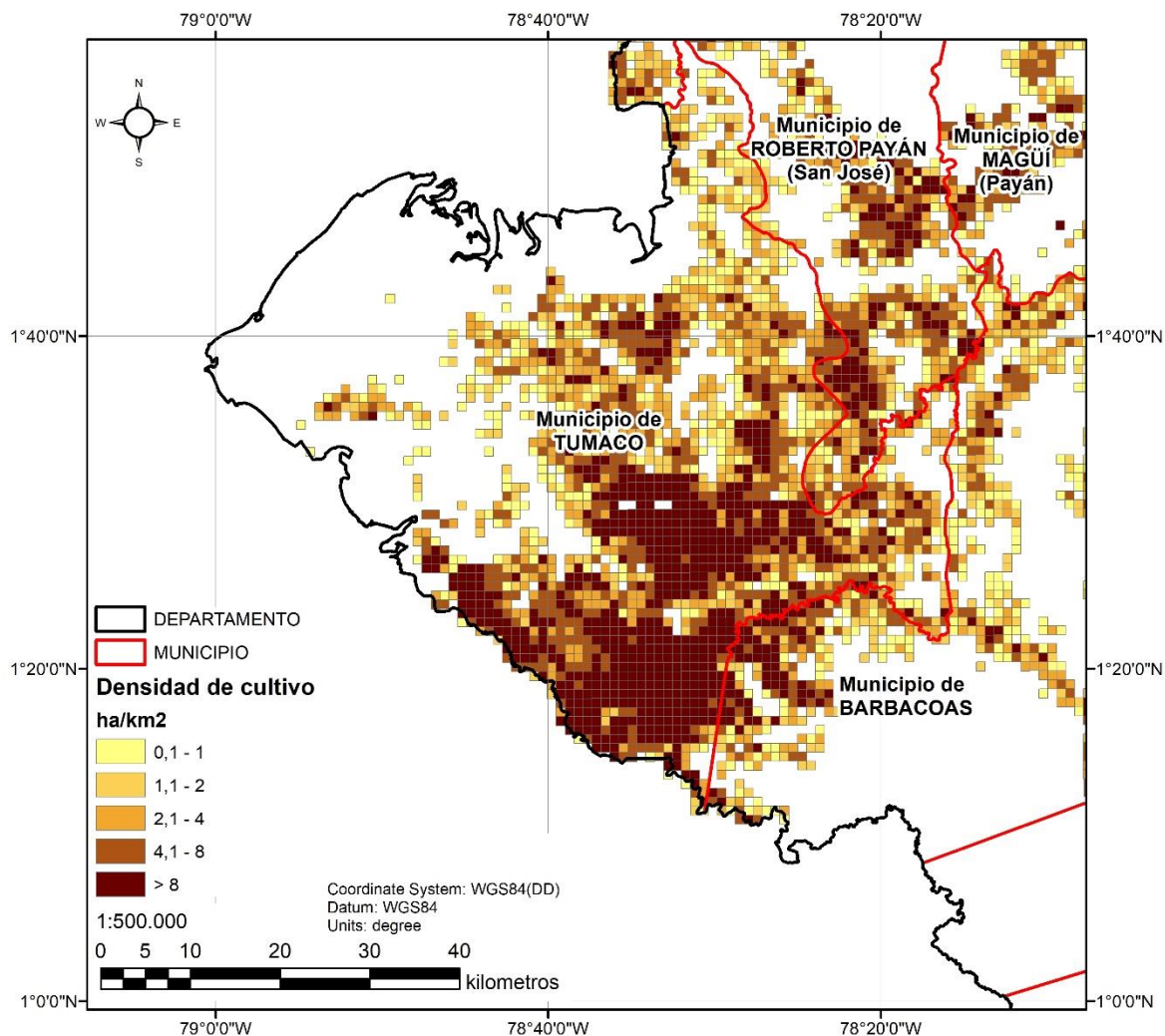


Ilustración 16. Densidad de cultivos de coca para el año 2018 en el municipio de Tumaco

Fuente: Autor con información vectorial obtenida del Catálogo de Servicios Geográficos – ODC

De acuerdo con los datos presentados en la ilustración anterior, y teniendo en cuenta las zonas donde se presentan más de 50 ha/km² de cultivos de coca, el área de trabajo está definido por el siguiente polígono:

Punto	Latitud	Longitud
1	1°19'49.1602" N	78°33'3.252" W
2	1°19'49.1602" N	78°32'31.172" W
3	1°19'16,641" N	78°32'31.172" W
4	1°19'16,641" N	78°33'3.252" W
Identificador Grilla UNODC – SIMCI		104_87_1_23
Área		0.99 km ² ≈ 1 km ²

6. Adquisición de imágenes

Una vez definida el Área de Interés (AOI por sus siglas en inglés), se procederá con la descarga de las imágenes satelitales para la identificación y delimitación de vegetación asociada a cultivos de hoja de coca, mediante fotointerpretación. Este proceso involucra 3 etapas: detección, discriminación e identificación, y para ello el mayor nivel de resolución espacial, temporal y espectral es necesario, no solo para permitir al interprete la definición clara de que cobertura está observando, sino además para garantizar que la delimitación sea lo más precisa posible (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.). Para ello, teniendo en cuenta la resolución espacial, y el acceso gratuito a las imágenes, se usarán los datos provenientes de la misión SENTINEL-2.

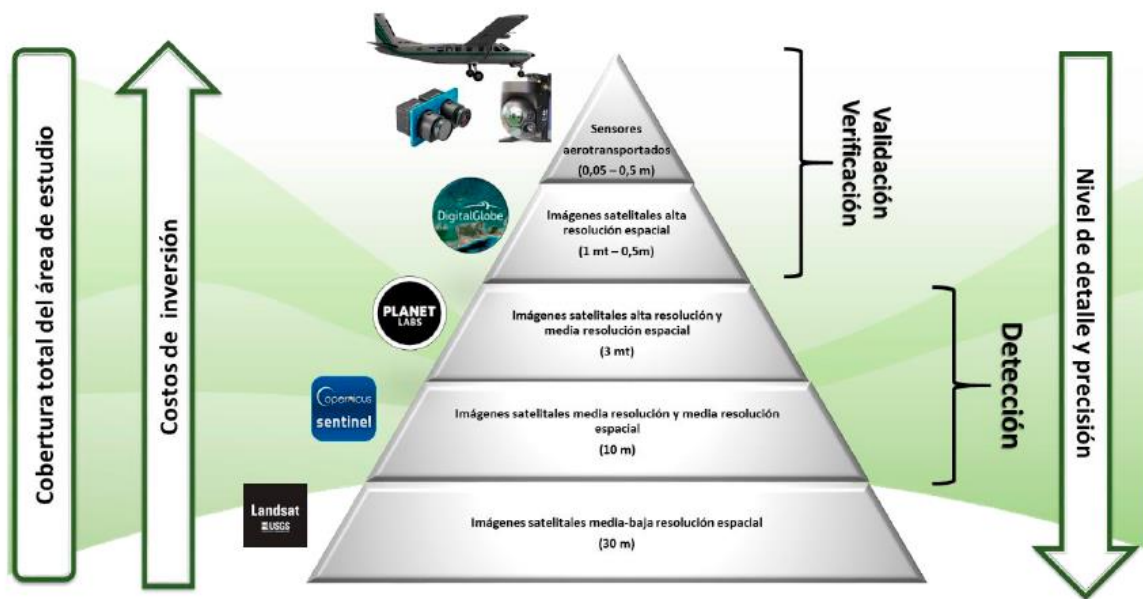


Ilustración 17. Enfoque de multisensoramiento remoto para la detección y verificación del área productiva con hoja de coca

Fuente: (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.)

6.1. SENTINEL-2

La misión Copernicus SENTINEL-2 comprende una constelación de dos satélites de órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol, con un desfase de 180° entre ellos. El objetivo principal de la misión es monitorear la variabilidad de las condiciones de la superficie terrestre, contando con un ancho de barrido de 290 km y una resolución temporal de 10 días en el Ecuador con un satélite y 5 días con ambos, en condiciones de poca nubosidad. Su cobertura está limitada entre las latitudes 56° Sur y 84° Norte. Cada una de las escenas provenientes por ambos satélites, son orto imágenes de 100x100 km en la proyección UTM/WGS1984 (European Space Agency - ESA, 2020).

6.1.1. Satélites que componen la misión SENTINEL-2

Como se mencionó anteriormente, esta misión está compuesta por 2 satélites denominados SENTINEL-2A y SENTINEL-2B.

El satélite europeo SENTINEL-2A forma parte de la familia de misiones de la European Space Agency (ESA) dentro de su programa espacial Copernicus. Se lanzó al espacio el 23 de junio de 2015, a una altura orbital de 786 km. Cuenta con una cámara multispectral de alta resolución, basada en las misiones francesas SPOT y en los satélites estadounidenses Landsat, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y de la vegetación. La cámara cuenta con dos grandes planos focales, uno en las bandas del visible y del infrarrojo cercano; y el otro, en el infrarrojo medio. Cada uno de ellos está equipado con 12 detectores con un total de 450.000 píxeles (SM GEODIM, 2020).

El satélite europeo SENTINEL-2B es el quinto satélite del programa espacial Copernicus, precedido por SENTINEL-1A y 1B, el SENTINEL-2A y el 3A. Fue lanzado al espacio el 7 de marzo de 2017 y es idéntico al SENTINEL-2A, estudiando la tierra mediante la carga útil MSI (Multi Spectral Instrument), dotado de tres espejos con una apertura equivalente de 150 mm (AgriSat Iberia, S.L., 2020).

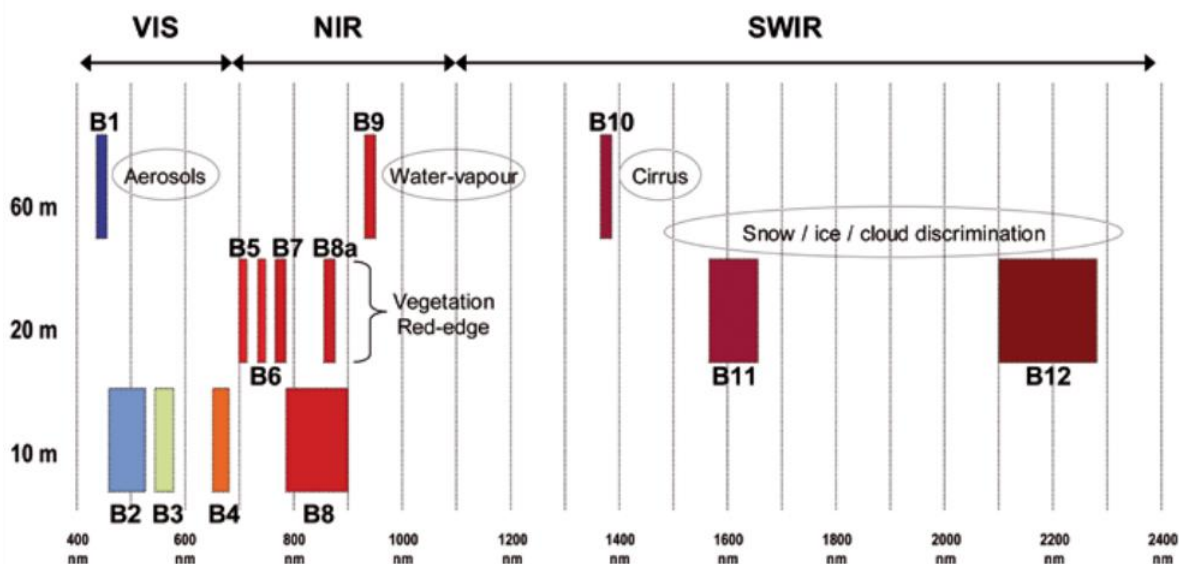


Ilustración 18. Cobertura espectral del SENTINEL-2

Fuente: <https://www.agrisat.es/lanzado-con-exito-el-satelite-sentinel-2b/>

Las características principales de estos satélites se resumen en la siguiente tabla:

Banda	Nombre de banda	SENTINEL-2A		SENTINEL-2B		Tamaño de píxel/Resolución(m)
		Longitud de onda (nm)	Longitud de onda (nm)	Ancho de onda (nm)	Longitud de onda (nm)	
1	Costal Aerosol	443.9	20	442.3	20	60
2	Blue	496.6	65	492.1	65	10
3	Green	560.0	35	559	35	10
4	Red	664.5	30	665	30	10
5	Vegetation Red Edge	703.9	15	703.8	15	20
6	Vegetation Red Edge	740.2	15	739.1	15	20
7	Vegetation Red Edge	782.5	20	779.7	20	20
8	NIR	835.1	115	833	115	10
8b	Narrow NIR	864.8	20	864	20	20
9	Water vapour	945	20	943.2	20	60
10	SWIR – Cirrus	1373.5	30	1376.9	30	60
11	SWIR	1613.7	90	1610.4	90	20
12	SWIR	2202.4	180	2185.7	180	20

Tabla 5. Características principales SENTINEL-2A

Fuente: Autor con datos de <https://eos.com/sentinel-2/>

6.2. Metodología de adquisición

Para la adquisición de las imágenes, se usará el servicio proporcionado por el USGS EarthExplorer (EE); el cual permite buscar, descargar y ordenar imágenes satelitales o aéreas; entre muchas otras más funcionalidades. Para facilitar la descarga de las imágenes para el AOI seleccionado, se generó un shapefile de tipo polígono definido por las coordenadas para la grilla 104_87_1_23.

Al acceder el visor del EE¹ y cargar el shapefile que delimita el AOI, se aprecia una previsualización del área así:

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

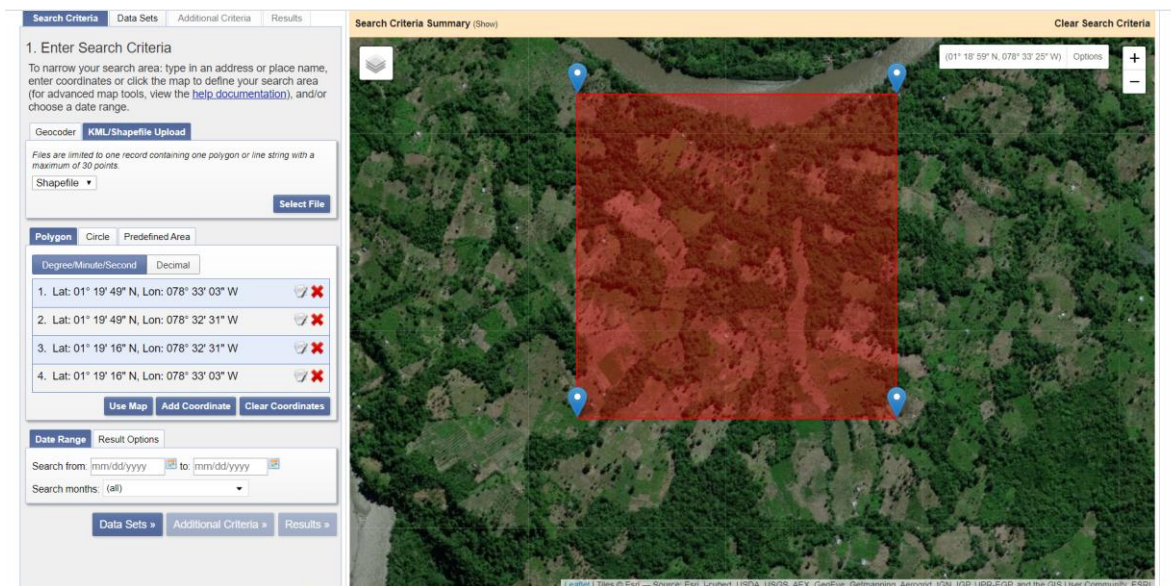


Ilustración 19. Previsualización del AOI

Fuente: USGS Earth Explorer

Así mismo, para refinar la búsqueda de las imágenes satelitales, se definieron los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor
Data set	Sentinel-2
Cloud cover	Less than 30%
Rango de fechas	01/01/2018 – 12/31/2018

Tabla 6. Parámetros para la búsqueda de imágenes satelitales

Fuente: Autor

Al ejecutar la búsqueda con estos parámetros, se encontraron 46 imágenes que cumplen con las especificaciones dadas. Sin embargo, es importante recordar que cada una de las escenas proporcionadas por Sentinel-2 cubre un área de 100x100 km, por lo cual es necesario validar que las imágenes resultantes, tengan recubrimiento dentro del AOI. Para ello, el servicio EE permite verificar la huella y la cobertura de cada una de las imágenes, para validar la cobertura y el porcentaje de nubosidad dentro del AOI definido.

De igual manera, dada la atemporalidad de los cultivos de hoja de coca, y teniendo en cuenta que no se tienen épocas definidas para su cosecha, al momento de validar la cobertura de las imágenes, es necesario contar con datos de épocas diferentes, para así facilitar la identificación e interpretación de resultados, comparando las coberturas para periodos diferentes.

Dicho esto, se seleccionaron dos imágenes con la menor nubosidad posible; una tomada en el mes de marzo y otra en el mes de agosto del año 2018, cuya cobertura se aprecia en las siguientes ilustraciones:

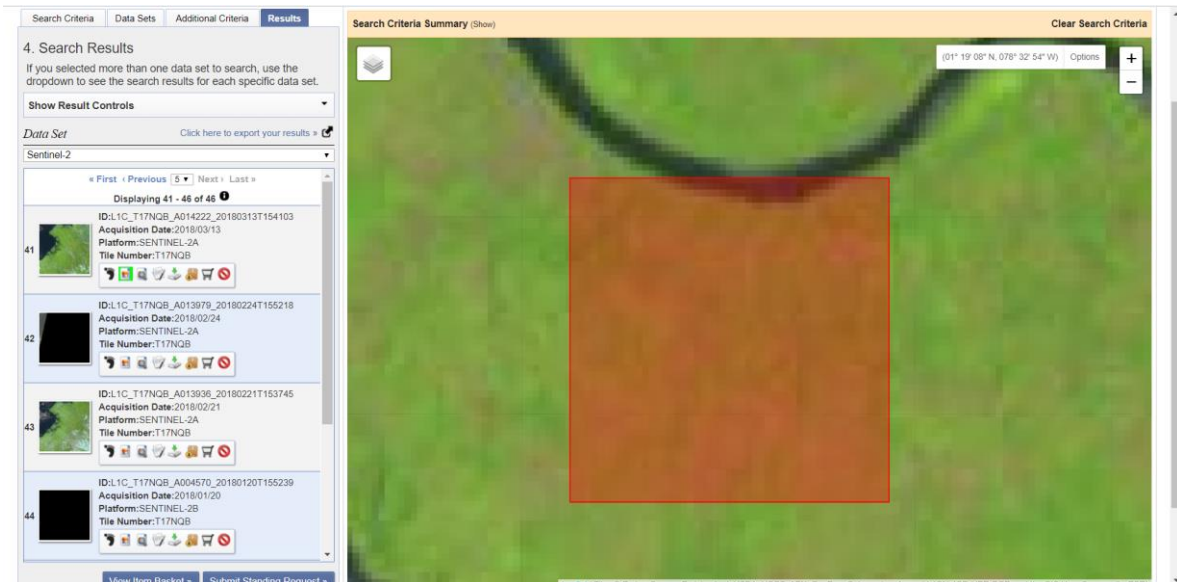


Ilustración 20. Recubrimiento del AOI de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103
Fuente: USGS EarthExplorer

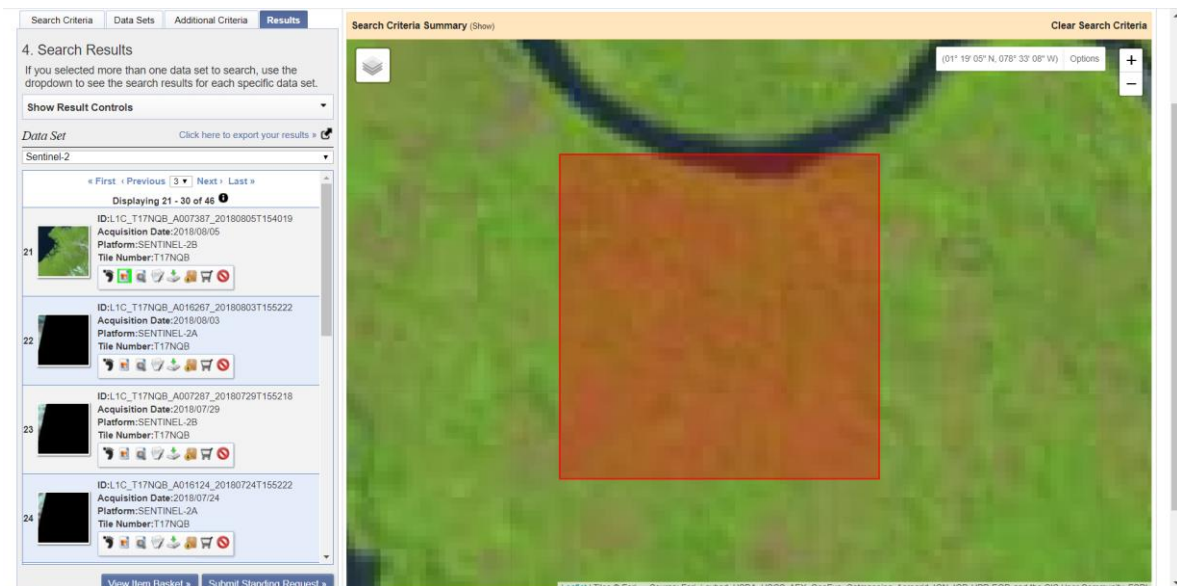


Ilustración 21. Recubrimiento del AOI de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019
Fuente: USGS EarthExplorer

Los metadatos para cada una de estas imágenes son:

Atributo	Valor
Entity ID	L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103
Acquisition Start Date	2018-03-13T15:41:03.077Z
Acquisition End Date	2018-03-13T15:45:44.483Z
Tile Number	T17NQB
Cloud Cover	16.6204
Agency	ESA
Platform	SENTINEL-2A

Orbit number	68
Orbit Direction	Descending Orbit
Product Format	JPEG2000
Processing Level	LEVEL-1C
Datum	WGS84
Map Projection	UTM
UTM zone	17N
EPSG Code	32617
Resolution	10,20,60
Units	Meter
NW Corner	1°48'32.12" N
	79°12'08.70" W
NE Corner	1°48'27.61" N
	78°12'57.56" W
SE Corner	0°48'55.66" N
	78°13'01.51" W
SW Corner	0°48'57.69" N
	79°12'11.25" W

Tabla 7. Metadatos de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103
Fuente: Autor con datos de <https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/10880/5487178/>

Atributo	Valor
Entity ID	L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019
Acquisition Start Date	2018-08-05T15:40:19.789Z
Acquisition End Date	2018-08-05T15:45:44.488Z
Tile Number	T17NQB
Cloud Cover	5.5886
Agency	ESA
Platform	SENTINEL-2B
Orbit number	68
Orbit Direction	Descending Orbit
Product Format	JPEG2000
Processing Level	LEVEL-1C
Datum	WGS84
Map Projection	UTM
UTM zone	17N
EPSG Code	32617
Resolution	10,20,60
Units	Meter
NW Corner	1°48'32.12" N
	79°12'08.70" W
NE Corner	1°48'27.61" N
	78°12'57.56" W
SE Corner	0°48'55.66" N
	78°13'01.51" W

SW Corner	0°48'57.69" N
	79°12'11.25" W

Tabla 8. Metadatos de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019

Fuente: Autor con datos de <https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/10880/4818184/>

7. Procesamiento de las imágenes

Para el procesamiento de las imágenes se utilizara PCI GEOMATICA, el cual es un software para procesamiento digital de imágenes satelitales de todo tipo de sensor aeroespacial que cuenta con dos niveles de funciones: Core que cuenta con todo lo necesario para clasificar imágenes multiespectrales, y Prime que ofrece muchas funciones analíticas de geoprocresamiento Ráster además del análisis de datos RADAR (*Geosoluciones, 2020*).

7.1. Metodología de procesamiento

Dado que las bandas de las imágenes provenientes de los satélites SENTINEL-2, cuentan con diferentes resoluciones, se realizará una combinación aquellas que cuentan con un tamaño de píxel de 10 m, para obtener una mayor precisión a la hora de identificar cultivos con hoja de coca. Para el caso de SENTINEL-2, esta imagen corresponde a la composición color natural (R=Banda 3, Green=Banda 2, Blue=Banda 1).

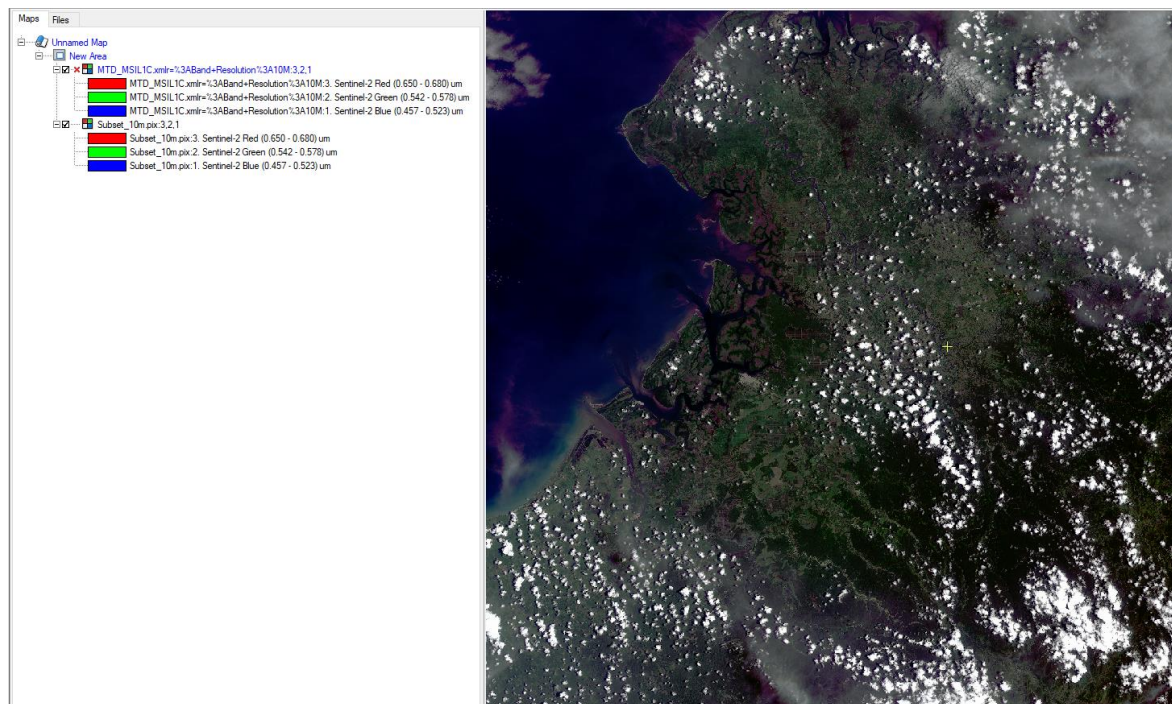


Ilustración 22. Composición color natural para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103

Fuente: Autor

Dada la magnitud de la escena descargada, y teniendo en cuenta que el AOI en este caso corresponde aproximadamente a 1 km², se realizara un recorte o subset para que de esta manera la interpretación y procesamiento de la imagen sea mucho más ágil. Hecho esto, la imagen resultante se aprecia en la siguiente ilustración.

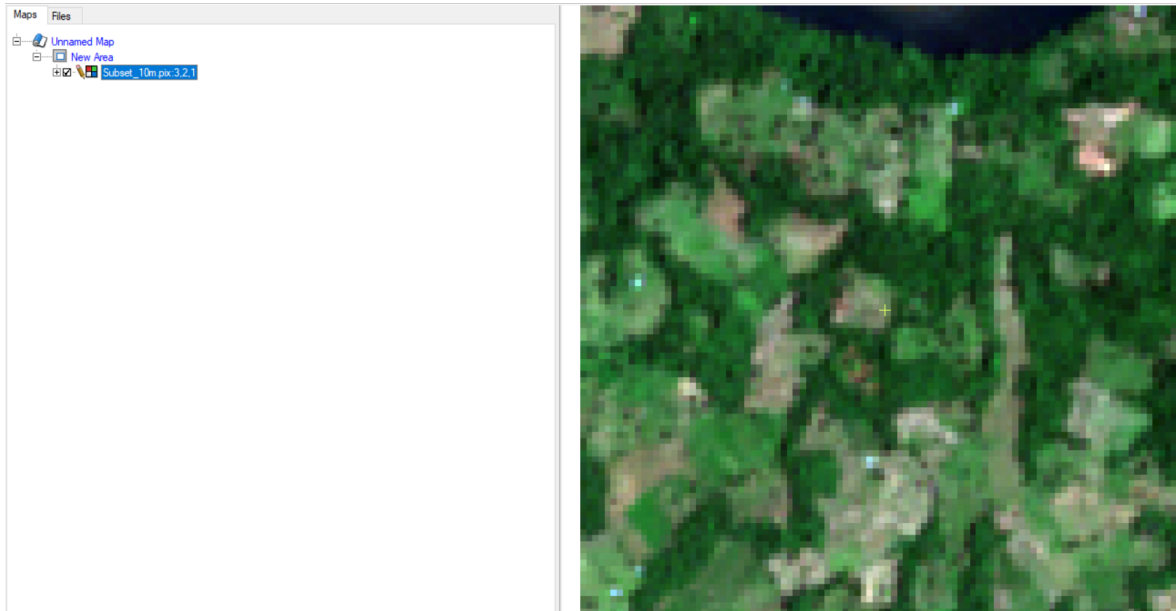


Ilustración 23. Subset del AOI para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103

Fuente: Autor

Ahora bien, la resolución radiométrica de los datos de teledetección se define como la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital. Asimismo, se define la amplitud o extensión radiométrica como el intervalo dinámico, o máximo de niveles digitales, que pueden ser detectados por un sensor particular (Labrador, Évora, & Arbelo, 2012). Estos datos están representados por números digitales positivos que varían del 1 hasta el valor resultante de la potencia elegida de 2 (por ejemplo, un sensor de 12 bits sería 2^{12} o 4096 niveles).

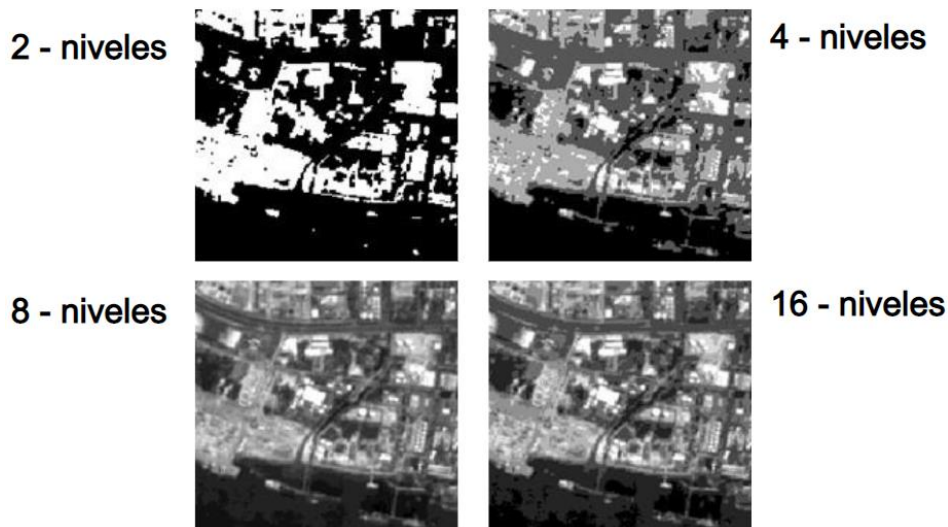


Ilustración 24. Niveles de resolución radiométrica

Fuente: Los fundamentos de la percepción remota satelital publicado por Ynez La Rosa en <https://slideplayer.es/slide/3382500/>

En este caso, las imágenes SENTINEL-2 cuentan con una resolución radiométrica de 16 bits lo que implica que los niveles de energía están codificados a niveles digitales

comprendidos entre 1 y 65535. De acuerdo con esto, para obtener reflectividades entre 0-1, se deben dividir los niveles digitales originales entre 10.000. En este caso, los resultados al aplicar este proceso a las bandas Red, Green, Blue y NIR son:

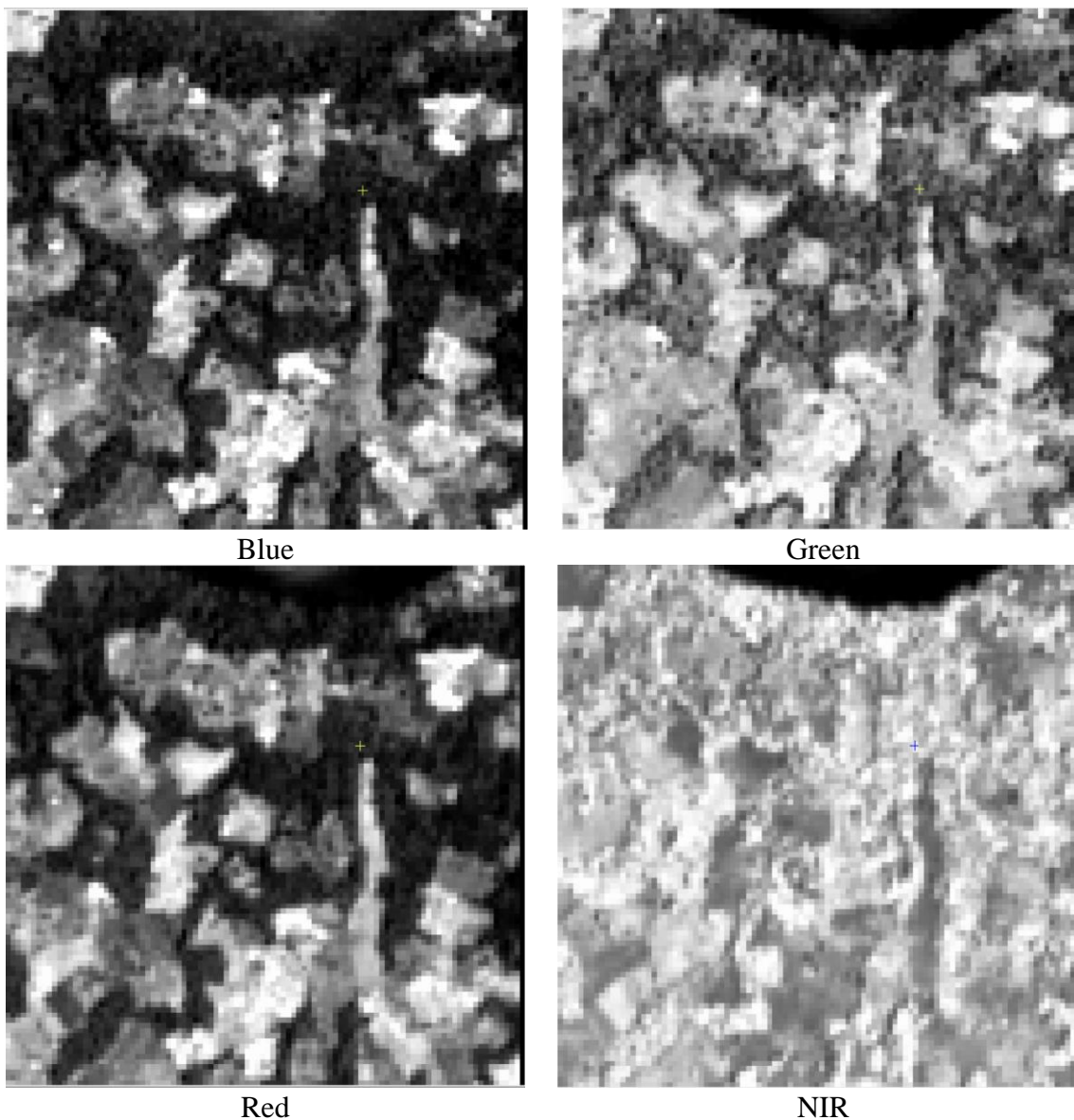


Ilustración 25. Resultados de la conversión a reflectividades para cada una de las bandas de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103
Fuente: Autor

Al validar el histograma para cualquiera de las bandas, se pueden apreciar los resultados obtenidos al transformar la imagen a valores de reflectividad entre 0 y 1.

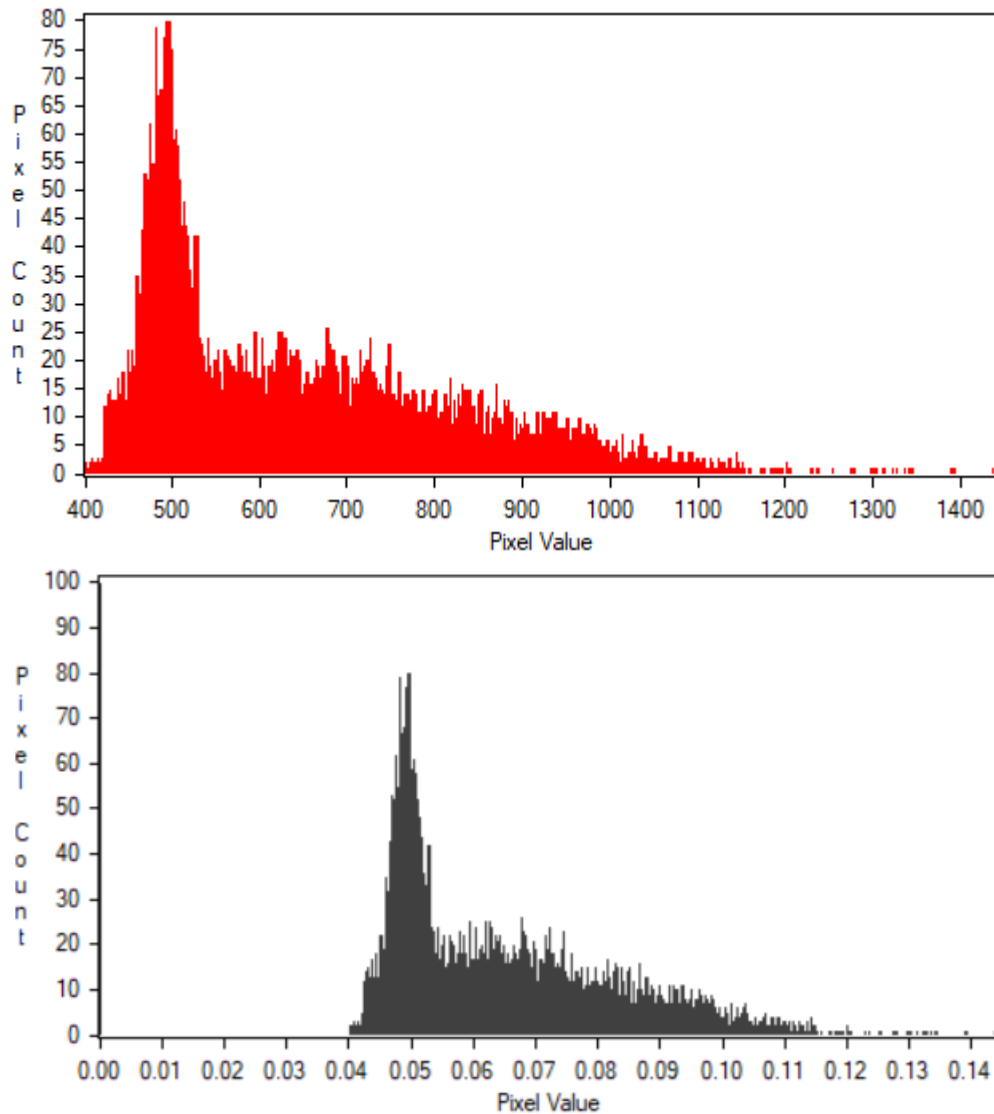


Ilustración 26. Histograma para la banda del rojo de la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103
 Superior: Imagen original – Inferior: Imagen transformada a valores de reflectividad entre 0-1
 Fuente: Autor

De acuerdo con el histograma que se aprecia en la parte inferior de la ilustración anterior, los niveles digitales para cada uno de los pixeles efectivamente se encuentran comprendidos en valores entre 0-1, con una media de 0.0633, mediana de 0.0585, desviación estándar de 0.01822 y un máximo de 0.1442.

Ahora para lograr categorizar y agrupar áreas con características particulares con respecto a otras, se hará uso de los índices. Estos son un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los pixeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena. (Muñoz, 2013)

Un índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal. También, corresponde a un número generado por alguna combinación de

bandas espectrales y que puede tener alguna relación con la cantidad de vegetación presente en un píxel dado. Estos índices son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de diferentes cubiertas. Los valores bajos de los índices de vegetación usualmente indican vegetación poco vigorosa, mientras valores altos indican vegetación muy vigorosa (Muñoz, 2013). Estos índices se dividen en dos categorías: basados en la pendiente y en la distancia. En esta ocasión, se centrará el estudio en los índices basados en la pendiente.

Los índices basados en la pendiente son combinaciones de las bandas roja visible e infrarroja cercana y se usan extensamente para generar índices de vegetación. Los valores indican tanto el estado como la abundancia de la cobertura y biomasa de la vegetación verde (Abaurrea, 2013). Se usan estas dos bandas, dado que en la infrarroja cercana es en la cual la vegetación refleja más energía, y en la roja visible es en la cual la vegetación absorbe la energía para el proceso de la fotosíntesis. El término “basado en la pendiente” se refiere a que, al analizar los valores resultantes del índice de vegetación, se comparan esencialmente las pendientes de las líneas que pasan a través del origen y de los píxeles representados en un gráfico, con la reflectancia de una banda en el eje de las X y la reflectancia de la otra en el eje de la Y (Muñoz, 2013).



Ilustración 27. Gráfico para los valores del índice basado en la pendiente
Fuente: (Muñoz, 2013)

A continuación, se presentan algunos índices basados en la pendiente:

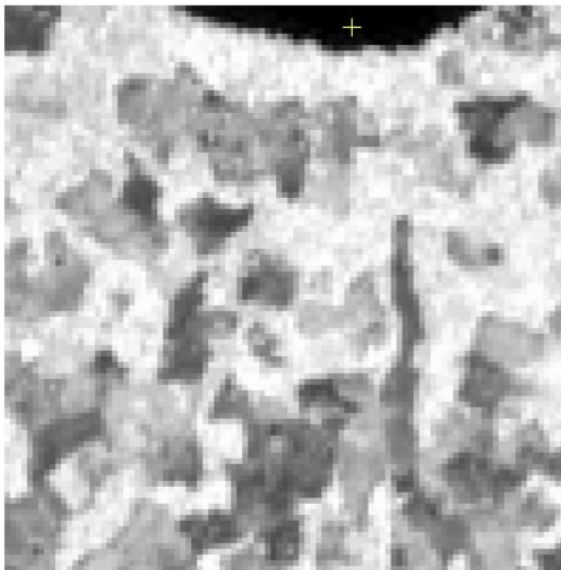
Nombre	Ecuación	Características	Autor y año
NDVI (Índice de Vegetación de diferencia normalizada)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Minimiza efectos topográficos y produce escala lineal de medición. La escala va de -1 a 1 con el valor cero representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación. La normalización	Rouse et al. 1974

		que realiza reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos. Gran sencillez matemática	
TVI (Índice de Vegetación transformado)	$TVI = \sqrt{\frac{NIR - RED}{NIR + RED}} + 0.5$	La constante 0,50 se introduce para evitar operar con valores negativos del NDVI. El cálculo de la raíz cuadrada se emplea para corregir los valores del NDVI que se aproximan a una distribución Poisson e introducir una distribución normal.	Deering et al. 1975
RVI (Índice de Vegetación de cociente)	$RVI = \frac{NIR}{RED}$	Poco sensible a las condiciones de iluminación, pero mucho a las propiedades ópticas de la tierra.	Pearson y Miller 1972
NRVI (Índice de Vegetación de cociente normalizado)	$NRVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$	El resultado del NRVI es normalizado. Es similar al NDVI, reduce los efectos de la topografía, la iluminación y los efectos atmosféricos, además de crear una distribución normal estadísticamente deseable	Baret y Guyot (1991)

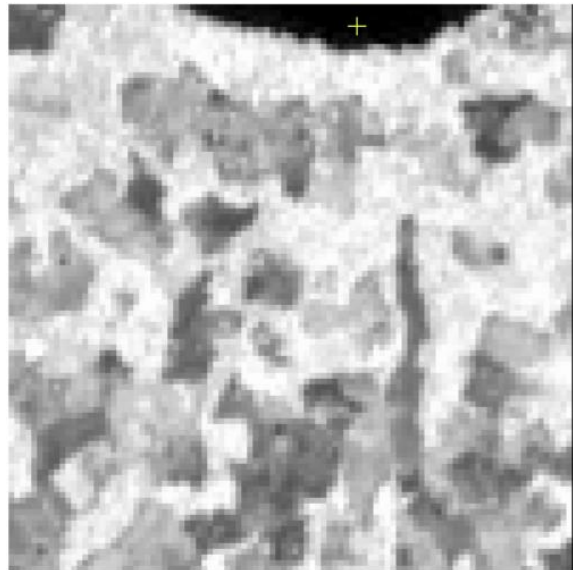
Tabla 9. Principales índices basados en distancia

Fuente: Autor adaptado de (Abaurrea, 2013) y (Muñoz, 2013)

Una vez definidos estos índices, al ser aplicados sobre el AOI, se obtienen los siguientes resultados:



NDVI



TVI

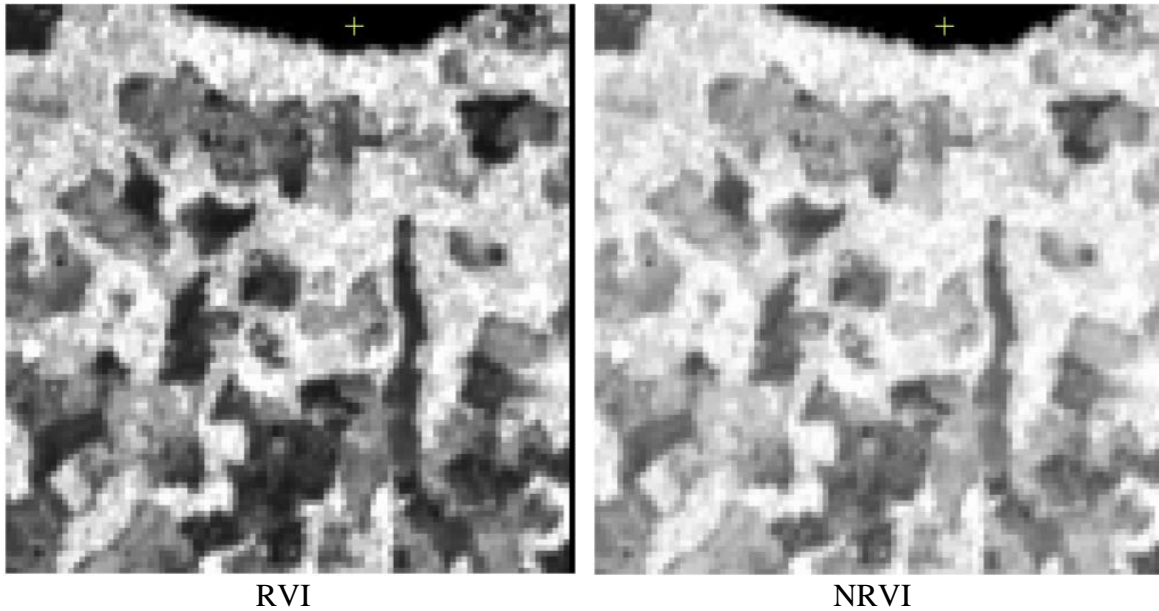




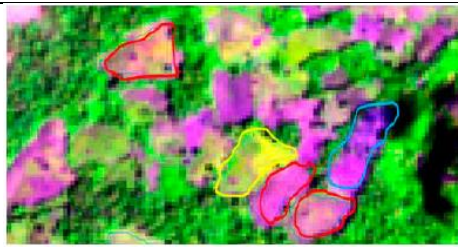
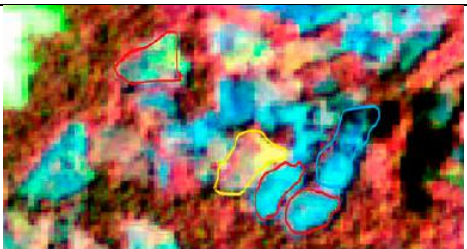
Ilustración 28. Índices de vegetación aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103
Fuente: Autor

De acuerdo con la ilustración anterior, se puede validar que en términos de contraste el Índice de Vegetación de cociente (RVI) es el que mejor permite discriminar algunas de las coberturas presentes en el AOI. Para este índice, cuando un píxel toma valores cercanos a 0 (lo que resulta en tonalidades oscuras), se puede categorizar y clasificar como cuerpos de agua donde hay ausencia de vegetación, como se aprecia en la parte superior de los resultados obtenidos al aplicar los índices. Otra categoría que se puede discriminar fácilmente es la vegetación vigorosa (de tipo bosque); donde al contrario de las zonas donde hay ausencia de vegetación, se encuentran valores altos cercanos a 1 para cada píxel donde las tonalidades se aprecian de color blanco. Para el AOI, están zonas se encuentran distribuidas a lo largo de toda el área, excluyendo estas zonas de la presencia de cultivos de hoja de coca.

Los resultados obtenidos al calcular el Índice de Vegetación de cociente permiten excluir de manera preliminar algunas zonas del AOI donde por sus características pictórico-morfológicas, hay menor probabilidad de presencia de cultivos ilícitos en este caso de hoja de coca (como cuerpos de agua o bosques) por lo que se puede continuar con el procesamiento de las imágenes, priorizando el análisis en el área restante.

Continuando con la delimitación de cultivos ilícitos, la coca en todos sus estados vegetativos puede ser considerada como una composición de áreas donde se mezclan zonas de alta y media densidad foliar con las de baja densidad foliar. Así mismo, dependiendo de la densidad también se tiene una respuesta diferente del suelo, permitiendo así que la respuesta espectral de un lote de coca se encuentre en un amplio rango espectral. Por tal razón para una mejor identificación, el intérprete debe tener en cuenta los elementos propios de la imagen, los análisis históricos de datos de las detecciones, la información secundaria de diversas fuentes tales como antecedentes de erradicación manual, así como información adicional que pueda ser suministrada por diferentes agencias del gobierno o el Sistema de Naciones Unidas. (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el Sistema Integrado de Información y Monitoreo Antinarcoáticos (SIIMA), ha generado diferentes fichas que sirven como guía para el proceso de interpretación visual del cultivo de coca en estado productivo. Allí, se describen las generalidades del proceso de interpretación visual teniendo en cuenta las características pictórico – morfológicas; así como otros factores adicionales. En estas fichas, se documentan los patrones espectrales, espaciales y de información de contexto que se deben usar para una adecuada detección, identificación y delimitación del cultivo de hoja de coca. Teniendo en cuenta, que para el AOI se utilizó una imagen SENTINEL, la ficha correspondiente será:

CAMPO	DESCRIPCION	
ID	1	
Nombre	INTERPRETACIÓN CULTIVOS COCA CON IMÁGENES DIGITALGLOBE – SENTINEL2	
Descripción	Imagen georreferenciada, principalmente de zona boscosa donde se muestran los límites de los polígonos delimitados sobre la imagen de alta resolución y se puede confirmar: 3 lotes de cultivos de coca (en rojo), así como deforestación y suelos en preparación para la siembra (en azul) así como un tipo de vegetación arbustiva que no correspondería con cultivos de hoja de coca (en amarillo), estas últimas dos zonas no se consideran áreas de siembra en estado productivo en este momento, se puede evidenciar las diferentes respuestas espectrales en las imágenes de cada sensor de acuerdo con las combinaciones de las bandas.	
Muestras graficas	 <p data-bbox="548 1167 1263 1199">INTERPRETACIÓN DE COCA EN IMAGEN DIGITAL GLOBE</p>	
Muestras visuales de interpretación	 <p data-bbox="483 1444 850 1476">SENTINEL-2 combinación 3-2-1</p>	 <p data-bbox="971 1444 1338 1476">SENTINEL-2 Combinación 2-4-3</p>
	 <p data-bbox="475 1722 859 1753">SENTINEL-2 combinación 7-3-10</p>	<p data-bbox="922 1476 1385 1860">Las respuestas espectrales de los suelos en preparación en todas las combinaciones de color generan tonos muy brillantes y texturas muy finas, los demás tipos de vegetación arbustiva al presentar una mayor densidad de siembra o densidad foliar presentan tonalidades de color asociados a la máxima reflectividad de la vegetación en las longitudes de onda del Infrarrojo cercano o el verde. Los cultivos de hoja de coca en estado productivo tienen una mezcla de las dos coberturas anteriormente mencionadas sin que resalte una más que otra, dado esto el patrón de siembra de la hoja de coca.</p>

Metadatos de la ficha	Lugar	Tumaco – Nariño
	Coordenadas	78°33'19.759" W 1°31'8.389" N – 78°33'8.359" W 1°30'55.497" N
	Interprete	
	Entidad	Policía Nacional

Tabla 10. Ficha de ejemplo sobre el proceso de interpretación y delimitación de cultivos de hoja de coca en imágenes SENTINEL a partir del patronamiento visual en imágenes DigitalGlobe

Fuente: (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.)

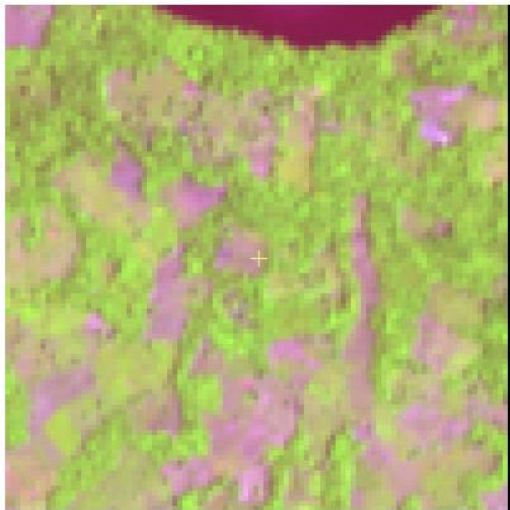
Así mismo, buscando facilitar el análisis visual e interpretación de las imágenes, se pueden realizar realces o mejoras a través de un conjunto de técnicas encaminadas a situar o disponer mejor de los datos (Rejas, 2007). Para ello, PCI GEOMATICA ofrece los siguientes tipos de realce:

Tipo	Descripción
Ninguno	Elimina todos los realces y muestra la imagen original sin corregir
Lineal	Mejora el contraste general de una imagen realzando los valores mínimos y máximos de una imagen, uniformemente sobre todo el rango dinámico posible. Este realce se adapta mejor a imágenes que tienen una distribución normal de los Niveles Digitales
Raíz	Aplica un realce con una función del tipo raíz cuadrada (también conocido como realce logarítmico), el cual comprime los valores de los Niveles Digitales más altos en la imagen y expande desproporcionalmente los valores más oscuros. Los valores originales más oscuros de la imagen reciben un contraste más alto que los valores más brillantes
Adaptable	Aplica una curva de realce óptimo que es una derivada adaptada del histograma de la imagen
Ecuilización	Aplica una ecualización del histograma
Inverso	Aplica un realce inverso, que asigna los niveles de gris en base a su frecuencia de ocurrencia

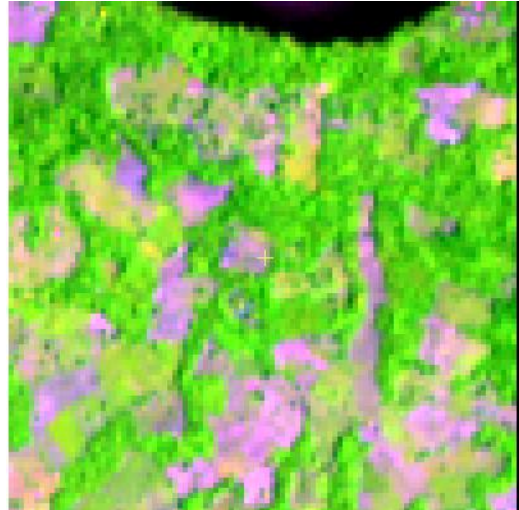
Tabla 11. Tipos de realce PCI GEOMATICA

Fuente: Autor con datos de (GeoSoluciones, s.f.)

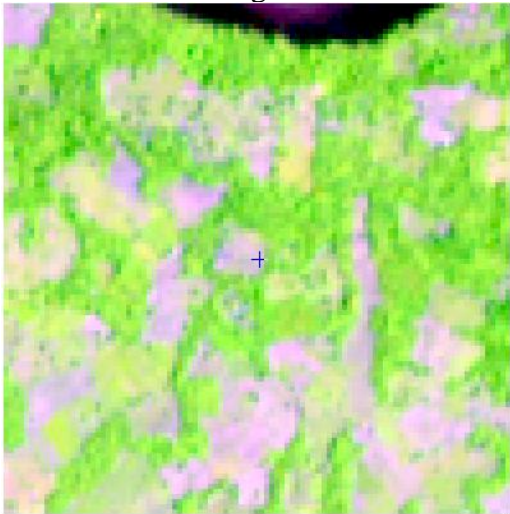
En este caso, al aplicar los realces a la imagen LIC_T17NQB_A014222_20180313T154103, para la combinación Green-NIR-Red, de acuerdo con la ficha de interpretación de cultivos para imágenes SENTINEL-2, se obtienen los siguientes resultados:



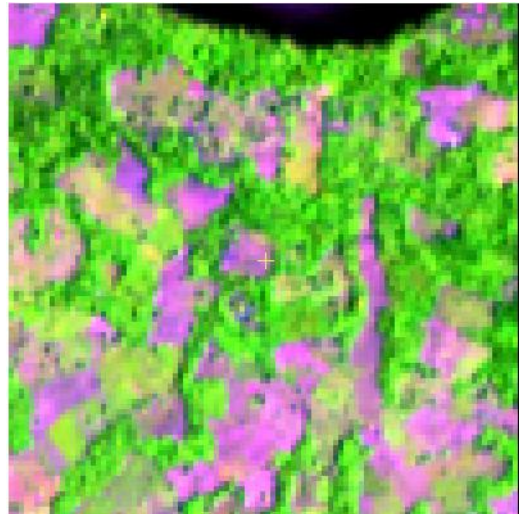
Ninguno



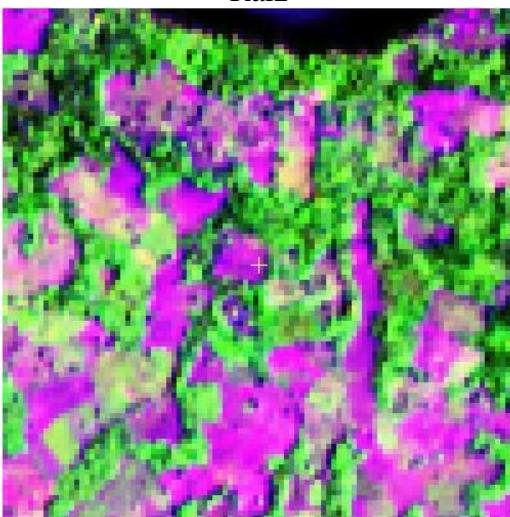
Lineal



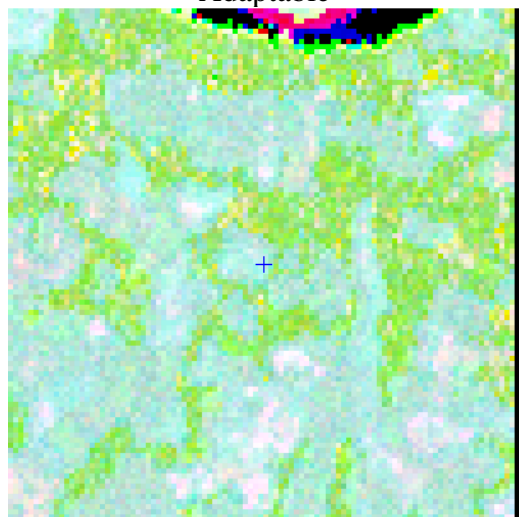
Raíz



Adaptable



Ecuación



Infrecuencia

Ilustración 29. Realces aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103

Fuente: Autor

De acuerdo con los resultados obtenidos al aplicar los realces a la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103, y como se puede apreciar en la ilustración anterior, al aplicar el de tipo lineal, adaptable y ecualización se pueden apreciar unos valores de contraste óptimos para la interpretación e identificación de cultivos de hoja de coca, de acuerdo con la ficha elaborado por el SIIMA.

De manera preliminar, analizando la imagen resultante al aplicar el realce de tipo Ecualización, se pueden apreciar en algunas zonas tonos muy brillantes y texturas muy finas, lo cual corresponde con la respuesta espectral de suelos en preparación, y que es concordante al comparar esta combinación de bandas de la imagen con la correspondiente en composición color natural.

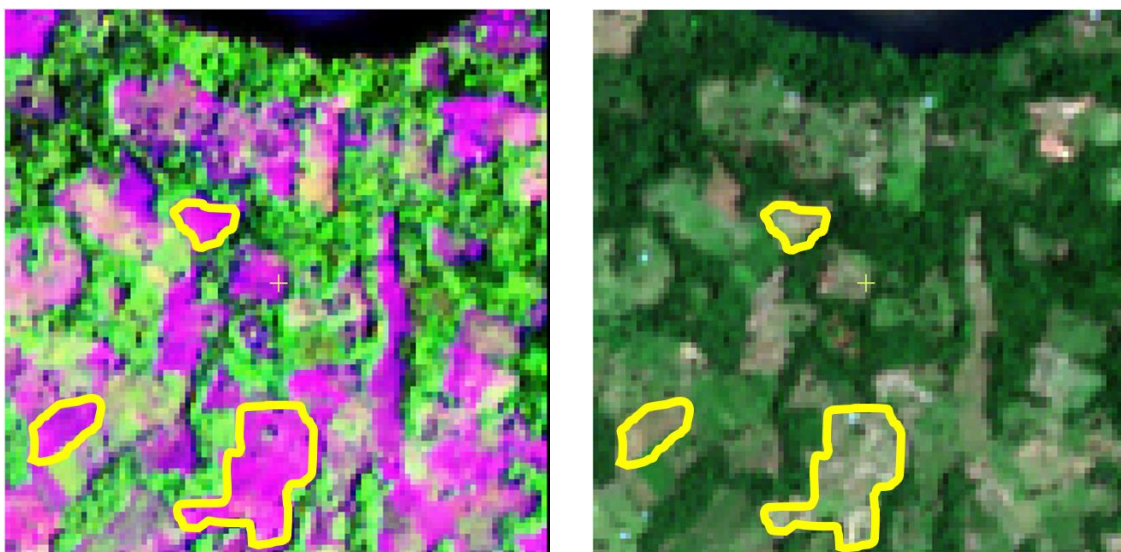


Ilustración 30. Delimitación preliminar de suelos en preparación de acuerdo con la respuesta espectral para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103

En amarillo delimitación de los polígonos con suelos desnudos. Izquierda: Combinación Green-NIR-Red con realce de tipo Ecualización. Derecha: Combinación 3-2-1 sin realce

Fuente: Autor

Hasta ahora las transformaciones y operaciones que se han realizado sobre la imagen, incluido el cálculo de los Índices de vegetación, corresponden a transformaciones puntuales donde el píxel resultante de la operación depende únicamente del valor del píxel de entrada. Sin embargo, existen otras formas de tratamiento para las imágenes, que se realizan teniendo en cuenta la respuesta espectral que cada píxel tiene en relación con la de sus vecinos; a esto se le conoce como transformaciones locales, donde se incluyen operaciones como suavizado, media, realces de borde, etc.; que se pueden clasificar en filtros lineales, como la media o no lineales como la mediana (Aguirre, 2013). Así mismo, estas transformaciones o filtros se pueden clasificar de tipo paso bajo o paso alto; en este caso se enfocará el estudio en la primera categoría.

Los filtros de paso bajo tienen como objetivo suavizar la imagen, siendo útiles cuando se supone que la imagen tiene gran cantidad de ruido y se quiere eliminar. También puede utilizarse para resaltar la información correspondiente a una determinada escala (tamaño de matriz de filtrado); por ejemplo, en el caso de que se quiera eliminar la variabilidad asociada

a los tipos de cubierta presentes en la imagen uniformizando de esta manera su respuesta (Universidad de Murcia, 2020). Existen varias posibilidades al aplicar este filtro, las cuales son (Aldalur & Santamaría, 2002):

- **Filtro de la media:** corresponde a un filtro de paso bajo muy utilizado cuya mascara por lo general tiene una dimensión 3x3 y sus nueve coeficientes son iguales a 1/9. Esta mascara produce un simple promedio de los valores de brillo de los pixeles.
- **Filtro de la mediana:** se basa en sustituir el valor del brillo del píxel central del núcleo por la mediana de todos los valores de brillo de los pixeles que forman dicho núcleo. Se emplea para eliminar valores anómalos aislados, producto de ruidos aleatorios en la adquisición de los datos.
- **Filtro de la moda:** corresponde a otro filtro espacial no lineal que se basa en sustituir el valor de brillo del píxel central del núcleo por la moda de todos los valores brillo de los pixeles que forman dicho núcleo.

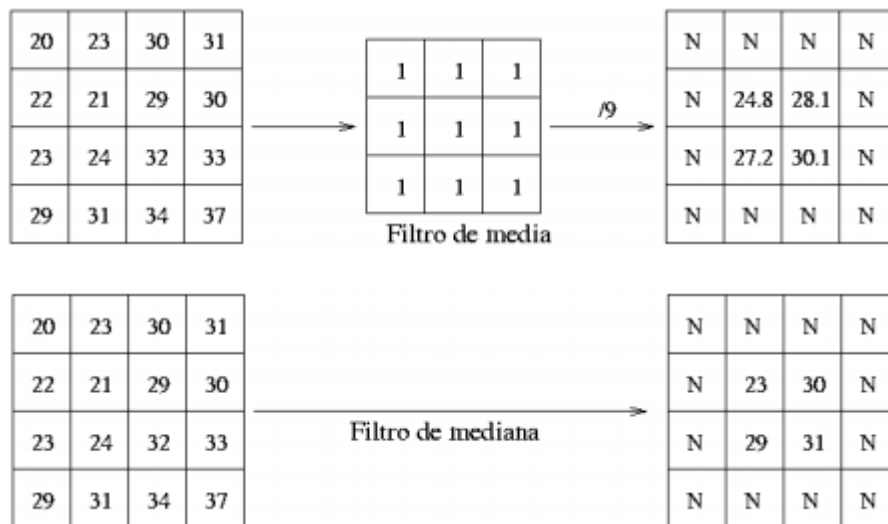


Ilustración 31. Mecanismo de aplicación del filtro de media y mediana
Fuente: (Universidad de Murcia, 2020)

Al aplicar estos filtros, a la imagen resultante de la combinación de bandas Green-NIR-Red con realce de tipo Ecuilización, se obtienen los siguientes resultados:

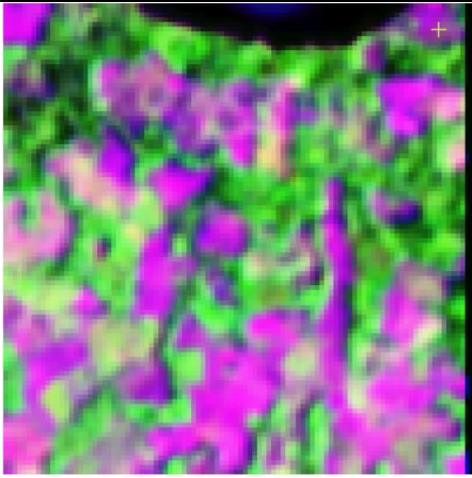
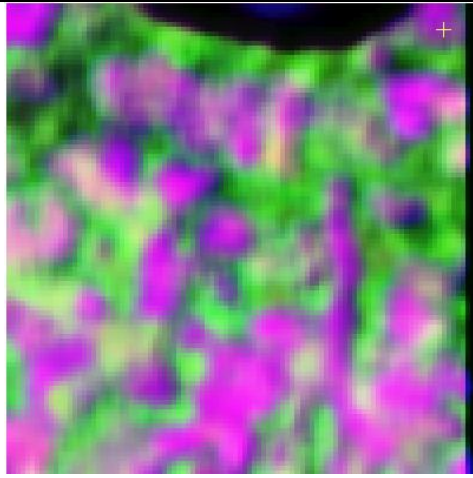
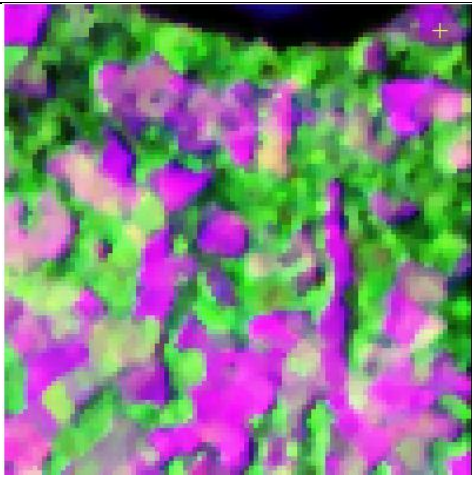
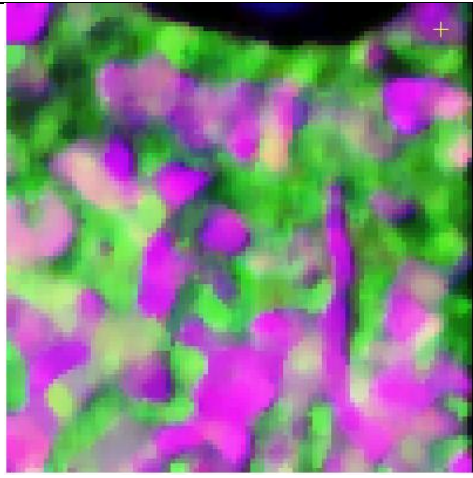
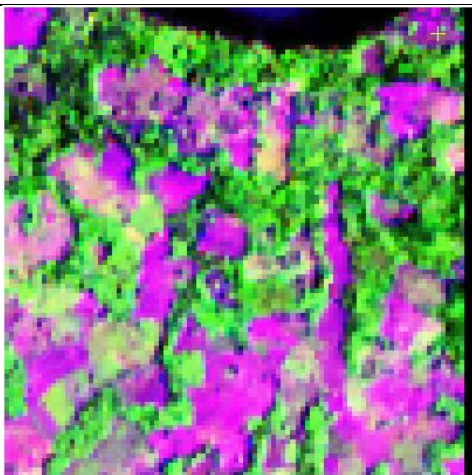
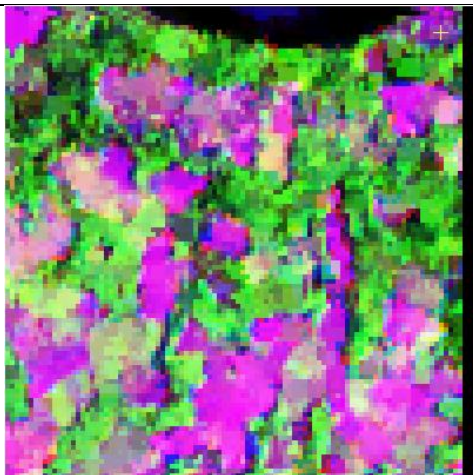
Filtro	Núcleo 3x3	Núcleo 5x5
Media		
Mediana		
Moda		

Tabla 12. Resultados al aplicar los filtros para la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103

Fuente: Autor

De acuerdo con los resultados que se presentan en la tabla anterior, en ningún filtro un núcleo de tamaño 5x5 arroja buenos resultados; como se evidencia en cada una de las imágenes ya que se presentan muy borrosos los datos, lo que dificulta la interpretación e identificación de los cultivos. Los resultados óptimos, se encuentran al aplicar el filtro de media y mediana con un tamaño de núcleo de 3x3 donde se suaviza un poco la imagen y se elimina el ruido presente en algunos pixeles.

Dado que el AOI es de aproximadamente 100x100 pixeles; lo cual es bastante pequeño en comparación con la escena completa de la imagen SENTINEL-2; también se evidencia un poco de opacidad en la imagen al aplicar estos filtros, lo que se puede deber a la poca interacción que tienen cada uno de los pixeles con sus vecinos, sin embargo para el propósito de la identificación de cultivos de hoja de coca, y apoyado en otras imágenes resultantes al aplicar las diferentes operaciones como la de los Índices de Vegetación, los resultados obtenidos se consideran viables para una correcta delimitación de los polígonos afectados por este tipo de cultivo.

Todo el procesamiento que se ha realizado hasta ahora se trabajó sobre la imagen L1C_T17NQB_A014222_20180313T154103, que de acuerdo con los metadatos fue capturada el 13 de marzo de 2018; pero dado que no hay una temporalidad definida para los cultivos de hoja de coca, y teniendo en cuenta que a la hora de adquirir las imágenes se encontró otra escena adicional donde el porcentaje de nubosidad permite una buena interpretación en el AOI, se realizaran las mismas operaciones para así validar, comparar y complementar los resultados obtenidos con la primera imagen. De esta manera, la composición a color natural para la imagen capturada el 5 de agosto de 2018, se visualiza así:

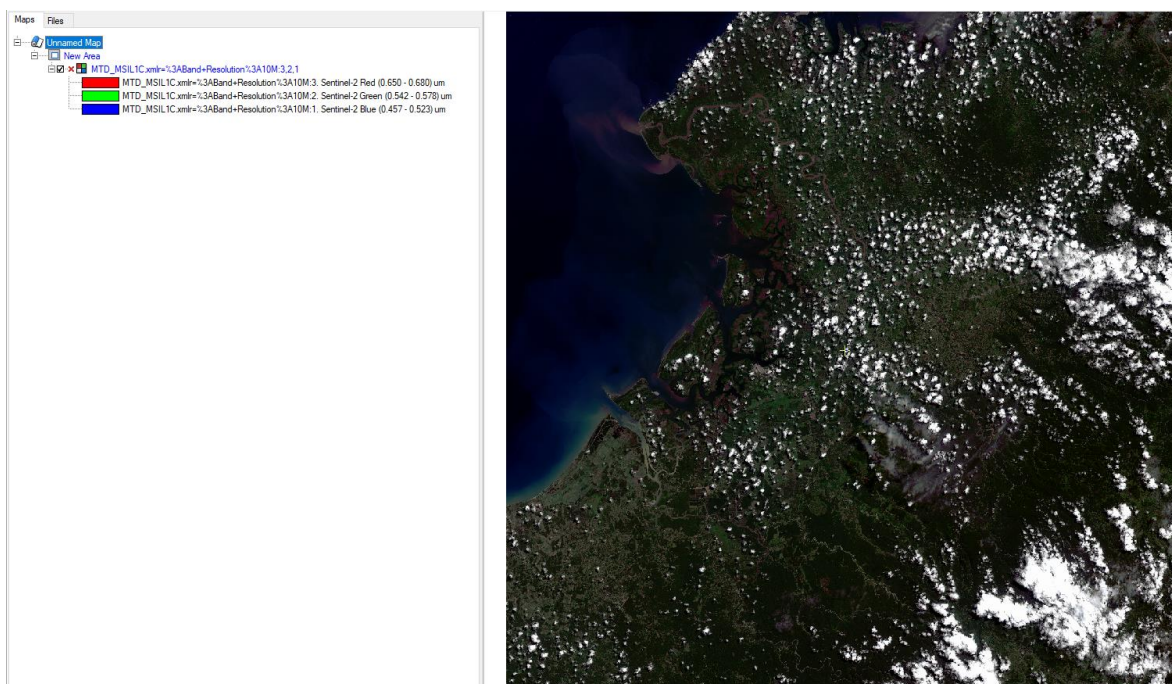


Ilustración 32. Composición color natural para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019

Fuente: Autor

Así mismo, la visualización del subset del AOI será:

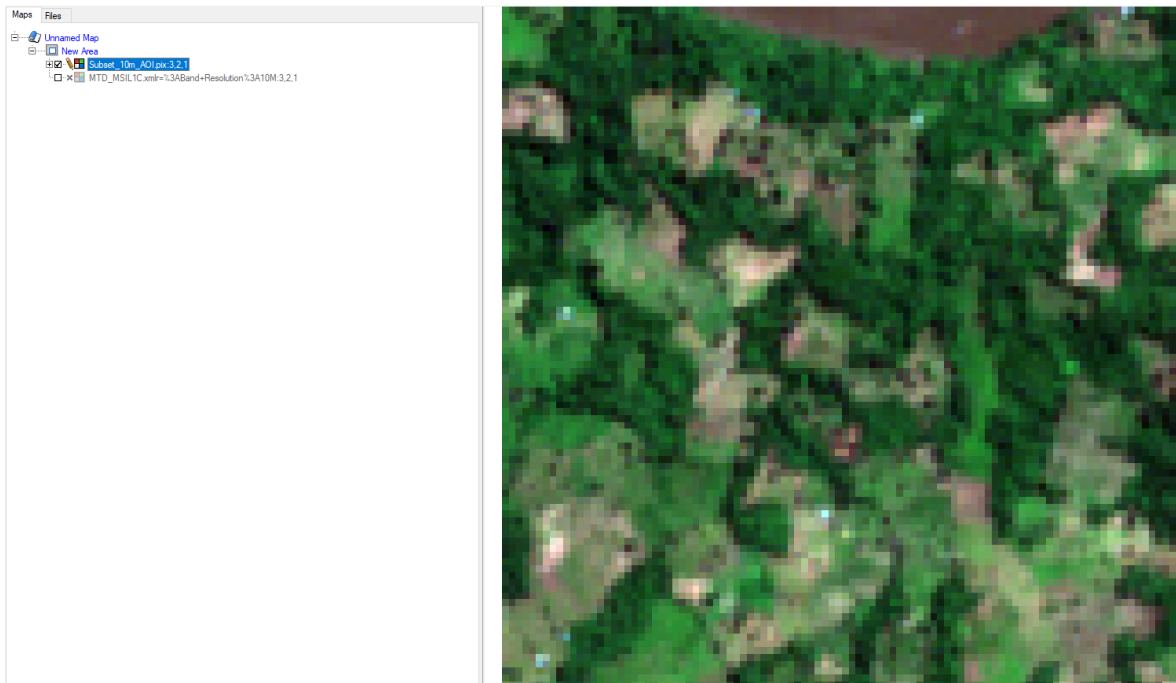
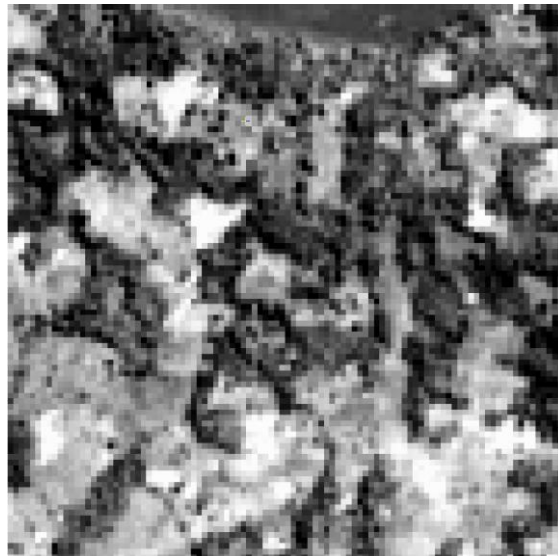


Ilustración 33. Subset del AOI para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019
Fuente: Autor

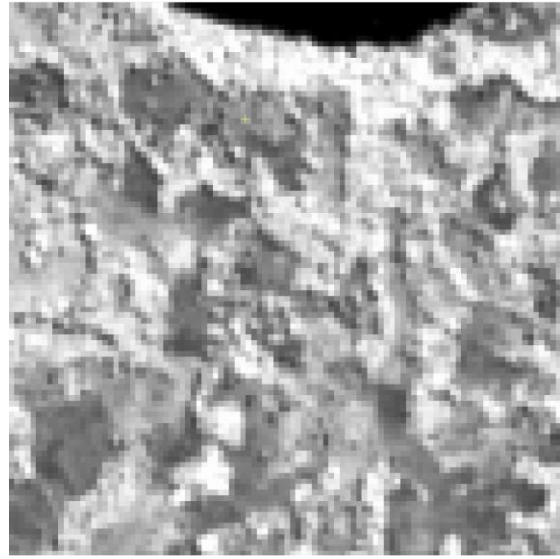
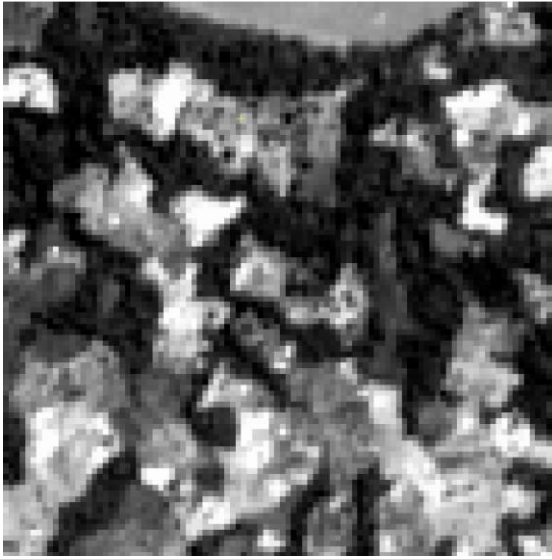
Al aplicar la operación en los niveles digitales para obtener reflectividades entre 0-1 para cada una de las capas se obtiene:



Blue



Green

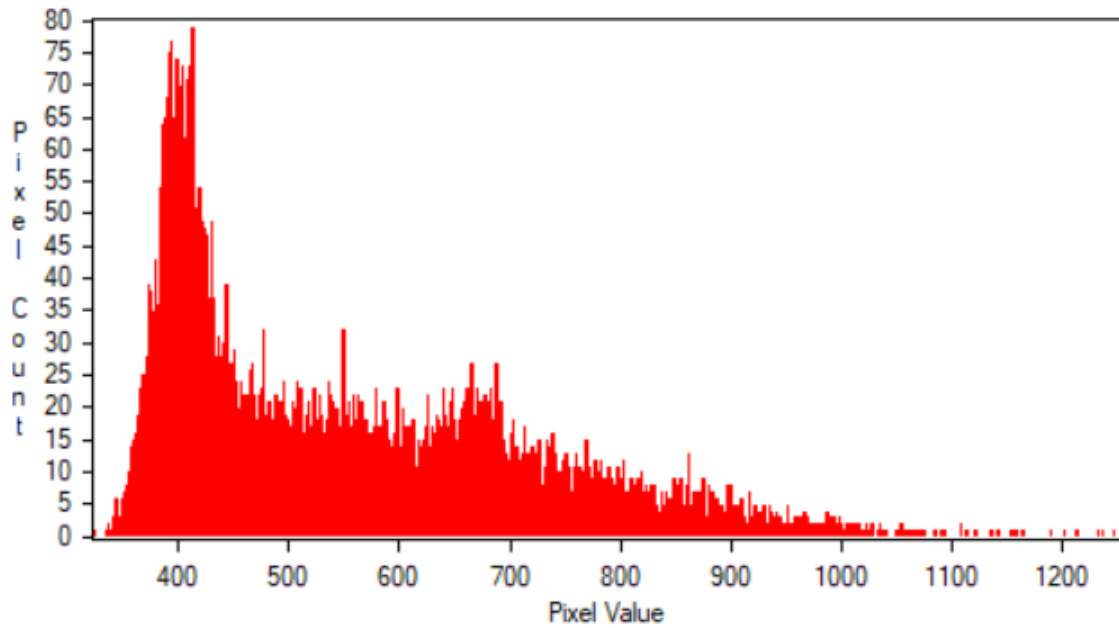


Red

NIR

Ilustración 34. Resultados de la conversión a reflectividades para cada una de las bandas de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019
Fuente: Autor

Al validar el histograma para cualquiera de las bandas, se pueden apreciar los resultados obtenidos al transformar la imagen a valores de reflectividad entre 0 y 1.



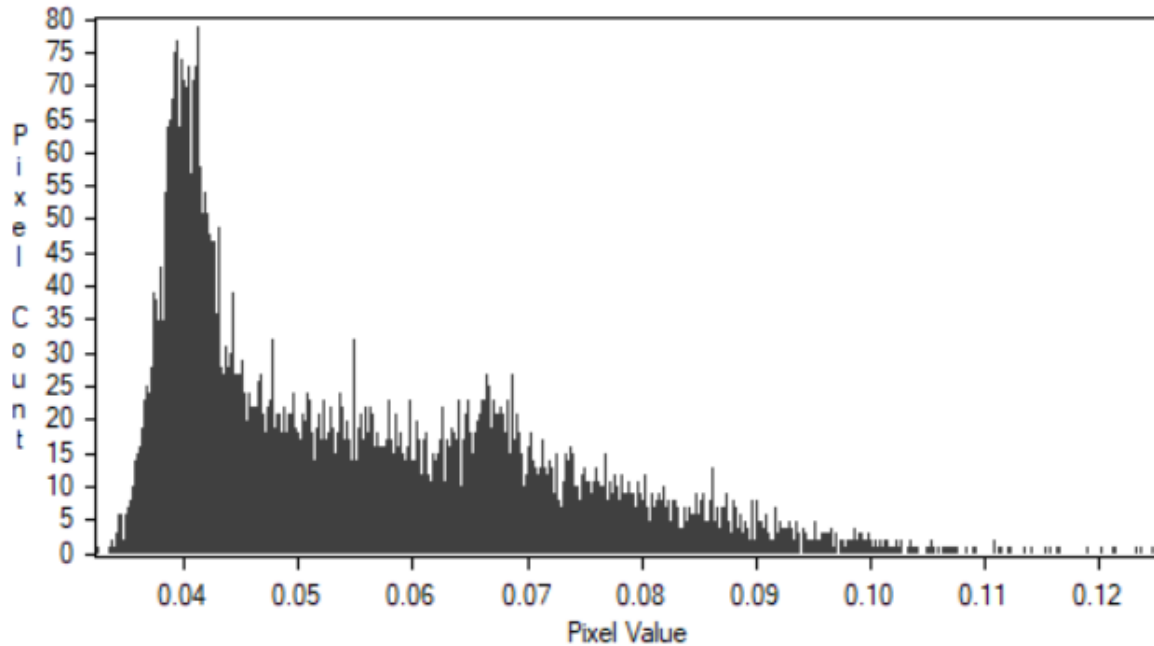
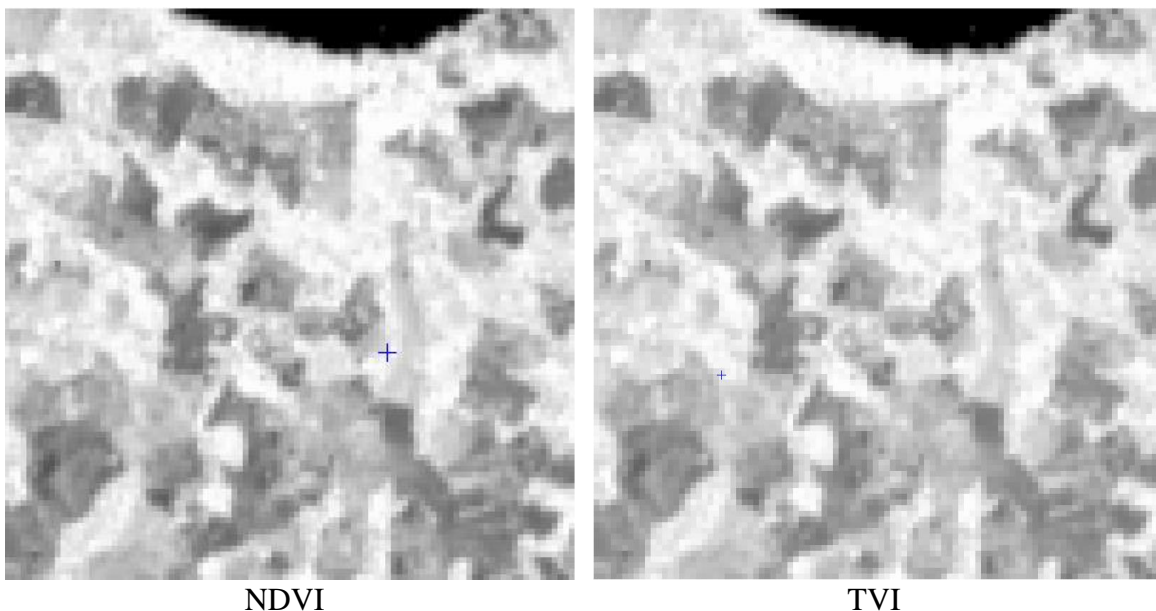


Ilustración 35. Histograma para la banda del rojo de la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019
 Superior: Imagen original – Inferior: Imagen transformada a valores de reflectividad entre 0-1
 Fuente: Autor

De la misma manera como se validó para la primera imagen, de acuerdo con el histograma que se aprecia en la parte inferior de la ilustración anterior, los niveles digitales para cada uno de los pixeles efectivamente se encuentran comprendidos en valores entre 0-1, con una media de 0.0546, mediana de 0.0502, desviación estándar de 0.0159 y un máximo de 0.1252.

Al realizar las operaciones necesarias para cada uno de los Índices de vegetación presentados, para el AOI se obtienen los siguientes resultados:



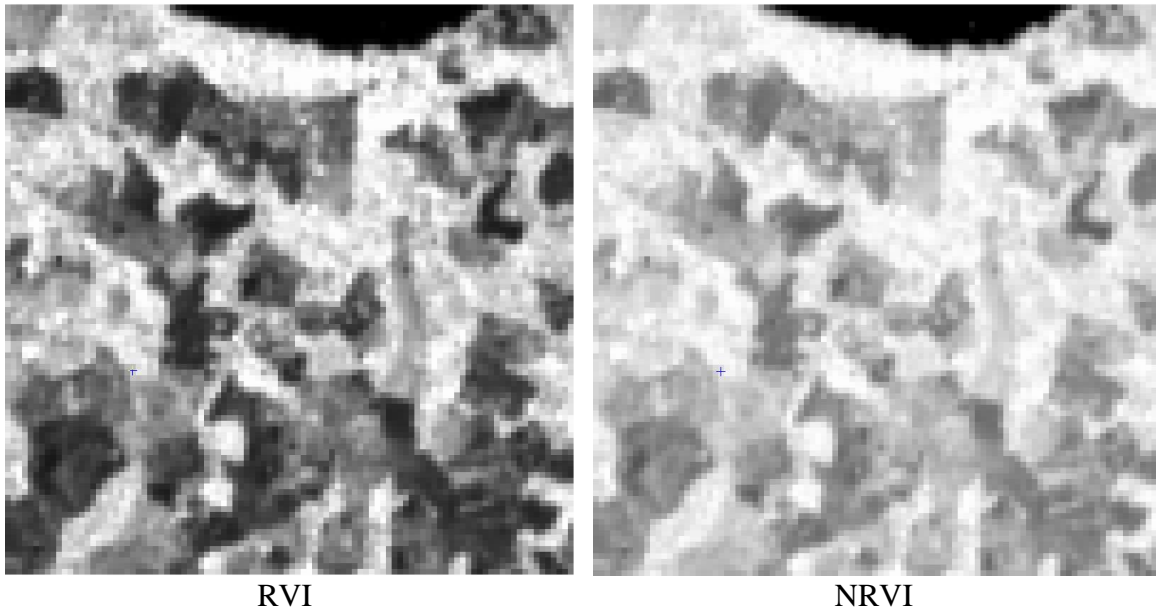


Ilustración 36. Índices de vegetación aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019
Fuente: Autor

Al comparar los resultados obtenidos al calcular los diferentes índices para la imagen capturada en el mes de agosto con los del mes de marzo, se pueden evidenciar algunas diferencias significativas en las coberturas del AOI.

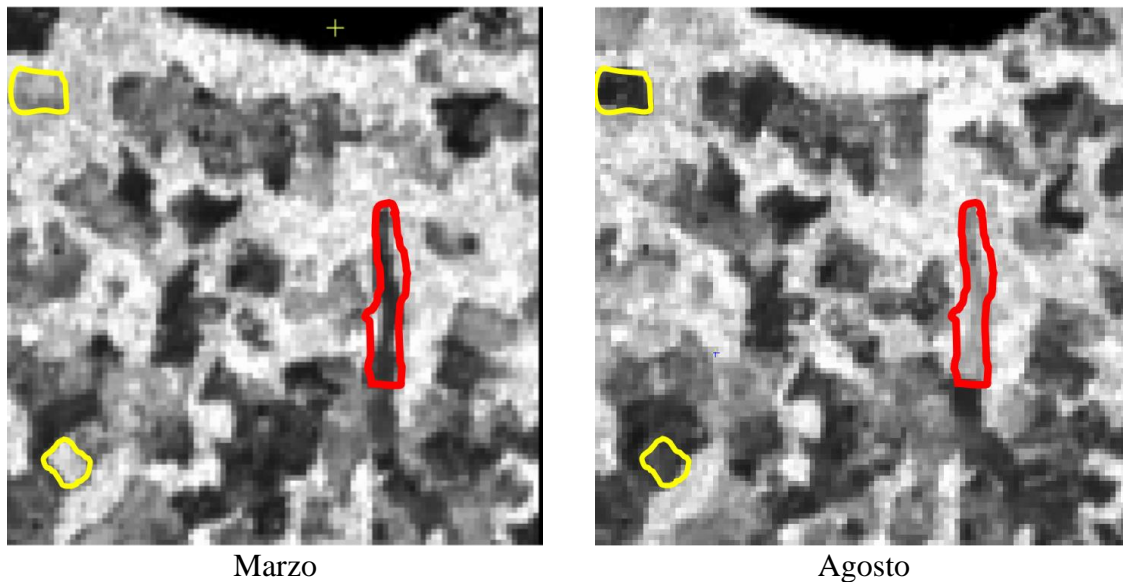
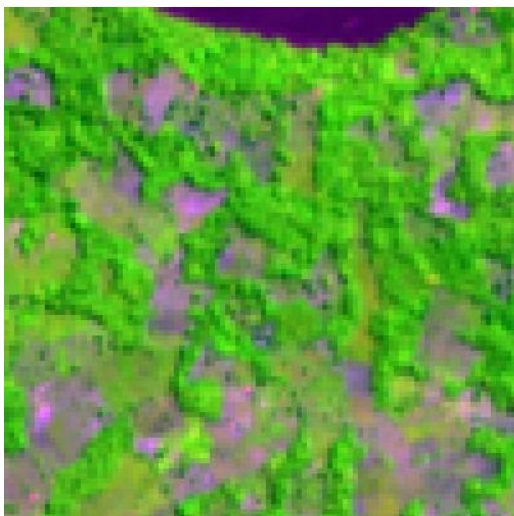


Ilustración 37. Comparación del Índice de Vegetación de cociente RVI
Fuente: Autor

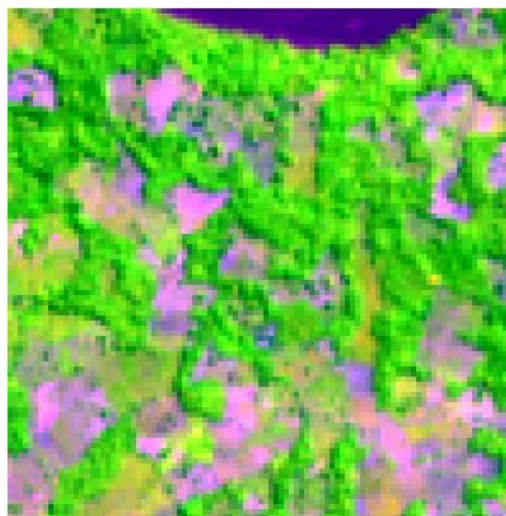
En la ilustración anterior, la zona delimitada en color Rojo para el mes de marzo correspondía a un suelo desnudo, donde se apreciaba ausencia de vegetación y por ende se visualizaba en valores oscuros o cercanos a 0 en cada píxel. Para esta misma zona en la imagen en el mes de agosto, se aprecia un cambio donde ahora hay una tonalidad más clara, lo cual significaría que hay un aumento en la cobertura vegetal en esta zona, al transcurrir

estos meses. Por el contrario, las zonas delimitadas en Amarillo para el mes de marzo correspondían a suelos con presencia de vegetación, que luego en el mes de agosto se transformaron en suelos desnudos perdiendo gran porcentaje de la capa vegetal presente en esas áreas.

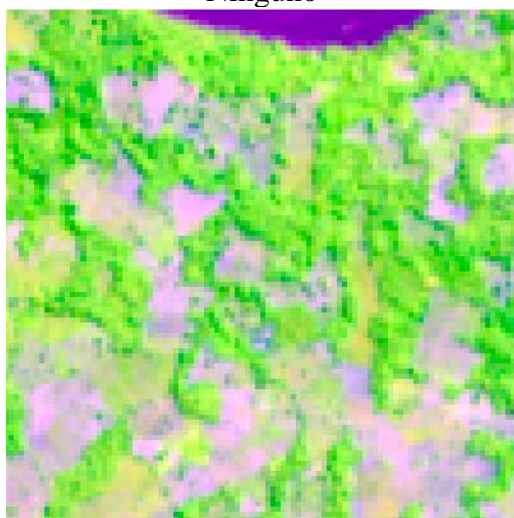
Continuando con el procesamiento, al aplicar los realces a la imagen LIC_T17NQB_A007387_20180805T154019, para la combinación Green-NIR-Red, de acuerdo con la ficha de interpretación de cultivos para imágenes SENTINEL-2, se obtienen los siguientes resultados:



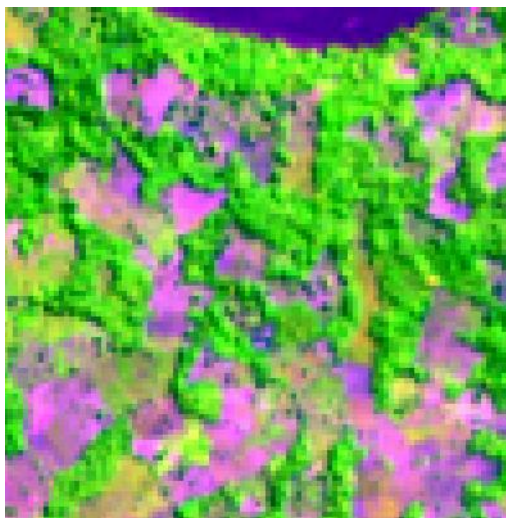
Ninguno



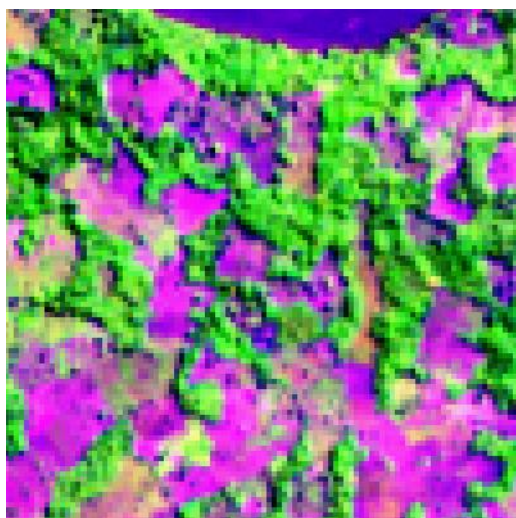
Lineal



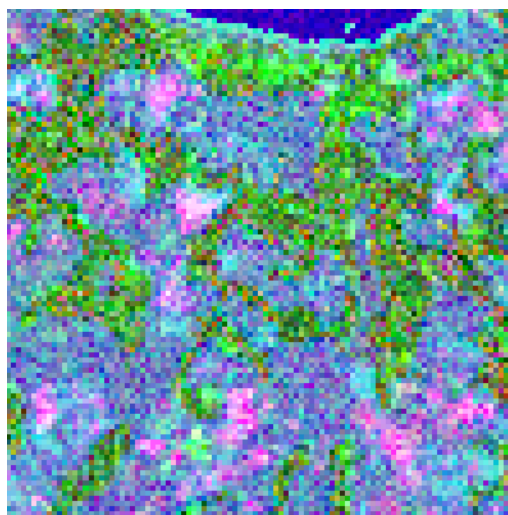
Raíz



Adaptable



Ecuilización



Infrecuencia

Ilustración 38. Realces aplicados a la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019
Fuente: Autor

Al validar de acuerdo con los resultados obtenidos en la imagen anterior, algunas zonas donde la respuesta espectral corresponde a suelos en preparación, se identifican preliminarmente los siguientes polígonos:

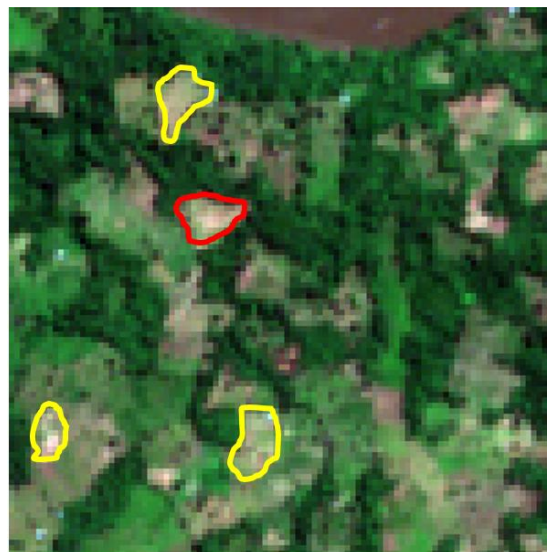
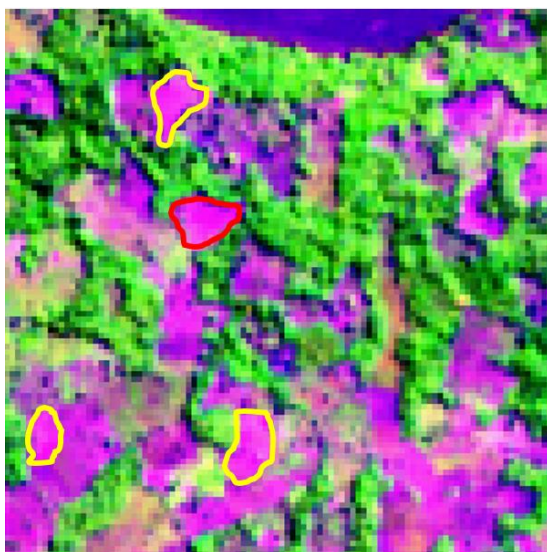


Ilustración 39. Delimitación preliminar de suelos en preparación de acuerdo con la respuesta espectral para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019

En amarillo delimitación de los polígonos con suelos desnudos. Izquierda: Combinación Green-NIR-Red con realce de tipo Ecuilización. Derecha: Combinación 3-2-1 sin realce

Fuente: Autor

Las áreas delimitadas en color amarillo corresponden a suelos desnudos, de acuerdo con la respuesta espectral para la imagen capturada en el mes de agosto. Así mismo, el polígono que se presenta preliminarmente en color rojo es un área que mantuvo su categorización de suelo desnudo, comparado con lo interpretado en la imagen capturada en el mes de marzo para el AOI.

Por último, al aplicar los filtros de paso bajo a la imagen correspondiente al mes de agosto, en la combinación de bandas Green-NIR-Red con realce de tipo Ecuilización se obtienen los siguientes resultados:

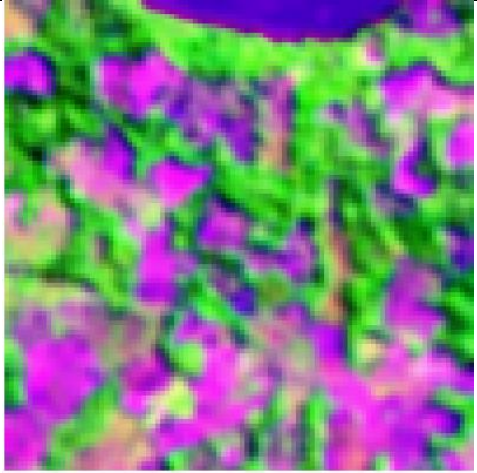
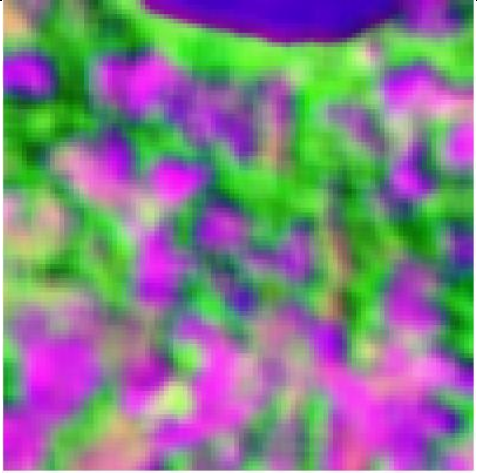
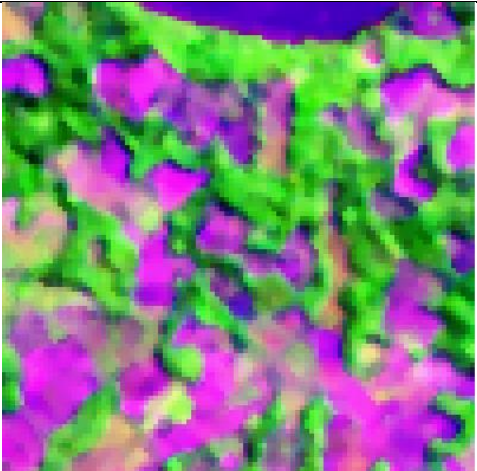
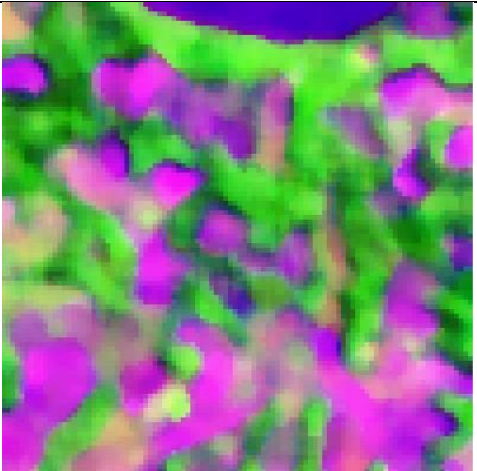
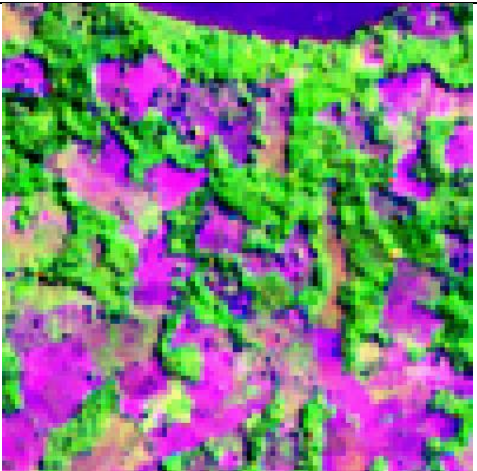
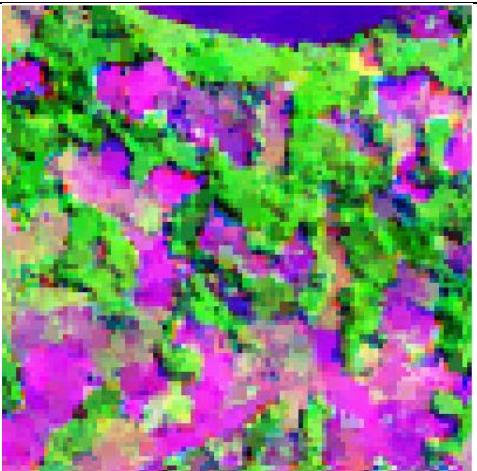
Filtro	Núcleo 3x3	Núcleo 5x5
Media		
Mediana		
Moda		

Tabla 13. Resultados al aplicar los filtros para la imagen L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019

Fuente: Autor

7.2. Problema de sobrestimación

Reducir los errores en la medición del área cultivada con coca requiere la utilización de múltiples tipos de insumos para las tareas de detección, verificación y validación. Con este enfoque se busca reducir varios errores entre ellos la sobrestimación (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.).

La sobrestimación se da por la no delimitación precisa de área debido a la mezcla de diferentes tipos de coberturas vegetales que no corresponden a cultivo de coca, identificando así más área de la real. Para evitar este tipo de error, se recurre al uso de imágenes de alta resolución como Planet, SkySat y DigitalGlobe (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.).

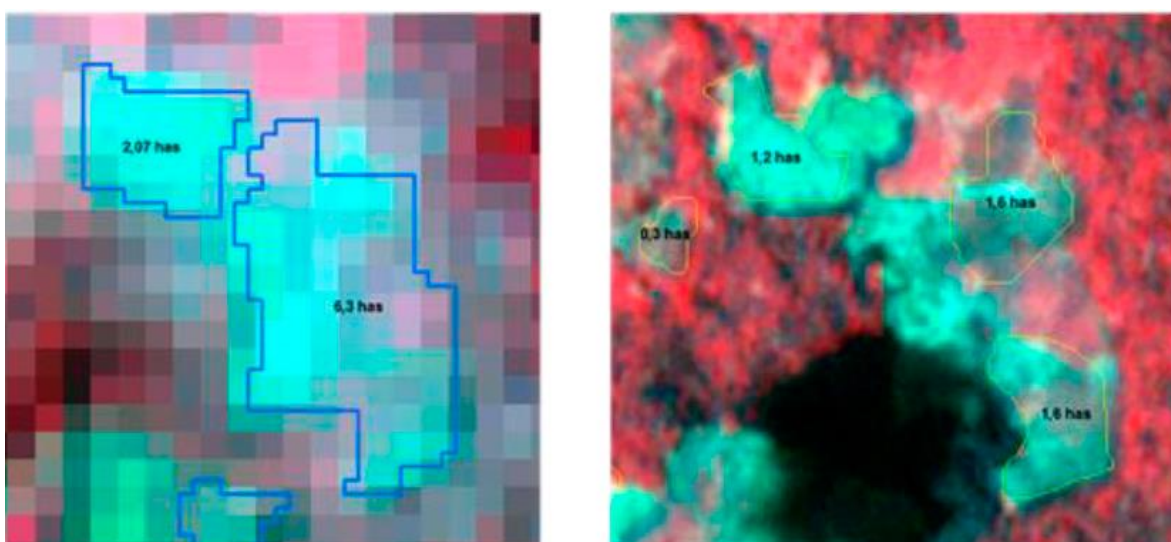


Ilustración 40. Ejemplo de sobrestimación en la identificación de cultivos de hoja de coca
Izquierda: Imagen Landsat; Derecha: Imagen Planet. Zona: Puerto Asís, Putumayo
Fuente: (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.)

Como se puede apreciar en la ilustración anterior, la imagen de la izquierda corresponde a una imagen Landsat, donde el intérprete delimitó 2 cultivos de hoja de coca con un área de 8,3 ha. Al usar una imagen de alta resolución espacial como Planet (imagen derecha), se puede hacer una mejor delimitación del área cultivada, definiendo así 4 polígonos como un área de 4,7 ha, lo cual corresponde a un 56,6% de lo definido inicialmente con la imagen Landsat.

Las características principales del instrumento PS2 que hace parte de la constelación PLANETSCOPE, se resumen en la siguiente tabla:

Ítem	Descripción
Altitud orbital	475 km
Bandas	4 (RGB, NIR): Blue: 455 - 515 nm Green: 500 - 590 nm

	Red: 590 - 670 nm NIR: 780 - 860 nm
Ground Sample Distance (GSD)	3.7 m aproximadamente
Tamaño de la escena	24 km x 8 km aproximadamente
Resolución radiométrica	Visual: 8 bit Analítica: 16 bit

Tabla 14. Principales características del instrumento PS2 de la constelación PLANETSCOPE
Fuente: (PLANET, 2020)

Aunque otros instrumentos hacen parte de la constelación PLANETSCOPE, para el AOI se logró conseguir una imagen Planet capturada el día 13 del mes de marzo de 2018, con el instrumento PS2 con un porcentaje de nubosidad del 1%, lo cual permite una buena interpretación de los cultivos de hoja de coca presentes en la zona.

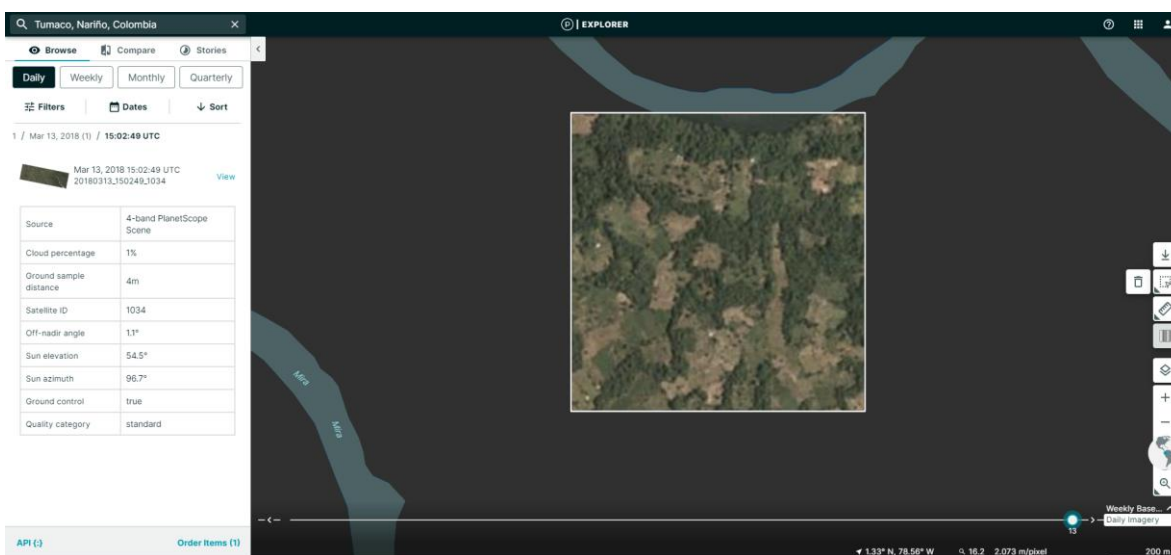


Ilustración 41. Previsualización del AOI
Fuente: Planet Explorer

Los metadatos de la imagen se presentan en la siguiente tabla:

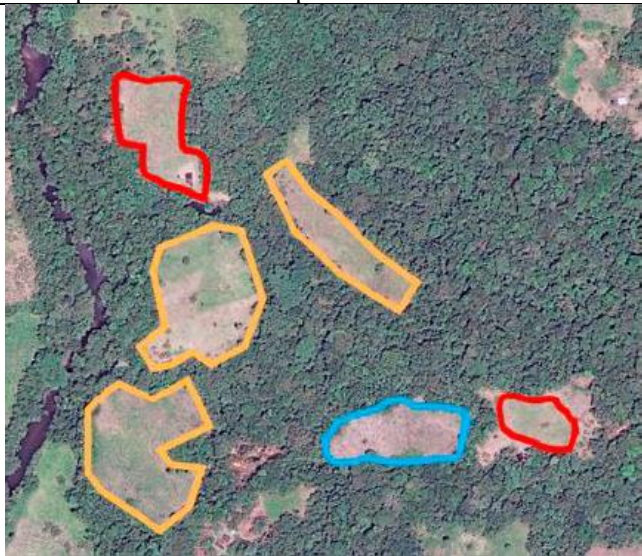
Atributo	Valor
File name	20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS
Product format	GeoTIFF
EPSG Code	32617
Geodetic Datum	WGS_1984
Projection	WGS 84 / UTM zone 17N
Projection Zone	17
Number of rows	4434
Number of columns	9070
Number of bands	4
Row GSD	3.0
Column GSD	3
Cloud cover percentage	0.67

Extent	Top left	Latitude: 1.40205463795
		Longitude: -78.6443256488
	Top right	Latitude: 1.40205463795
		Longitude: -78.3999345234
	Bottom Right	Latitude: 1.28160146217
		Longitude: -78.3999345234
	Bottom Left	Latitude: 1.28160146217
		Longitude: -78.6443256488

Tabla 15. Metadatos de la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS.tif

Fuente: Autor con datos de descarga de la imagen

Previo al procesamiento de esta imagen, es importante mencionar que de la misma manera como se tiene para la imagen SENTINEL, SIIMA también ha generado una ficha para el proceso de interpretación visual del cultivo de coca en estado productivo, para imágenes Planet, la cual se presenta a continuación:

CAMPO	DESCRIPCION
ID	3
Nombre	INTERPRETACIÓN CULTIVOS COCA CON IMÁGENES DIGITALGLOBE – PLANET – ERRADICACIÓN MANUAL
Descripción	Imagen georreferenciada, principalmente de zona boscosa donde se muestran los límites de los polígonos delimitados sobre la imagen de alta resolución y se puede confirmar: 2 lotes de cultivos de coca (en rojo), así como suelos en preparación para la siembra (en azul), estos últimos no se consideran áreas productivas en este momento, y empleando los datos de erradicación validada en convenio con Naciones Unidas seis meses antes de la fecha de la imagen (en naranja) se confirma que estos lotes presentan evidencias de siembra de coca y deben ser interpretados como lotes productivos.
Muestras graficas	 <p>INTERPRETACIÓN DE COCA EN IMAGEN DIGITAL GLOBE</p>


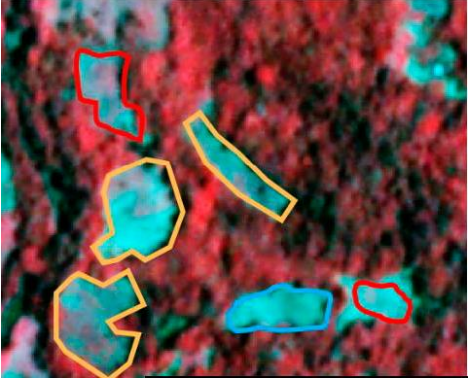
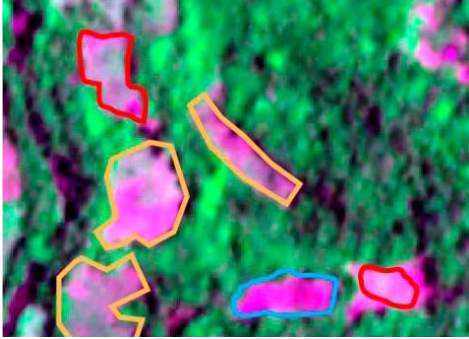
Muestras visuales de interpretación			
	Planet combinación 3-2-1	Planet combinación 4-3-2	
		Las respuestas espectrales de los suelos en preparación en todas las combinaciones de color generan tonos muy brillantes y texturas muy finas. Los cultivos de hoja de coca en estado productivo tienen una mezcla en la tonalidad de suelos y vegetación sin que realce una más que otra, dado esto el patrón de siembra de la hoja de coca. Las zonas con mayor densidad de siembra de hoja de coca toman tonalidades y texturas en tonalidades más asociadas con vegetación que con suelos.	
Metadatos de la ficha	Lugar	Puerto Asís - Putumayo	
	Coordenadas	76°50'39.486" W 0°18'33.338" N – 76°50'24.577" W 0°18'26.407" N	
	Interprete		
	Entidad	Policía Nacional	

Tabla 16. Ficha de ejemplo sobre el proceso de interpretación y delimitación de cultivos de hoja de coca en imágenes Planet a partir del patronamiento visual en imágenes DigitalGlobe
Fuente: (Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional, s.f.)

Dicho esto, y teniendo en cuenta que esta es una imagen a la que ya se le aplicó una corrección radiométrica, que se encuentra geo rectificadas y dado el bajo porcentaje de nubosidad presente en la escena, se procederá con el procesamiento para el posterior análisis y comparación con los datos obtenidos al procesar la imagen SENTINEL, y así evaluar el problema de sobrestimación en este caso particular.

Tomando como insumo la imagen Planet, la composición color natural para el AOI, se visualiza así:



Ilustración 42. Subset del AOI para la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS
Fuente: Autor

Al validar el histograma para la banda del rojo, se encuentran en la imagen Planet 110.554 pixeles, lo cual es un valor mucho mayor comparado con la imagen SENTINEL donde el conteo era de 10.000. En cuanto a los estadísticos, la media toma un valor de 557,361, un mínimo de 266 y máximo de 1535, moda de 452, mediana de 517 y una desviación estándar de 148,308.

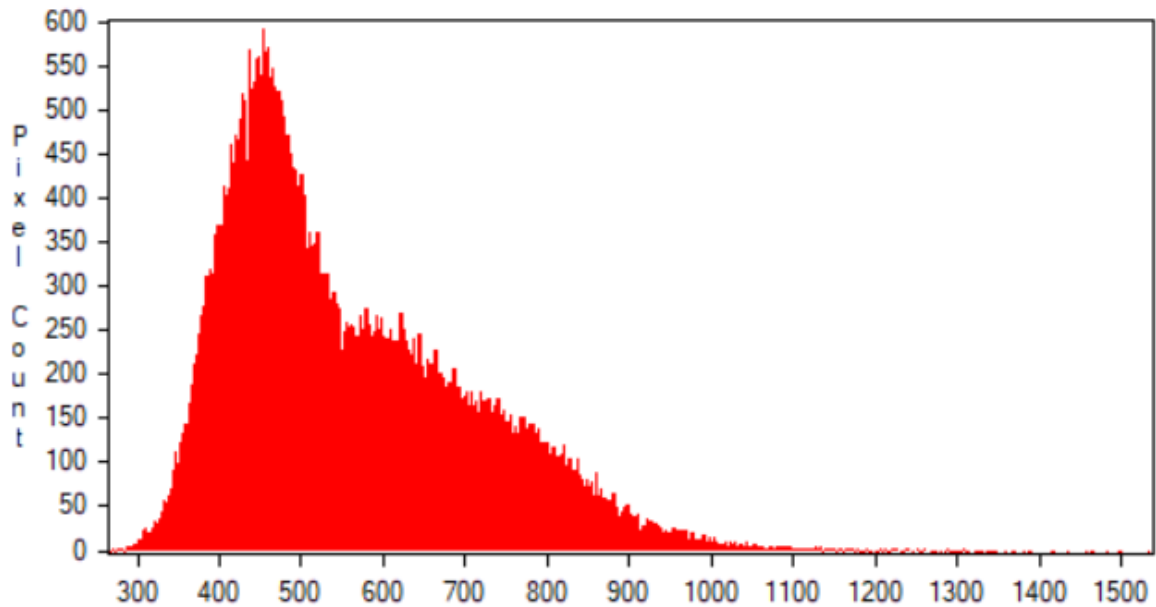


Ilustración 43. Histograma para la banda del rojo de la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS
Fuente: Autor

Al realizar las operaciones en cuento a los Índices de Vegetación, se obtienen los siguientes resultados:

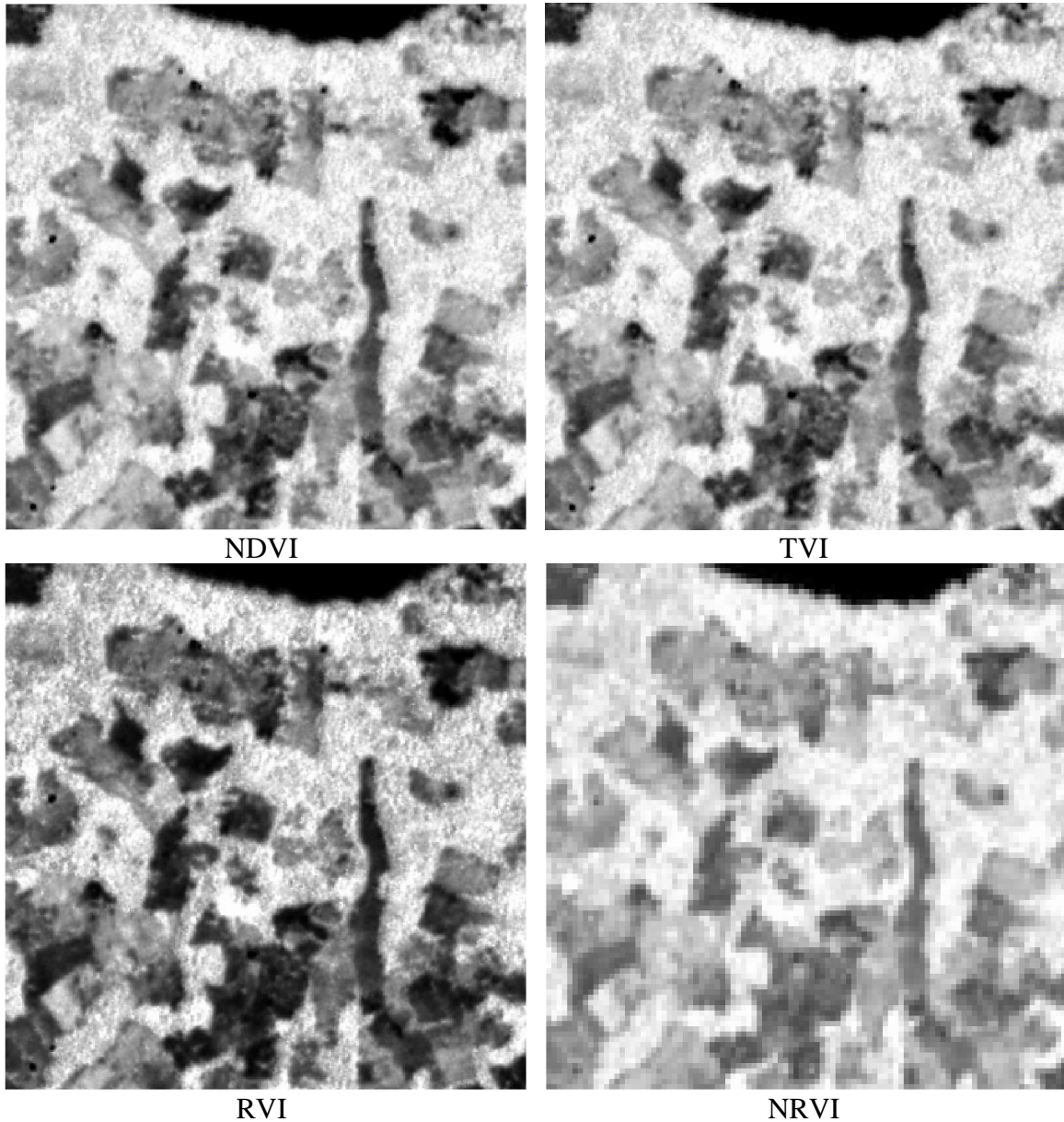
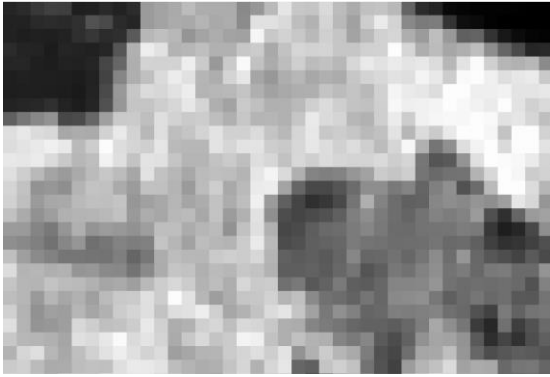
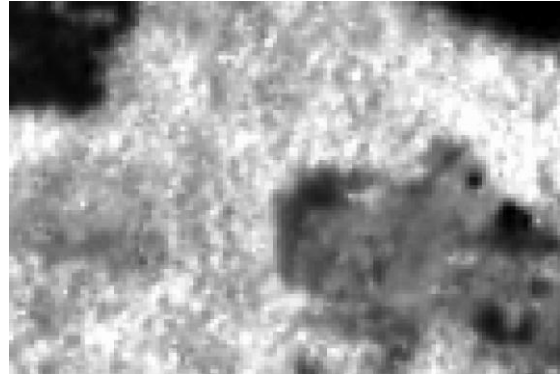


Ilustración 44. Índices de vegetación aplicados a la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS
Fuente: Autor

En principio los resultados obtenidos para los índices de vegetación con la imagen Planet, son bastantes similares a la imagen SENTINEL capturada en la misma fecha. Sin embargo, al realizar un acercamiento sobre una zona específica, ya se pueden validar las implicaciones en cuanto a la resolución espacial para cada una de estas imágenes, y las repercusiones que tiene al momento de estimar el área para cada una de las coberturas.



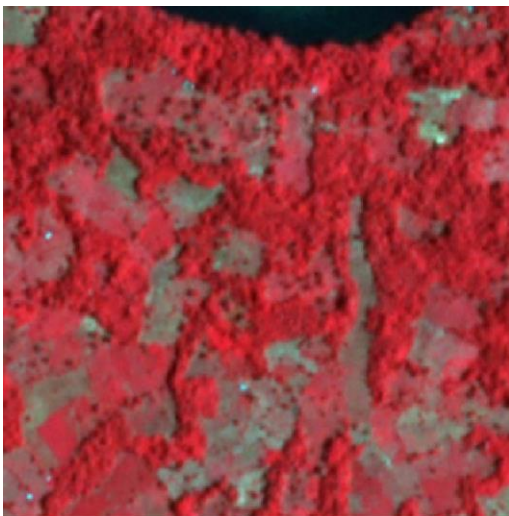
SENTINEL



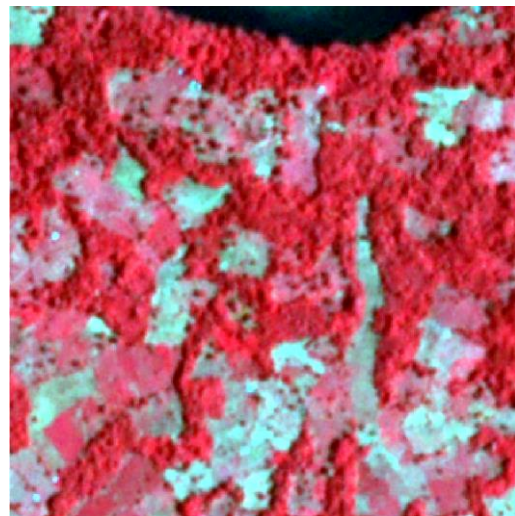
Planet

*Ilustración 45. Comparación de resultados para el índice de vegetación RVI
Fuente: Autor*

Continuando con el procesamiento, al aplicar los realces a la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS, para la combinación NIR-Red-Green, de acuerdo con la ficha de interpretación de cultivos para imágenes Planet, se obtienen los siguientes resultados:



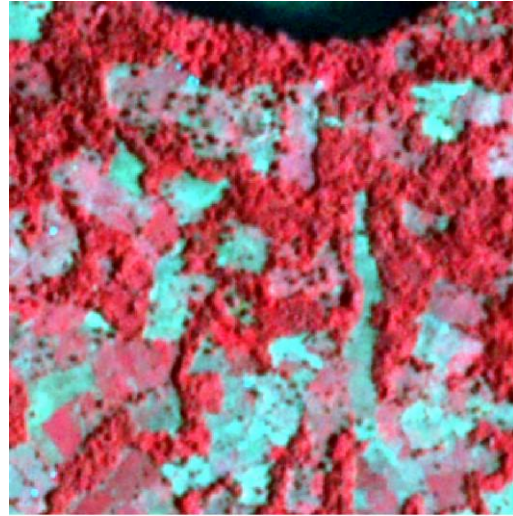
Ninguno



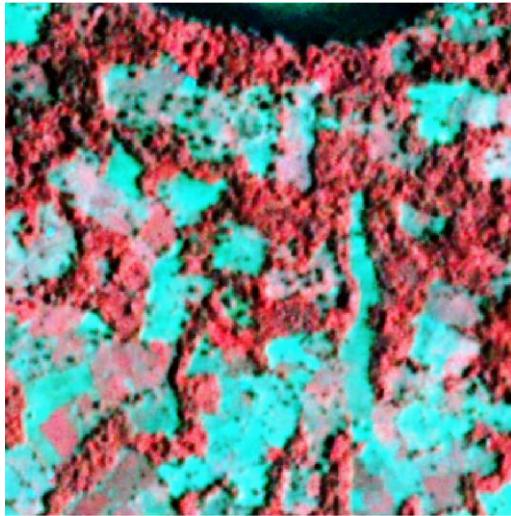
Lineal



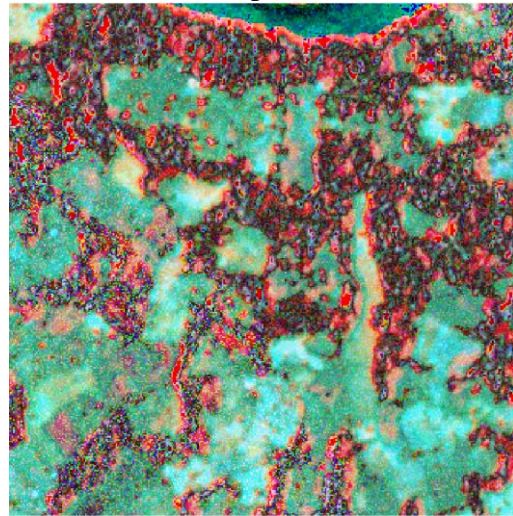
Raíz



Adaptable



Ecuación



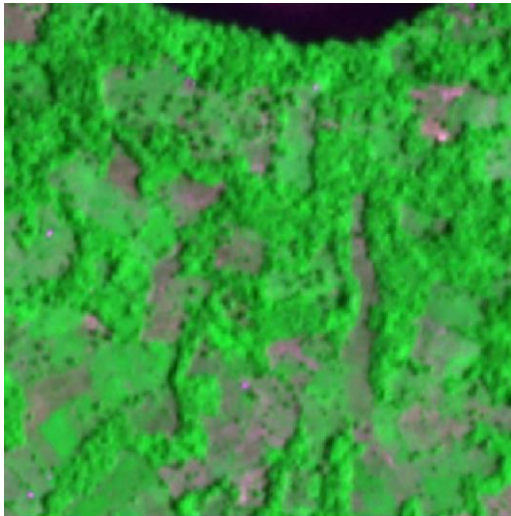
Infrecuencia

Ilustración 46. Realces aplicados a la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS (NIR-Red-Green)

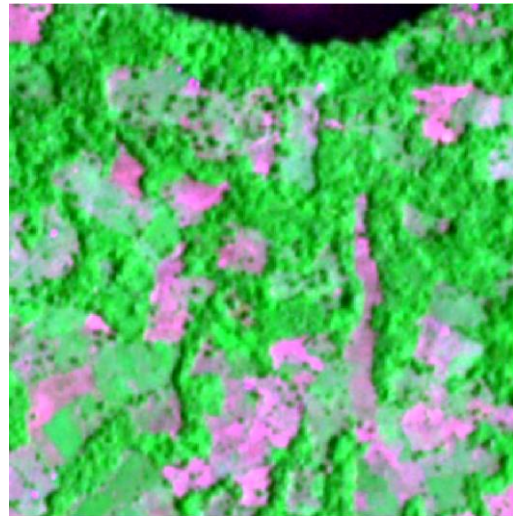
Fuente: Autor

Para esta combinación, el realce de tipo adaptable o ecuación es el que permite una mejor interpretación, donde las zonas de bosque con vegetación vigorosa presentan tonalidades rojizas con texturas gruesas; contrario a zonas donde los suelos están en preparación o desnudos, donde se evidencian tonalidades azules brillantes con textura fina, las cuales son más fáciles de identificar comparado con la imagen SENTINEL.

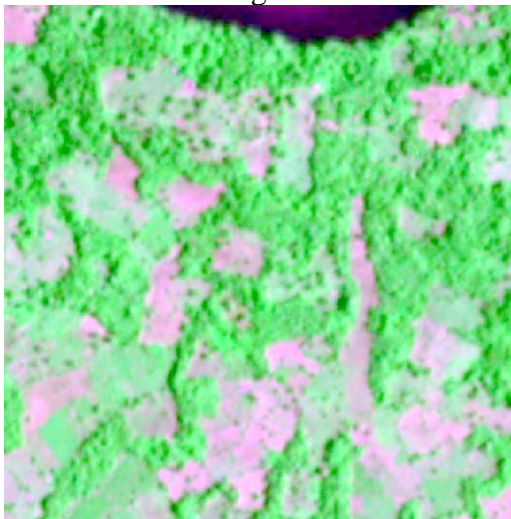
Así mismo, de acuerdo con la ficha de interpretación de cultivos de coca para imagen Planet del grupo SIIMA, para la combinación Red-NIR-Green, al aplicar los diferentes realces se obtienen estos resultados:



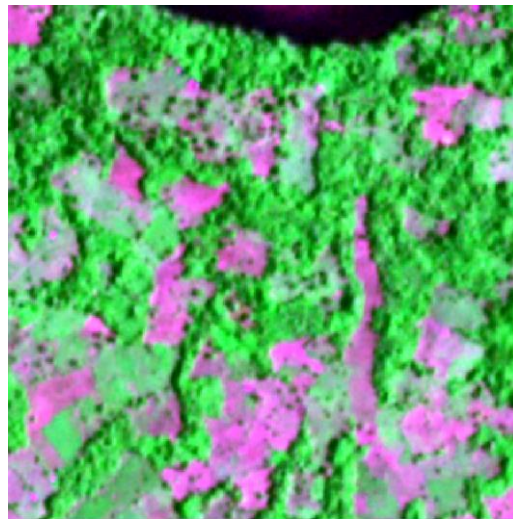
Ninguno



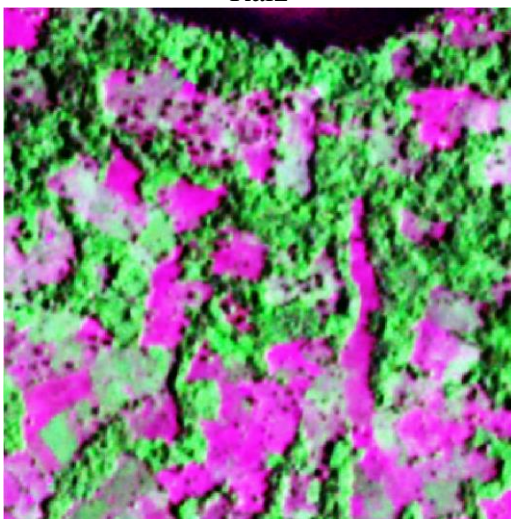
Lineal



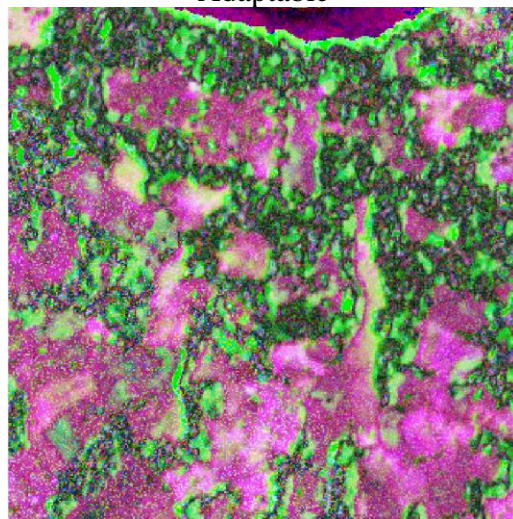
Raíz



Adaptable



Ecuación



Infrecuencia

Ilustración 47. Realces aplicados a la imagen 20180313_150249_1034_3B_AnalyticMS (Red-NIR-Green)

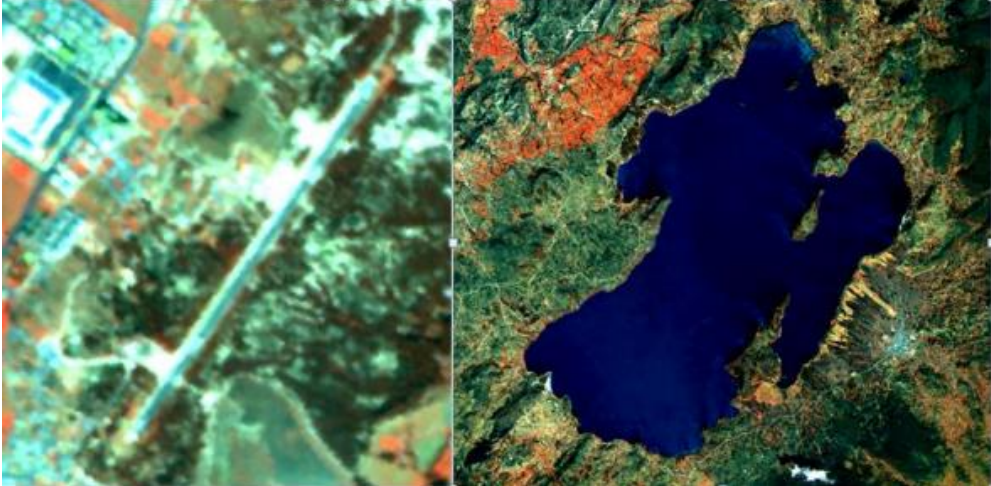
Fuente: Autor

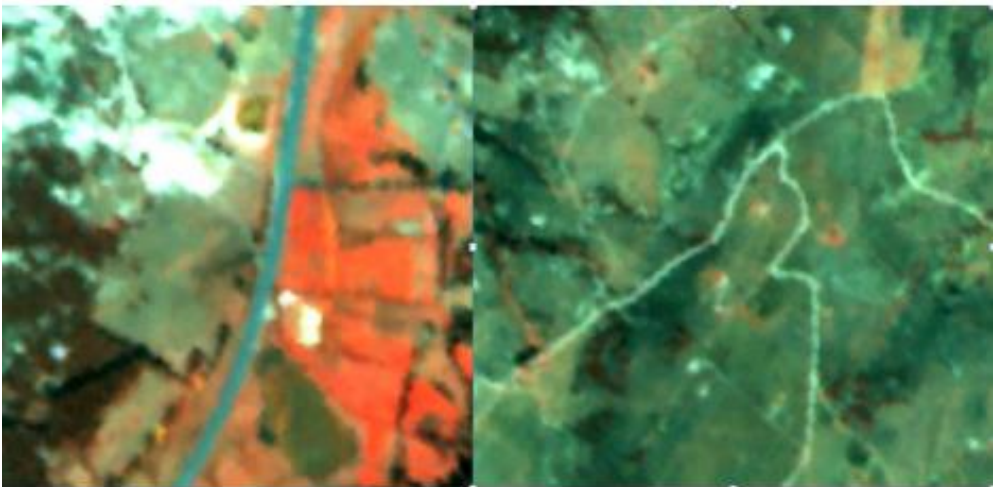
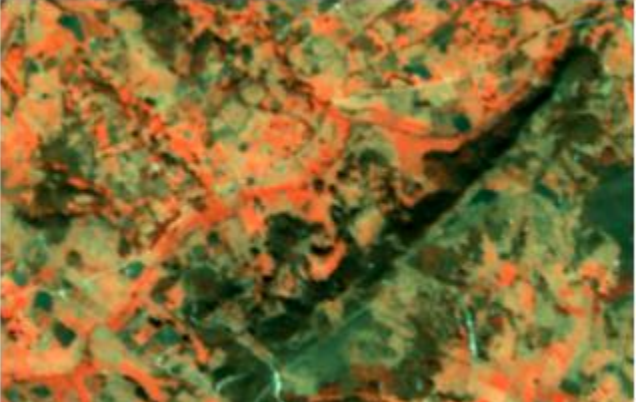
Para esta combinación, la vegetación vigorosa se presenta en color verde también con textura gruesa y los suelos desnudos en color morado brillante con tonalidades finas.

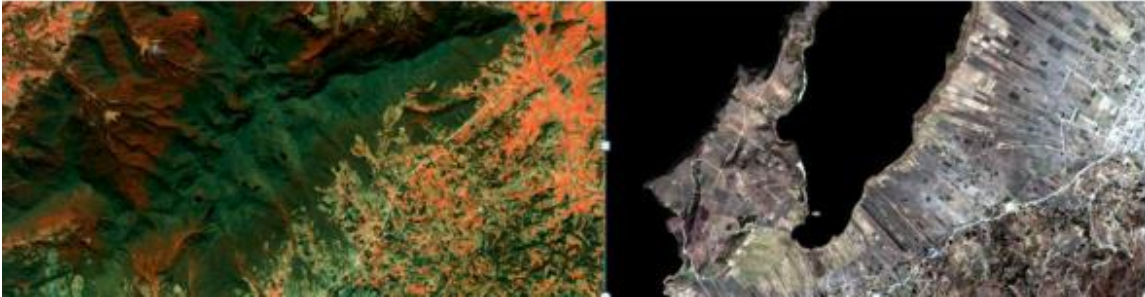
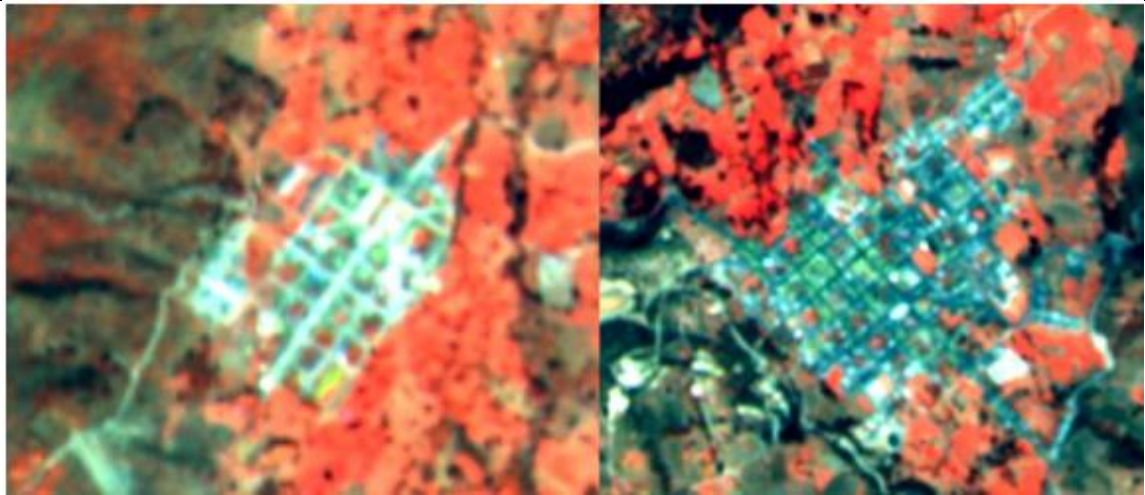
8. Clasificación

La clasificación permite dividir una imagen, para aislar segmentos, regiones u objetos individuales que sean homogéneos con respecto a algún rasgo; de tal forma que se puedan extraer características o identificar y clasificar los elementos presentes en la imagen. Estos datos pueden ser útiles para cuantificar regiones, tomar medidas sobre los objetos, discriminar los elementos presentes, definir bordes y formas, diferenciar tonalidades, etc. (Giraldo, Gonzalez, & Camargo, 2011).

Para diferenciar y describir un determinado tipo de cobertura de las demás, se tendrán en cuenta las características pictórico – morfológicas. Estas son aquellas que colaboran o pueden servir como evidencia concurrente para poder identificar objetos y diferenciarlos de los demás. Se consideran como fundamentales la forma, tamaño, sombras, tono y color, patrón, textura y asociación (Herrera, 2014).

Característica Pictórico - Morfológica	Descripción
<p style="text-align: center;">Forma</p>	<p>Se refiere a la forma de los objetos, a la forma de su perímetro y como se ve en una foto de dos dimensiones, en definitiva, la forma caracteriza a muchos de los objetos. Las formas pueden ser regulares o irregulares dependiendo del tipo de cobertura, su naturaleza y su origen, por ejemplo, los objetos creados por el hombre pueden conservar ciertas formas regulares con bordes normalmente rectos o conservando ciertas formas geométricas, mientras que las de origen natural poseen formas irregulares influenciadas por el relieve, geoformas y por características propias de cada tipo de cobertura</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p>Imagen RapidEye 2009 composición de falso color RGB 5-4-2 muestra a la izquierda un aeropuerto el cual tiene una forma regular y a la derecha un cuerpo de agua con forma irregular.</p>	
<p style="text-align: center;">Tamaño</p>	<p>Está determinado por la medida de un objeto y permite al intérprete reducir de su consideración gran parte de las posibilidades de identificación de los diferentes elementos (por ejemplo, una vía principal de una secundaria). El tamaño de los objetos en las imágenes se tiene que considerar siempre</p>

	<p>en el contexto de la resolución espacial y de la escala en la que está impresa o desplegada la imagen. Igualmente es importante relacionar el tamaño del objeto analizado con otros objetos.</p>
	<p>Imagen RapidEye 2009 composición de falso color RGB 5-4-2. Se aprecian las diferencias de tamaño en formas del mismo tipo de cobertura (vía).</p>
<p>Sombras</p>	<p>Son una región o espacio de oscuridad o ausencia de luz la cual es obstaculizada por un objeto, puede ayudar al intérprete a juzgar el tamaño y la forma de un elemento además de la sensación de profundidad. Las sombras también pueden obstaculizar la interpretación de imágenes debido a que pueden ocultar información importante, puesto que evitan que se refleje energía al sensor y se vean las coberturas con tonos más oscuros u ocultarlos en su totalidad, esto se presenta principalmente cuando hay presencia de nubes que no dejan traspasar los rayos del sol generando sombras sobre la superficie terrestre</p>
	<p>Imagen RapidEye 2009 composición de falso color RGB 5-4-2. Ejemplo de sombras.</p>
<p>Tono y color</p>	<p>El tono se define como los grados de variación de gris que existe entre el negro y el blanco, mientras que el color es una percepción visual del cerebro a través de información recibida por el ojo y en la cual se interpretan las diferentes longitudes de onda de la porción visible del espectro electromagnético. Los tonos generalmente son asociados a</p>

	<p>imágenes pancromáticas y fotografías aéreas en blanco y negro y los colores a imágenes multispectrales o fotografías a color. Los colores permiten diferenciar los elementos de acuerdo con la percepción visual que se tenga de estos en la naturaleza.</p>
	<p>Imagen RapidEye 2009 composición de falso color RGB 5-4-2. Ejemplo de tono y color</p>
<p>Patrón</p>	<p>Es un arreglo espacial de un conjunto de objetos o asociaciones de objetos similares, así como la repetición sistemática de formas. Algunos patrones responden más a la actividad humana sobre la superficie terrestre y otros son de carácter natural.</p>
	<p>Imagen RapidEye 2009 composición de falso color RGB 5-4-2. Ejemplo de patrón espacial urbano</p>
<p>Textura</p>	<p>Algunos expertos definen el término textura como una técnica de interpretación de imágenes de sensores remotos y que se refiere a la repetición de tonos en grupos de objetos que son demasiado pequeños para ser discriminados individualmente. Otras definiciones acuñan el término a la frecuencia de cambios y disposición de los tonos dentro de una imagen. La textura permite identificar la sensación de “rugosidad” o “finura” de los elementos presentes en una imagen proveniente de sensores remotos, esta puede variar dependiendo de la escala de trabajo y de la resolución de la imagen</p>




Imagen RapidEye 2009 composición de falso color RGB 5-4-2. Diferentes tipos de texturas	
Asociación	Permite la identificación de un elemento a partir de otros elementos ya sean naturales, culturales o accidentes geográficos relacionados a este. Por ejemplo, ciertas variedades de café requieren de la sombra producida por otras plantaciones, ciertos tipos de rocas o suelos pueden ser identificados de acuerdo con el tipo de vegetación que los cubre

Tabla 17. Definición de características pictórico - morfológicas
Fuente: Autor con datos de (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017)

Así mismo, luego de haber realizado todas las operaciones de procesamiento y teniendo en cuenta la visualización preliminar del AOI y las fichas técnicas elaboradas por SIMCI, para la clasificación se definieron las siguientes coberturas:

Cobertura	Descripción
Ríos	Corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, lago u otro río
Bosques	Comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas
Lote de cultivo de coca	Área productiva cultivada a la fecha con hoja de coca
Suelo desnudo	Comprende aquellas zonas en las cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente por suelos desnudos y quemados. Se puede considerar como suelo en preparación para el cultivo de hoja de coca.
Otros cultivos	Comprende a las áreas ocupadas con otro tipo de cultivo transitorio o pastos.

Tabla 18. Coberturas por clasificar en el AOI
Fuente: Autor con datos de (IDEAM, 2010)

Para la consolidación de la información, haciendo uso del software ArcCatalog, se generará una Personal Geodatabase con la siguiente estructura:

Feature Dataset	Feature Class	Geometría
Planet_20180313	Ríos	Polígono
	Bosques	
	Lote_coca	
	Suelo_desnudo	
	Otro_cultivo	

Sentinel_20180313	Ríos	Polígono
	Bosques	
	Lote_coca	
	Suelo_desnudo	
	Otro_cultivo	
Sentinel_20180805	Ríos	Polígono
	Bosques	
	Lote_coca	
	Suelo_desnudo	
	Otro_cultivo	

Tabla 19. Modelo de datos de la Personal Geodatabase

Fuente: Autor

Dado que los 3 Feature Dataset se componen por los mismos Feature Class, a continuación, se presenta el diccionario de datos para estos:

Feature Class	Ríos			
Geometría	Polígono			
Campo	Tipo de dato	Tamaño	Descripción	Obligatorio
Identificador	Short Integer		Numero identificador de cada polígono	SI
Nombre	Text	50	Nombre asociado al cuerpo de agua	NO
Área	Double	8	Área calculada en hectáreas para cada polígono	SI
Feature Class	Bosques			
Geometría	Polígono			
Campo	Tipo de dato	Tamaño	Descripción	Obligatorio
Identificador	Short Integer		Numero identificador de cada polígono	SI
Fecha_captura	Date		Fecha de captura de la imagen	SI
Fecha_interp	Date		Fecha en la cual se clasifica la imagen	SI
Área	Double	8	Área calculada en hectáreas para cada polígono	SI
Feature Class	Lote_coca			
Geometría	Polígono			
Campo	Tipo de dato	Tamaño	Descripción	Obligatorio
Identificador	Short Integer		Numero identificador de cada polígono	SI
Fecha_captura	Date		Fecha de captura de la imagen	SI
Fecha_interp	Date		Fecha en la cual se clasifica la imagen	SI
Área	Double	8	Área calculada en hectáreas para cada polígono	SI

Feature Class	Suelo_desnudo			
Geometría	Polígono			
Campo	Tipo de dato	Tamaño	Descripción	Obligatorio
Identificador	Short Integer		Numero identificador de cada polígono	SI
Fecha_captura	Date		Fecha de captura de la imagen	SI
Fecha_interp	Date		Fecha en la cual se clasifica la imagen	SI
Área	Double	8	Área calculada en hectáreas para cada polígono	SI
Feature Class	Otro_cultivo			
Geometría	Polígono			
Campo	Tipo de dato	Tamaño	Descripción	Obligatorio
Identificador	Short Integer		Numero identificador de cada polígono	SI
Fecha_captura	Date		Fecha de captura de la imagen	SI
Fecha_interp	Date		Fecha en la cual se clasifica la imagen	SI
Área	Double	8	Área calculada en hectáreas para cada polígono	SI

Tabla 20. Diccionario de datos para los Feature Class

Fuente: Autor

Esquemáticamente, en ArcCatalog la Personal Geodatabase se visualiza así:

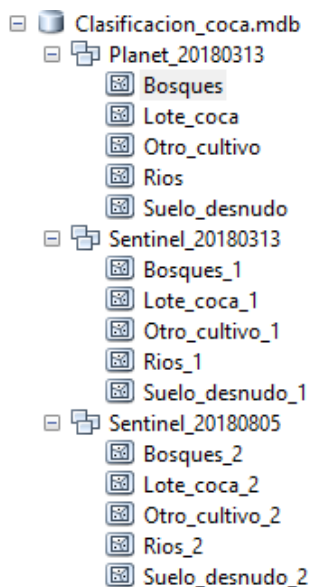


Ilustración 48. Estructura de la Personal Geodatabase

Fuente: ArcCatalog

Una vez definida la estructura de almacenamiento para las coberturas a identificar, y luego de exportar las imágenes generadas para cada sensor luego de las operaciones de procesamiento, haciendo uso del software ArcMap, la digitalización y visualización de la clasificación de los resultados para cada una de las imágenes, se visualiza así:

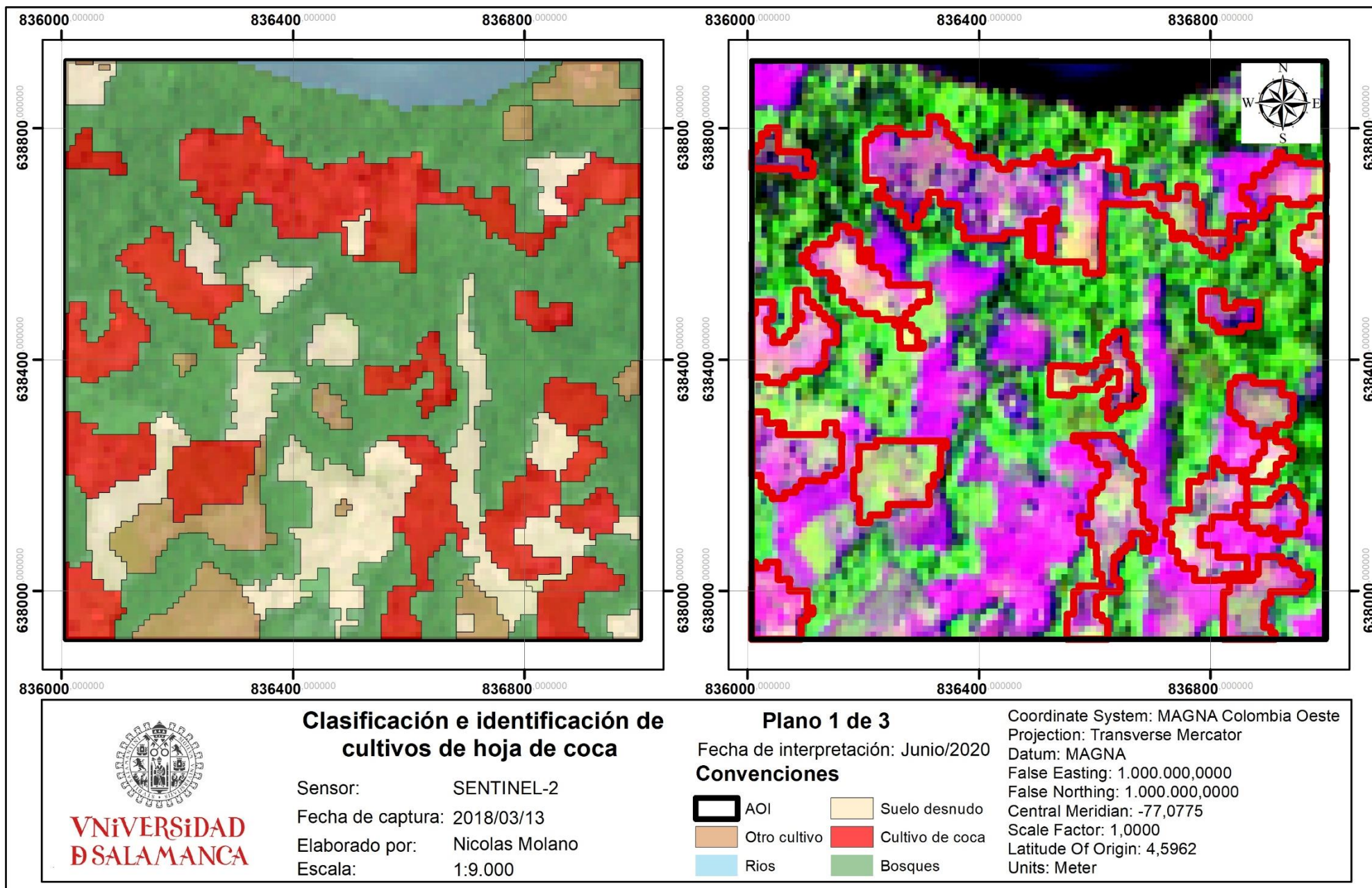


Ilustración 49. Clasificación e identificación de cultivos de hoja de coca para la imagen Sentinel-2 de fecha 2018/03/13

Fuente: Autor

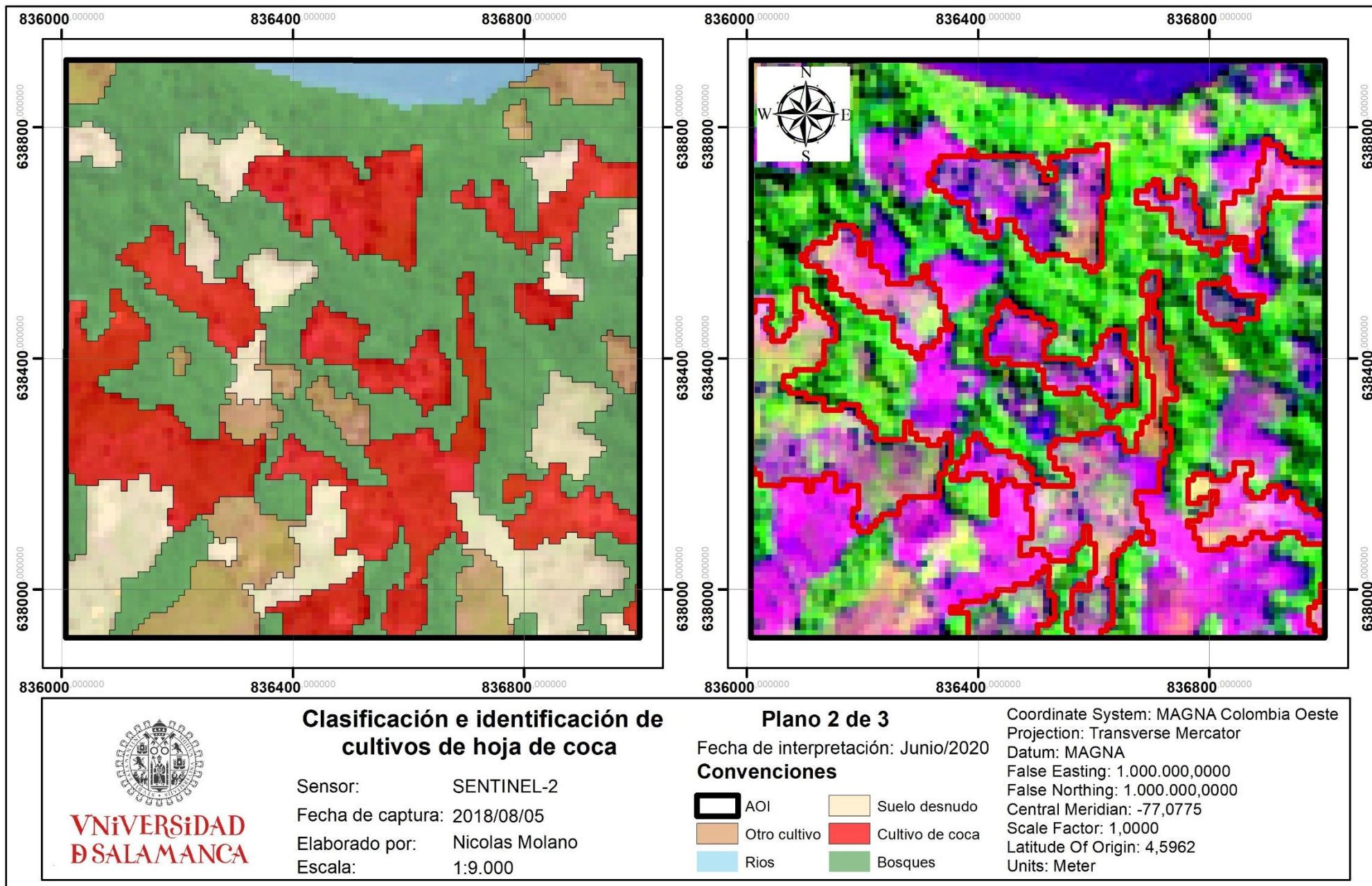


Ilustración 50. Clasificación e identificación de cultivos de hoja de coca para la imagen Sentinel-2 de fecha 2018/08/05

Fuente: Autor

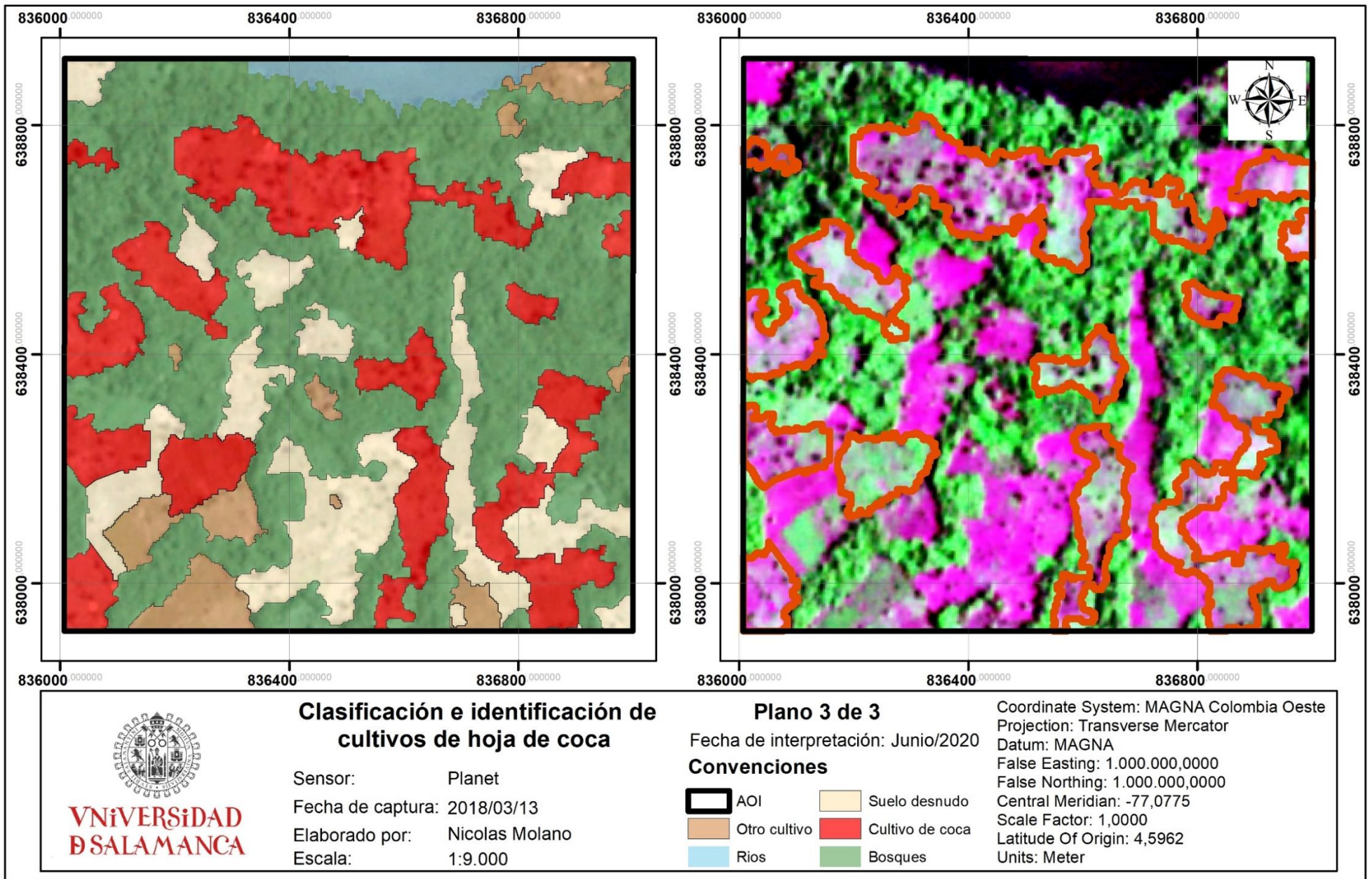


Ilustración 51. Clasificación e identificación de cultivos de hoja de coca para la imagen Planet de fecha 2018/03/13

Fuente: Autor

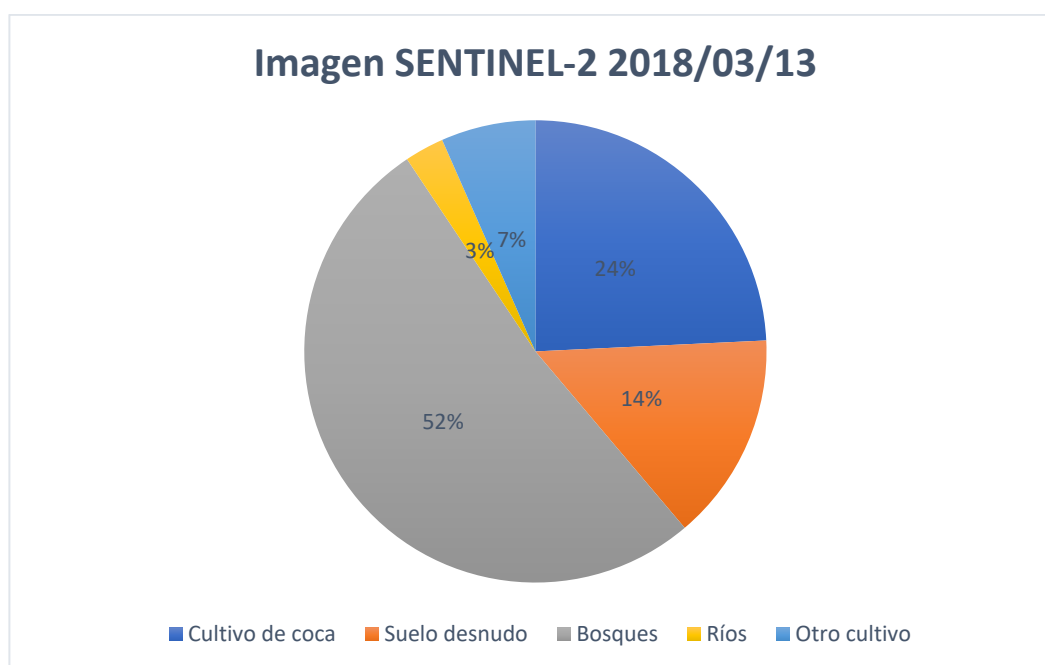
8.1. Interpretación de resultados

Luego de realizar la clasificación para cada una de las imágenes, y teniendo en cuenta que el área del AOI es de 99,12 ha, para cada una de las coberturas se obtuvieron los siguientes resultados:

Sensor	SENTINEL-2	
Fecha captura	2018/03/13	
Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cultivo de coca	24,03	24,24
Suelo desnudo	14,45	14,58
Bosques	51,35	51,81
Ríos	2,74	2,76
Otro cultivo	6,55	6,61
Sumatoria	99,12	100

Tabla 21. Resultados para la imagen SENTINEL-2 capturada el 2018/03/13

Fuente: Autor



Grafica 1. Proporción de cada una de las coberturas para la imagen SENTINEL-2 capturada en 2018/03/13

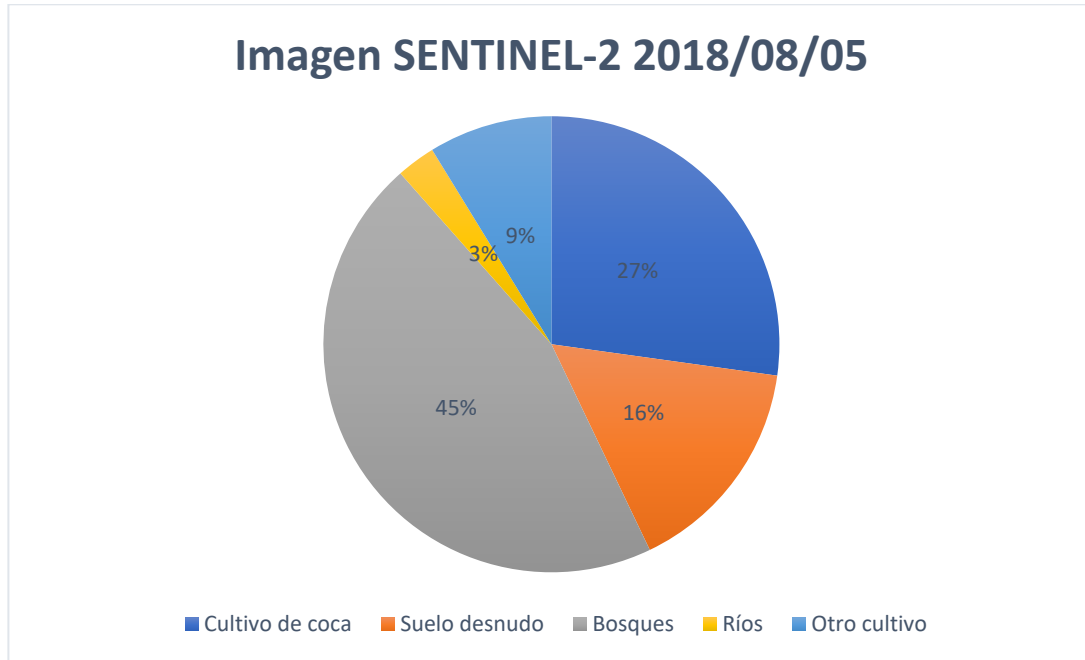
Fuente: Autor

De igual manera, para la imagen SENTINEL-2 capturada el 2018/08/05 los resultados obtenidos son:

Sensor	SENTINEL-2	
Fecha captura	2018/08/05	
Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cultivo de coca	26,96	27,20
Suelo desnudo	15,56	15,70

Bosques	45,18	45,58
Ríos	2,74	2,76
Otro cultivo	8,68	8,86
Sumatoria	99,12	100

Tabla 22. Resultados para la imagen SENTINEL-2 capturada el 2018/08/05
Fuente: Autor

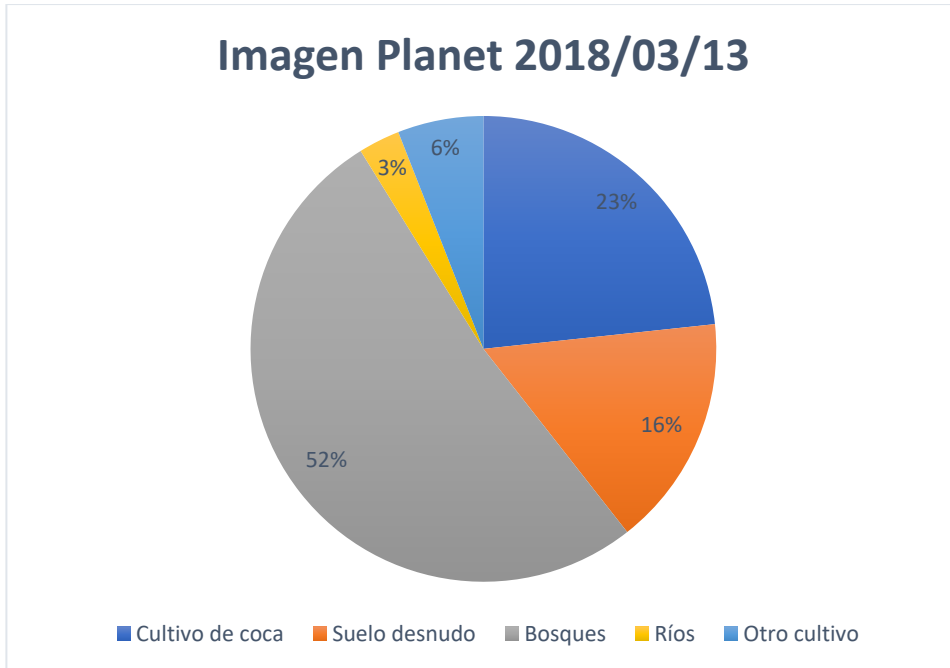


Grafica 2. Proporción de cada una de las coberturas para la imagen SENTINEL-2 capturada en 2018/08/05
Fuente: Autor

Por último, para validar el problema de sobrestimación teniendo en cuenta la resolución espacial para la imagen Planet, los resultados obtenidos para la imagen capturada por este sensor son:

Sensor	Planet	
	2018/03/13	
Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cultivo de coca	23,10	23,31
Suelo desnudo	15,96	16,10
Bosques	51,30	51,76
Ríos	2,86	2,89
Otro cultivo	5,90	5,95
Sumatoria	99,12	100

Tabla 23. Resultados para la imagen Planet capturada el 2018/03/13
Fuente: Autor



Grafica 3. Proporción de cada una de las coberturas para la imagen Planet capturada en 2018/03/13
Fuente: Autor

Comparando los datos para las imágenes SENTINEL-2, luego de transcurridos 5 meses se evidencia un aumento en cuanto a cultivos de hoja de coca del 2,96% equivalente a 2,93 ha; y así mismo, se presenta una reducción en la cobertura de bosques del 6,23% equivalente a 6,17 ha.

En estas zonas donde se evidencia una reducción en la cobertura de bosques, se presentan ahora suelos desnudos o en preparación y cultivos de hoja de coca, lo cual representa una afectación para el ecosistema.

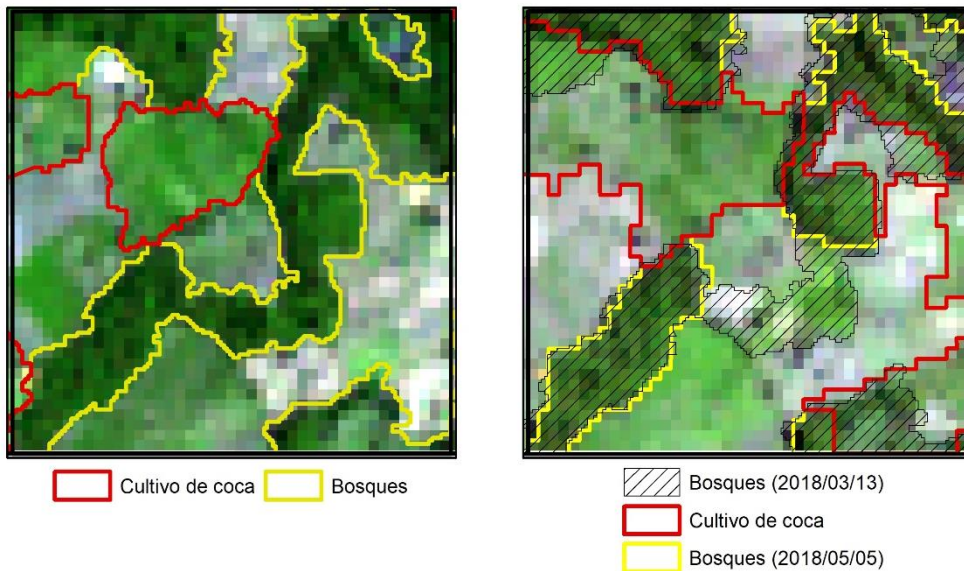


Ilustración 52. Degradación de la cobertura de bosques
Fuente: Autor

Ahora, para analizar el problema de sobrestimación en cuanto al cultivo de hoja de coca, comparando la clasificación realizada haciendo uso de la imagen Planet con los datos obtenidos de la imagen SENTINEL-2, se presentan los siguientes datos:

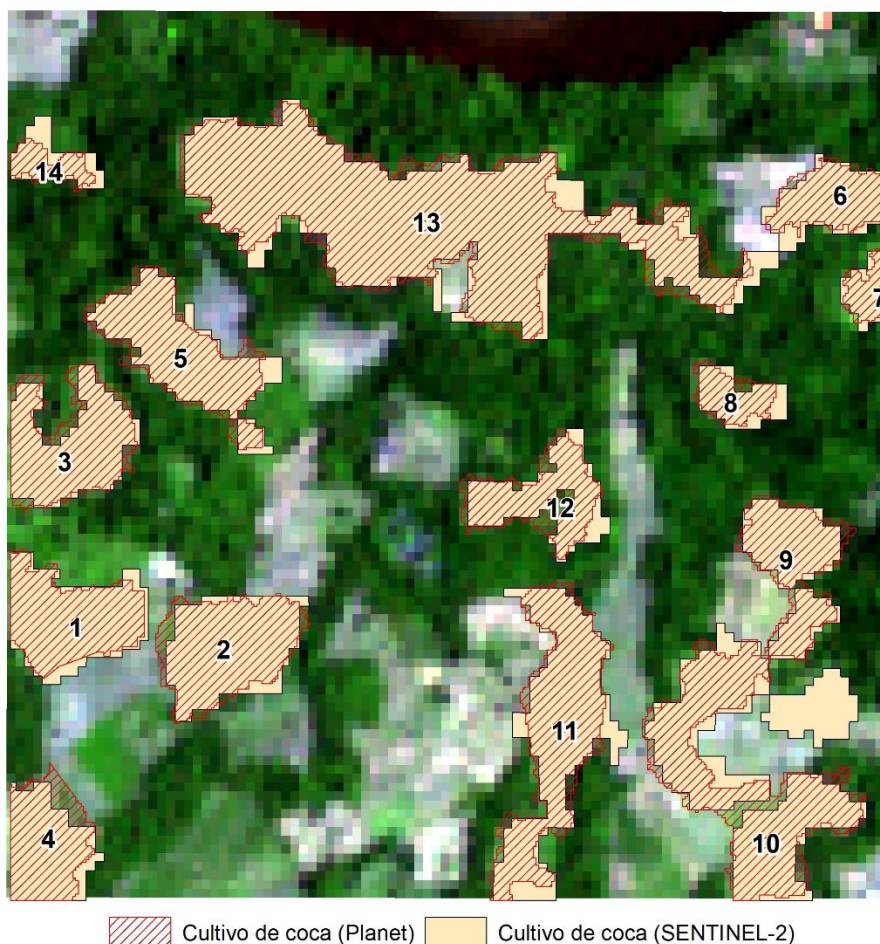


Ilustración 53. Comparativo en cuanto a clasificación de cultivo de hoja de coca
Fuente: Autor

Identificador	Área (ha)		Diferencia (ha)
	SENTINEL-2	Planet	
1	1,52	1,32	0,20
2	1,60	1,64	-0,04
3	1,39	1,55	-0,16
4	1,02	1,09	-0,07
5	1,66	1,67	-0,01
6	0,93	0,82	0,11
7	0,36	0,32	0,04
8	0,48	0,41	0,07
9	1,14	1,21	-0,07
10	2,75	2,71	0,04
11	2,26	2,17	0,09

12	0,99	1,09	-0,10
13	6,90	6,81	0,09
14	0,45	0,28	0,17
Sumatoria	23,46	23,10	0,36

Tabla 24. Comparativo de áreas para cultivos de hoja de coca para cada una de las imágenes
Fuente: Autor

De acuerdo con los datos presentados en la tabla e ilustración anterior, se puede apreciar que con la imagen Planet la delimitación de los polígonos donde se evidencian cultivos de hoja de coca, es mucho más precisa comparado con la clasificación realizada con la imagen SENTINEL-2, teniendo en cuenta la resolución espacial para cada sensor. Aunque en principio una diferencia de 0,36 ha puede parecer un valor bastante pequeño comparado con la sumatoria de cultivos de hoja de coca presentes en el AOI, gráficamente la delimitación más precisa haciendo uso de la imagen Planet compensa tanto por exceso como por defecto el área de cada uno de estos polígonos, generando así datos más aproximados a la realidad presente en terreno.

9. Visualización de resultados

De acuerdo con el más reciente informe de Monitoreo de Territorios afectados por cultivos ilícitos en Colombia, realizado por SIMCI, la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) y el gobierno nacional, para el año 2019 se reportó una reducción del 9% en el área sembrada de coca en el país, pasando de 169.000 ha en 2018 a 154.000 en 2019 (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, 2020).

Aunque se evidencio una reducción en el área sembrada comparado con el año inmediatamente anterior, preocupan algunas cifras importantes que demuestran que casi la mitad de la coca del país está en zonas de manejo especial como Parques Nacionales Naturales (con 6785 ha), resguardos indígenas (14022 ha) y en tierras de las comunidades negras (24856 ha) (El Espectador, 2020).

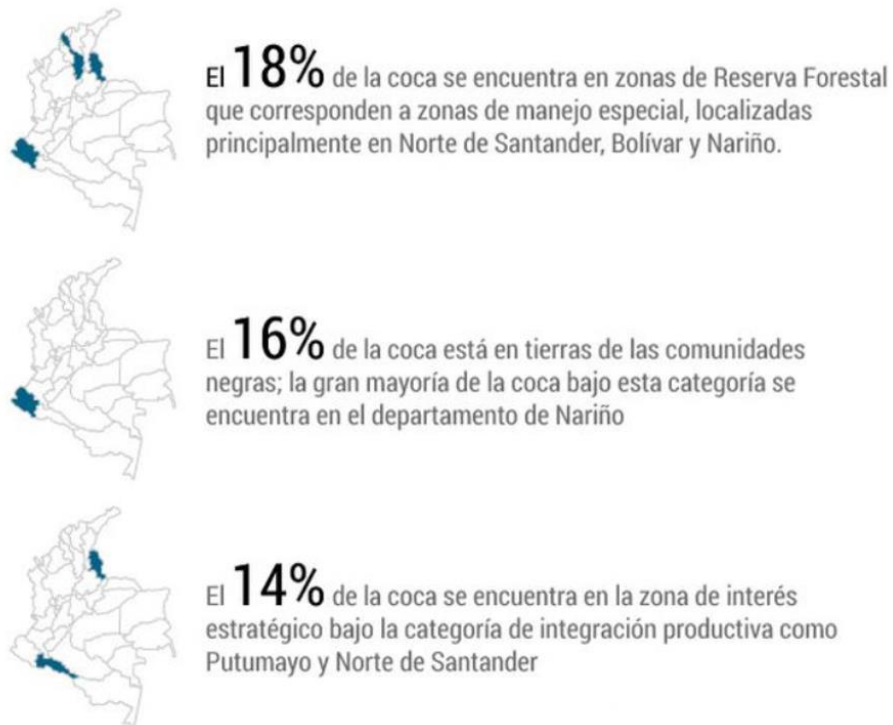


Ilustración 54. Presencia de cultivos de coca en zonas de manejo especial
Fuente: (El Espectador, 2020)

Dentro del AOI esto no es la excepción, ya que, de acuerdo con la información espacial oficial, la comunidad negra Alto Mira y Frontera (la cual se encuentra legalmente constituida) está ubicada dentro del área de estudio, abarcando 96,31 ha equivalente al 97,17% del AOI, evidenciando así que la totalidad de los cultivos de hoja de coca delimitados luego de la clasificación se encuentran dentro de esta zona de manejo especial.



Ilustración 55. Delimitación de la comunidad negra Alto Mira y Frontera dentro del AOI
Fuente: Autor

Evidenciando esta situación, y con el propósito de que sea más accesible la información sin necesidad de contar con un software de procesamiento GIS, es que se plantea la visualización de los resultados a través de una aplicación web. Para ello, hay un grupo bastante amplio de librerías que proporcionan Interfaces de Programación de Aplicaciones (API por sus siglas en inglés) para manejar mapas web, utilizando JavaScript como lenguaje base; en esta ocasión se utilizara Leaflet

9.1. Leaflet

Leaflet es la biblioteca de JavaScript de código abierto líder para mapas interactivos compatibles con dispositivos móviles, que cuenta con todas las características principales de mapeo que se requieren para el desarrollo de aplicaciones. Está diseñado teniendo en cuenta la simplicidad, el rendimiento y la usabilidad. Funciona de manera eficiente en todas las principales plataformas de escritorio y móviles, contando con gran número de complementos, una API sencilla, fácil de usar, bien documentada, y con código fuente simple y legible. (Leaflet, 2020)

9.1.1. Formato GeoJSON

Para integrar a la aplicación web la información resultante de la clasificación, que se encuentra en formato shapefile, se debe exportar e incluir en el API en formato GeoJSON.

De acuerdo con la especificación RFC 7946, GeoJSON es un formato de intercambio de datos geoespaciales basado en Notación de Objeto de JavaScript (JavaScript Object Notation – JSON por sus siglas en inglés). Define varios tipos de objetos que se combinan

para representar elementos geográficos, sus propiedades y su extensión. Este formato utiliza el sistema de referencia de coordenadas geográficas World Geodetic System 1984 (WGS84), tomando grados decimales como unidad.

Las principales propiedades del formato GeoJSON son:

- Permite codificar varias estructuras de datos geográficos
- Permite tener almacenada la información en ficheros sin necesidad de bases de datos
- Admite varios tipos de geometría: point, linestring, polygon, multipoint, multilinestring y multipolygon.

9.2. Diseño de la aplicación

La metodología llevada a cabo para el diseño de la aplicación web se resume en la siguiente ilustración:

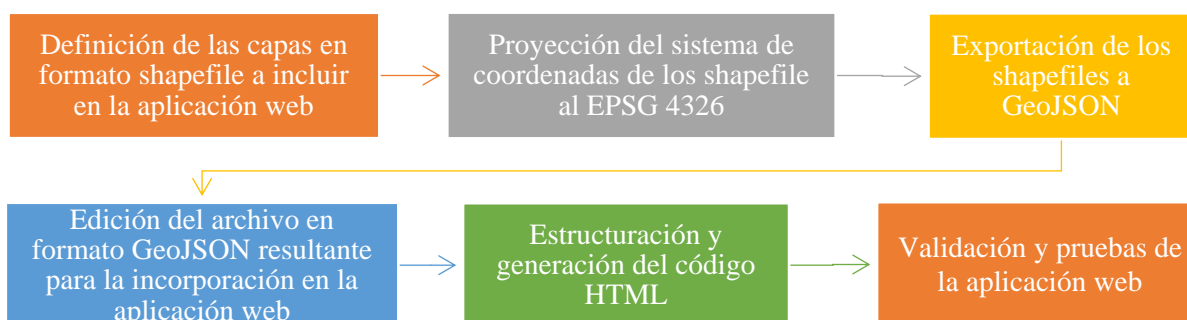


Ilustración 56. Flujograma de diseño de aplicación web

Fuente: Autor

Las capas incluidas en la aplicación web son:

Capa	Descripción	Fuente
BASE		
OpenStreetMap	Mapa base con datos provenientes de Open Street Map	OSM
ESRI Aerial	Mapa base con imágenes satelitales provenientes del servidor ESRI	ESRI
Google map	Mapa base con imágenes satelitales provenientes del servidor Google	Google
ANÁLISIS		
AOI	Área de estudio	Autor
Cultivos de coca Marzo (Planet)	Contiene los polígonos identificados luego de la clasificación realizada haciendo uso de la imagen Planet capturada el 13/03/2018	Autor
Cultivo de coca Marzo (Sentinel)	Contiene los polígonos identificados luego de la clasificación realizada	Autor

	haciendo uso de la imagen SENTINEL-2 capturada el 13/03/2018	
Cultivo de coca Agosto (Sentinel)	Contiene los polígonos identificados luego de la clasificación realizada haciendo uso de la imagen SENTINEL-2 capturada el 05/08/2018	Autor
Comunidad Negra	Contiene la delimitación de la comunidad negra denominada Alto Mira y Frontera, que se traslapa con el AOI	Datos abiertos Colombia
Capa predial	Contiene los polígonos prediales circundantes al AOI	Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC

Tabla 25. Capas incluidas en la aplicación web

Fuente: Autor

Luego de proyectar los shapefile al EPSG 4326² haciendo uso del software ArcMap, y posterior a la exportación al formato GeoJSON³, se deben editar los archivos resultantes para que puedan ser incorporados en la aplicación web.

```

Zona.js
1 [{"type":"GeometryCollection", "geometries": [
2 [{"type":"Polygon", "coordinates": [[[-78.5509033207316,1.3303222653602802], [-78.5509033207316,1.3212890628400373],
3 [-78.54199218768929,1.3212890628400373], [-78.54199218768929,1.3303222653602802], [-78.5509033207316,1.3303222653602802]]]]]
4 ]}]

```

Ilustración 57. Visualización en Notepad++ de un archivo en formato GeoJSON

Fuente: Autor

El formato GeoJSON guarda la información en una matriz como se aprecia en la ilustración anterior, por lo cual para su integración en la aplicación web, se deben asignar estos valores a una variable.

```

Zona.js
1 var Zona = [{"type":"GeometryCollection", "geometries": [
2 [{"type":"Polygon", "coordinates": [[[-78.5509033207316,1.3303222653602802], [-78.5509033207316,1.3212890628400373],
3 [-78.54199218768929,1.3212890628400373], [-78.54199218768929,1.3303222653602802], [-78.5509033207316,1.3303222653602802]]]]]
4 ]}]

```

Ilustración 58. Edición del archivo en formato GeoJSON para incorporar en la aplicación web

Fuente: Autor

Al cambiar la extensión del archivo a .js, e incluir previo a la matriz la instrucción “var zona=” se puede incorporar esta capa en el código HTML, para que sea llamada y desplegada por la aplicación web al momento de la ejecución. Esta edición, se realizó para todas las capas incluidas en la aplicación web.

Posterior a esta edición, se estructuró y generó el código fuente en lenguaje HTML con los diferentes estilos y configuraciones para cada una de las capas. Este código se presenta en el Anexo 1 de este documento.

Hecho esto, la aplicación web en el navegador Google Chrome se visualiza así:

² EPSG 4326: Sistema de coordenadas geográficas WGS 84

³ <https://mapshaper.org/>

Identificación de cultivos de coca en Colombia

Año: 2018



Ilustración 59. Visualización inicial de la aplicación web

Fuente: Autor

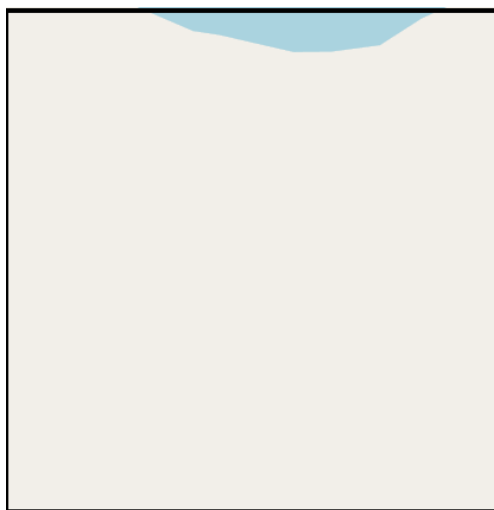
El selector de capas con los datos mencionados en la tabla anterior se visualiza así:

<input type="radio"/>	OpenStreetMap
<input type="radio"/>	ESRI Aerial
<input checked="" type="radio"/>	Google map
<hr/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	AOI
<input type="checkbox"/>	Cultivos de coca Marzo (Planet)
<input type="checkbox"/>	Cultivos de coca Marzo (Sentinel)
<input type="checkbox"/>	Cultivos de coca Agosto (Sentinel)
<input type="checkbox"/>	Comunidad Negra
<input type="checkbox"/>	Capa predial

Ilustración 60. Selector de capas de la aplicación web

Fuente: Autor

Al contar con 3 capas base, con información de servidores diferentes, la imagen satelital de base para cada una de estas se aprecia así:



OSM



ESRI



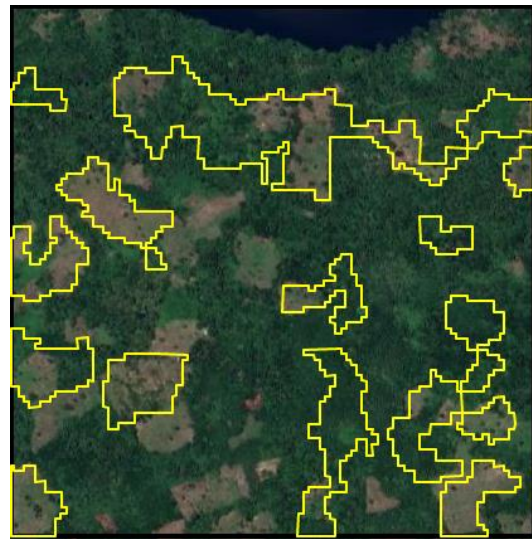
Google Map

Ilustración 61. Visualización de las imágenes satelitales base adicionadas en la aplicación web
Fuente: Autor

Así mismo, la simbología definida para cada una de las capas de Análisis es:



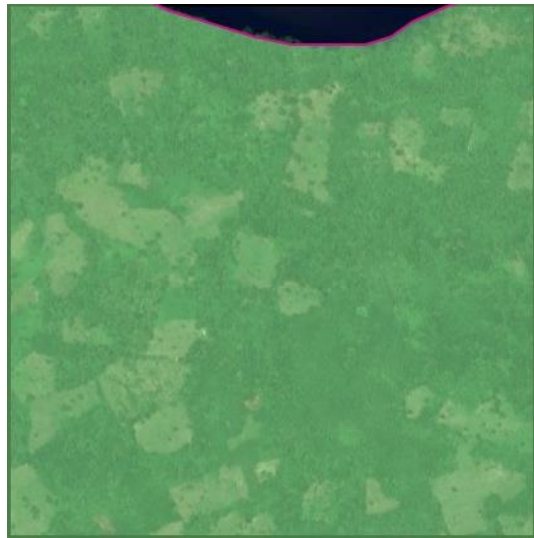
Cultivos de coca Marzo (Planet)



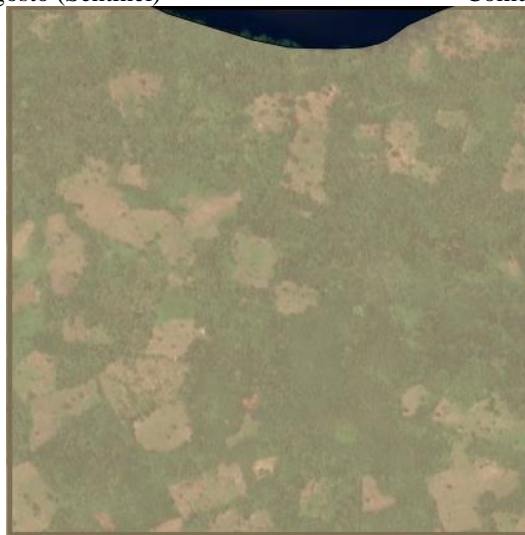
Cultivos de coca Marzo (Sentinel)



Cultivos de coca Agosto (Sentinel)



Comunidad Negra



Capa predial

Ilustración 62. Simbología para las capas de Análisis incluidas en la aplicación web
Fuente: Autor

Para que el usuario pueda interactuar con cada uno de los polígonos de las capas incluidas en la aplicación web, se definieron unas ventanas emergentes o pop-up al momento de dar clic sobre cualquiera de estos; para cada capa se incluyó la siguiente información:

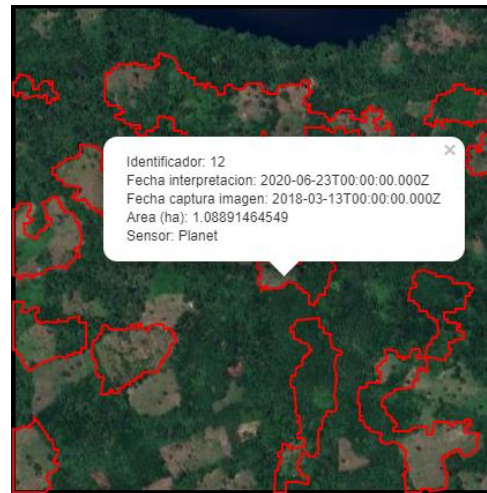
Capa	Atributos pop-up
Cultivos de coca Marzo (Planet)	Identificador Fecha interpretación Fecha captura imagen Área (ha) Sensor
Cultivo de coca Marzo (Sentinel)	
Cultivo de coca Agosto (Sentinel)	
Comunidad Negra	Nombre comunidad
Capa predial	Numero Predial Nacional

Tabla 26. Atributos del pop-up para cada capa en la aplicación web
Fuente: Autor

Estos pop-up para cada capa se visualizan así:



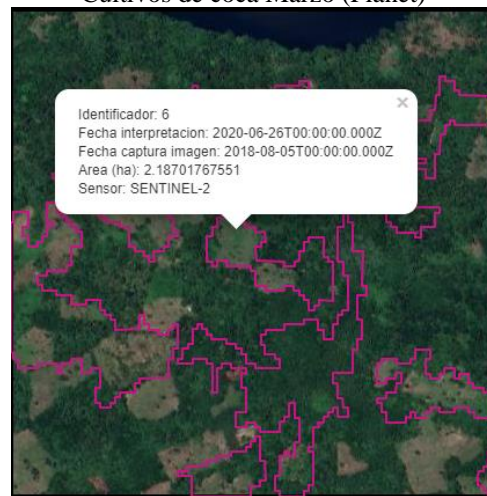
AOI



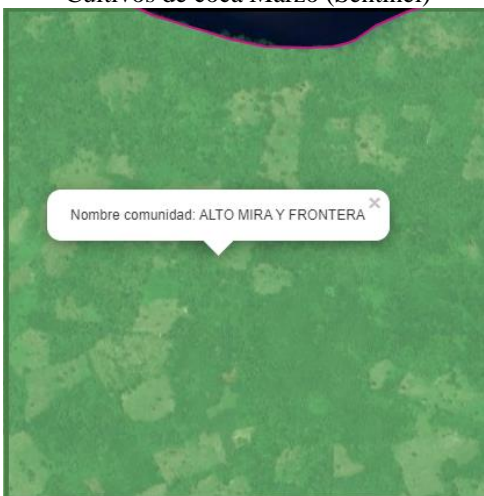
Cultivos de coca Marzo (Planet)



Cultivos de coca Marzo (Sentinel)



Cultivos de coca Agosto (Sentinel)



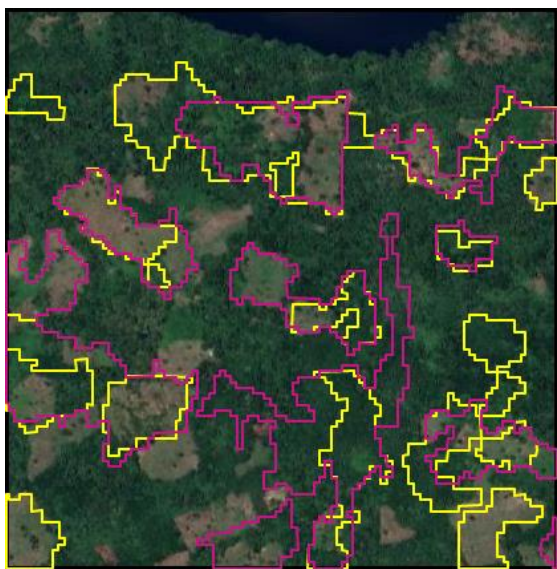
Comunidad Negra



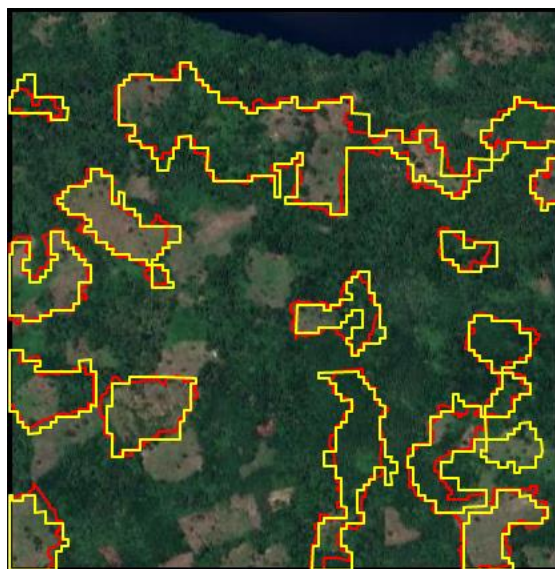
Capa predial

Ilustración 63. Visualización de los pop-up para cada capa en la aplicación web
Fuente: Autor

Hasta ahora se ha presentado individualmente cada una de las capas, sin embargo, de acuerdo con la manera como se estructuró la aplicación web, también es posible que el usuario despliegue dos o más capas y analice como fue por ejemplo la dinámica de los cultivos de hoja de coca en el AOI a lo largo del tiempo, o como la identificación de los polígonos es mucho más precisa al utilizar la imagen proveniente del sensor Planet en lugar de SENTINEL-2; estos dos escenarios se visualizan así en la aplicación web:



Superposición Marzo – Agosto (SENTINEL-2)
En amarillo clasificación mes de marzo; en morado
clasificación mes de agosto



Superposición Planet – SENTINEL-2
En rojo clasificación con imagen Planet; en rojo
clasificación con imagen SENTINEL-2

Ilustración 64. Superposición de capas de análisis en la aplicación web
Fuente: Autor

Conclusiones

A lo largo de los años, con el uso de imágenes satelitales se ha buscado alcanzar una tendencia denominada agricultura de precisión, trayendo consigo grandes ventajas para los pequeños y grandes agricultores, así como para el sector público pudiendo analizar el comportamiento de la superficie terrestre, para tomar decisiones y distribuir adecuadamente los recursos asignados para los cultivos, minimizar gastos, controlar y optimizar ciclos de producción, o como en este caso establecer políticas públicas para la protección, mejor aprovechamiento y buena gestión de los recursos.

Aunque los cultivos de coca están distribuidos a lo largo del territorio nacional, el departamento de Nariño y en particular el municipio de Tumaco ha sido de los más afectados por el fenómeno de cultivos ilícitos, en razón a su cercanía con Ecuador y al Océano Pacífico; por ello la definición del área de estudio en esta zona, permitió que la interpretación se generara de una manera más clara, teniendo en cuenta la densidad de este tipo de cultivos en el área.

En cuanto al procesamiento de las imágenes, se sabe que las imágenes SENTINEL-2 alcanzan un tamaño de píxel de hasta 60 metros, sin embargo, las bandas del Rojo, Verde, Azul e Infrarrojo cercano al tener una resolución espacial de 10 metros permitieron al combinarlas obtener datos bastante precisos que facilitaron la buena identificación no solo de cultivos de hoja de coca en el área de estudio, sino de otras coberturas importantes para entender el contexto y dinámica del suelo en la zona. Para ello, también los índices de vegetación basados en pendiente aportaron datos muy importantes para identificar coberturas como bosques y suelos desnudos.

Así mismo, luego de aplicar los realces y mejoras a las imágenes SENTINEL-2, para el mes de marzo de 2018 se identificaron después de la clasificación realizada teniendo en cuenta el agrupamiento de píxeles de acuerdo con los diferentes niveles digitales para cada uno, que 24,03 hectáreas estaban afectadas por cultivos de hoja de coca, equivalente al 24,24% del área de estudio. De igual manera, para el mes de agosto del mismo año, se evidenció un crecimiento del 2,96% en lo referente a cultivos de hoja de coca, comparado con el mes de marzo, encontrando un área afectada equivalente a 26,96 hectáreas. Aunque puede parecer un porcentaje de variación bajo, analizando las otras coberturas presentes en el área de estudio, se encontró por ejemplo que en el caso de los bosques, en los meses transcurridos entre marzo y agosto se redujo en un 6,23% su cobertura en el área de estudio, afectando el ecosistema y degradando los suelos para el establecimiento de cultivos ilícitos en estas zonas, lo que traería consigo una variación mayor si se llegase a analizar el comportamiento de cultivos de hoja de coca en un periodo posterior.

Sin embargo, teniendo en cuenta que se contó con una imagen capturada por el instrumento PS2 que hace parte de la constelación PLANETSCOPE, con una resolución espacial o GSD de 3 metros, los datos obtenidos luego del procesamiento de la imagen SENTINEL-2, se pueden tomar como una aproximación preliminar a la realidad en el área de estudio. Con la imagen Planet, correspondiente al mes de marzo de 2018, se clasificaron como cultivos de hoja de coca un total de 23,10 hectáreas, evidenciando una reducción de

0,93 hectáreas comparado con los datos obtenidos luego del procesamiento de la imagen SENTINEL-2. Contrastando cada uno de los polígonos generados luego la clasificación de cada una de las imágenes para el mismo periodo se evidenció que la diferencia en algunos casos es por exceso o por defecto, permitiendo delimitar los cultivos ilícitos presentes en el área de estudio de una manera mucho más precisa. Analizar el problema de la sobrestimación no solo mostro mejores resultados para los cultivos de hoja de coca; en lo referente a suelos desnudos, luego del procesamiento de la imagen Planet se clasificaron en esta categoría 15,96 hectáreas, lo que difiere de las 14,45 hectáreas identificadas en la imagen SENTINEL-2, lo que repercute al final que esta clase de suelo aunque en ese momento no se considera afectado por cultivos ilícitos, puede que en otro periodo de tiempo si se haya visto relacionado con este fenómeno, o por el contrario corresponda a suelos en preparación para el establecimiento de la siembra de hoja de coca.

De igual manera es importante aclarar que, aunque en esta investigación se logró analizar el problema de sobrestimación en el área de estudio para un periodo determinado, hay dos factores que limitan este análisis, que son la disponibilidad de las imágenes y el costo de estas. En primer lugar, como se presentó en el procesamiento y clasificación, se logró obtener una imagen capturada en la misma fecha tanto para la constelación PLANET SCOPE como para SENTINEL-2, donde el porcentaje de nubosidad fuera bastante bajo y así facilitara el procesamiento e identificación de las diferentes coberturas presentes en el área de estudio; sin embargo, esto no ocurrió para el mes de agosto, donde se logró obtener una imagen para SENTINEL-2, pero desafortunadamente no se consiguió para la constelación PLANET SCOPE, teniendo en cuenta las características climatológicas que presentan en el país, donde históricamente han habido zonas donde se dificulta la obtención de imágenes debido al porcentaje de nubosidad presente al momento de la captura. Por otro lado, la obtención de imágenes de la constelación PLANET SCOPE en esta ocasión se realizó a través de una cuenta educativa, solicitada directamente a la casa matriz demostrando el uso y potencial que se le daría a las imágenes obtenidas, permitiendo así el acceso de manera gratuita; sin embargo, si no se contara con esta opción, el alto costo de estas dificultaría su obtención, limitando la interpretación y afectando la tendencia de agricultura de precisión. Como se evidencio en los resultados luego de la clasificación, al usar imágenes con una resolución espacial mucho menor, los resultados obtenidos fueron más precisos, permitiendo así clasificar e identificar cada una de las coberturas presentes en el área de estudio, con una calidad mucho mayor.

El gobierno de Colombia en los últimos años ha impulsado estrategias encaminadas a generar una política de datos abiertos en sus diferentes entes territoriales, agencias y demás organismos, lo que ha repercutido en la creación de diferentes Infraestructuras de Datos Espaciales, Geovisores, tableros de control o aplicaciones geográficas para divulgar la información generada por todas las entidades. Es por esta razón, que los datos obtenidos luego de la clasificación de las imágenes decidieron presentarse a través de una aplicación web, que al hacer uso de código abierto lo hace todavía más accesible para su desarrollo. De esta manera, se logró integrar de una manera simple y sencilla información de zonas de protección como lo son las comunidades negras, para entender el impacto que ha tenido en estas zonas, el establecimiento de cultivos ilícitos; así como también, se logró incluir información oficial de los predios rurales, para ver la participación que tienen estos cultivos en cada uno de los terrenos. Esto al final, permite analizar la información de una manera

mucho más amplia, buscando facilitar la generación de políticas públicas dentro del territorio nacional para disminuir las zonas afectadas por cultivos ilícitos, a través de medidas como sustitución de cultivos o aspersión aérea, teniendo en cuenta el contexto social y geográfico de la zona de estudio.

Dentro de los compromisos pactados en el marco del acuerdo de paz firmado con las FARC, lo referente al tema de tierras y desarrollo rural es un componente fundamental que busca transformar al país, y dentro de lo cual se busca actualizar el 100% del catastro para el año 2025 mediante la implementación de la estrategia de barrido predial. Dado que es una propuesta ambiciosa que involucra varias entidades a nivel nacional, se debe facilitar este proceso a través de herramientas tecnológicas, que permitan analizar el suelo de manera masiva, y es allí donde las imágenes satelitales y aéreas juegan un papel fundamental para el cumplimiento de estas metas. Luego de este estudio, se evidencio que el procesamiento de estas imágenes permite identificar y clasificar las coberturas de uso del suelo de una manera precisa, centrándose no solo en la identificación de cultivos de hoja de coca como en esta ocasión, sino permitiendo analizar de manera general la dinámica de una zona en particular, reduciendo costos operativos al no tener que desplazarse hasta el área de estudio, y permitiendo de manera remota obtener datos precisos, que pueden ser útiles para otras entidades, para todos los ciudadanos y para el desarrollo del país en general.

Bibliografía

- Abaurrea, M. (2013). *Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra*. Navarra: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos - Universidad Pública de Navarra.
- AgriSat Iberia, S.L. (05 de Mayo de 2020). *Novedades: AgriSat*. Obtenido de AgriSat Web site: <https://www.agrisat.es/lanzado-con-exito-el-satelite-sentinel-2b/>
- Aguirre, N. (2013). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE SEÑALES DE TRÁFICO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL BASADO EN FPGA*. Sevilla: Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela Superior de Ingenieros: Universidad de Sevilla.
- Aldalur, B., & Santamaría, M. (2002). Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de teledetección*, 31-42.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona: Ariel S. A.
- Díaz, A., & Sánchez, F. (2004). *GEOGRAFÍA DE LOS CULTIVOS ILÍCITOS Y CONFLICTO ARMADO EN COLOMBIA*. Bogotá: Centro de Estudios de Desarrollo Económico, Facultad de Economía. Universidad de los Andes.
- Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional. (s.f.). *Memoria técnica del procesamiento e interpretación de imágenes satelitales y aéreas para la detección de cultivos de hoja de coca*. Sistema Integrado de Información y Monitoreo Antinarcóticos (SIIMA).
- El Espectador. (30 de Junio de 2020). *Noticias Judicial: El Espectador*. Obtenido de El Espectador Web site: <https://www.elespectador.com/noticias/judicial/naciones-unidas-reporta-reduccion-del-9-en-cultivos-de-coca-en-colombia/>
- European Space Agency - ESA. (05 de Mayo de 2020). *Missions Sentinel-2: ESA*. Obtenido de ESA Web site: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Galindo, A., & Fernández-Alonso, J. (2010). Plantas de coca en Colombia. Discusión crítica sobre la taxonomía de las especies cultivadas del género *Erythroxylum* P. Browne (Erythroxylaceae). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 455-465.
- Gates, D., Keegan, H., Schleiter, J., & Weidner, V. (1965). Spectral Properties of Plants. *Applied Optics*, 11-20.
- Geosoluciones. (27 de Mayo de 2020). *PCI GEOMÁTICA: Geosoluciones*. Obtenido de Geosoluciones Web site: <https://www.geosoluciones.cl/pci-geomatica/>
- GeoSoluciones. (s.f.). *Manual de PCI Geomática 10*.

- Giraldo, F., Gonzalez, M., & Camargo, E. (2011). Algoritmos de procesamiento de imágenes satelitales con transformada Hough. *Revista Visión Electrónica*, 26-41.
- Gobernación de Nariño. (20 de Mayo de 2020). *Historia del departamento de Nariño: Gobernación de Nariño*. Obtenido de Gobernación de Narino Web site: <https://xn--nario-rta.gov.co/index.php/departamento/historia>
- Herrera, D. (2014). *Patrones coberturas de la tierra escala 1:25.000 en los paramos priorizados Proyecto Fondo Adaptacion (Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia)*. Bogotá: Subdirección de Servicios Científicos y Proyectos Especiales - Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Huber, S., Kneubuhler, M., Psomas, A., Itten, K., & Zimmermann, N. (2008). Estimating foliar biochemistry from hyperspectral data in mixed forest canopy. *Forest Ecology and Management*, 491-501.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogota: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Infodrogas. (12 de Mayo de 2020). *Drogas: Infodrogas*. Obtenido de Infodrogas: Informacion y provención sobre drogas: <https://www.infodrogas.org/drogas/cocaina>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Metodología: Interpretación de imágenes de sensores remotos aplicada a levantamientos de cobertura de la tierra*. Bogotá: Grupo interio de trabajo de interpretación.
- Jensen, J. (2000). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Brigham Young University.
- Krawczyk, S. (2008). *Monografía: La hoja de coca*. Mar de Plata.
- Labrador, M., Évora, J., & Arbelo, M. (2012). *Satélites de Teledetección para la gestion del territorio*. Canarias: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.
- Leaflet. (2 de Julio de 2020). *About: Leaflet*. Obtenido de Leaflet Web site: <https://leafletjs.com/>
- Lopez, Y. (2012). *Metodología para identificar cultivos de coca mediante análisis de parámetros red edge y espectroscopia de imágenes*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (07 de Julio de 2020). *Noticias: MINAMBIENTE*. Obtenido de MINAMBIENTE Web site: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/4264-minambiente-llamo-la-atencion-sobre-impactos-de-cultivos-ilicitos-en-bosques-de-colombia>

- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. Centro de información de Recursos Naturales.
- Observatorio de Drogas de Colombia - ODC. (19 de Mayo de 2020). *Catálogo de servicios geográficos: Observatorio de Drogas de Colombia*. Obtenido de ODC Web site: <http://www.odc.gov.co/Portals/1/Geodata/catalogo-servicios/index.html>
- Observatorio de Drogas de Colombia - ODC. (19 de Mayo de 2020). *Metadatos visor geografico: Observatorio de Drogas de Colombia*. Obtenido de ODC Web site: <http://visor.odc.gov.co/Metadata/Densidad%20de%20cultivos%20de%20coca.pdf>
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (2019). *Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2018*. Bogotá.
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (30 de Junio de 2020). *Colombia: UNODC*. Obtenido de UNODC Web site: <https://www.unodc.org/colombia/es/informe-de-monitoreo-de-territorios-afectados-por-cultivos-ilicitos-en-colombia-2019.html>
- Oficinas de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (s.f.). *Características agroculturales de los cultivos de coca en Colombia 2005 - 2010*. Bogotá.
- PLANET. (2020). *Planet imagery product specifications*. Planet Labs Inc.
- Rejas, J. (2007). *Tratamiento digital previo de las imágenes*. Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008: Escuela de Negocios EOI.
- SM GEODIM. (21 de Mayo de 2020). *Satélites: SM GEODIM*. Obtenido de GEODIM Web site: <http://www.geodim.es/pdf/Geodim%20SENTINEL-2A.pdf>
- Universidad de Murcia. (3 de Junio de 2020). *Apuntes de la asignatura Teledetección en Geografía*. Obtenido de SIGMUR SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema06.pdf>
- Uribe, S. (11 de Mayo de 2020). *Evolución de los cultivos de coca en Colombia: 1986-2017*. Obtenido de Razon Publica Web site: <https://razonpublica.com/evolucion-de-los-cultivos-de-coca-en-colombia-1986-2017/>
- Valbuena, C., & Castro, C. (2013). *Protocolo para el proceso de captura de firmas espectrales aplicada a levantamiento de suelos*. Bogotá: Instituto Geografico Agustin Codazzi.

Anexos

Anexo 1

```
<!DOCTYPE html><html>
<meta charset="utf-8" />
<head>
  <title>Aplicacion web resultados TFM</title>

  <script src="https://unpkg.com/leaflet@1.0.2/dist/leaflet.js"></script>
  <link rel="stylesheet" href="https://unpkg.com/leaflet@1.0.2/dist/leaflet.css" />
  <script type="text/javascript" src="Zona.js"></script>
  <script type="text/javascript" src="Lotecoca_20180313_planet.js"></script>
  <script type="text/javascript" src="Lotecoca_20180313_Sentinel.js"></script>
  <script type="text/javascript" src="Lotecoca_20180805_Sentinel.js"></script>
  <script type="text/javascript" src="ComunidadNegra.js"></script>
  <script type="text/javascript" src="Rural_terreno.js"></script>

<style>
#map {
  width: 90%;
  height: 600px; }
</style>

</head>
<body>
<header>
  <h1 style="font-size: 32px; color:#0000FF; text-align: center">Identificación de cultivos de coca
en Colombia</h1>
  <p style="font-size: 20px; color:#00FFFF; text-align: center">Año: 2018</p>
</header>
  <div id="map"></div>

<script>

var estiloaoi = { //Definicion del estilo para el AOI
"fillColor": "#000000",
"opacity": 1,
"color": "#000000",
"weight": 4,
"fillOpacity": 0
};

var estilolotecoca = { //Definicion del estilo para los cultivos de coca (Planet)
"fillColor": "#CC6600",
"opacity": 1,
"color": "#FF0000",
"weight": 2,
"fillOpacity": 0
};

var estilolotecoca2 = { //Definicion del estilo para los cultivos de coca (Planet-20180313)
"fillColor": "#CC6600",
"opacity": 1,
```

```

"color": "#FFFF00",
"weight": 2,
"fillOpacity": 0
};

var estilolotecoca3 = { //Definicion del estilo para los cultivos de coca (Planet-20180805)
"fillColor": "#CC6600",
"opacity": 1,
"color": "#C71585",
"weight": 2,
"fillOpacity": 0
};

var estilocomunidad = { //Definicion del estilo para zonas de comunidades negras
"fillColor": "#98FB98",
"opacity": 1,
"color": "#C71585",
"weight": 2,
"fillOpacity": 0.5
};

var estilopredios = { //Definicion del estilo para capa de predios rurales
"fillColor": "#FFDEAD",
"opacity": 1,
"color": "#000000",
"weight": 1,
"fillOpacity": 0.5
};

function popup_aoi(feature, layer) { //Funcion que muestra el pop-up al dar clic sobre el marcador el AOI
    layer.bindPopup("Departamento: Nariño"</strong><br/>"Municipio:
Tumaco"</strong><br/>"Area AOI: 99.12 ha");
}

function popup_planet(feature, layer) { //Funcion que muestra el pop-up al dar clic sobre los poligonos
interpretados con imagen Planet
if (feature.properties && feature.properties.Fecha_inte)
{
    layer.bindPopup("Identificador: "+
feature.properties.Identifica+"</strong><br/>"Fecha interpretacion: " +
feature.properties.Fecha_inte+"</strong><br/>"Fecha captura imagen:
"+feature.properties.Fecha_capt+"</strong><br/>"Area (ha):
"+feature.properties.Area+"</strong><br/>"Sensor: Planet");
}
}

function popup_sentinel(feature, layer) { //Funcion que muestra el pop-up al dar clic sobre los poligonos
interpretados con imagen Sentinel-2
if (feature.properties && feature.properties.Fecha_inte)
{
    layer.bindPopup("Identificador: "+
feature.properties.Identifica+"</strong><br/>"Fecha interpretacion: " +
feature.properties.Fecha_inte+"</strong><br/>"Fecha captura imagen:

```

```

"+feature.properties.Fecha_capt+"</strong><br/>"+ "Area (ha):
"+feature.properties.Area+"</strong><br/>"+ "Sensor: SENTINEL-2");
    }
}

function popup_comunidad(feature, layer) { //Funcion que muestra el pop-up al dar clic sobre el area de
comunidad negra
if (feature.properties && feature.properties.NOMBRE_COM)
    {
        layer.bindPopup("Nombre comunidad: "+ feature.properties.NOMBRE_COM);
    }
}

function popup_predios(feature, layer) { //Funcion que muestra el pop-up al dar clic sobre poligonos de la
capa predial
if (feature.properties && feature.properties.CODIGO)
    {
        layer.bindPopup("Numero predial nacional: "+ feature.properties.CODIGO);
    }
}

var map = L.map('map').setView([1.32, -78.55], 15); //Centra el mapa en el AOI

capa_Lotecoca_20180313_planet=L.geoJson(Lotecoca_20180313_planet,{ style:estilolotecoca,onEachFeat
ure: popup_planet}); //Cargue del geoJson de la capa Lote Coca Planet
capa_Lotecoca_20180313_Sentinel=L.geoJson(Lotecoca_20180313_Sentinel,{ style:estilolotecoca2,onEac
hFeature: popup_sentinel}); //Cargue del geoJson de la capa Lote Coca Sentinel-2(20180313)
capa_Lotecoca_20180805_Sentinel=L.geoJson(Lotecoca_20180805_Sentinel,{ style:estilolotecoca3,onEac
hFeature: popup_sentinel}); //Cargue del geoJson de la capa Lote Coca Sentinel-2(20180805)
capa_ComunidadNegra=L.geoJson(ComunidadNegra,{ style:estilocomunidad,onEachFeature:
popup_comunidad}); //Cargue del geoJson de la capa Comunidad Negra
capa_Rural_terreno=L.geoJson(Rural_terreno,{ style:estilopredios,onEachFeature:
popup_predios}); //Cargue del geoJson de la capa de predios rurales
capa_aoi=L.geoJson(Zona,{ style:estiloaoi,onEachFeature: popup_aoi}).addTo(map); //Cargue del geoJson
de la capa del AOI

var capasadicionales = { //Elementos a desplegar en el menu del selector de capas
"AOI": capa_aoi,
"Cultivos de coca Marzo (Planet)": capa_Lotecoca_20180313_planet,
"Cultivos de coca Marzo (Sentinel)": capa_Lotecoca_20180313_Sentinel,
"Cultivos de coca Agosto (Sentinel)": capa_Lotecoca_20180805_Sentinel,
"Comunidad Negra": capa_ComunidadNegra,
"Capa predial": capa_Rural_terreno
};

//Cargue de los mapas base (ESRI, OSM, Google Map)
var osmUrl = 'https://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png';
var osmAttribution = 'Map data &copy; 2013 <a href="http://openstreetmap'+
'.org">OpenStreetMap</a> contributors';
var osm = new L.TileLayer(osmUrl, {maxZoom: 18, attribution: osmAttribution});

```

```

var esriAerialUrl = 'https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services'+
'/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}';
var esriAerialAttrib = 'Tiles &copy; Esri &mdash; Source: Esri, i-cubed, '+
'USDA, USGS, AEX, GeoEye, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, UPR-EGP, and the'+
' GIS User Community';
var esriAerial = new L.TileLayer(esriAerialUrl,
    {maxZoom: 18, attribution: esriAerialAttrib});

var gUrl = 'http://mt0.google.com/vt/lyrs=s&x={x}&y={y}&z={z}';
var gAttribution = 'google';
var googlesat = new L.TileLayer(gUrl, {maxZoom: 18, attribution: gAttribution}).addTo(map);

var baseLayers = { //Mapas base a desplegar en el menu del selector de capas
    'OpenStreetMap': osm,
    'ESRI Aerial': esriAerial,
    'Google map': googlesat
}

L.control.layers(baseLayers,capasadicionales).addTo(map);//Cargue del selector de capas.

L.control.scale().addTo(map);//Cargue de la herramienta de zoom

</script>
</body>
</html>

```