Análisis Multitemporal del cambio de Coberturas del Suelo por Minería Ilegal en el Cantón de San Pablo - Chocó

Ruth Ávila Ramírez
Hugo Enrique Van Stralen Iguaran
Fabián Alberto Rodríguez Méndez
Yesid Rentería Rodríguez
Michel Ciro Hoyos

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director (a):

Título (Ph.D., M.Sc., etc.) y nombre del director(a)

Codirector (a):

Título (Ph.D., M.Sc., etc.) y nombre del codirector(a)

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica.

Manizales, 2025

Resumen

El departamento del Chocó ha enfrentado a lo largo de su historia diversas problemáticas, como la violencia, el abandono estatal, la pobreza y la falta de oportunidades. Entre otras, sobresale la minería ilegal, que ha tenido un impacto considerable en los recursos hídricos de la región. Esta actividad ha ocasionado un aumento en los sedimentos, la desviación de cauces y el vertimiento de sustancias químicas como mercurio, ácido sulfúrico y cianuro, que se utilizan para extraer minerales, especialmente oro. Un caso representativo es el de la cuenca del Río San Pablo, situada en el Municipio de Cantón de San Pablo. Desde esta perspectiva, se evaluó el impacto de las actividades de minería ilegal a través del análisis de imágenes satelitales de diferentes años y el uso de Sistemas de Información Geográfica, lo que permitió realizar un estudio detallado de las afectaciones en esta zona a partir de información secundaria.

Algunos de los hallazgos encontrados fueron: Disminución del área de la cobertura de bosque y la vegetación secundaria, aumentó del área abierta o con poca vegetación, lo que habla de un cambio progresivo de las coberturas del suelo, disminuyendo y fragmentando notablemente los ecosistemas terrestres y acuáticos y dando paso a suelos desnudos e infértiles.

Palabras clave: Minería, afectaciones, contaminación, cuenca, imágenes, análisis.

Abstract

The department of Chocó has faced various problems throughout its history, such as violence, state abandonment, poverty and lack of opportunities. Among others, illegal mining stands out, which has had a considerable impact on the region's water resources. This activity has caused an increase in sediments, the diversion of channels and the dumping of chemicals such as mercury, sulfuric acid and cyanide, which are used to extract minerals, especially gold. A representative case is that of the San Pablo River basin, located in the Municipality of Cantón de San Pablo. From this perspective, the impact of illegal mining activities was evaluated through the analysis of satellite images from different years and the use of Geographic Information Systems, which allowed a detailed study of the effects in this area based on information secondary.

Some of the findings were: Decrease in the area of forest cover and secondary vegetation, increase in open area or with little vegetation, which speaks of a progressive change in soil cover, notably decreasing and fragmenting terrestrial ecosystems and aquatic and giving way to bare and infertile soils.

Keywords: Mining, impacts, contamination, watershed, images, analysis.

Contenido

Pág.

1. 9

2. 10

2.1 10

2.2 12

2.3 14

3. 17

3.1 17

3.2 17

4. 18

4.1 18

4.2 18

4.3 19

5. 20

5.1 20

5.2 20

5.3 20

6. 21

7. 22

7.1 22

7.2 24

7.3 24

7.3.1 25

7.3.2 26

7.3.3 27

8. 28

8.1 28

8.2 32

8.3 41

8.4 48

9. 62

10. 69

11. 70

12. 72

Lista de Mapas

Mapa 1: Área de estudio, elaboración propia 8

Mapa 2. Cartografía Base Planchas IGAC 27

Mapa 3. Área en hectárea de la detección de cambios de uso del suelo 2017 – 2024 54

Mapa 4. Pérdida de coberturas 2017 – 2024 61

Mapa 5. Cambio de coberturas 2017 – 2024 62

Mapa 6. Títulos Mineros y Áreas excluidas del Área de estudio - Agencia Nacional de Minería. 65

Lista de figuras

Figura 1. Fases comprendidas para llevar a cabo el proyecto, elaboración propia. 23

Figura 2. Fuentes secundarias 25

Figura 3. Visualización de archivos descargados - Imágenes PlanetScope 31

Figura 4. Imágenes satelitales en los años comprendidos para el análisis. 31

Figura 5. Diagrama de flujo procedimiento cálculo NDVI 33

Figura 6. Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo. 34

Figura 7. Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo. 35

Figura 8. Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo. 36

Figura 9. Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo. 37

Figura 10. Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo. 38

Figura 11. Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo. 39

Figura 12. Recorte Imagen 2017 Planet Scope. 42

Figura 13. Puntos generados por cada clase: Bosque, vegetación secundaria, áreas abiertas, sin o con poca vegetación, aguas continentales, nubosidad y sin información. 44

Figura 14. Caja de herramientas para crear signatures. 45

Figura 15. Cálculo del algoritmo Maximun likehood (máxima la probabilidad de ver lo que se está viendo en la muestra) 45

Figura 16. Resultado del análisis máxima verosimilitud 46

Figura 17. Visualización del uso de la herramienta Class Confution Matrix 47

Figura 18. Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2017. Elaboración propia 49

Figura 19. Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2018. Elaboración propia 50

Figura 20. Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2020. Elaboración propia 51

Figura 21. Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2021. Elaboración propia 52

Figura 22. Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2023. Elaboración propia 53

Figura 23. Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2024. Elaboración propia 54

Figura 24. Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura en .shp, año 2024. Elaboración propia 55

Figura 25. Área de bosques 58

Figura 26. Área de bosques 58

Figura 27. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación 59

Figura 28. Aguas continentales 60

Figura 29. Áreas con Nubosidad 60

Figura 30. Áreas sin Información 61

Figura 31. Cambio de coberturas a bosque 2017 – 2024 64

Figura 32. Pérdida de bosque 2017 – 2023 65

Figura 33. Ganancia de bosque 2017 – 2023 66

Lista de Tablas

Tabla 1. Detalles Geovisor elaboración propia 26

T**abla 2.** Parámetros imágenes planetScope 30

T**abla 3.** Lectura de valores cálculo NDVI 32

Tabla 4. Tabla de resultados del cálculo NDVI por año 40

Tabla 5. Tabla de resultados del cálculo NDVI por año 41

Tabla 6. Comparación de pérdidas y ganancia de coberturas 66

1. Introducción

La actividad de minería ilegal en el departamento de Chocó ha tenido fuertes impactos al medio ambiente, viéndose afectados el recurso hídrico, ocasionando la desviación de los cauces de los ríos, esta actividad genera impacto sobre los bosques naturales y otras coberturas.

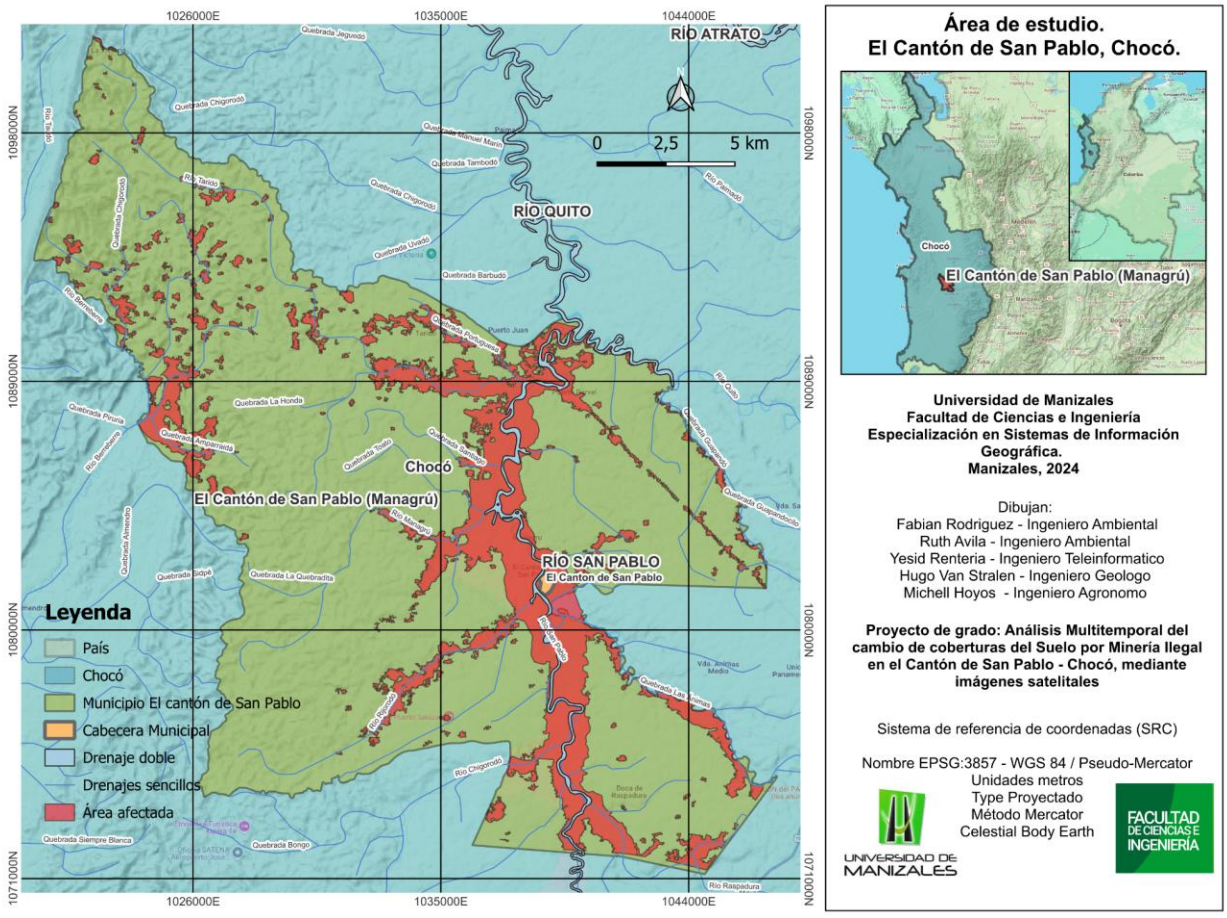
Este análisis multitemporal surgió de la necesidad de evaluar los impactos generados por la minería ilegal en diferentes épocas sobre el río San Pablo en el Municipio del Cantón San Pablo – Chocó.

Para el desarrollo del estudio se plantearon 3 fases de ejecución, la recopilación de la información, La identificación de los impactos generados por la actividad de minería ilegal, el respectivo análisis multitemporal con base en las imágenes satelitales y la generación de información temática como resultado de los procesos.

Finalmente, los resultados de este estudio permitirán comprender la dinámica de la minería ilegal en el Cantón de San Pablo y evaluar sus impactos ambientales. La información generada será de gran utilidad para la toma de decisiones en la gestión territorial y el diseño de políticas públicas para combatir la deforestación y la degradación ambiental.

2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

2.1 Descripción del área problemática



Mapa 1*: Área de estudio, elaboración propia*

El departamento del Chocó se encuentra ubicado al occidente del país, siendo uno de los 32 departamento de Colombia, limitando con el mar Caribe y la república de Panamá en el norte; Antioquia, Risaralda y Valle del Cauca en el este; el departamento del valle del cauca por el sur

y hacía el oeste con el Océano Pacifico. Este departamento tiene una extensión territorial de 4.796.941,048 ha, lo equivale al 4,2% del territorio nacional. El área de estudio en donde se realiza esta investigación es el sector de la cuenca del Río San Pablo ubicada en el Municipio del Cantón de San Pablo en el departamento del Chocó, caracterizado por la pertenecer a la subregión de San Pablo en donde predominan actividades de extracción minera de recursos como el oro, plata, el platino, además a esto se suma la extracción de madera (PDEA – Chocó 2020 – 2023 - Agencia de Desarrollo Rural, 2020).

Para el año 2020 según el DANE se estima que en este Municipio habitaban 6.286 personas, estando distribuidas en la cabecera municipal con 2.911 habitantes y 3.375 habitantes en centros poblados y rural disperso. Cuenta con 8 corregimientos: (Managrú cabecera municipal, Puerto Pervel, Taridó, La Isla, La Victoria, Guapandó, Boca de Raspadura y Pavaza) en los cuales se encuentran 9 veredas: Boca de Jorodó, Duana, Taudó, Puerto Juan, Santa Lucía, Calichón, Los Zainos, Patocito y Chiciburrú, con un área de 52.556,11 ha (Plan de Desarrollo 2024 - 2027 “Con voluntad porque merecemos más”, 2024).

Este Municipio cuenta con una gran cantidad de fuentes hídricas y quebradas, las cuales escurren de forma superficial y subterránea, uno de los que representa mayor importancia para el Municipio del Cantón San Pablo, es el Río San Pablo el cual nace en el Municipio de Istmina y desemboca sobre el Río Quito con una extensión aproximada de 28 km, caudal promedio de 88.043 L/seg; uno de los principales problemas es la contaminación con mercurio y alta turbidez por el trabajo minero, generando mala calidad del agua para uso humano y disminución de la

vida acuática (Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio del Cantón de San Pablo - Chocó, 2016).

2.2 Formulación del problema

Las actividades mineras a nivel mundial son de las pocas industrias que tienen la capacidad de modificar significativamente paisajes completos, ecosistemas y sociedades en su área de influencia, siendo la causa de una gran variedad de impactos sociales, económicos y en el medio ambiente en diferentes escalas (Werner, 2019). En este sentido, dichos impactos se agravan cuando se realizan prácticas ilícitas de manera artesanal e informal al margen de la ley.

La problemática de la minería ilegal en Colombia se fundamenta en que al no ser una actividad que lleve un control y seguimiento, se ejecuta sin cumplir requisitos de carácter ambiental, económicos, de seguridad e higiene, con mano de obra no calificada y técnicas de extracción que en muchos casos son empíricas y no cuentan con un soporte técnico que garantice la reducción de impactos en su entorno.

En Colombia, según la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, por sus siglas en inglés) se estima que el 73% de las actividades mineras que se pudo detectar por medio de imágenes satelitales sin contar la minería subterránea y de subsistencia es ilegal, revelando que entre el 2021 a 2022, la superficie destinada a la minería ilegal aumentó 5139 hectáreas, representando un incremento del 8%, estas actividades son más representativas

en los departamentos del Chocó con 89% y Antioquia con el 51% de la operación ilegal. (Informe de Explotación de Oro de Aluvión, 2022).

Las actividades ilícitas causan grandes impactos al medio ambiente, que en muchas ocasiones afectan de una forma irreversible, donde se ven afectados ecosistemas y comunidades enteras, pérdida de hábitat, desplazamiento de la biodiversidad, deforestación, contaminación de las cuencas hidrográficas, la privación a las comunidades locales de los recursos vitales, afectando la seguridad alimentaria de la zona, debido al uso de sustancias químicas, maquinarias y artefactos que no solo ponen en riesgo al ambiente, sino que también afecta la salud de las personas que llevan a cabo estas actividades, además, genera más empobrecimiento y aumenta la violencia armada.

La explotación minera ilegal afecta significativamente al entorno natural y cultural de Colombia, impactando más del 60% de sus cuencas hidrográficas y el 28% de las áreas protegidas (MADS, 2019). De acuerdo con UNODC, 2023, esto se transforma en una problemática grave, ya que Colombia tiene un gran potencial ambiental, en total se estima que se han afectado 45.780 hectáreas, donde el 76% de las actividades se realizaron en la reserva forestal del Pacifico, 24% en la reserva forestal del Magdalena y el 0.5% en la reserva forestal de la Amazonia.

La UNODC también reveló que la minería ha afectado comunidades negras del Chocó y 557 hectáreas en resguardos indígenas de esta misma zona, donde se ha identificado la presencia de la guerrilla del Ejército de Liberación Nacional (ELN) y las autodefensas Gaitanistas de Colombia o el Clan del Golfo.

La actividad minera en el Chocó Biogeográfico es principalmente la de oro y platino, aunque existen yacimientos de minerales como cobre, manganeso, cromo, zinc, antimonio, carbón, azufre, calizas, agregados y rocas ornamentales, algunos de ellos actualmente en explotación (Ayala, 2005).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se formula la siguiente pregunta de investigación. ¿Cuál es el impacto generado por la minería ilegal en las coberturas del suelo en la cuenca del río San Pablo, Chocó, entre los años 2017 a 2024, analizado mediante el uso de los sistemas de información geográfica?

2.3 Justificación

La minería ha sido la principal actividad económica de la región del Chocó desde la época colonial, pero la mayor parte de su historia ha sido artesanal por agricultores, comunidades afrodescendientes, comunidades indígenas y empresas extranjeras a través de concesiones otorgadas por el estado colombiano.

La minería ilegal es una de las principales causas de deforestación y contaminación ambiental en Colombia. En el Pacífico, para iniciar las operaciones mineras ilícitas es necesario arrasar amplias áreas de bosque, lo que deja sin hábitat a gran parte de la biodiversidad de esta región, además durante la explotación, los mineros ilegales utilizan mercurio y otros productos químicos que envenenan los ríos, las especies que viven en ellos, y los humanos cuya alimentación y sustento depende de éstos.

Por su parte, las redes criminales corrompen a funcionarios públicos para garantizar el buen funcionamiento del negocio. Así mismo, organizaciones criminales como el Ejército de Liberación Nacional (ELN) y ex disidentes de la guerrilla de las FARC, seducidas por los altos precios del oro, supervisan directamente las operaciones mineras ilegales y extorsionan a los mineros. Además, utilizan oro extraído ilegalmente para lavar dinero derivado del tráfico de drogas. (WWF-Colombia).

Todas estas actividades mineras han afectado enormemente, especialmente el agua de los principales ríos y quebradas de la región, lo que reduce la calidad de vida de las personas e impide que puedan alimentar a sus familias y avanzar hacia un futuro mejor.

El impacto de la minería ilegal en el Río San Pablo es tan fuerte, que hoy es prácticamente imposible determinar el cauce original que alguna vez tuvo el río, sus brazos y sus afluentes, junto a lo que se puede apreciar un crecimiento considerable de zonas deforestadas, dado que la minería ilegal se desarrolla tanto en los ríos -minería aluvial- como en tierra -minería de veta a cielo abierto-, explotaciones que sumadas producen graves procesos de deforestación.

Los ejercicios de monitoreo de coberturas en Colombia, se realizan a partir del procesamiento digital de imágenes satelitales ópticas, lo que resulta ser una limitante en el departamento del Chocó al estar localizado geográficamente en una zona con altos niveles de nubosidad, como consecuencia de los vientos transectoriales que soplan sobre el océano Pacífico, adquieren una trayectoria del oeste hacia el este y penetran al interior de Colombia en forma de una corriente superficial (Rueda & Poveda, 2006) generando escasez de información espacial,

por tanto se requieren nuevas herramientas como la interpretación de imágenes de radar que no dependen de las condiciones climáticas y se pueden obtener de manera gratuita, reduciendo costos y tiempo para determinar factores hídricos.

A pesar de las limitantes mencionadas, es viable la descarga, análisis y procesamiento con imágenes satelitales, para este caso de estudio las originadas por la constelación de satélites PlanetScope, que junto con el uso de herramientas para el procesamiento en los softwares ENVI y ArcGis Pro y el análisis de información, permiten obtener resultados buscados, como la medición y comparación de áreas con la misma cobertura por año

.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el impacto por las afectaciones generadas debido a las actividades mineras mediante la interpretación de imágenes satelitales en la cuenca del Río San Pablo, Municipio del Cantón de San Pablo, departamento del Chocó.

3.2 Objetivos específicos

- Recopilar información secundaria del área de estudio.
- Realizar el análisis multitemporal de la cuenca del Río San Pablo para estudiar los cambios en la superficie terrestre e identificar los impactos generados por la minería ilegal.
- Generar información base y temática de la zona de estudio que permita estimar las afectaciones en la cuenca del Río San Pablo.

4. Antecedentes

Para los antecedentes se tienen en cuenta una visión global, nacional y local para tener una percepción amplía desde las diversas investigaciones con temas relacionados al análisis multitemporal, el uso de herramientas e imágenes satelitales para determinar los cambios en el uso del suelo producto de la minería y otras actividades que afectan las cuencas hidrográficas.

4.1 Global

Guzmán Quinto, C. (2023), Se tiene como objetivo evaluar las zonas afectadas realizando un análisis multitemporal de imágenes satelitales en donde se visibiliza la minería en el Cantón Camilo Ponce Enriquez, provincia de Azuay (Ecuador) mediante el uso de Teledetección (SIG) para la elaboración de un plan de mitigación en las afectaciones ambientales ocasionadas por estas actividades.

Ruiz, V., Savé, R., Herrera, A. (2013), Busca mediante un análisis multitemporal determinar los cambios del uso del suelo en el paisaje terrestre durante el periodo 1993 - 2011, deduciendo la evolución del medio natural o las persecuciones de la acción humana sobre el medio en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflor Moropotente Nicaragua.

4.2 Nacional

Carlos, C. O. L., & Asesor. (2017), Realizar un análisis multitemporal de los cambios en las coberturas vegetales y usos del suelo en la zona de la cuenca del Río San Francisco en el Municipio de Puracé, en el periodo 1989 a 2014.

Flórez-Yepes, G. Y., Rincón-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M. (2017), El objetivo consiste en analizar los impactos ambientales mediante un análisis multitemporal en el periodo 1998 - 2010 de las coberturas vegetales usando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales (Colombia).

4.3 Local

León, Q. P. J. (2020), se busca evaluar las afectaciones generadas por actividades relacionadas con la minería en la Subzona Hidrográfica del Río Quito en el departamento del Chocó; mediante la interpretación de imágenes satelitales.

Jhoana, A. M. G. (2019), este trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis multitemporal de las características geomorfológicas de la cuenca del Río Quito en departamento del Chocó durante el periodo de tiempo del 2007, 2010 y 2018 generadas por la extracción minera de oro de aluvión a cielo abierto.

5. Referente normativo y legal

5.1 Artículo 79, Constitución Política de 1991

"*Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La Ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectar.*

Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines."

5.2 Artículo 80, Constitución Política de 1991

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y se reordena el sector público que se encarga de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos renovables, se reorganiza el Sistema Nacional Ambiental SINA, en el cual se tiene como uno de sus fundamentos establecer los estudios de impacto ambiental como instrumento básico a la hora de implementar o realizar obras y actividades que afecten significativamente el medio ambiente natural o artificial.

5.3 Ley 1333 de 2009, Ministerio de Ambiente

En esta ley se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y otras disposiciones. En el Artículo cuatro se establece que las sanciones administrativas en materia ambiental tienen una función preventiva, correctiva y compensatoria para garantizar la efectividad de los principios y fines previstos en la Constitución, los tratados internacionales, la ley y el

reglamento. Así mismo, estas buscan que la actividad o la situación tengan una prevención, impedimento o evitar que atente contra el medio ambiente, los recursos naturales, el paisaje o la salud humana.

6. Referente teórico

Sistemas de información geográfica: Herramienta informática capaz de gestionar y analizar información georreferenciada, buscando la resolución de problemas de orden territorial y medioambiental (Miguel, S. P. J., 2020).

Teledetección: Es una de las principales herramientas disponibles que proporcionan información sobre las características del entorno que influyen en la biodiversidad, la infraestructura, la distribución espacial de los diferentes componentes del entorno, como el uso del suelo, cobertura terrestre, perturbación ecológica, entre otras, mediante imágenes satelitales (Sanchez - Diaz, Baltazar, 2018).

Minería: La actividad minera realiza el reconocimiento, exploración y explotación de los recursos naturales, sin embargo, esta actividad se realiza de manera legal e ilegal, en esta última se considera de esta forma porque se realiza en zonas prohibidas por la ley, incumpliendo con las exigencias de las normas de carácter administrativo, social, técnico y medioambiental (Escobar López, Y, 2016).

Cuenca hidrográfica: Se considera como el espacio del territorio en el cual naturalmente discurren todas las aguas en cursos de agua superficiales, es decir, aguas que provienen de acuíferos, deshielo, precipitaciones etc. que posteriormente se dirige hacia un lugar o punto de

descarga. La cuenca hidrográfica proporciona a las comunidades diferentes bienes y servicios, tales como el abastecimiento de agua para consumo humano, para actividades agrícolas o industriales (Aguirre Núñez, M. 2011).

Monitoreo: Es el seguimiento de un ejercicio con el fin de identificar de manera sistemática la calidad del desempeño de un sistema, subsistema o proceso, permitiendo analizar el avance y proponer acciones para tomar decisiones y lograr los objetivos establecidos. (Valle, Rivera, O. 2008).

Impacto: Se considera como el cambio logrado en las condiciones sociales, ambientales, económicas de la población, como resultado de las actividades, proyectos o programas, el impacto se puede considerar positivo o negativo. (DNP, 2015).

Desviación de cauces: consiste en la ejecución de un cauce artificial, para lo cual hay que hacer una serie de excavaciones provisionales que produzcan la conducción suficiente para que el agua circule por el nuevo cauce, es una obra que transportará el agua desviada hasta un punto agua abajo de la obra (Figueroa, S. F.).

7. Metodología

7.1 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico es de carácter mixto, ya que, durante el proceso de recolección y análisis de información, se reunirán, analizarán y generarán datos cualitativos y cuantitativos. Cualitativos al analizar la literatura existente sobre la minería en el área de estudio en los últimos

ocho años (2017 - 2024), que nos proporcionará un marco teórico que complementará el análisis geográfico de las imágenes satelitales, permitiéndonos observar los cambios en los patrones de cobertura del suelo y validar los hallazgos documentales.

Por otro lado, el análisis cuantitativo se llevará a cabo mediante el uso de software de procesamiento digital de imágenes. Con una parametrización adecuada, generamos datos numéricos, como índices y áreas, que facilitarán la comparación de cada imagen y nos permitirán cuantificar los cambios en las coberturas del suelo a lo largo del tiempo.

Aprovechando las fortalezas de ambos enfoques, se busca ofrecer una visión integral del tema de investigación, lo que nos ayudará a alcanzar los objetivos del estudio de manera más efectiva.

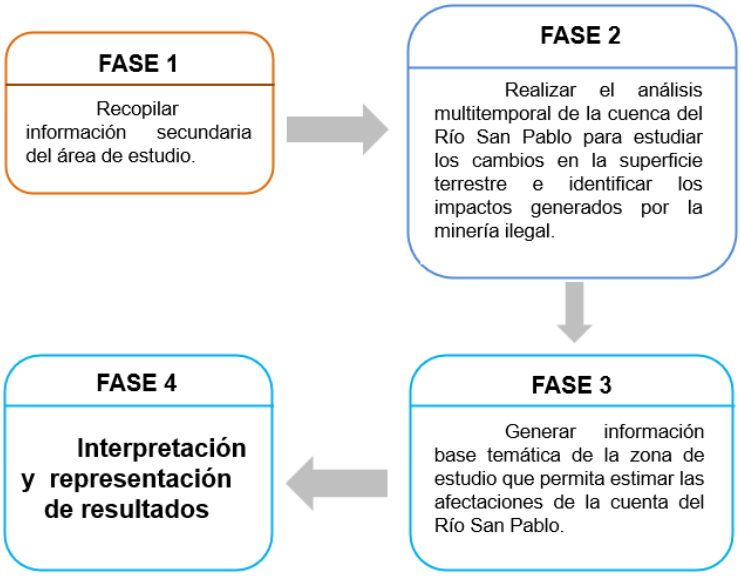


Figura 1. *Fases comprendidas para llevar a cabo el proyecto, elaboración propia.*

7.2 Tipo de estudio

El presente trabajo es una investigación de tipo cuantitativa y aplicada, donde se utilizarán datos numéricos obtenidos de las imágenes satelitales para medir y cuantificar cambios en la cobertura del suelo, de la misma manera se emplearán métodos estadísticos para analizar los datos y establecer relaciones entre las variables expansión de la minería y la pérdida de la cobertura, los resultados obtenidos podrán generalizarse a una población más amplia.

Otras características importantes en la realización de este trabajo enfocado en el tipo de estudio en donde se analizan imágenes satelitales de diferentes periodos y se estudia la evolución de un fenómeno a lo largo del tiempo; dado a estas características se utiliza la tecnología de los sistemas de información geográfica para analizar datos espaciales y generar mapas temáticos que son permiten la identificación de las zonas afectadas y los cambios de coberturas del presente estudio, combinando los conocimientos de diversas disciplinas como la teledetección, la geografía, la ecología y las ciencias ambientales.

En general, este trabajo de investigación busca generar conocimiento científico para abordar problemas ambientales concretos y contribuir a la toma de decisiones informales.

7.3 Procedimiento

La metodología aplicada contiene 3 fases que permitieron realizar el análisis multitemporal del cambio de coberturas del suelo por minería ilegal en el Cantón de San Pablo – Chocó mediante imágenes satelitales.

7.3.1 Fase 1. Recopilar información secundaria del área de estudio.

Figura 2. *Fuentes secundarias*

Se obtuvieron imágenes de la plataforma Planetscope para la zona de estudio, ya que estas ofrecen mayor resolución, proporcionando detalles sobre los impactos de la minería en áreas críticas.

Por otro lado, se obtiene información a través del uso de geovisores que permiten la obtención de información cartográfica y temática para la realización del trabajo y el análisis de los resultados.

Tabla 1. *Detalles Geovisor elaboración propia*

Geovisores	
ANNA Minería, 2024	Cartografía base
	Títulos Mineros
MAPBIOMAS Colombia,2024	Mapa de coberturas y usos del suelo.

Cabe resaltar que Mapbiomas Colombia es una iniciativa de la Fundación Gaia Amazonas, la red MapBiomas Network y la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), quienes a su vez colaboran técnicamente con la Universidad Nacional de Colombia e Image Processing Laboratory and Geo (LAPIG) y tecnológicamente con Ecostage y Google.

De igual manera y como apoyo se extrae la cartografía base de la zona de estudio de las planchas del IGAC para comparar el cauce del río con respecto al análisis.

7.3.2 Fase 2: Realizar el análisis multitemporal de la cuenca del Río San Pablo para estudiar los cambios en la superficie terrestre e identificar los impactos generados por la minería ilegal.

Se realiza un análisis cualitativo de informes y estudios previos que detallan las afectaciones de la minería en la región con datos históricos que aporten información sobre la evolución de la actividad minera y sus efectos en la cuenca.

Mediante el software ArcGis Pro se realiza el cálculo del ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI), que es un indicador del estado de la vegetación en términos de color, densidad y salud de las plantas, que se puede identificar en cada píxel que compone una imagen, para el monitoreo agrícola, evaluación de ecosistemas y gestión de recursos naturales. Adicionalmente ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo artificial.

Por otro lado, ArcGIS Pro también facilita el procesamiento de imágenes satelitales y la detección de cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo. El procesamiento de estas imágenes permite la identificación de variaciones espaciales y temporales a largo plazo en los ecosistemas afectados por actividades humanas, como la minería ilegal (Sánchez-Sánchez et al., 2021). Se realiza una clasificación supervisada para identificar distintos tipos de cobertura, complementadas con el cálculo de índices. Además, se utiliza con los datos obtenidos el cruce de la información con lo que se genera la detección de cambios para resaltar las áreas impactadas por la minería ilegal, y se calcularán las superficies afectadas mediante herramientas SIG (Deng et al., 2014).

7.3.3 Fase 3: Generación de información base y temática que permita estimar las afectaciones en la cuenca del Río San Pablo

Las imágenes ya analizadas y clasificadas en la fase anterior servirán como insumo principal para generar capas temáticas de las coberturas.

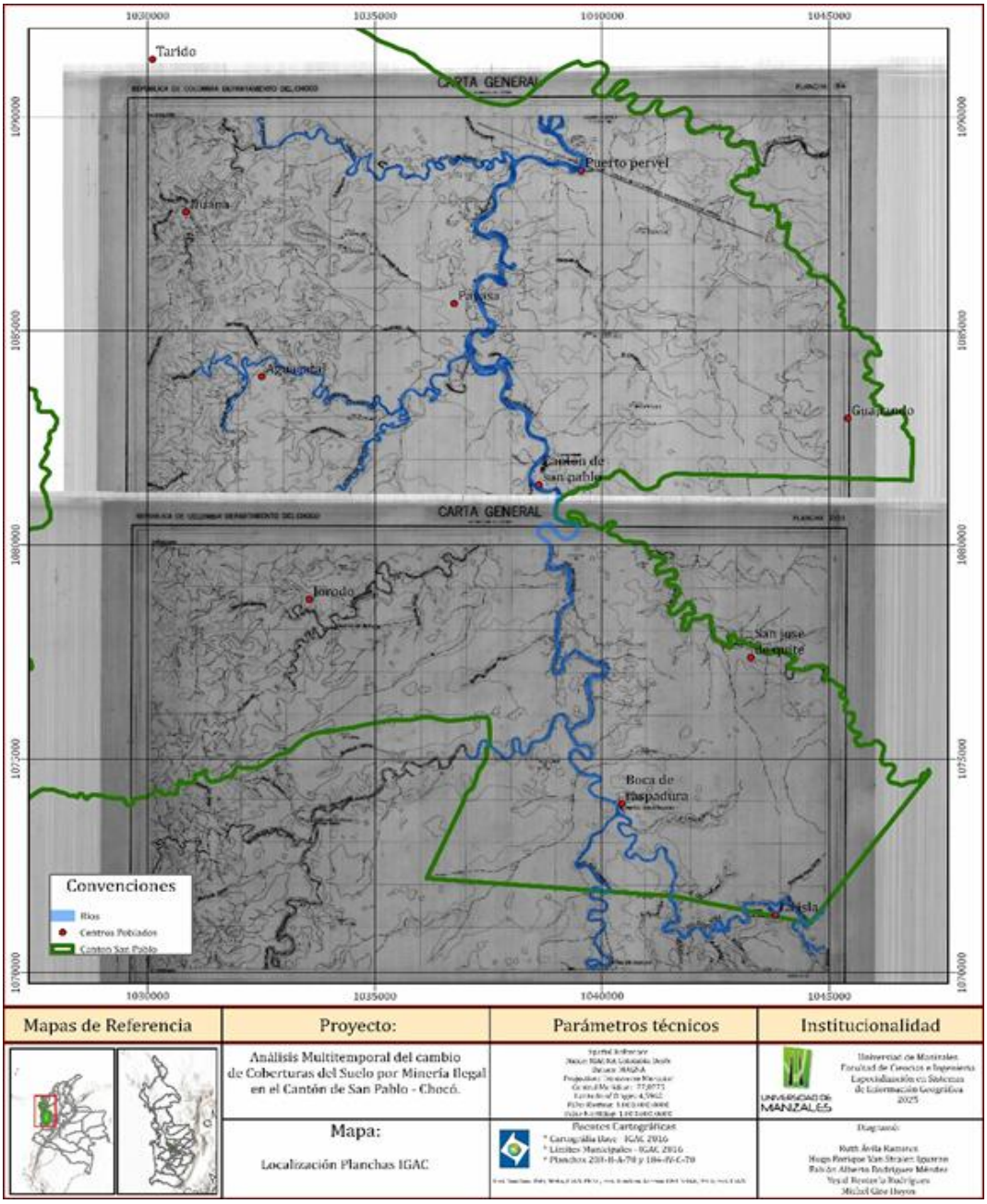
Herramientas, métodos y técnicas de análisis: Se utilizan herramientas SIG como ArcGIS Pro, QGIS y ENVI, para la creación de capas, bases de datos, estadísticas y mapas temáticos que muestran las áreas más afectadas por la minería ilegal clasificando como pérdidas las áreas en donde se ha producido una disminución de la cobertura o ganancias a un aumento de la cobertura en el periodo de análisis, lo cual permite estimar el valor en hectáreas (ha) de la afectación generada por la minería en la zona estudiada, teniendo en cuenta los títulos o concesiones mineras que se encuentran vigentes para determinar la legalidad de las actividades de extracción.

8. Resultados

8.1 Fase 1. Recopilar información secundaria del área de estudio

De acuerdo con la fase inicial del procedimiento, se realiza el levantamiento de la información, en este caso, se usa información secundaria proporcionada

Se digitaliza y se extrae la cartografía base de las planchas del IGAC 203-II-A-70 y 184-IV-C-70 a escala 1:25.000.



Mapa 2. *Cartografía Base Planchas IGAC*

De igual manera se adquieren las imágenes de satélite de PlanetScope el cual consiste en productos de datos con alta resolución desde 20m/px hasta 3m/px de la superficie terrestre, esta plataforma permite la descarga de imagenes en cuentas académicas para las combinaciones de 4

bandas BGRN (Blue, Green, Red and NIR con corrección geométrica, radiométrica y de reflexión de superficie). (European Space Agency, 2024.).

Tabla 2. *Parámetros imágenes planetScope*

PARÁMETROS DE LAS IMÁGENES PLANETSCOPE		
Resolución (m)		X: 4.77, Y: 4.77
Número de bandas		4
Resolución radiométrica	Azul	455 - 515 nm
	Verde	500 - 590 nm
	Roja	590 - 670 nm
	NIR	780 - 860 nm
Proyección cartográfica		WGS 84, WebMercator
Datum		WGS 84
Formato		GeoTIFF

A la hora de la descarga se obtiene un producto ZIP el cual contiene una imagen .TIFF del producto.

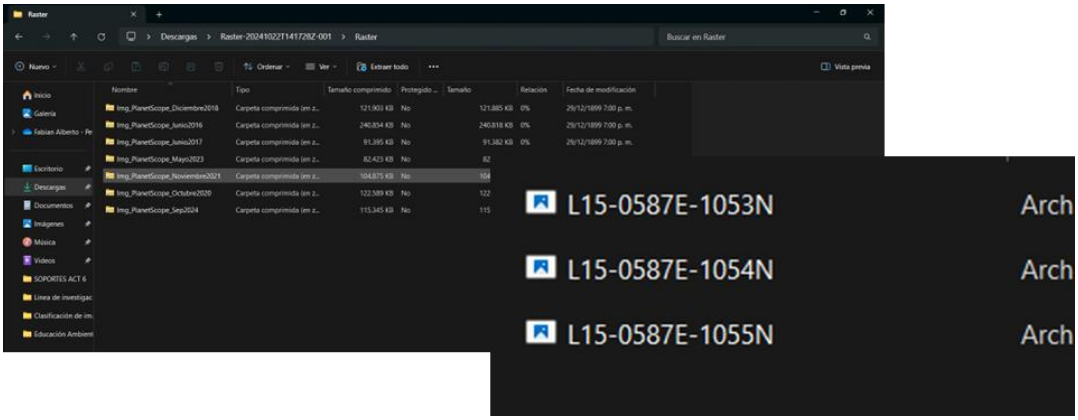


Figura 3. *Visualización de archivos descargados - Imágenes PlanetScope*

Se obtienen imágenes de los años 2017, 2018, 2020, 2021, 2023 y 2024, con las cuales se trabaja para realizar el análisis respecto a los cambios generados en las coberturas y las afectaciones generadas por la minería ilegal en el área de estudio. Las imágenes correspondientes a los años 2019 y 2022 no fueron obtenidas debido a la alta nubosidad que se presentó en el área de estudio.

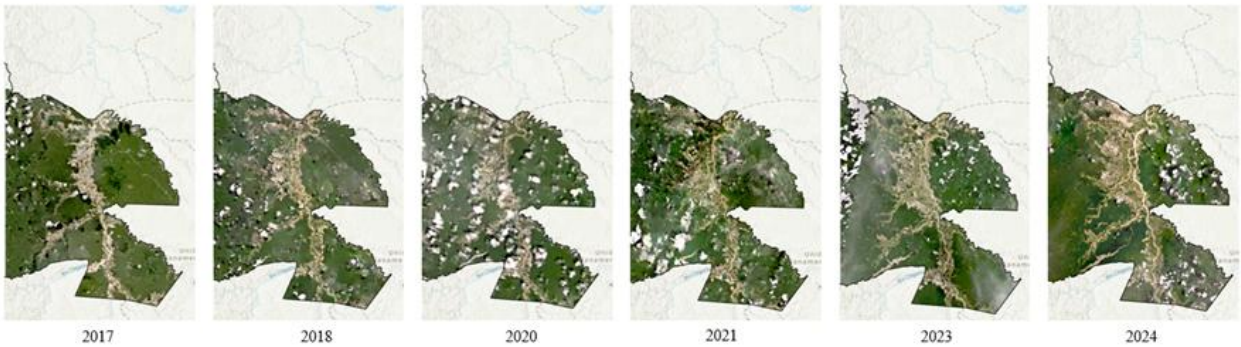


Figura 4. *Imágenes satelitales en los años comprendidos para el análisis.*

8.2 Fase 2. Procesamiento e identificación de los impactos generados por la actividad minera ilegal en el uso del suelo de la cuenca del río San Pablo

Se realiza el cálculo del ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI), con la diferencia normalizada entre la banda del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR), mediante la aplicación de la siguiente fórmula en la herramienta *Calculadora Ráster*: **NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED)**, en el software ArcGis Pro que permite este tipo de tratamiento en imágenes satelitales, posteriormente en el mismo software se hace la reclasificación según los rangos de valores de la tabla definida del cálculo NDVI, mediante la herramienta *Reclassify*, los resultados del cálculo varían de -1 a 1 como valor para cada pixel de la imagen, , posteriormente se convierten las imágenes en polígonos para poder hacer la sumatoria de coberturas y poder hacer la comparación, para esto se hace uso de la herramienta *Ráster to Polygon*., con las siguientes valoraciones:

Tabla 3. *Lectura de valores cálculo NDVI*

Clase	Valores de NDVI	Cobertura de la tierra	Descripción
1	< -0.1	Clases no vegetales	Ríos, quebradas, lagunas, nubes.
2	-0.1 – 0.15	Tierra Desnuda	Tierras degradadas, asentamientos, vías, suelo sin cobertura vegetal.
3	0.15 – 0.25	Vegetación Dispersa	Tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales, terreno arado para cultivo.
4	0.25 – 0.40	Vegetación Abierta	Vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosque seco.
5	> 0.40	Vegetación Cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo.

Fuente: (Vargas N. H., 2017)

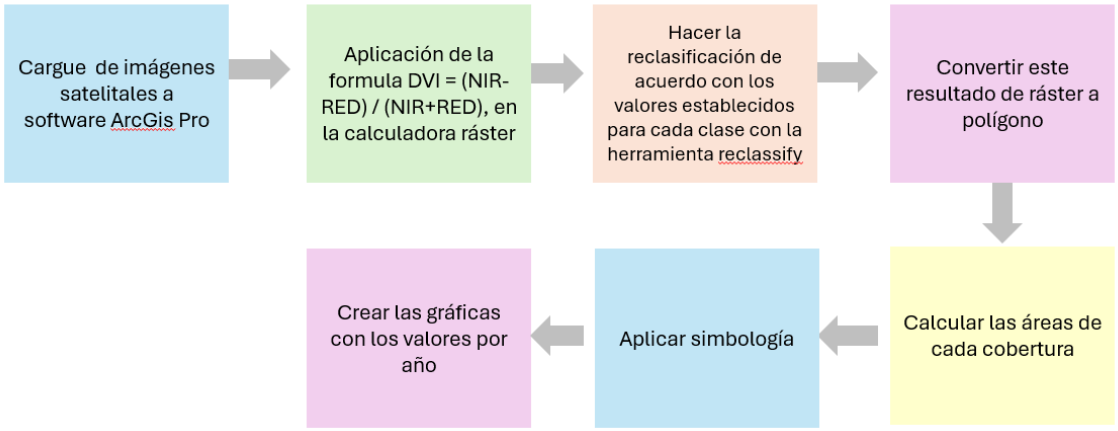


Figura 5. *Diagrama de flujo procedimiento cálculo NDVI*

Realizando este procedimiento se presentó una dificultad, ya que luego de aplicar la fórmula en la calculadora ráster y obtener la imagen para cada año del análisis, se observa que estas presentan valores entre 0 y 1 únicamente para los pixeles, no presentan valores negativos, lo cual podría deberse a que la zona es muy boscosa y no identifica claramente las coberturas coberturas con valores negativos, razón por la cual se trabajaron valores de 0 a 1 en la reclasificación.

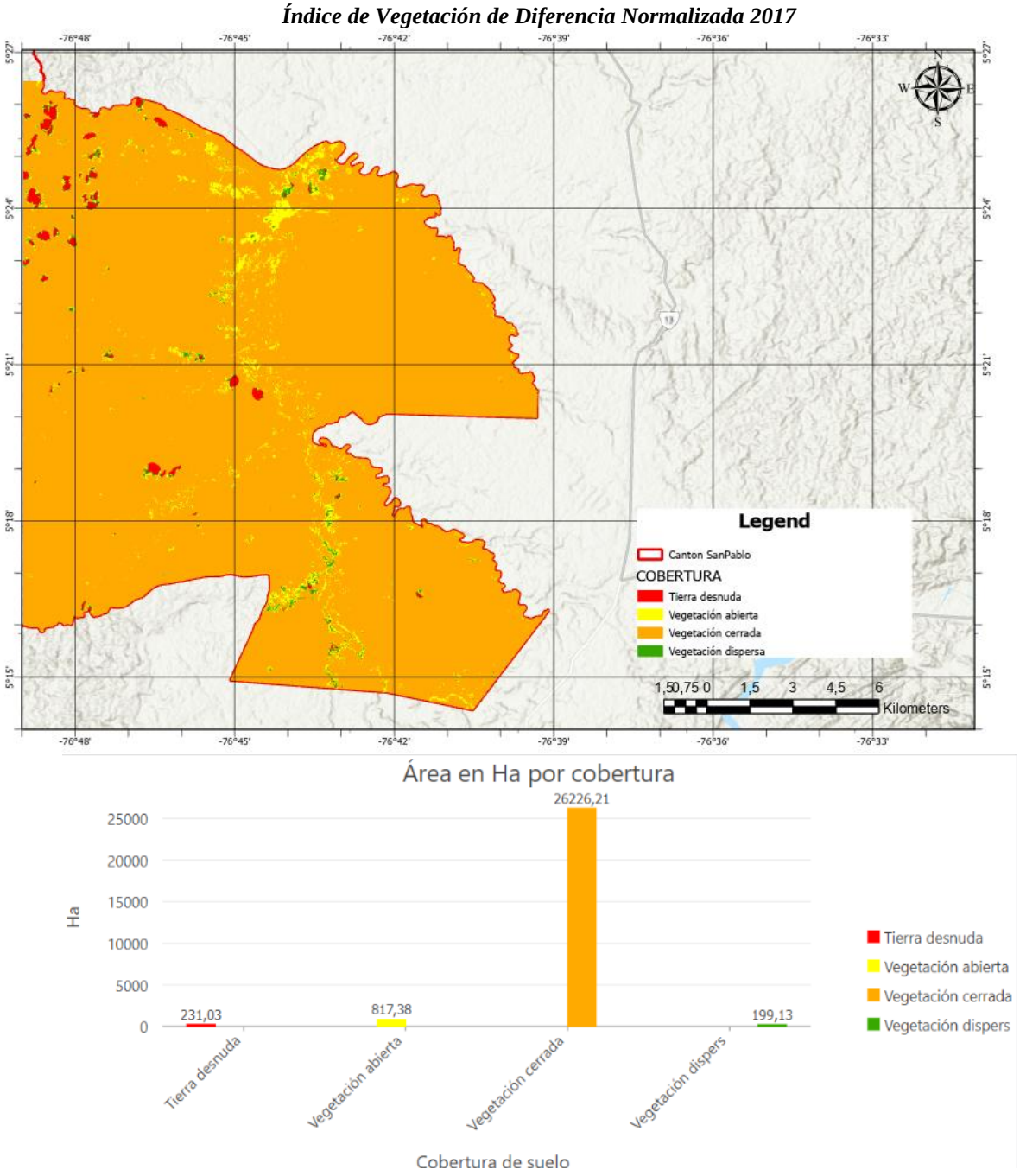
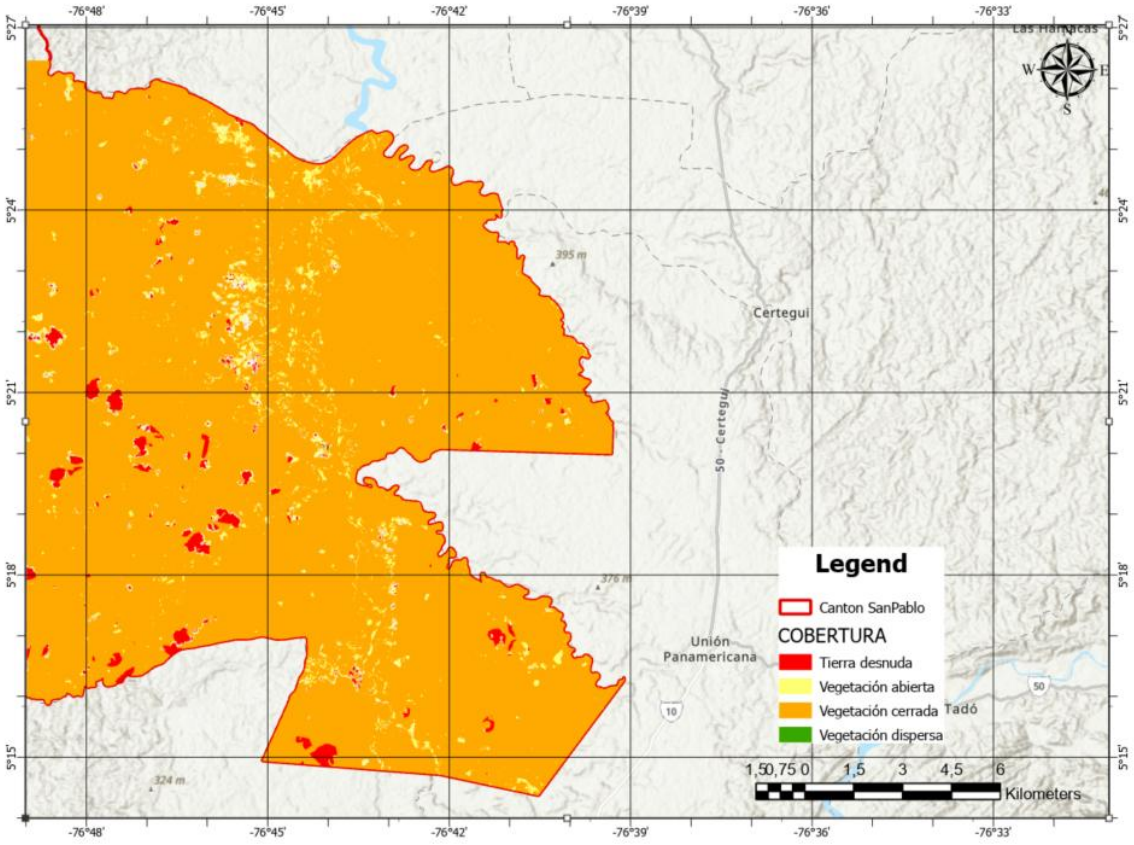


Figura 6. *Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo.*

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada 2018



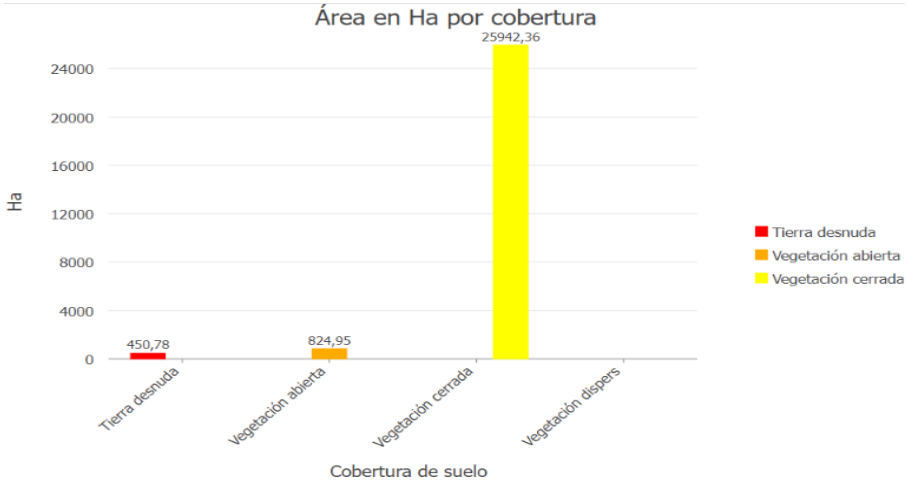
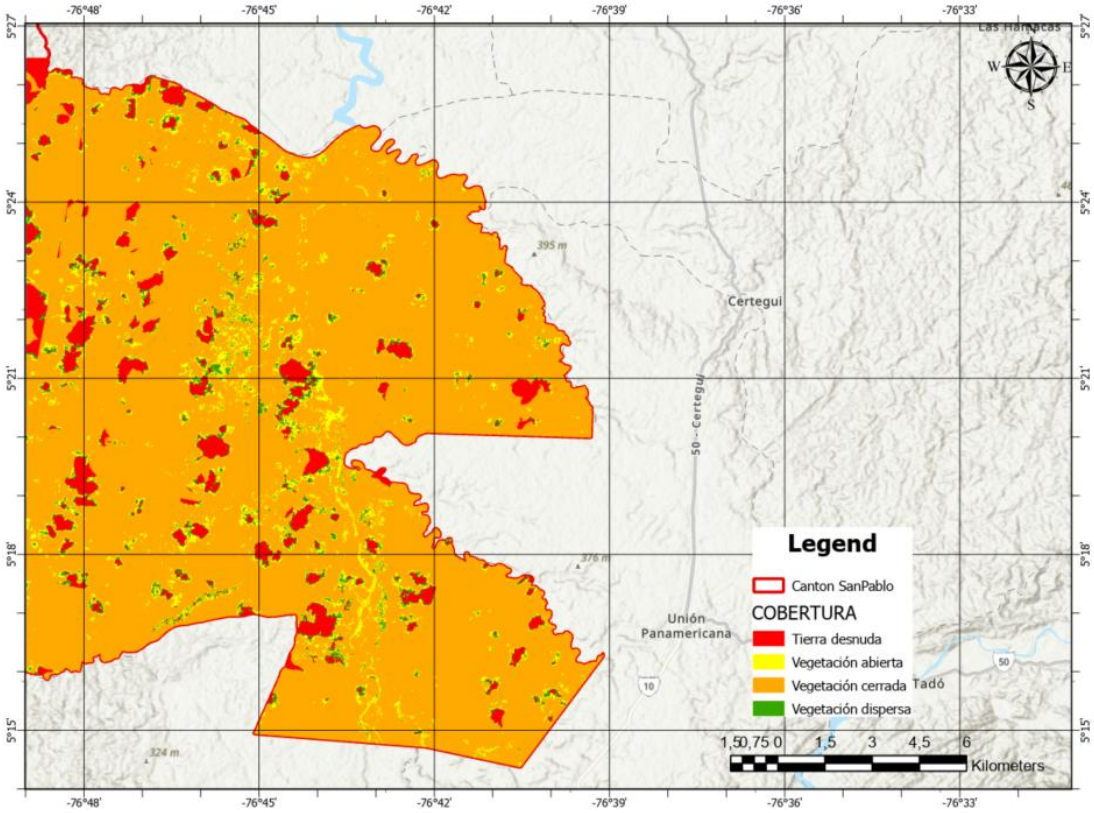


Figura 7. *Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo.*

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada 2020



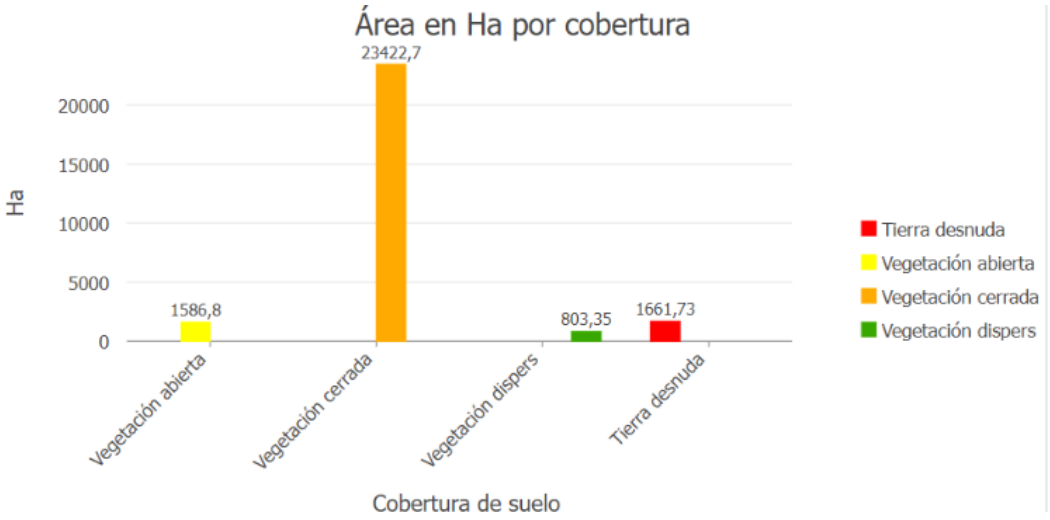


Figura 8. *Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo.*

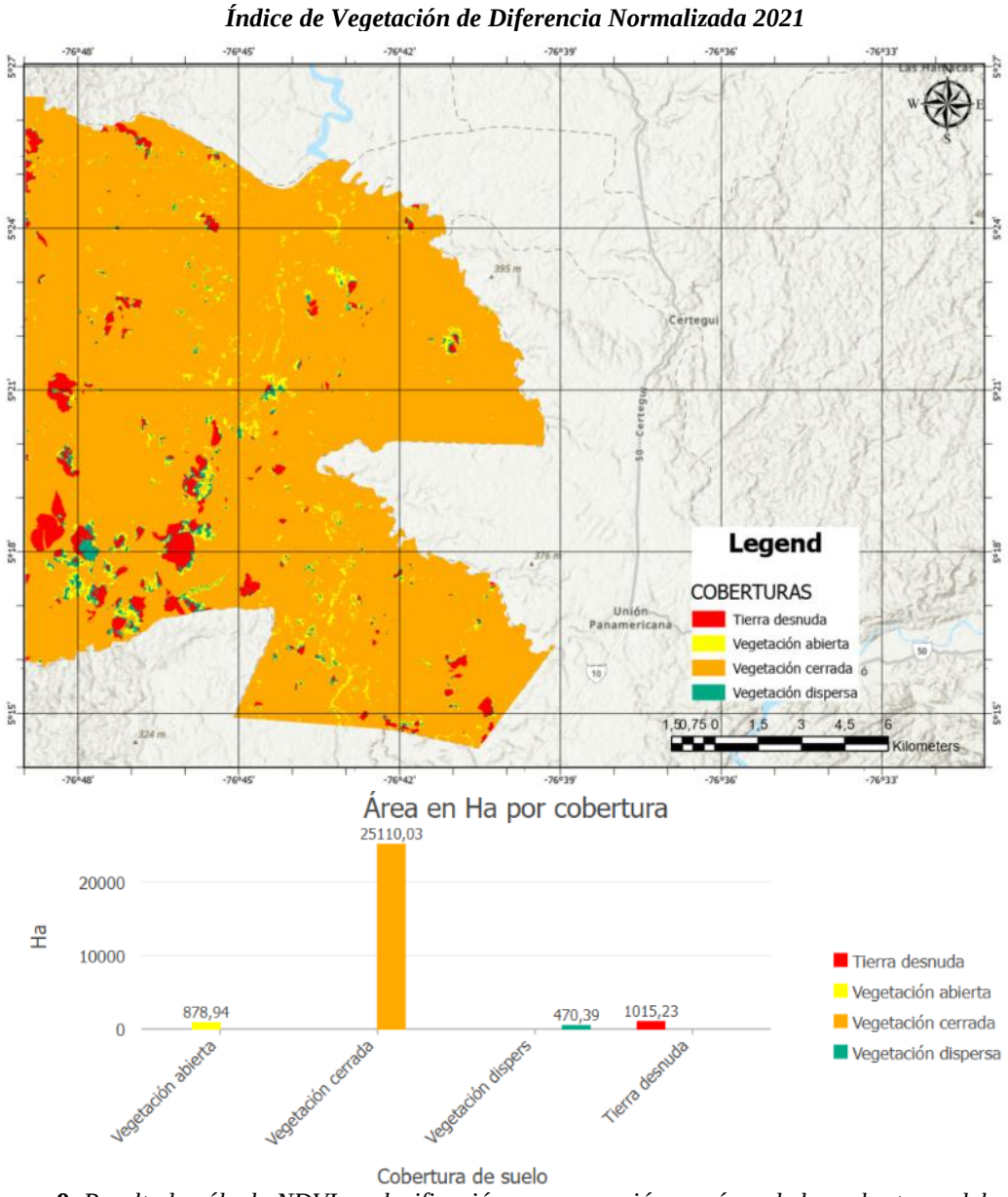
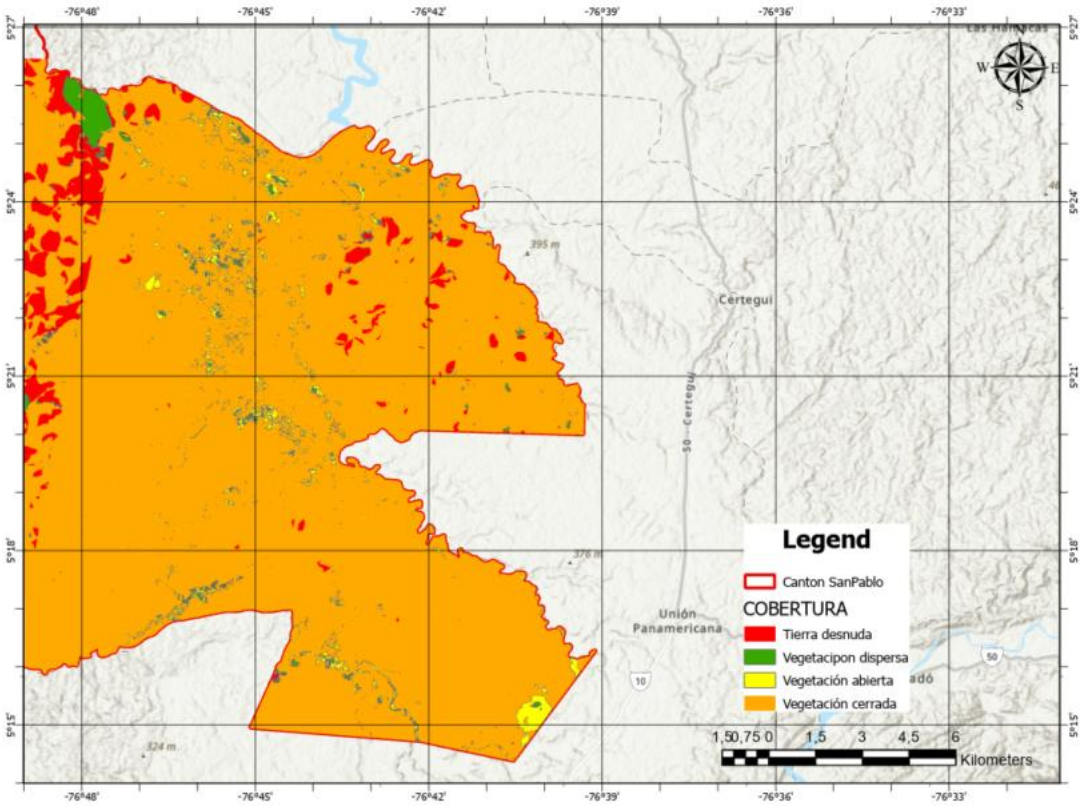


Figura 9. *Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo.*

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada 2023



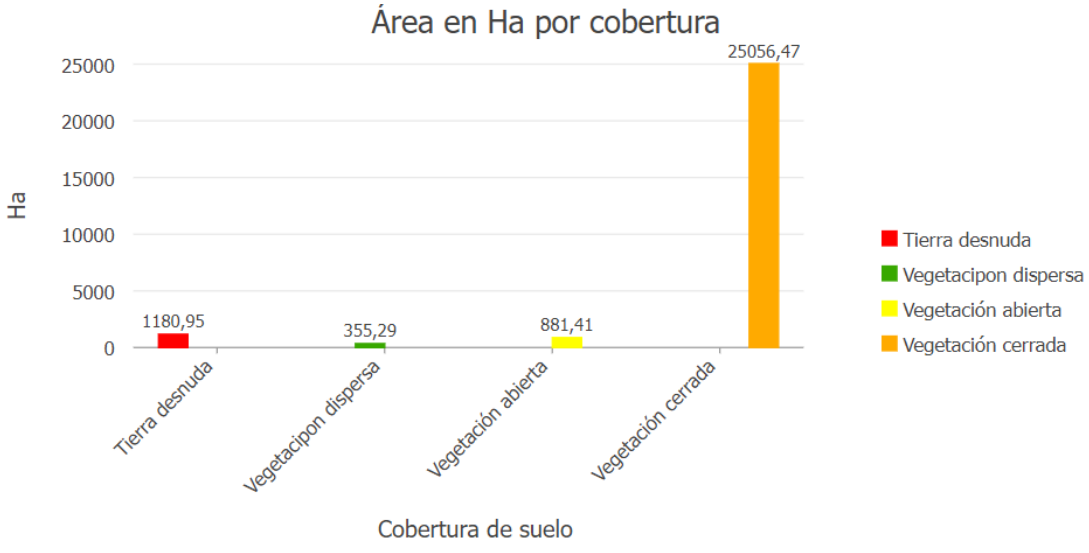


Figura 10. *Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo.*

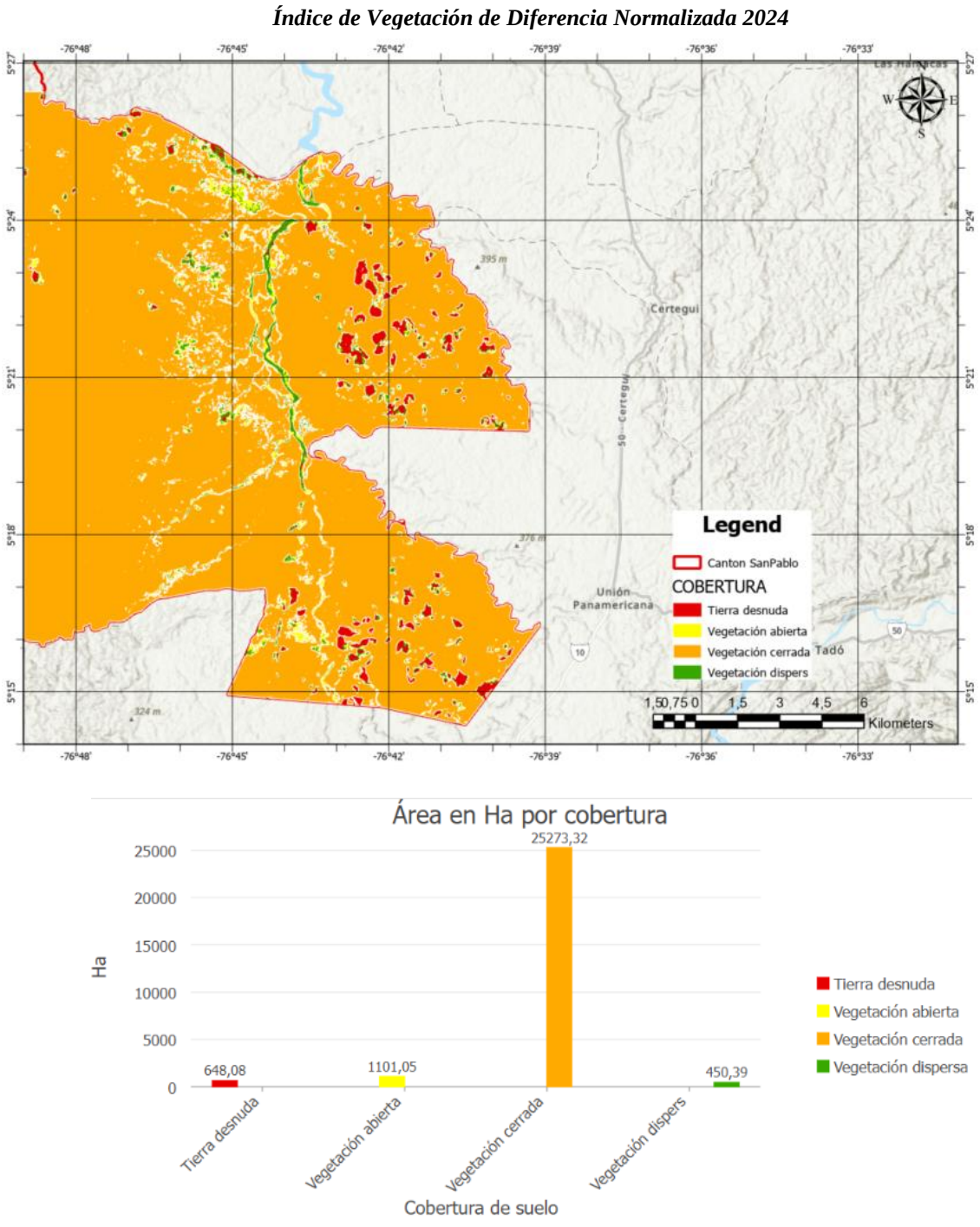


Figura 11. *Resultado cálculo NDVI, reclasificación y comparación por área de las coberturas del suelo.*

Tabla 4. *Tabla de resultados del cálculo NDVI por año*

Área (Ha) por cobertura del suelo

	AÑO					
	2017	**2018**	**2020**	**2021**	**2023**	**2024**
<0.1 Clases no vegetables	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.10 – 0.15 Tierra desnuda	213,03	450,78	1661,73	1015,23	1180,95	648,08
0.15 – 0.25 Vegetación dispersa	199,13	256,16	803,35	470,39	355,29	450,39
0.25 – 0.40 Vegetación abierta	817,38	824,95	1586,8	878,94	881,41	1101,05
> 0.40 Vegetación cerrada	26226,21	25942,36	23422,7	25110,03	25056,47	25273,32

Puede observarse en la tabla que para las clases no vegetables aparece el N/A que como se describió anteriormente corresponde a valores negativos que no fueron identificados por el software en la imagen satelital.

En la clase de tierra desnudas puede observarse que las áreas están entre las 213 ha y 1661 ha en los seis años de estudio, que indican tierras degradadas, asentamientos, vías y suelo sin cobertura vegetal, encontrándose el valor más alto en el año 2020, esto se debe a que los parches que aparecen en color rojo son nubosidad y el software los tomó como tierra desnuda.

La clase de vegetación dispersa muestra valores entre 199,13 ha y 803,35 ha, que indican tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales, terreno arado para cultivo, presentando el valor más alto en el año 2020.

Para la clase de vegetación abierta, observamos valores entre 817, 38 ha y 1586,8 ha, que indican vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosque seco. El valor más alto fue en el año 2020.

Para la vegetación cerrada, tenemos valores que oscilan entre las 23422,7 ha y 26226,21 ha, el valor más bajo se presentó en el año 2020, en donde hubo menos área de vegetación cerrada, correspondiente a plantas densas en crecimiento y a bosque húmedo, esta alteración se produjo porque la imagen tenía mucha nubosidad, pero no se pudo conseguir una imagen de mejor calidad ya que la zona normalmente presenta esta característica que afecta los resultados de los análisis.

8.3 Fase 3. Análisis multitemporal de la cuenca del río San Pablo para estudiar cambios en el uso del suelo

Preparación inicial:

Fuente de imágenes: PlanetScope. Estas imágenes son ideales para diferenciar coberturas como vegetación, agua, y suelo desnudo gracias a sus bandas espectrales (especialmente NIR y SWIR).

Tabla 5. *Tabla de resultados del cálculo NDVI por año*

Mes	Año	Imagen
Junio	2017	L15-0587E-1054N
		L15-0587E-1053N
Diciembre	2018	L15-0587E-1053N
		L15-0587E-1054N
Octubre	2020	L15-0587E-1053N
		L15-0587E-1054N
Noviembre	2021	L15-0587E-1053N
		L15-0587E-1054N
Mayo	2023	L15-0587E-1053N
		L15-0587E-1054N
Septiembre	2024	L15-0587E-1053N
		L15-0587E-1054N

Recorte: Selección área esto reduce el tiempo de procesamiento.

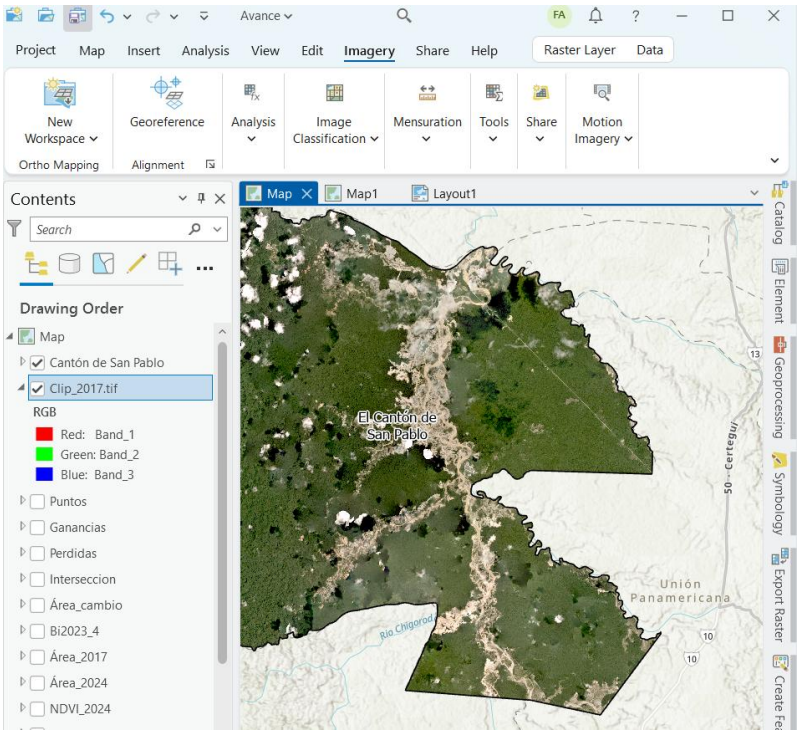


Figura 12. *Recorte Imagen 2017 Planet Scope.*

Correcciones:

- Realiza la **corrección atmosférica** para obtener reflectancia de superficie.
- Recorta la imagen a la zona de interés (Río San Pablo y su entorno).

Identificar coberturas relevantes:

Definir las clases de cobertura que deseas identificar:

- 3.1. Bosque
- 3.2.3. Vegetación secundaria
- 3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
- 5.1. Aguas continentales
- Nubosidad
- Sin Información

Generación de las ROIs:

Dibujar los puntos representativos en cada clase:

- Dibujar puntos sobre áreas que representen bien cada tipo de cobertura.
- Se establece un id de acuerdo con cada una de las coberturas que se quieren determinar.

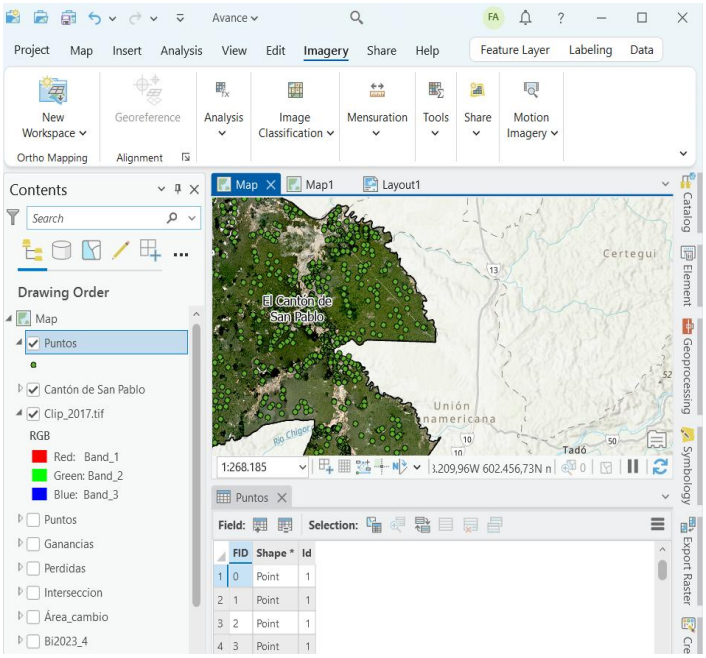


Figura 13. *Puntos generados por cada clase: Bosque, vegetación secundaria, áreas abiertas, otras.*

Selección del algoritmo de clasificación:

Para áreas como el Río San Pablo, donde las transiciones entre clases pueden ser complejas, posteriormente desde las herramientas se ingresa a Spatial Analyst Tools>Multivariate>créate signatures las cuales serán usadas para el siguiente proceso.

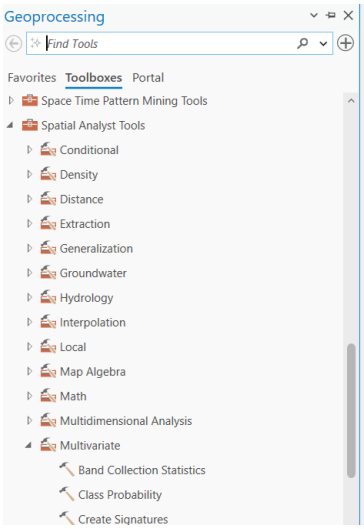


Figura 14. *Caja de herramientas para crear signatures.*

Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood): Ideal si las clases tienen distribuciones espectrales claras.

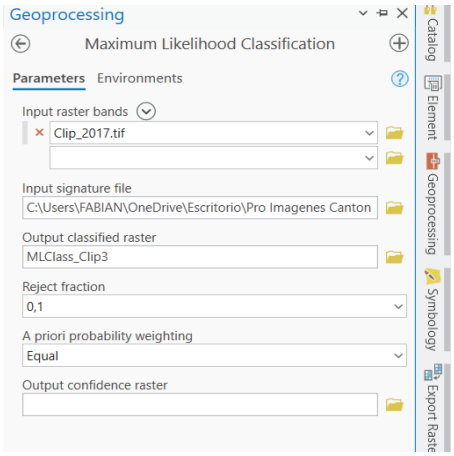


Figura 15. *Cálculo del algoritmo Maximun likehood (máxima la probabilidad de ver lo que se está viendo en la muestra)*

Resultado:

Se obtiene una capa en la cual se pueden visualizar las coberturas de acuerdo con los puntos de muestra que se usaron en el proceso anterior.

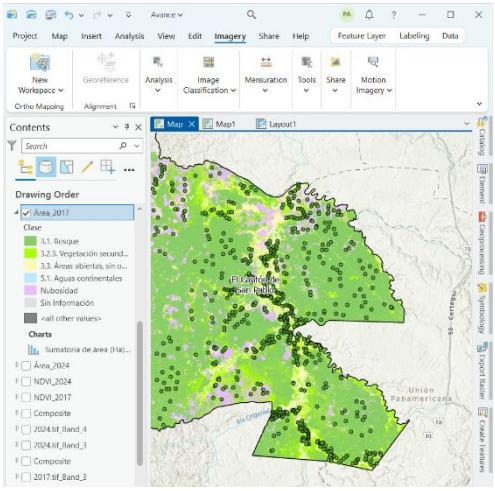


Figura 16. *Resultado del análisis máxima verosimilitud*

Validación del resultado:

- Usar datos de campo o información externa (como Google Earth o shapefiles existentes) para evaluar la precisión.
- *Genera una **Matriz de Confusión** para medir métricas como precisión general y Kappa.

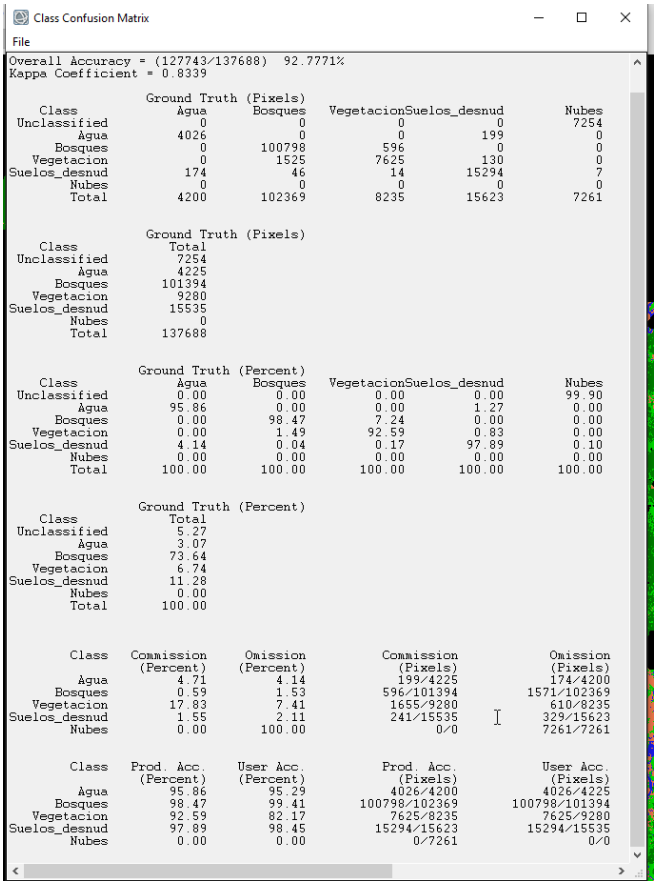


Figura 17. *Visualización del uso de la herramienta Class Confution Matrix*

Este proceso se realiza para cada uno de los años que se tiene previsto analizar por medio de la clasificación supervisada.

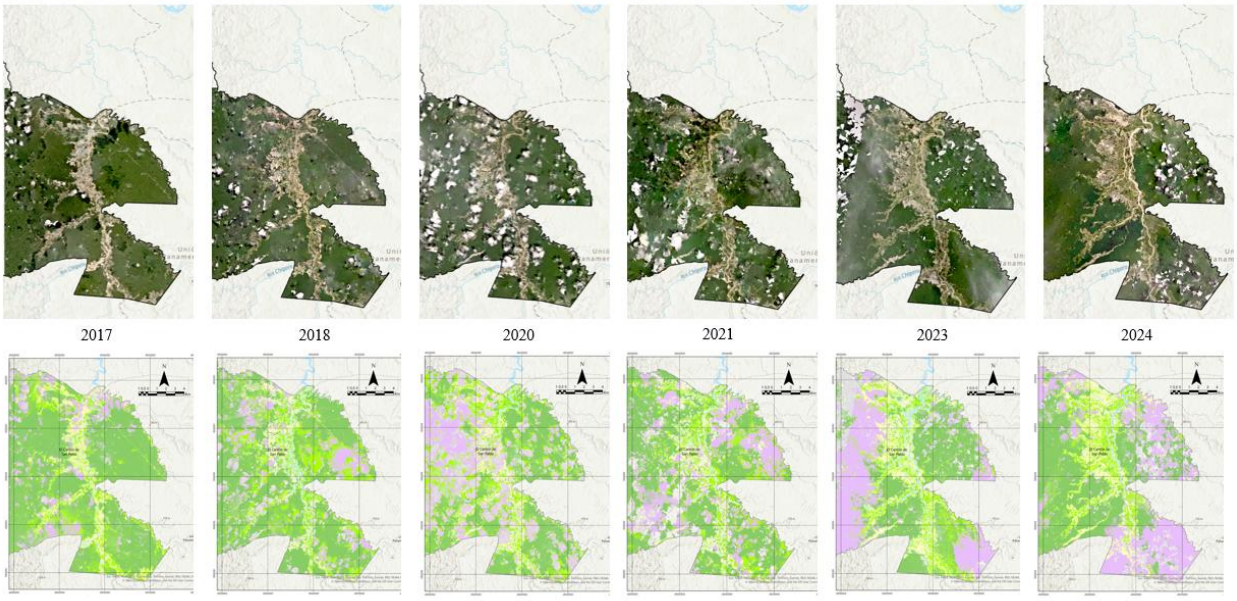


Figura 18. *Clasificación supervisada imágenes satelitales - años 2017 al 2024*

8.4 Fase 4. Generación de información base y temática que permita estimar las afectaciones en la cuenca del río San Pablo

- Exporta los resultados en formato GeoTIFF o shapefile para análisis posterior.

- Para este análisis, se utiliza la funcionalidad de detección de cambios categóricos disponible en ArcGIS Pro. En este caso, se trabajó con clasificaciones supervisadas realizadas a partir de imágenes satelitales correspondientes a los años 2017 y 2024. Una vez pasados los archivos a .Shp se realiza el análisis de acuerdo con las coberturas establecidas para determinar el valor en hectáreas para cada uno de los años con los que se está trabajando y usando la herramienta para la visualización de información se puede obtener los valores con gráficas de salida.

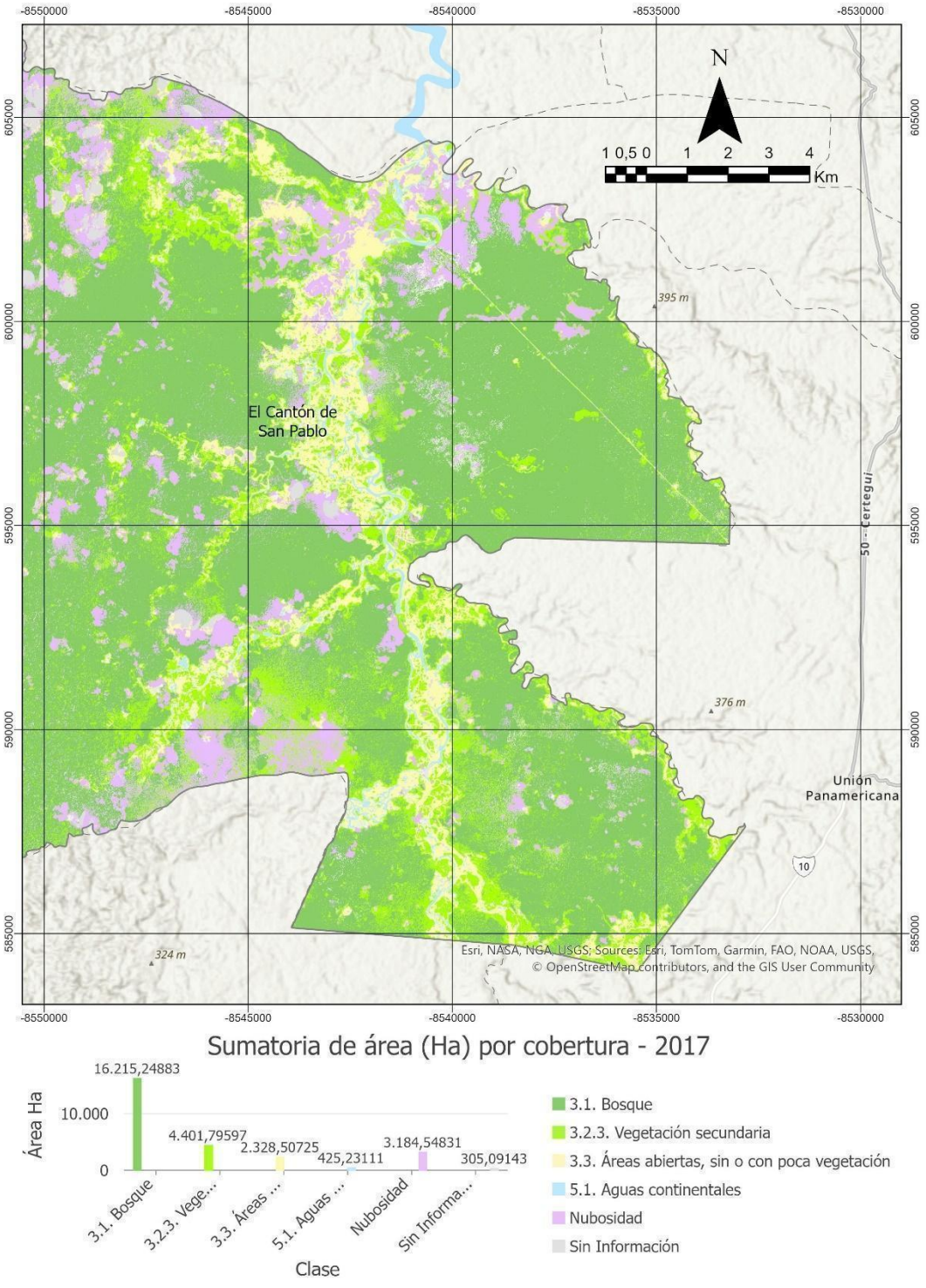


Figura 18. *Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2017. Elaboración propia*

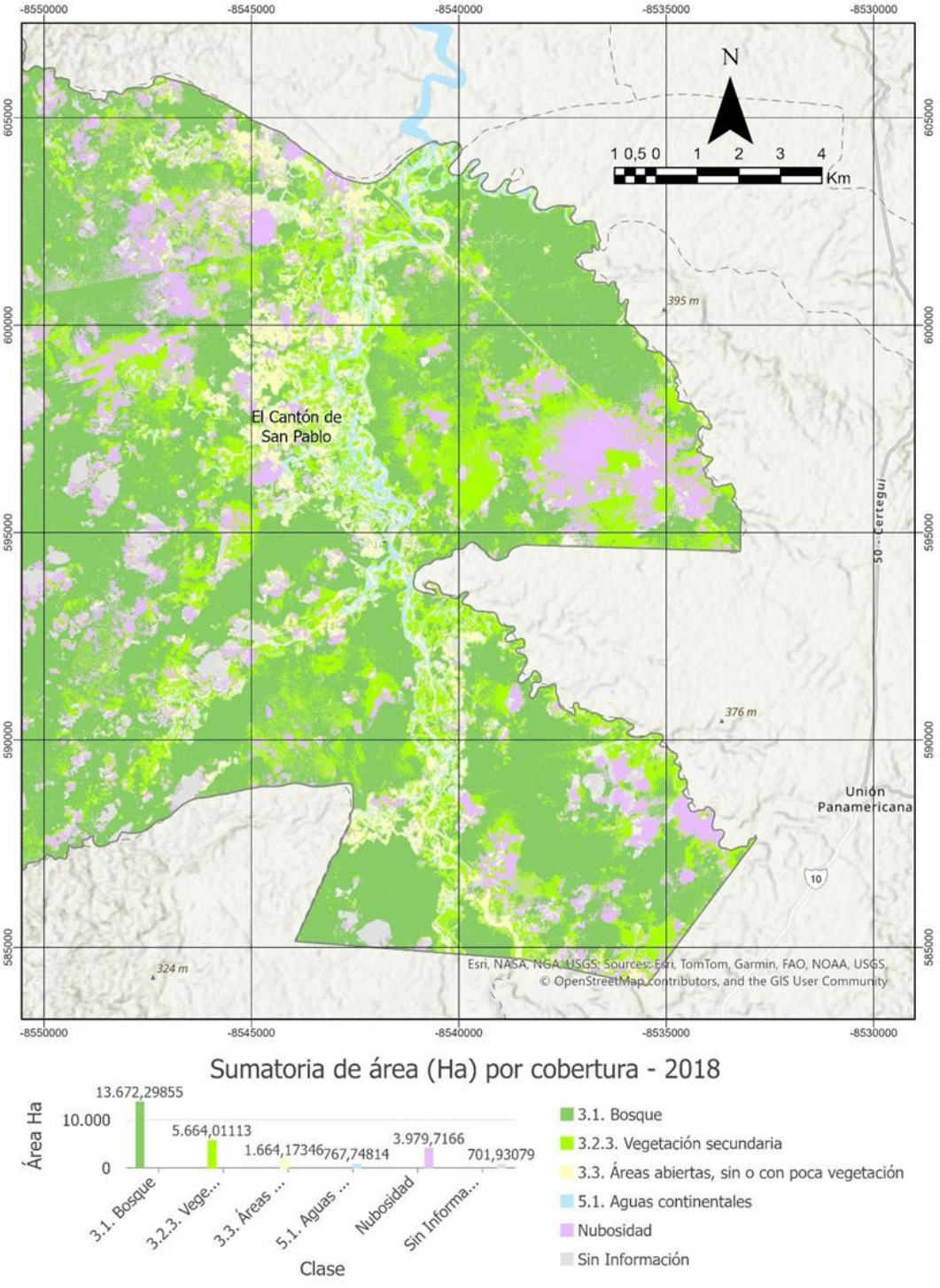


Figura 19. *Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2018. Elaboración propia*

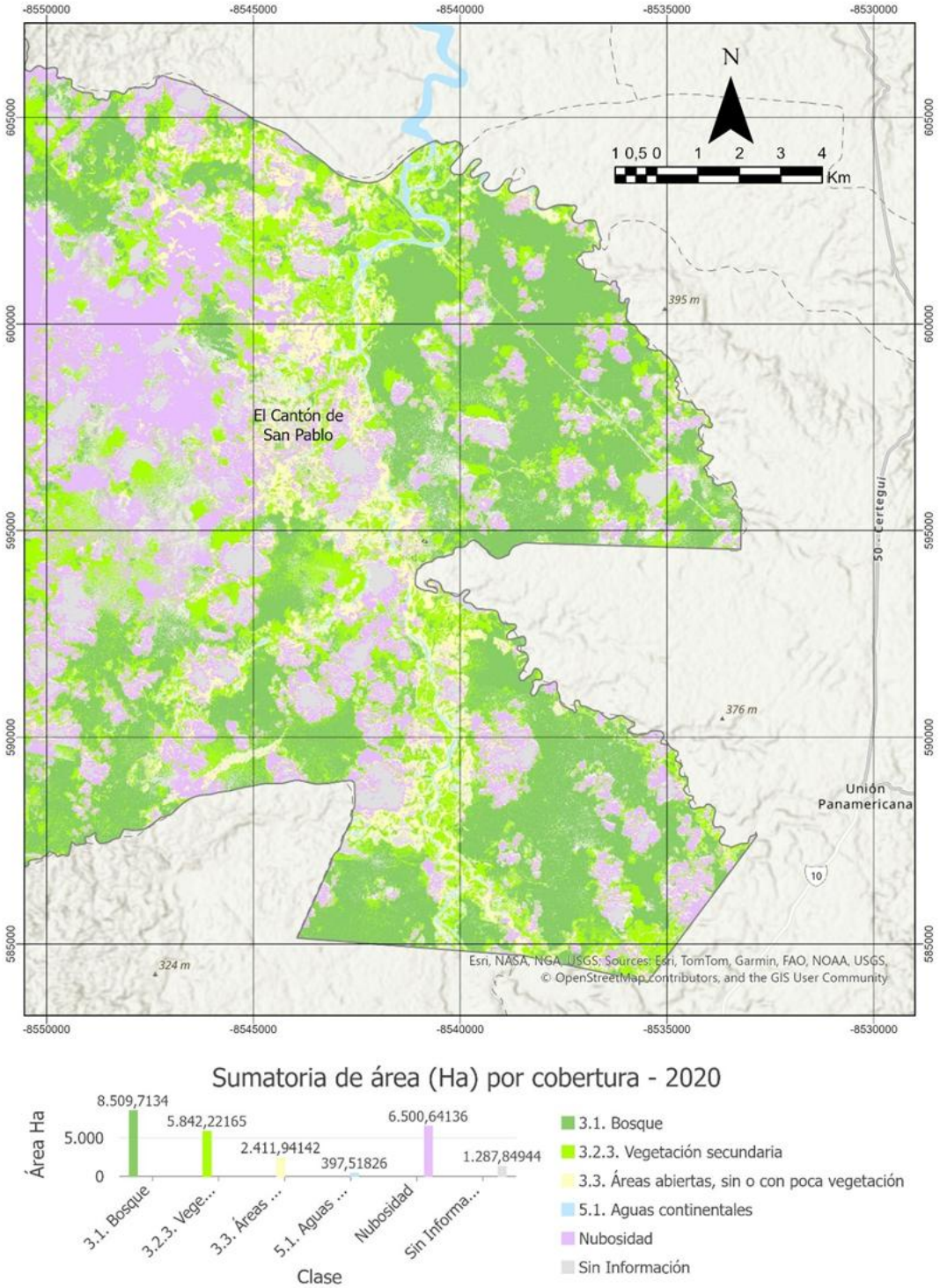


Figura 20. *Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2020. Elaboración propia*

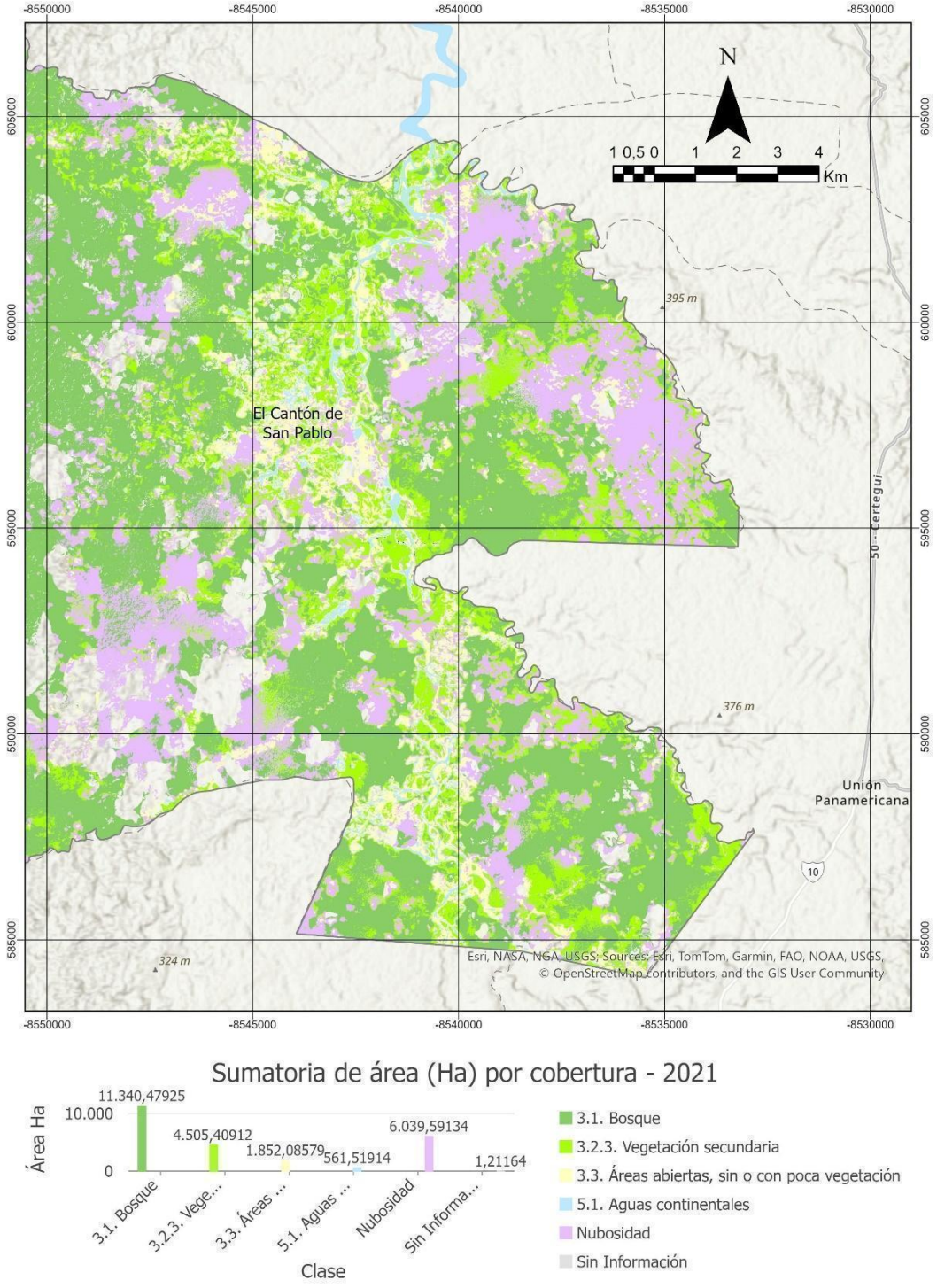


Figura 21. *Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2021. Elaboración propia*

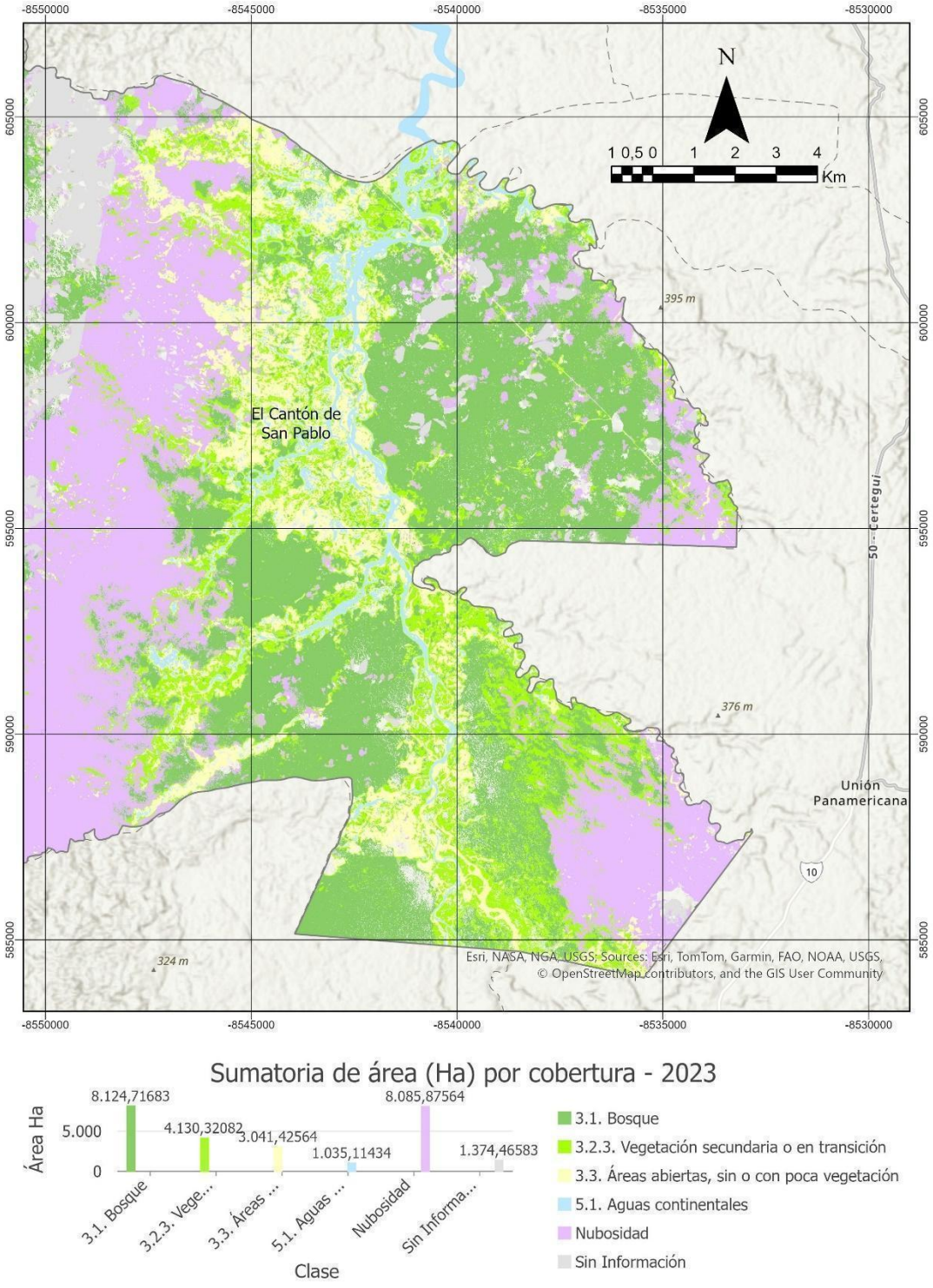


Figura 22. *Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2023. Elaboración propia*

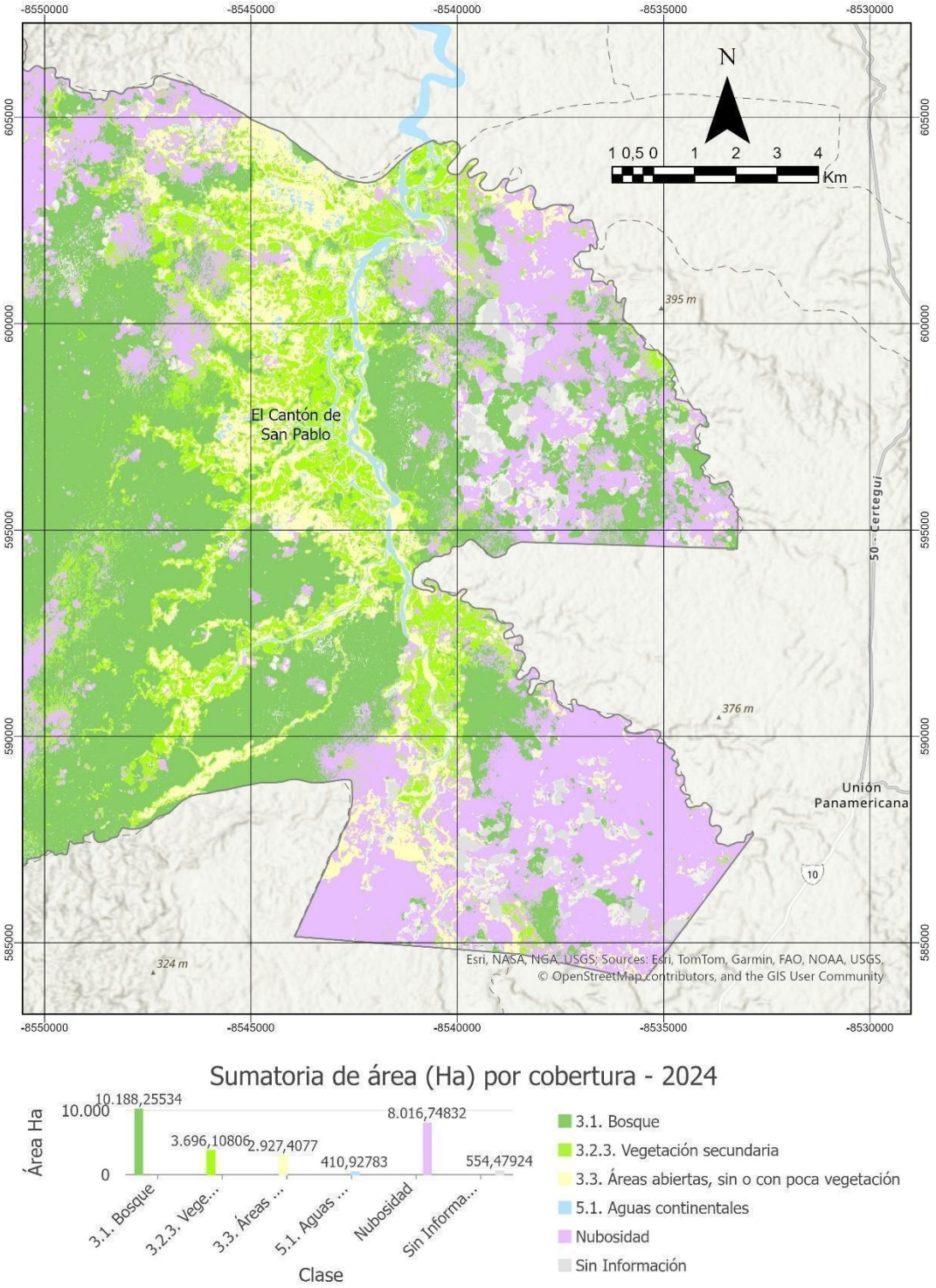


Figura 23. *Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2024. Elaboración propia*

Para visualizar la información de una mejor manera se agrupan los datos obtenidos de acuerdo con las coberturas establecidas, obteniendo la siguiente gráfica.

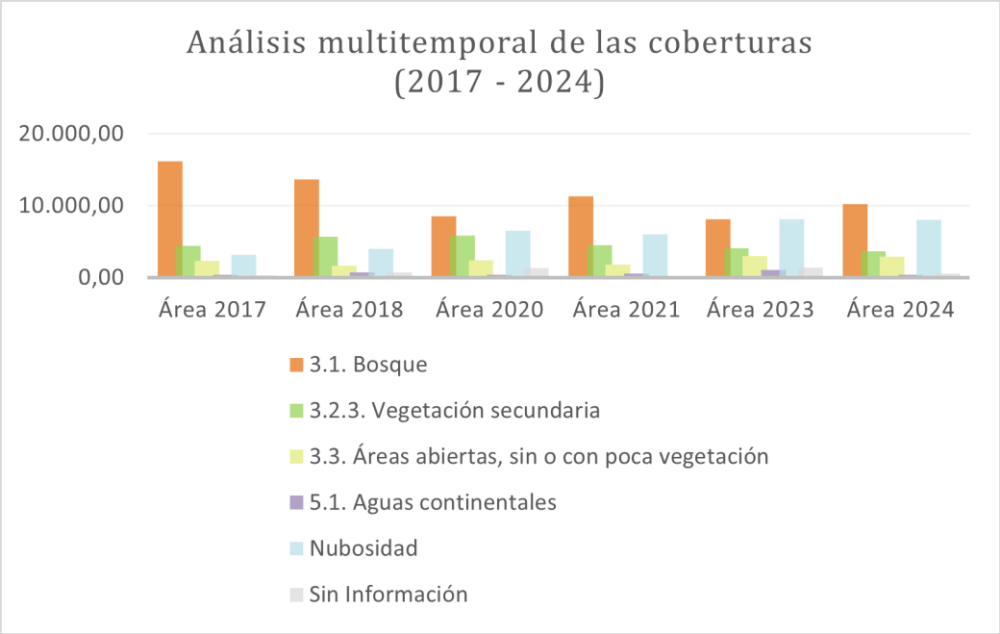
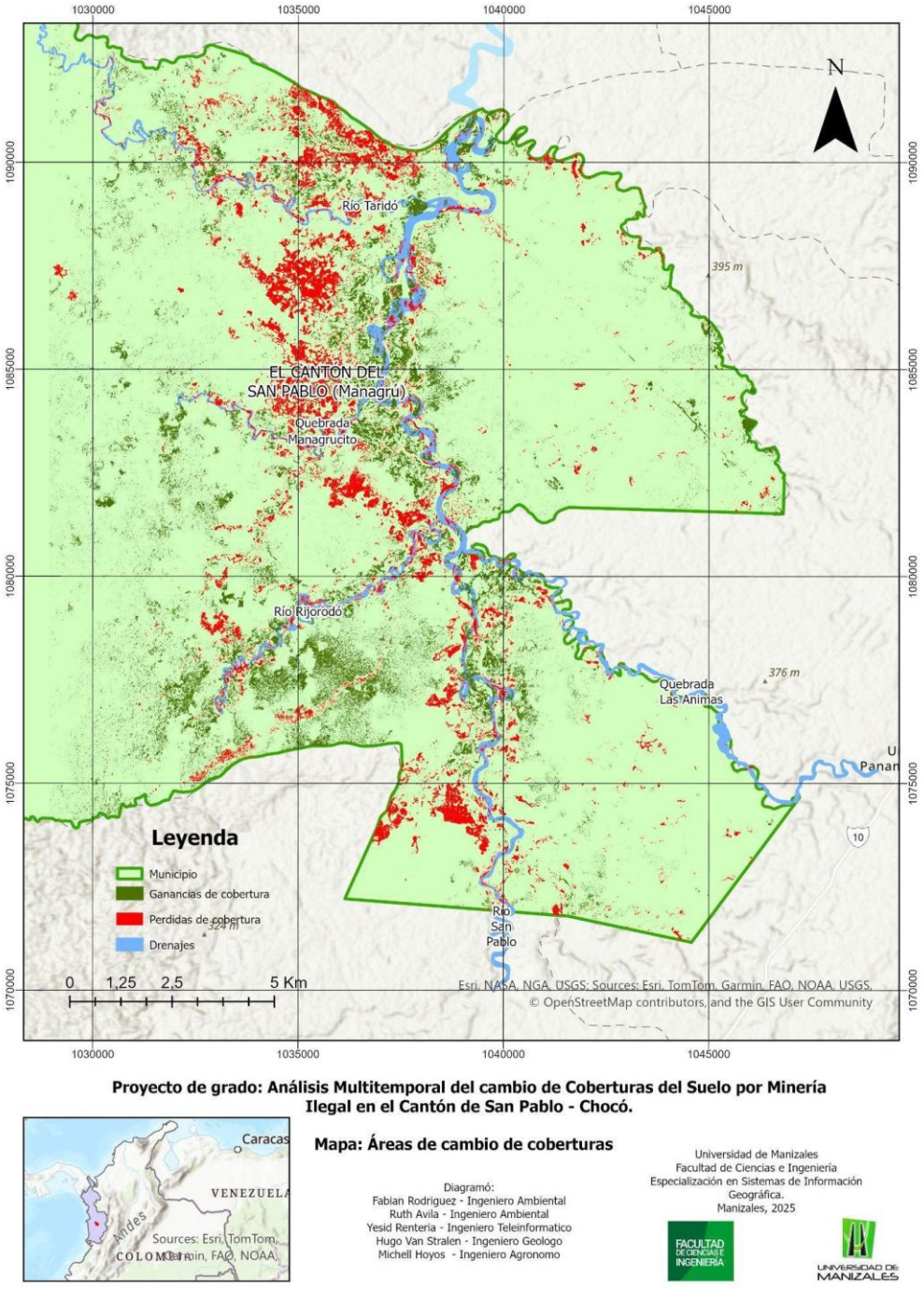


Figura 24. *Resultado de la Clasificación supervisada por cobertura - año 2024. Elaboración propia*

Con estos datos se realiza una intersección o cruce de información para determinar según las coberturas los cambios sufridos durante el periodo de estudio, obteniendo como resultado el valor expresado en hectáreas de las pérdidas de coberturas las cuales se pueden asumir como los cambios sufridos en la cobertura de bosque y vegetación secundaria a áreas abiertas, sin o con poca vegetación; por otro lado, se establece como ganancia a las áreas abiertas, son o con poca vegetación que pasaron a ser vegetación secundaria o bosque.



Mapa 3. *Área en hectárea de la detección de cambios de uso del suelo 2017 – 2024*

La gráfica muestra las transiciones en el uso del suelo en el Municipio del Cantón de San Pablo entre 2017 y 2024, reflejando el impacto de la minería en el territorio, se puede considerar que el patrón podría estar relacionado con procesos de regeneración natural o con actividades de explotación y abandono en el caso de las ganancias de cobertura. Asimismo, es posible que algunas diferencias detectadas entre estas dos clases se deban a limitaciones en la precisión de las imágenes satelitales, que pueden no discriminar de manera totalmente precisa entre las coberturas de vegetación baja y bosque.

Se obtiene como resultado la visualización de los cambios de cobertura en el área de estudio, para ello, se establecen las siguientes gráficas para visualizar los cambios según los datos obtenidos.

Bosque

Las áreas en donde se determina la presencia de bosque se visualizan de la siguiente manera, para esto hay que tener en cuenta que en las imágenes se determinaron áreas con la clase de nubosidad y sin información debido a la poca visibilidad de la imagen analizada, en este caso el bosque paso de detener 16.215,25 ha a 10.188,26 hectáreas.

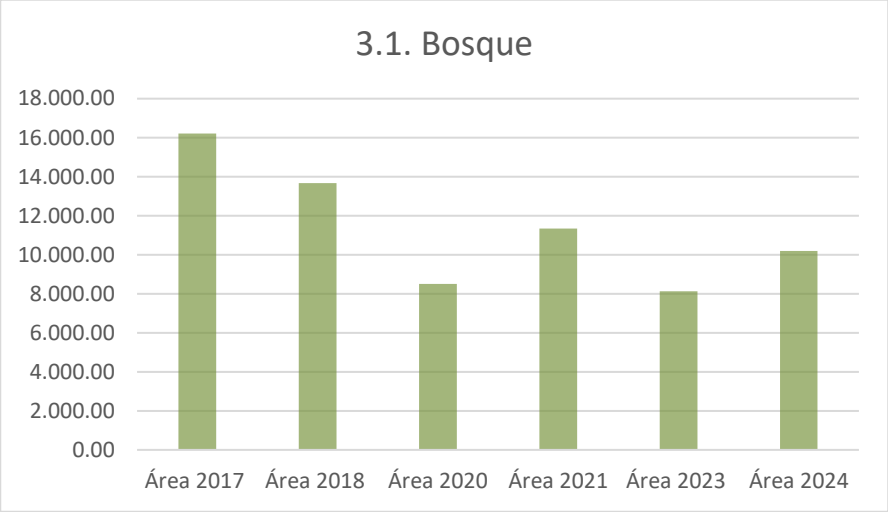


Figura 25. *Área de bosques*

Vegetación secundaria

La vegetación secundaria se establece como las áreas en donde la vegetación es baja, para este caso se obtuvo como resultado que para el año 2017 había 4.402,80 hectáreas y en el año 2024 3.696,11 hectáreas.

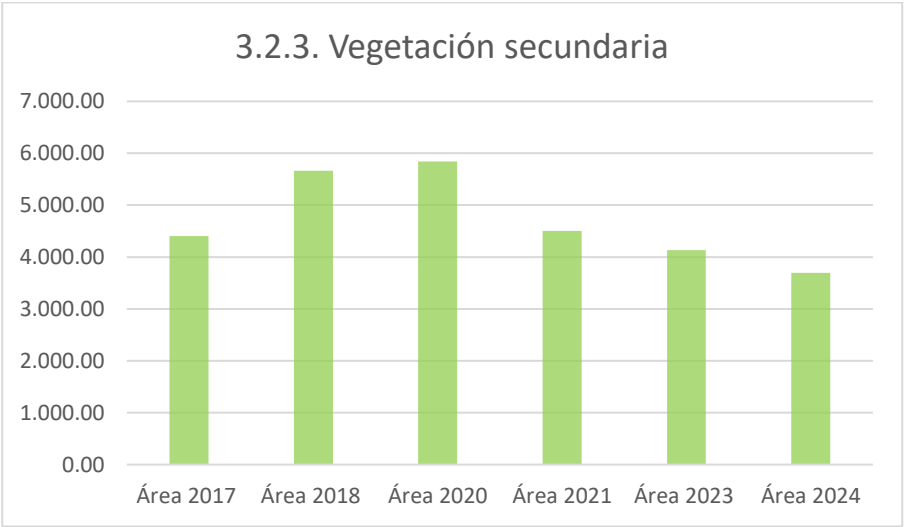


Figura 26. *Área de bosques*

Áreas abiertas, sin o con poca vegetación

En esta clasificación se determinan las áreas en donde no hay vegetación o zonas abiertas, comprendiendo en ellas las vías y áreas urbanas, es decir que hay que tener en cuenta, hay un aumento, sin embargo, este no solo se debe a que haya aumentado la actividad minera, sino también hubo un crecimiento en cuanto a la infraestructura. En el año 2017 se estiman 2.328,51 hectáreas y el año 2024 con 2.927,41 hectáreas.

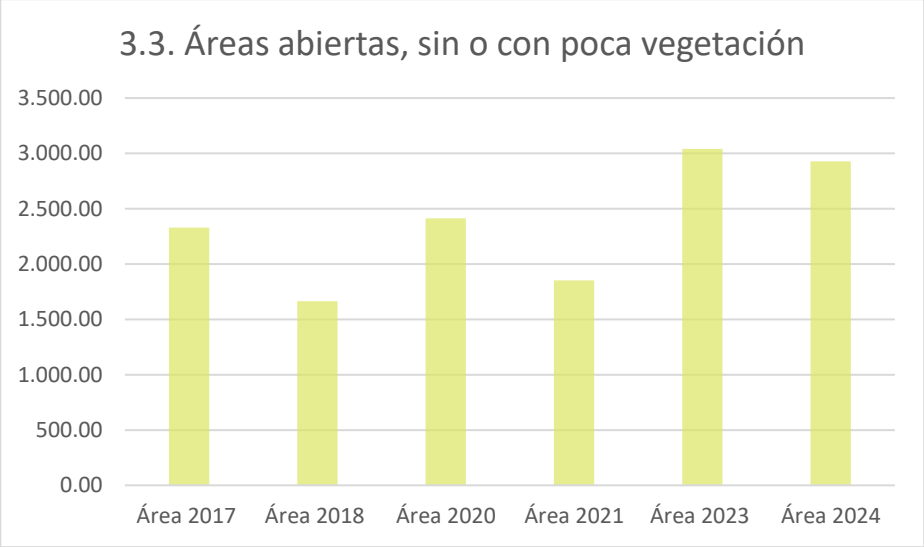


Figura 27. *Áreas abiertas, sin o con poca vegetación*

Aguas continentales.

Se establecen como aguas continentales a los cuerpos de agua que están presentes en el área de estudio, en este caso hacemos referencia al aumento o disminución de la lámina de agua del río San Pablo.

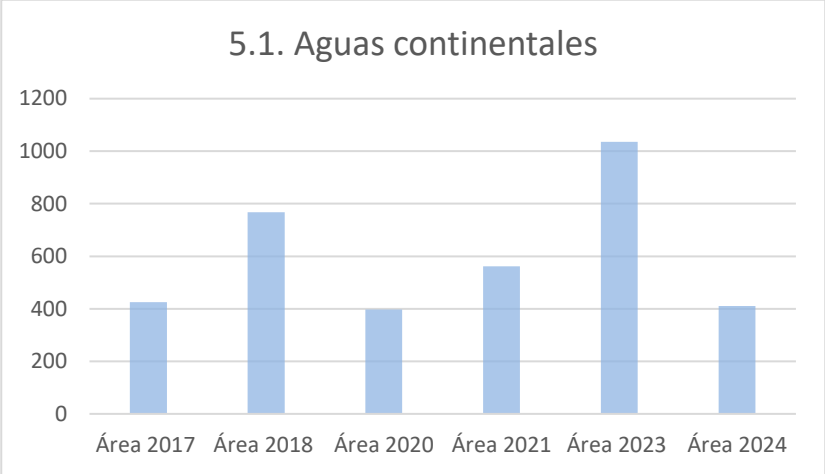


Figura 28. *Aguas continentales*

Nubosidad

La nubosidad es un factor presente en las imágenes satelitales que se obtuvieron para el análisis, para ello se le determinó una clase ya que afecta directamente los resultados obtenidos debido a que reduce la visibilidad y la reflexión de los objetos presentes en el área de estudio.

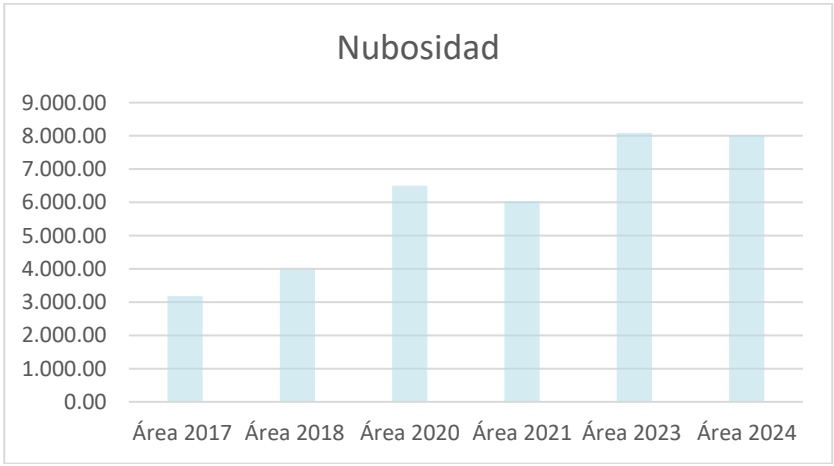


Figura 29. *Áreas con Nubosidad*

Sin Información

Esta clase es usada debido a que en las imágenes se encuentran parches que no tienen información o un valor en específico, las razones de este NoData pueden ocurrir por diversos factores, entre estos se incluye la limitación del sensor en donde la visión o el ángulo no permite una señal clara, como también puede ocurrir por errores técnicos a la hora de capturar, procesar o realizar una reproyección de la información.

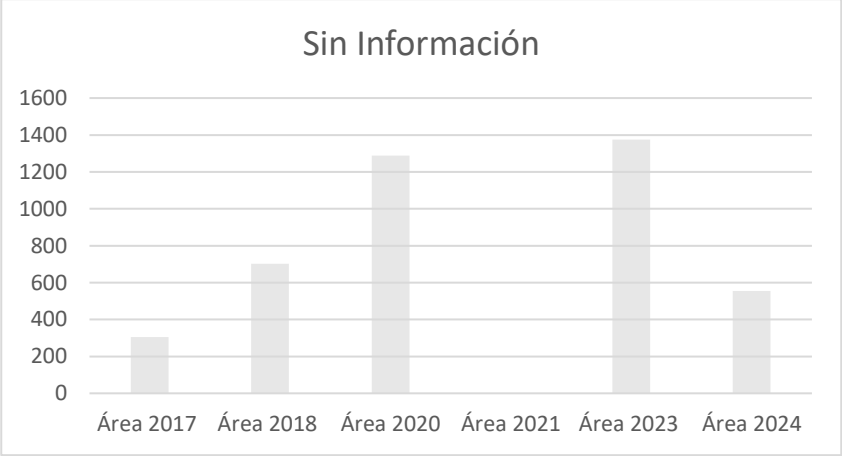


Figura 30. *Áreas sin Información*

9. Discusiones

La presencia de nubosidad en las imágenes satelitales y las áreas sin información presentaron limitaciones que pueden influir en la precisión de los datos, especialmente en zonas de difícil acceso o con cobertura atmosférica densa como lo es en el departamento del Chocó.

A pesar de las limitaciones que pueden afectar el análisis se pueden comparar estos cambios respecto a los años 2017 y 2024 permitiendo apreciar las diferencias en cuanto a las coberturas en donde se genera una transición de bosque o vegetación secundaria a áreas abierta, sin o con poca vegetación y de forma contraria para observar las áreas que se puedan establecer como ganancia o pérdidas de coberturas.

En la siguiente gráfica de pérdidas de cobertura se obtiene como resultado un total de 1.748,70 ha las cuales cambiaron de la clase de bosque o vegetación secundaria a la clase determinada como áreas abiertas, sin o con poca vegetación.

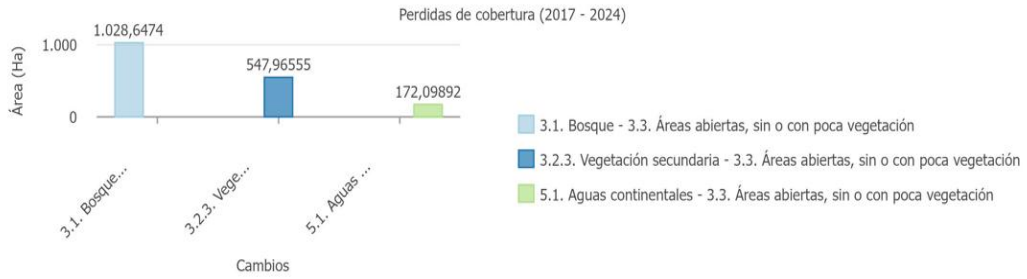
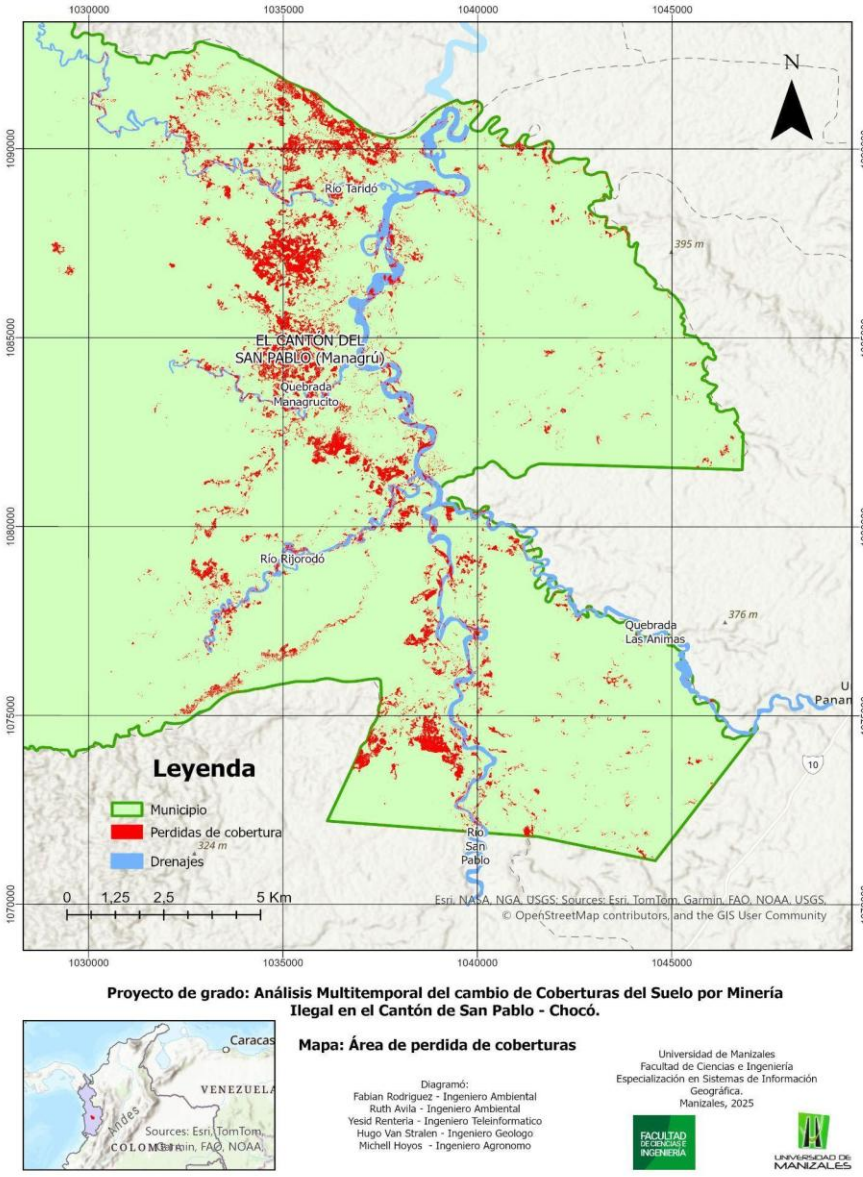


Figura 31. *Pérdida de coberturas 2017 – 2024*



Mapa 4. *Pérdida de coberturas 2017 – 2024*

Por otro lado, los cambios que se determinan como ganancia, hacen referencia a las transformaciones del suelo que pasaron de vegetación secundaria, áreas abiertas, sin o con poca vegetación o aguas continentales a bosque, en donde se obtuvo un total de 2.066,61 ha distribuyéndose de la siguiente manera.

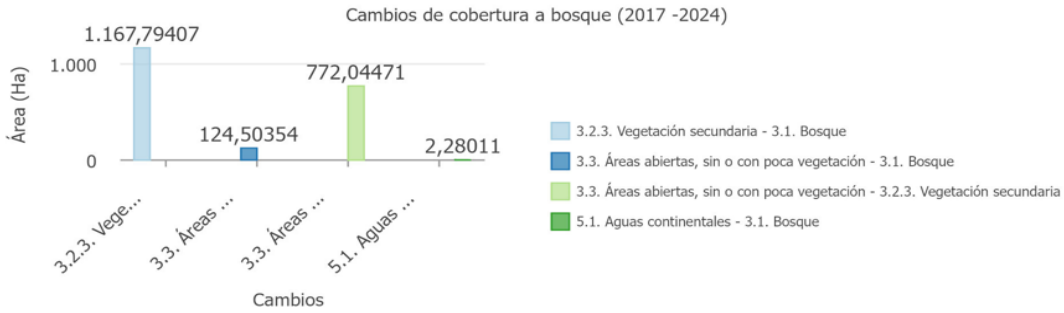
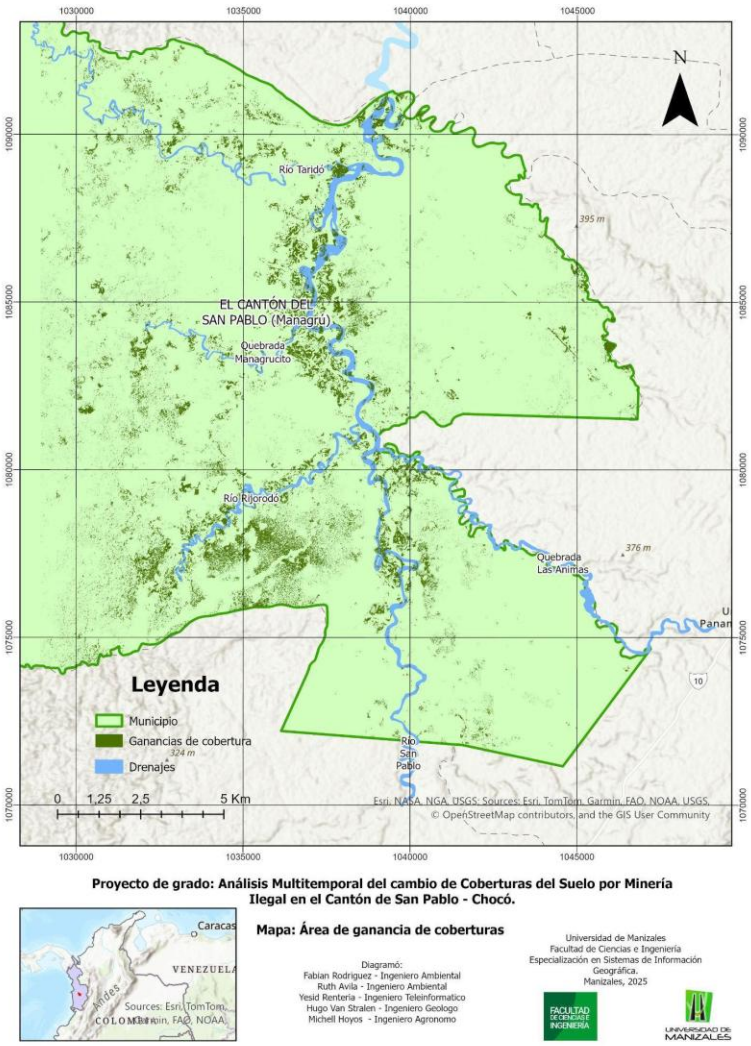


Figura 31. *Cambio de coberturas a bosque 2017 – 2024*



Mapa 5. *Cambio de coberturas 2017 – 2024*

Sin embargo, para determinar la variabilidad en cuanto a la información obtenida se desea comparar los resultados del análisis realizado mediante la clasificación supervisada con la plataforma Web de consulta pública MapBiomas Colombia, el cual contiene imágenes, estadísticas y material que permite el análisis respecto a las coberturas y el uso del suelo trabajados con imágenes landsat con un periodo desde 1985 hasta el año 2023 en su colección 2.0 publicada en el 2024, se puede verificar que los resultados respecto a las pérdidas y ganancias de cobertura tienen un margen de error mínimo respecto los datos obtenidos por medio de la clasificación supervisada, esto puede variar debido a varios factores, destacando los siguientes: las imágenes con las que se trabajaron para el análisis multitemporal del cambio de cobertura del suelo por minería ilegal en el cantón de san pablo tiene un año más (2024) respecto a la plataforma Web, también hay que sumar que poseen un gran margen de nubosidad y áreas sin información; es importante mencionar que el área de estudio fue para el margen del río San Pablo, contrario a los datos que nos arroja la plataforma en donde el análisis es para todo el municipio de El Cantón de San Pablo.

Respecto a las pérdidas en la plataforma Web se obtiene que para el periodo comprendido entre los años 2017 a 2023 la superficie acumuló un total de 2.195 ha.

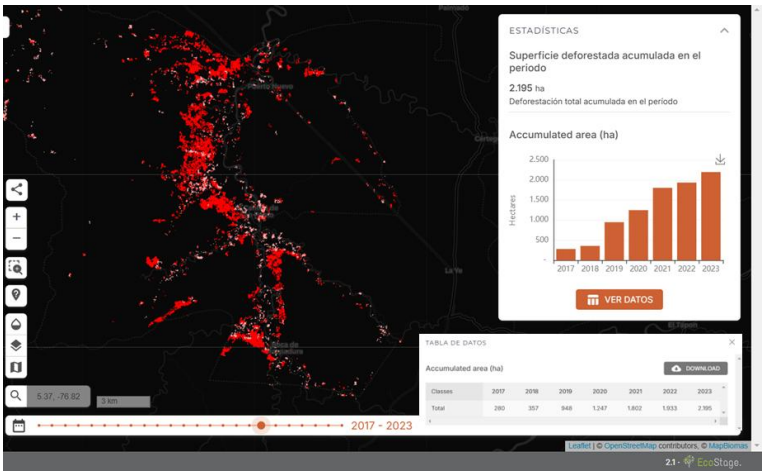


Figura 32. *Pérdida de bosque 2017 – 2023*

En cuanto a ganancias se puede interpretar respecto a la vegetación recuperada, estableciendo un total de 2.762 ha para los años comprendidos entre el 2017 y 2023.

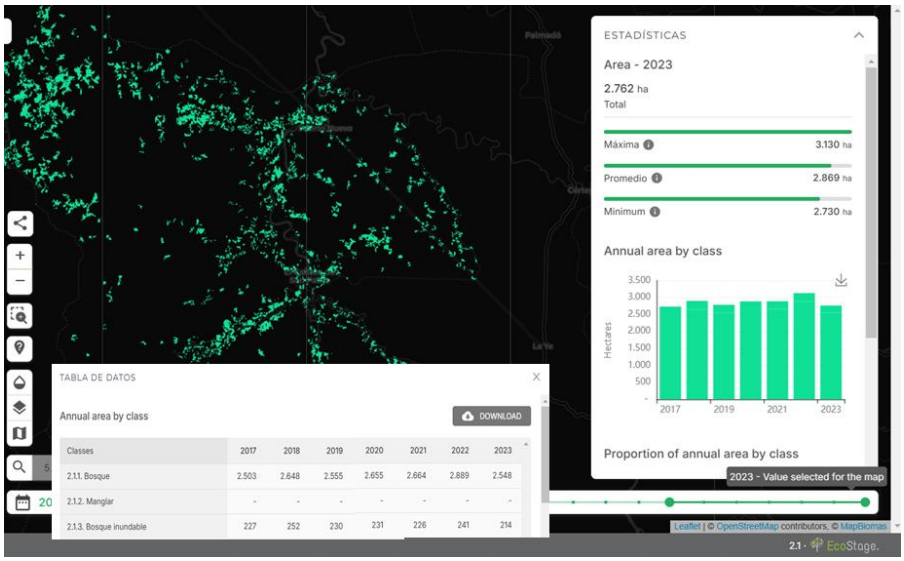


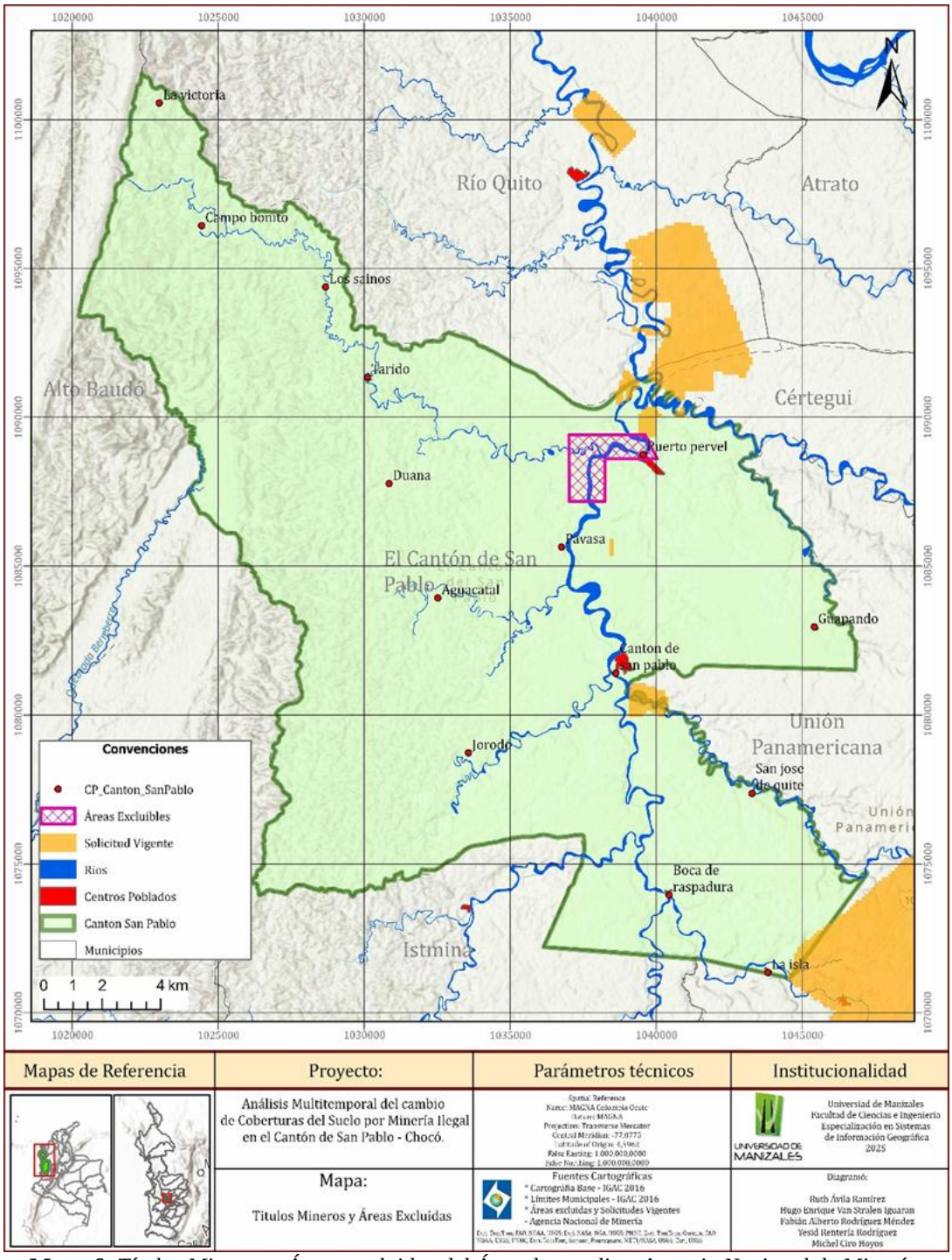
Figura 33. *Ganancia de bosque 2017 – 2023*

En el siguiente cuadro se pueden observar las diferencias en hectáreas (ha) respecto a la clasificación supervisada realizada en el área de estudio para el presente trabajo y lo obtenido de la plataforma Web MapBiomas Colombia.

Tabla 6. *Comparación de pérdidas y ganancia de coberturas*

Fuente	Año	Cambios	Área de cambio	Área de estudio	%
Clasificación Supervisada ArcGis Pro	2017 - 2024	Perdidas	1.748	27.487	6,36%
		Ganancias	2.066		7,52%
MapBiomas Colombia	2017 - 2023	Perdidas	2.195	37.965	5,78%
		Ganancias	2.762		7,28%

Otro factor a tener en cuenta es la presencia de solicitudes mineras presentes en el municipio de El Cantón de San Pablo, ya que esto determina la ilegalidad en cuanto a las actividades mineras que se realizan en el área de estudio.



Mapa 6. *Títulos Mineros y Áreas excluidas del Área de estudio - Agencia Nacional de Minería.*

10. Conclusiones

A través de este estudio multitemporal mediante imágenes satelitales del cambio de coberturas del suelo debido a la minería ilegal en el Cantón de San Pablo - Chocó, se logra evidenciar el deterioro y la afectación que la explotación de este mineral ha ocasionado sobre el territorio que conforma el municipio.

Desde el punto de vista hidrológico se puede apreciar según la cartografía del IGAC en las planchas a escala 1:25.000 y las imágenes de PlanetScope en diferentes épocas del año que el río San Pablo tiene un ancho de 160m aproximadamente, posterior a las intervenciones generadas por la minería este río ha sufrido aumento en su cauce principal llegando a tener medidas de hasta 2.4km de ancho aproximadamente.

El análisis realizado evidenció una pérdida total de 1.748,70 ha de bosque y vegetación secundaria que fueron transformadas en áreas abiertas, sin o con poca vegetación. Por otro lado, se identificó una ganancia de 2.066,61 ha de bosque provenientes de vegetación secundaria, áreas abiertas y cuerpos de agua, lo que indica procesos de regeneración natural o cambios en el uso del suelo en el área de estudio.

La plataforma MapBiomas Colombia permitió corroborar los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada. A pesar de un margen de error mínimo, las diferencias se atribuyen a la inclusión del año 2024 en este trabajo, así como a variaciones en la resolución espacial y la extensión del área analizada (margen del río San Pablo vs. todo el municipio de El Cantón de San Pablo).

Este trabajo indica la importancia de combinar herramientas avanzadas de SIG, como el uso de software especializado (ArcGIS Pro) y el análisis de imágenes satelitales de alta resolución (PlanetScope). La información obtenida es fundamental para diseñar estrategias de mitigación frente a los impactos de la minería ilegal y promover la conservación del bosque y la vegetación secundaria. Los resultados obtenidos permiten comprender la dinámica de la minería ilegal en el Cantón de San Pablo y evaluar sus impactos ambientales.

11. Recomendaciones

El uso de imágenes satelitales de PlanetScope representa una herramienta fundamental para el monitoreo de cambios en la cobertura del suelo, gracias a su alta resolución temporal y espacial, que permite obtener datos detallados con mayor frecuencia. Estas ventajas permiten monitorear de manera más efectiva los procesos antrópicos como la deforestación en zonas con condiciones climáticas y sociales complejas. En este sentido se recomienda integrar las imágenes de PlanetScope en investigaciones análogas que requieran enfoques multitemporales para la identificación de impactos.

La metodología empleada en la investigación permite ser adaptada por los gobiernos locales de la región para fortalecer las fases de diagnóstico en la formulación o actualización de los instrumentos de planificación territorial como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) o los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA). Al aplicar análisis multitemporales es posible cuantificar las áreas con extracción ilícita de minerales y a su vez monitorear su evolución. De modo que se pueden tomar acciones por parte de las autoridades

competentes para la suspensión de estas actividades y de manera concurrente promover proyectos de reconversión productiva.

Dado que esta investigación realizada evidenció cambios significativos de coberturas del suelo generados por la minería ilegal a lo largo del tiempo, se invita a fortalecer la gobernanza en la zona a través de la unificación de los esfuerzos institucionales.

Conviene reforzar el estudio con técnicas de validación de datos in situ como visitas de campo orientadas a la toma de datos directos sobre la calidad del agua, el estado de los suelos y la variación en la diversidad biológica. Estas observaciones pueden apoyarse en herramientas como drones, pruebas químicas y física, así como sensores de monitoreo, lo que permitirá calibrar el modelo y ajustar la clasificación de coberturas con mayor precisión

Se propone desarrollar un Sistema de Información Geográfica (SIG) en una plataforma web que integre insumos de PlanetScope con algoritmos de corrección atmosférica y clasificación supervisada en tiempo real. Este SIG debe garantizar la interoperabilidad entre entidades a nivel local, regional y nacional, asegurando la toma de decisiones oportunas y la implementación eficiente de acciones en puntos críticos previamente identificados.

12. Referencias

Aguirre Núñez, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. Revista virtual REDESMA, 5, 9. http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1995-10782011000100003&lng=es&nrm=iso

Bernhoft, R. A. (2012). Mercury toxicity and treatment: A review of the literature. Journal of Environmental and Public Health, [doi: 10.1155/2012/460508].

Carlos, C. O. L., & Asesor. (2017, March 15). Análisis multitemporal de coberturas vegetales y usos del suelo de la cuenca media del Río San Francisco de Puracé, (1989-2014). https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3007

Deng, J., Wang, K., Hong, Y., & Qi, J. (2014). Understanding spatio-temporal land use changes and driving mechanisms. Journal of Land Use Science, 9(2), 131-148.

Escobar López, Y. (2016). Una mirada a la evasión tributaria en la minería. Revista Lidera, (11), 70-74. Recuperado a partir de https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/revistalidera/article/view/16943

Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio del Cantón de San Pablo- Chocó. (2016). En la Alcaldía Municipal del Cantón de San Pablo. https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/20.500.14471/16208/19204-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

European Space Agency. (2024). PlanetScope sample data. Earth Online. https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope/sample-data

Figueredo Fernández, José Luis, Ramón Puebla, Adonis Maikel, & Barrero Medel, Héctor. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de manejo "Los Números" Guisa, Granma. Revista Cubana de Ciencias Forestales, 8(1), 1-15. Epub 01 de abril de 2020. Recuperado en 31 de diciembre de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692020000100001&lng=es&tlng=es.

FIGUEROA, O. H. (S. F.). DESVÍO DE CAUDALES. Retrieved 05 09, 2019, from

Flórez-Yepes, G. Y., Rincón-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. Dyna, 84(201), 95-101.

GUZMÁN QUINTO, C. (2023). EVALUACIÓN DE LAS ZONAS AFECTADAS POR LA MINERÍA UTILIZANDO SIG EN EL CANTÓN CAMILO PONCE ENRÍQUEZ, PROVINCIA DE AZUAY. [Tesis, Universidad Agraria del Ecuador]. https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/GUZM%C3%81N%20QUINTO%20CAROLAY%20ALEJANDRA.pdf

http://files.construccion-de-edificaciones.webnode.com.co/200000171-0729c0823a/DESVIO%20DE%20CAUDALES.pdf

Informe de Explotación de Oro de Aluvión 2022. https://www.unodc.org/colombia/es/informe-de-explotacion-de-oro-de-aluvion-2022.html

Jhoana, A. M. G. (2020, October 14). Análisis multitemporal de las características geomorfológicas de la cuenca Río Quito, presionada por actividad minera. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/4186

León, Q. P. J. (2020, August 27). Afectaciones por minería en la subzona hidrográfica de Río Quito, mediante la interpretación de imágenes satelitales. https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/4133

Mario Martínez, J. P. (2013). La Normativa Minera en Colombia. Bogotá. Retrieved 05 08, 2019, from https://www.movimientom4.org/wp-content/docs/Normativa-Minera_Colombia.pdf.

Mateus, C. P. (2014). Marco Normativo para la Minería Ilegal como actividad no regulada en Colombia y. Retrieved Diciembre 23, 2018, from https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7077/Sanchez%20Mateus%20Claudia%20Patricia%202015.pdf?sequence=4&isAllowed=y https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/6225/T_DHDIH_408.pdf?sequence=2 LA MINERIA EN EL DEPARTAMENTO DEL CHOCO

Miguel, S. P. J. (2020). Sistemas de información geográfica. Editorial UNED.

Minería ilegal. (2022.). Universidad Del Rosario. https://pure.urosario.edu.co/es/projects/miner%C3%ADa-ilegal

NDVI: Fórmula y uso del índice de vegetación na agricultura. (2023, December 1). EOS Data Analytics. https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/

PDEA – Chocó 2020 – 2023 - Agencia de Desarrollo Rural. (2020). En la Agencia de Desarrollo Rural. https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/PDEA-CHOCO-2020-2023-Versio%CC%81n-Final-03-12-2020.pdf

Plan de desarrollo 2024 -2027 «con voluntad porque merecemos más». (2024). En la alcaldía municipal del cantón de san pablo. https://elcantondelsanpablochoco.micolombiadigital.gov.co/sites/elcantondelsanpablochoco/content/files/000604/30171_pdm-20242027.pdf

Repositorio Universidad Javeriana, González Borrero, Romero Rodríguez. Análisis multitemporal de los cambios de la cobertura de la tierra e incidencia del cultivo de palma en el territorio del Municipio de Villanueva Casanare 2013, from https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/13495

Revista Bioetnia Volumen 18, 2021, Arango Carvajal, Rastros indelebles de la minería ilegal mecanizada en la cocina tradicional: caso Managrú , Cantón de San Pablo, Chocó, Colombia, from https://bioetnia.iiap.org.co/index.php/bioetnia/article/view/247

Ruiz, V., Savé, R., Herrera, A. (2013). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflor Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. Ecosistemas 22(3):117-123. Doi.: 10.7818/ECOS.2013.22-3.16.

Sánchez-Díaz, Baltazar. (2018). La teledetección en investigaciones ecológicas como apoyo a la conservación de la biodiversidad: una revisión. Revista científica, (33), 243-253. https://doi.org/10.14483/23448350.13370

Sánchez-Sánchez, Y., Martínez-Graña, A., Santos-Francés, F., & Criado, M. (2021). Multitemporal analysis of land use changes and their effect on the landscape. Agronomy, 11(8), 1470. https://doi.org/10.3390/agronomy11081470

UNODC. (2023). Respuesta a la Minería ilegal y el tráfico de metales y minerales. https://sherloc.unodc.org/cld/uploads/pdf/Illegal_Mining_and_Trafficking_in_Metals_S.pdf

Valle, O., & Rivera, O. (2008). Monitoreo e indicadores. IDIE Guatemala. Educación Inicial y Derechos de la Infancia. Sevilla: Junta de Andalucía.