Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis de cambios de cobertura vegetal en áreas de importancia para la conservación ambiental en Colombia.

Daniela Rojas Isaza

Natalia Giraldo Trujillo

Especialistas en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

Juan José García Duque, Especialista (Esp)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Rojas Isaza & Giraldo Trujillo, 2023)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Rojas Isaza, D., & Giraldo Trujillo, N. (2023). *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis de cambios de cobertura vegetal en áreas de importancia para la conservación ambiental en Colombia.* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

creative commons CC BY NC SA

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Cohorte XVIII.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Lina María Berrouet Cadavid.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del problema. 1

2. OBJETIVOS 3

2.1 Objetivo general. 3

2.2 Objetivos específicos. 4

3. MARCO TEÓRICO. 4

3.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG). 4

3.2. Sensores remotos. 5

3.3. Teledetección. 6

3.4. Clasificación supervisada 6

3.5. Fotointerpretación. 7

3.6. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). 7

3.7. Colombia y sus principales biomas. 8

3.7.1. Bosque húmedo tropical: 8

3.7.2. Bosques de niebla: 9

3.7.3. Bosques secos tropicales: 9

3.7.4. Humedales: 9

3.7.5. Páramos: 9

3.7.6. Sabanas tropicales: 10

3.8. Cobertura vegetal en Colombia. 10

3.9. Cambios en la cobertura vegetal. 10

3.10. Áreas de protección. 11

3.11. Sistemas de Información Geográfica y Áreas protegidas. 12
4. METODOLOGÍA..... 13
4.1. Estrategia de búsqueda de literatura. 13
4.2. Los criterios de inclusión y exclusión..... 14
4.3. Definición de categorías de análisis..... 14
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS. 14
5.1. Fuentes de datos:..... 15
5.2. Preprocesamiento:..... 20
5.3. Tipos de clasificación y técnicas de teledetección de cambios..... 22
3. CONCLUSIONES..... 30
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1**.** Fortalezas y Limitaciones generales de las principales técnicas detección de cambio de cobertura en áreas protegidas. 28

Tabla 2. Principales enfoques y las técnicas implementadas. 34

Tabla 3. Fortalezas y limitaciones generales de la detección de cambio de cobertura en áreas protegidas en Colombia. 37

LISTA DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1. Resultado de la revisión inicial 15

Ilustración 2. Tipos de fuentes de datos identificados. 16

Ilustración 3. Resultado revisión datos de preprocesamiento 20

Ilustración 4. Principales usos o propósitos de las fuentes de datos analizadas. 28

GLOSARIO

- **Áreas protegidas:** Son áreas definidas geográficamente que han sido designadas, reguladas y administradas para alcanzar objetivos específicos de conservación. Estas áreas contribuyen a la conservación de espacios que poseen o pueden llegar a tener una significativa riqueza ecológica y paisajística, que provee beneficios y servicios ambientales al conjunto de la sociedad.

- **Vegetación azonal:** Es aquella que se sitúa en superficies, donde los factores climáticos pueden ejercer su acción sin verse por las condiciones del suelo, en esta, son más importantes determinadas características del suelo que del clima (como sucede con las dunas, riberas, humedales, pedregales…).

- **Fragmentación de hábitat**: El proceso en que áreas continuas de hábitat son reducidas y divididas en dos o más fragmentos o parches pequeños y aislados que quedan inmersos en una matriz con condiciones poco aptas para las especies que ahí habitan.

- **Ecosistemas estratégicos:** Son las unidades ambientales específicas biológicas, características físicas, estructuras y procesos proveen a la sociedad de bienes y servicios vitales. Los ecosistemas estratégicos garantizan la oferta de bienes y servicios ambientales esenciales para el desarrollo humano sostenible del país, como lo son: páramos, humedales y bosques.

- **Servicios ecosistémicos:** Son todas aquellas contribuciones directas e indirectas que hacen los ecosistemas al bienestar humano, esto se ve representado en elementos o funciones derivadas de los ecosistemas que son percibidas, capitalizadas y disfrutadas por el ser humano como beneficios que incrementan su calidad de vida.

- **Bandas espectrales:** Un rango de longitudes de onda en el espectro de energía electromagnética (EM) reflejada o radiada a la que un sensor remoto es sensible.

Cuando un sensor captura datos de una banda espectral, almacena los datos en un archivo. El archivo o parte del archivo dedicado a ese rango también se conoce normalmente como banda.

- **Resolución espacial:** Se refiere a la dimensión del tamaño de celda que representa el área cubierta en el terreno. Por lo tanto, si el área cubierta por una celda es de 5 x 5 metros, la resolución será de 5 metros. Cuanto mayor sea la resolución, más pequeño será el tamaño de celda, y, por lo tanto, mayor será el detalle.

- **Resolución temporal:** Se refiere a la frecuencia a la cual se capturan las imágenes en el mismo lugar de la superficie de la tierra, también se denomina período de revisita, que es el término que se usa generalmente para los sensores satelitales. Así, un sensor que captura datos una vez por semana tiene una mayor resolución temporal que uno que captura datos una vez por mes.

- **Resolución espectral:** El rango de longitudes de onda que un sistema de imágenes es capaz de detectar, describe la capacidad de un sensor de distinguir entre intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético. Cuanto mayor es la resolución espectral, más se restringe el rango de longitud de onda.

- **Valor ecológico:** El valor atribuido a un organismo, ecosistema, producto, recurso o actividad, en términos de beneficios para el medio ambiente.

- **Sucesión ecológica**: Es un proceso natural en el que se produce una secuencia de cambios en la comunidad ecológica que son observables en el tiempo y en el espacio. Se debe a colonizaciones y extinciones locales de especies.

- **SIG:** Sistemas de Información Geográfico.
- **NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- **AP:** Área protegida.

RESUMEN

Este trabajo se basa en una revisión bibliográfica de artículos científicos, la cual busca evaluar la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis de cambios de cobertura vegetal en áreas de importancia para la conservación ambiental en Colombia. Se aborda esta temática debido a que las herramientas SIG emergen como soluciones esenciales para comprender las transformaciones en la cobertura vegetal, las cuales tienen un impacto negativo en los ecosistemas y en la calidad de vida, especialmente en el contexto de Áreas Protegidas.

Los resultados obtenidos destacan el amplio uso de la teledetección de cambio de cobertura vegetal concluyendo en unas fortalezas y limitaciones de su aplicación. Dentro de los análisis realizados se concluyen que los SIG son recomendados para monitorear áreas protegidas, ya que son menos costosos, más objetivos que los métodos tradicionales y posibilitan la evaluación de zonas remotas. En tal sentido, sobresale la implementación de imágenes Landsat, para el análisis a escala regional y la eficacia como técnica, de la clasificación supervisada mediante métodos como Random Forests. Sin embargo, se logró concluir que la investigación específica dentro de áreas protegidas en Colombia aun es limitada y se recomienda realizar nuevos estudios de teledetección en estas zonas de gran importancia para la conservación ambiental, como es el caso especial, de las áreas de pequeña escala como las Reservas Naturales de la Sociedad Civil (RNSC), donde su investigación aun es incipiente y se observan limitaciones relacionadas con la resolución espacial y temporal de las imágenes, así como el tamaño del píxel.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfico, Áreas Protegidas, Cambios de cobertura vegetal, Colombia.

ABSTRACT

This work is based on a bibliographic review of scientific articles, which seeks to assess the application of Geographic Information Systems (GIS) in the analysis of changes in vegetation cover in areas of environmental conservation importance in Colombia. This topic is addressed because GIS tools emerge as essential solutions to understand transformations in vegetation cover, which have a negative impact on ecosystems and quality of life, especially in the context of Protected Areas.

The results highlight the extensive use of vegetation cover change detection through remote sensing, concluding with strengths and limitations of its application. The analyses lead to the conclusion that GIS is recommended for monitoring protected areas as they are less costly, more objective than traditional methods, and enable the assessment of remote areas. In this regard, the implementation of Landsat images stands out for regional-scale analysis, and the effectiveness of supervised classification techniques such as Random Forests.

However, it was concluded that specific research within protected areas in Colombia is still limited, and it is recommended to conduct new remote sensing studies in these areas of great importance for environmental conservation. This is especially relevant for small-scale areas like Civil Society Natural Reserves (RNSC), where research is still in its early stages, and limitations related to the spatial and temporal resolution of images, as well as pixel size, are observed.

Keywords: Geographic Information Systems, Protected Areas, Vegetation Cover Changes, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

La conservación ambiental es un desafío crucial en la actualidad, dada la creciente presión sobre los ecosistemas naturales. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) emergen como herramientas poderosas para analizar y comprender la dinámica de la cobertura vegetal en áreas protegidas o de importancia para la conservación. Estos sistemas permiten la visualización y el análisis de datos espaciales relacionados con la vegetación, brindando una visión integral de los patrones de cambio a lo largo del tiempo. En este artículo, se explorará exploraremos la aplicación de los SIG y su contribución para la protección y preservación de nuestro entorno natural.

1.1 Planteamiento del problema.

La región de América Latina y el Caribe contienen aproximadamente la mitad de los bosques tropicales que quedan en el mundo, pero la tensión entre la conservación y la extracción de recursos naturales es un denominador común en todos los paisajes forestales (Clark et al., 2021a). Colombia no es ajena a esta realidad, al ser uno de los países con mayor diversidad biológica del mundo (Etter et al., 2006), se encuentra fuertemente afectado por la conversión y fragmentación de hábitat, explotación de recursos naturales, presión sobre los ecosistemas, extracción minera y diversos conflictos sociopolíticos y económicos, entre otros, que se ven reflejados en un aumento del cambio en la cobertura del suelo (Chaves y Arango, 1998; Myers, 1988) (Etter et al., 2006), especialmente en ecosistemas estratégicos como son las áreas protegidas y áreas de bosques de gran importancia para la conservación ambiental (como lo son la Amazonia y los Andes Tropicales), debido a que posee regiones de alta prioridad de conservación por su gran biodiversidad, alta cantidad de endemismos y por su importancia para la conservación de servicios ecosistémicos como el almacenamiento de carbono y la protección de cuencas hidrográficas (Clark et al., 2021b).

La pérdida de cobertura vegetal es un problema ambiental que afecta a nivel global. Entre las principales causas de la pérdida de cobertura vegetal se encuentran la deforestación, la expansión agrícola y la urbanización, lo que conlleva a consecuencias negativas en los ecosistemas y en el bienestar humano, como pueden ser la baja absorción de dióxido de carbono y de liberación de oxígeno, el aumento en la erosión del suelo y la degradación de la tierra, baja calidad del aire y del recurso hídrico, pérdidas de fuentes de alimentos, problemas en la regulación del clima y disminución de la biodiversidad, entre otros problemas que afectan el bienestar humano de las comunidades y el medio ambiental.

Históricamente las áreas protegidas han sido creadas para recreación, protección y salvaguardar lugares de interés natural, ambiental y económicos (Sanchez-Cuervo & Aide, 2013). Sin embargo, esta figura de protección también ha sido perturbada por factores exógenos y antrópicos que han afectado su conservación y reflejado un cambio de cobertura del suelo. Acceder y monitorear estas áreas a menudo es complejo, debido a problemas de orden público y poco acceso, lo que resulta en dificultades para dar seguimiento y buena gestión de estás. El monitoreo y la presentación de informes sobre los cambios en la cobertura del suelo a escala nacional y regional son muy importantes para desarrollar e implementar políticas para conservar la biodiversidad y los hábitats, pero no informan las complejidades espaciales y temporales de la dinámica de la cobertura del suelo que ocurre a escala local (Etter et al., 2006), lo que es indispensable para identificar puntos críticos de cambio dentro de áreas protegidas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas tecnológicas que permiten recopilar, almacenar, visualizar y analizar datos espaciales de diferentes fuentes, como imágenes satelitales, mapas y fotografías aéreas (Almalki et al., 2022). En las últimas dos décadas los SIG han desempeñado un papel fundamental en el análisis de los cambios en la cobertura vegetal, permitiendo relacionar diversidad de variables e identificar patrones y relaciones espaciales que facilitan la toma de decisiones informadas y efectivas, para esto, es fundamental considerar la disponibilidad y calidad de los datos de cobertura vegetal, ya que

estos factores pueden afectar la precisión y la aplicabilidad de los resultados obtenidos mediante los SIG.

En el contexto de áreas protegidas, los SIG se utilizan para delimitar y cartografiar los límites geográficos, monitorear cambios en el uso del suelo, evaluar la biodiversidad y los hábitats, identificar áreas de conservación prioritarias y gestionar la planificación ambiental territorial. Además, los SIG son esenciales en la gestión de ecosistemas estratégicos al facilitar la identificación de áreas vulnerables, el seguimiento de recursos naturales, la gestión de riesgos ambientales y la planificación de acciones para la conservación y restauración de estos entornos cruciales para el equilibrio ecológico.

Sin embargo, a pesar de las ventajas que ofrecen los SIG, existe una necesidad de comprender cómo se pueden aplicar de manera efectiva en el análisis del cambio de la cobertura vegetal, así como, los diferentes enfoques y modelos utilizados en el análisis de dichos cambios.

Este trabajo de revisión busca evaluar cómo se han aplicado los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis de cambios de cobertura vegetal en áreas protegidas o de importancia para la conservación ambiental en Colombia.

2. OBJETIVOS.

2.1 Objetivo general.

Evaluar la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis de cambios de cobertura vegetal en áreas de importancia para la conservación ambiental en Colombia.

2.2 Objetivos específicos.

A continuación, se describen los objetivos específicos que buscan el logro del proyecto:

- Identificar las aplicaciones SIG en el análisis de cambio de coberturas vegetales para desarrollar estudios multitemporales-espaciales.
- Reconocer las limitaciones y fortalezas de las diferentes aplicaciones SIG en la identificación de cambios de cobertura vegetal.
- Analizar cuáles son las técnicas de teledetección más usadas para la identificación de cambios de cobertura vegetal en Colombia.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Son herramientas informáticas que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados. Estos sistemas integran información espacial y atributiva para generar mapas y modelos que ayudan en la toma de decisiones en diferentes campos, como la planificación urbana, la gestión ambiental, la agricultura, entre otros. (Butt et al., 2015). Al ser capaces de representar gráficamente algún tipo de componente espacial, estas herramientas permiten que la información pueda relacionarse de diversas maneras, algunos ejemplos de esto son los mapas de suelo, mapas climáticos o mapas de otra variable territorial. (Mena et al., 2011)

Los sistemas de información geográfica SIG se han implementado desde principios de la década de 1960, sin embargo, solo en las últimas dos décadas los avances tecnológicos han propiciado un desarrollo acelerado de las herramientas y los programas disponibles. Es por esto, que los SIG desempeñan un papel fundamental en el análisis de los cambios en la

cobertura vegetal, a través de diferentes técnicas que permiten identificar patrones de cambio, evaluar la efectividad de las políticas de conservación y apoyar la toma de decisiones informadas en la gestión de los recursos naturales y la conservación ambiental. (Zuria & Martínez-Morales, 2019).

Las herramientas SIG incluyen algunos softwares especializados dentro de los que se destacan ArcGIS y QGIS que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados. Estos sistemas también pueden incluir herramientas de análisis espacial, como la interpolación, el análisis de redes, la superposición de capas, la generación de modelos digitales de elevación, entre otros (Butt et al., 2015). Actualmente existe un gran número de programas de SIG de libre acceso entre los que destacan QGIS, ILWIS y GRASS. (Zuria & Martínez-Morales, 2019), entre otros.

Estos programas permiten realizar análisis de superposición para dilucidar las relaciones espaciales que existen en la información contenida en las diferentes bases de datos. En el campo de la biodiversidad, los SIG se han utilizado para hacer mapas que comparan la riqueza de especies entre sitios o los diferentes tipos de cobertura del terreno, para modelar cuál será el impacto de las actividades humanas sobre la riqueza de especies en el futuro, y para el manejo y conservación de recursos naturales en áreas protegidas. (Zuria & Martínez-Morales, 2019)

3.2. Sensores remotos.

Son herramientas que se colocan sobre satélites, aviones, helicópteros e incluso drones para captar imágenes de áreas relativamente extensas de la superficie terrestre. Estos sensores permiten captar la radiación electromagnética que se refleja de los objetos en la Tierra y esta información se representa en imágenes. Existen dos tipos de sensores remotos, los pasivos y los activos. Los sensores pasivos captan la radiación electromagnética que se refleja de los objetos en la Tierra y esta información se representa en imágenes. Los sensores remotos

activos son aquellos que emiten energía que después es reflejada por el objeto para ser captada por el sensor. (Zuria & Martínez-Morales, 2019)

Las herramientas utilizadas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) incluyen la teledetección, la fotointerpretación, la clasificación digital supervisada, el uso de funciones de transformación de coordenadas, filtros, extracción y superposición de coberturas, herramientas de análisis espacial, entre otras (Mena et al., 2011).

3.3. Teledetección.

Se define como la ciencia y el arte de adquirir información sobre la Tierra y otros objetos del universo sin estar en contacto físico con ellos. Este campo abarca una amplia gama de técnicas que implican la detección y el registro de la energía electromagnética reflejada o emitida por los objetos a través de instrumentos remotos, como cámaras aerotransportadas y sensores satelitales (Gould, 2000). Es una técnica que utiliza sensores remotos para recopilar información sobre la superficie terrestre desde una distancia. En el contexto de las coberturas vegetales, se utiliza para adquirir datos sobre la distribución espacial y las características de la vegetación a través de la captura de la radiación electromagnética reflejada o emitida por las plantas.

La teledetección en SIG se combina con técnicas de modelado espacial y análisis estadístico para generar modelos predictivos sobre la distribución y la dinámica de las coberturas vegetales, que pueden utilizarse para realizar pronósticos sobre el impacto del cambio climático y la gestión forestal sostenible.

3.4. Clasificación supervisada.

Es un proceso de clasificación en el cual el intérprete o usuario proporciona muestras de entrenamiento que representan las clases espectrales de interés. El algoritmo de clasificación

utiliza estas muestras para aprender las características espectrales y clasificar los píxeles no etiquetados de la imagen (Gould, 2000). Utilizada en los SIG para categorizar o clasificar diferentes objetos o elementos en una imagen digital o en una cobertura vegetal. En el contexto de las coberturas vegetales, la clasificación supervisada se utiliza para identificar y clasificar diferentes tipos de vegetación presentes en una imagen o en un conjunto de datos geoespaciales, como son tipos de bosques, cultivos agrícolas, pastizales, áreas urbanas, entre otras.

3.5. Fotointerpretación.

Es el proceso de examinar fotografías aéreas e imágenes de satélite para identificar y describir características y fenómenos de la superficie terrestre, (Gould, 2000). En el contexto de las coberturas vegetales, se emplea para comprender y caracterizar los distintos tipos de vegetación presentes en una imagen, en el cual se observan y analizan las características de las coberturas vegetales, como la forma, el tamaño, la textura, la densidad, el color, la altura, entre otros. Para este proceso se utilizan conocimientos teóricos y experiencia para identificar y clasificar diferentes tipos de vegetación en función de estas características.

3.6. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Se utiliza para evaluar la densidad y la vitalidad de la vegetación, ya que las plantas sanas y bien desarrolladas tienden a reflejar más radiación en el infrarrojo cercano y absorber más radiación en el rojo, lo que lo hace especialmente útil en el monitoreo de cambios en la cobertura vegetal, la detección de estrés hídrico, la evaluación de la productividad de los cultivos y la identificación de áreas afectadas por la degradación de la vegetación. (Gould, 2000).

Tal como lo explica Butt et al. (2015) en el artículo *"Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan"* el

uso de metodologías y aplicaciones SIG para la identificación y monitoreo de cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo, estos mencionan la importancia del uso de imágenes satelitales y teledetección para la generación de mapas e identificación de coberturas vegetales. Además, mencionan la importancia del uso de herramientas de análisis espacial como la superposición de capas y la generación de modelos digitales de elevación para la identificación de áreas de cambio en la cobertura vegetal. Así mismo, mencionan el uso de muestreo aleatorio para la selección de áreas de estudio y la estimación de la precisión de los resultados.

Durante los últimos años, los estudios del cambio de cobertura vegetal en los diversos ecosistemas a nivel mundial han tomado mayor notabilidad, debido a múltiples factores como el cambio climático y actividades antrópicas, generando la necesidad de realizar estudios que evalúen los diferentes cambios en la cobertura del suelo. (Barrera & Chaparro, 2021).

3.7. Colombia y sus principales biomas.

Colombia, debido a su diversidad de ecosistemas y climas, cuenta con diferentes tipos de cobertura vegetal, comprendida en una amplia gama de biomas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales (Departamento Nacional de Planeación, 2022). Se mencionan algunos de los principales biomas que componen el País, debido a su importancia ecosistémica:

3.7.1. Bosque húmedo tropical:

Es uno de los ecosistemas con mayor productividad primaria. Se estima que engloba el mayor número de especies por metro cuadrado. Está representado principalmente por la región del Amazonas y su dinámica regula el clima de la región. Se estima que para el año 2050 habrá perdido alrededor de un 50% de su superficie actual debido a la deforestación. (Sánchez et al., n.d.)

3.7.2. Bosques de niebla:

Desempeñan una función determinante en el suministro hídrico; capturan, almacenan y liberan el agua. A pesar de su gran importancia, la tasa de fragmentación y reducción de estos ecosistemas aumenta por la expansión de la frontera agrícola y la sobreexplotación de sus recursos. (Sánchez et al., n.d.)

3.7.3. Bosques secos tropicales:

El endemismo en este ecosistema es muy alto y amerita todo el esfuerzo de conservación, este ecosistema se encuentra en riesgo debido a su alta vulnerabilidad relacionada con su conformación fragmentada y sus condiciones climáticas particulares. (Sánchez et al., n.d.)

3.7.4. Humedales:

A pesar del valor ecológico, económico y social de estos ecosistemas (regulación de cuencas hidrográficas, provisión de recursos y fertilización de tierras), estos se han ido resecando, desatando una crisis ambiental reflejada en la transformación de la cobertura vegetal. (Sánchez et al., n.d.)

3.7.5. Páramos:

Habitado por especies endémicas y amenazadas; este ecosistema desempeña un papel determinante en el suministro hídrico ya que captura, almacena y libera agua. (Sánchez et al., n.d.)

3.7.6. Sabanas tropicales:

Cubre alrededor del 12,8% del territorio y se caracteriza por tener tipos extremos de suelos y vegetación azonal. Una transformación o eliminación de estos generaría desbalance en la regulación hídrica, ciclado de nutrientes y podría tener consecuencias negativas sobre la seguridad alimentaria. (Sánchez et al., n.d.)

3.8. Cobertura vegetal en Colombia.

Se refiere a la variedad de formaciones vegetales presentes en el territorio, que incluyen bosques, selvas, pastizales, humedales y otros tipos de vegetación, así como su distribución espacial y composición florística. La cobertura es fundamental para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proporcionan (IDEAM). El proceso de adopción estandarización de la metodología y la leyenda de coberturas terrestres de Colombia, inició desde el año 2004 con la adaptación a nivel nacional de la metodología europea CORINE Land Cover - CLC; este proceso surge como respuesta a la necesidad de unificar y armonizar las diferentes metodologías y leyendas de cobertura terrestre, para establecer las comparaciones de las áreas (Flórez-Yepes et al., 2017) y generar información actualizada, confiable y trazable.

3.9. Cambios en la cobertura vegetal.

A lo largo del tiempo, se han registrado cambios significativos de cobertura vegetal en Colombia, principalmente de bosques a pastizales y cultivos. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), solo en 2016 se pasó de 178.597 hectáreas deforestadas a 219.973 hectáreas en 2017 a escala nacional. Estos cambios en la cobertura vegetal pueden ser causados por diversas actividades humanas y eventos naturales. (Young et al., 2015)

De acuerdo con la percepción de los expertos locales, las amenazas más importantes para las áreas de importancia para la conservación son el cambio climático, la minería, la deforestación, el avance de la agricultura, la ocupación ilegal de la tierra, la caza, el tráfico de flora o fauna y la tala ilegal; cambios que pueden resultar en la pérdida, fragmentación o modificación de los ecosistemas naturales (Young et al., 2015), y por ende, pérdida de sus servicios ecosistémicos.

3.10. Áreas de protección.

Un área protegida está definida geográficamente y ha sido designada, regulada y administrada a fin de alcanzar los objetivos específicos de conservación. Estas áreas son de diversos tipos y deben corresponder a una categoría de manejo, conforme el nivel de biodiversidad que protejan, su estado de conservación, el tipo de gobernanza, la escala de gestión (nacional, regional o local) y las actividades que en ellas se permitan (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2013).

Actualmente el país cuenta con diferentes tipos de áreas protegidas (Amaya Navas, 2018), a continuación, se mencionan las principales categorías: Parque Natural Nacional, Reserva Forestal Protectora, Parque Natural Regional, Distrito de Manejo Integrado, Distrito de Conservación de Suelo y Área Protegida Privada o Reserva Natural de la Sociedad Civil (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2013).

El Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia está conformado por 1,552 áreas protegidas que ocupan una superficie de 19’090,818.63 hectáreas equivalentes al 16.72% de la superficie terrestre del País, las cuales se encuentran en el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas -RUNAP- de Parques Nacionales Naturales de Colombia.

En Colombia se pueden identificar las siguientes áreas protegidas: Reserva Nacional Natural y Regional (122 y 43 respectivamente), Reserva Forestal Protectora Nacional y Regional (56 y 98 respectivamente), Reserva Natural de la Sociedad Civil (1187), Distritos de Manejo Integrado (nacional y regional), Santuarios de Fauna y Flora, entre otros. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2013).

3.11. Sistemas de Información Geográfica y Áreas protegidas.

Tal como lo menciona Negassa et al. (2020) en artículo *"Forest cover change detection using Geographic Information Systems and remote sensing techniques: a spatio-temporal study on Komto Protected forest priority area, East Wollega Zone, Ethiopia"* priorizan el análisis de los cambios de cobertura vegetal con herramientas SIG en las áreas protegidas, debido a que estas áreas son importantes para la conservación de la biodiversidad y la protección de los servicios ecosistémicos; la pérdida de cobertura en estas áreas puede tener un impacto significativo en la calidad de vida de las comunidades locales y en la economía de la región. Es por esto que los autores sugieren el uso de SIG para analizar los cambios en la cobertura vegetal en las áreas protegidas, con el fin de identificar las causas de la pérdida. Además, destacan la importancia de monitorear y proteger las áreas para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de estás, sus ecosistemas y su biodiversidad.

Cada vez se hace más notorio la necesidad de monitorear y analizar los cambios de cobertura en las áreas de importancia para la conservación. Es de ahí, que se implementan los SIG como una herramienta para complementar los análisis sobre el medio ambiente y generar información importante para determinar los cambios que han sufrido las coberturas vegetales en el tiempo (Flórez-Yepes et al., 2017). Este análisis es fundamental para la planificación de la gestión ambiental a largo plazo, los resultados obtenidos pueden ayudar a identificar las áreas que requieren una mayor atención y recursos para su protección y restauración con el objetivo de desarrollar estrategias de manejo adecuadas y sostenibles.

Por último, Colombia es uno de los países con mayor biodiversidad en el mundo, pero también enfrenta desafíos significativos en términos de deforestación y degradación ambiental, por lo que el análisis del cambio de cobertura vegetal en áreas protegidas proporciona información valiosa sobre la magnitud y la ubicación de estos procesos, ayudando a la toma de decisiones informadas. Sin embargo, es importante conocer que para llegar a estas conclusiones es necesario identificar qué tipo de insumos, métodos, metodologías y análisis son los más idóneos y podrían proporcionar información más acertada según la necesidad a estudiar dentro de cada área protegida y al nivel de detalle al que se quiera monitorear dicha región.

4. METODOLOGÍA

4.1. Estrategia de búsqueda de literatura.

Con el propósito de identificar los enfoques utilizados para evaluar la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis de cambios de cobertura vegetal en áreas de importancia para la conservación ambiental en Colombia, se realizó una revisión de literatura. La búsqueda inicial de artículos se realizó en las bases de datos Scopus, Science Direct, Springer y Research gate, comprendiendo un periodo de tiempo entre los años 2002 y 2023. En cada una de las bases de datos se realizaron cinco (5) tipos de búsqueda diferente, de los cuales cuatro (4) de estos realizaban diferentes combinaciones de las palabras claves y en el último Tipo de búsqueda se realizaron consultas manuales considerando la similitud entre títulos y autores destacados en otros artículos, con el fin de obtener información importante que los motores de búsqueda pudieron haber omitido.

Las palabras claves utilizadas en los motores de búsqueda fueron: “Sistemas de información geográfica”, “cobertura vegetal”, “cambios de cobertura”, “área protegida”, “conservación de vegetación”, “pérdida de cobertura” y “Colombia”.

4.2. Los criterios de inclusión y exclusión.

Inicialmente se realizó la exclusión de artículos duplicados, luego se revisaron los títulos y resúmenes de los artículos no repetidos con el fin de determinar si estos estaban acorde con la aplicación de los sistemas de información geográfica en los cambios de cobertura vegetal; finalmente, se revisó que estos últimos artículos fueran representativos e involucran áreas protegidas o áreas de importancia para la conservación ambiental en Colombia y se excluyeron los que no cumplieron esa particularidad.

4.3. Definición de categorías de análisis.

Para realizar el análisis de los artículos, se realizó una revisión preliminar de los mismos con el fin de comprender los principales temas y enfoques que abordan cada uno de los autores y así, poder definir categorías de análisis mediante la identificación de conceptos, metodologías y términos esenciales. En tal sentido, se definieron cuatro categorías de análisis las cuales fueron “Fuente de Datos”, “Preprocesamiento”, “Tipos de clasificación” y “Técnicas de teledetección de cambios”, las cuales serán discutidas más adelante.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Inicialmente, se recuperaron 191 artículos mediante la búsqueda asistida por diferentes bases de datos, bajo los tipos de búsqueda descritos anteriormente. Luego de eliminar los artículos repetidos (49 artículos), se realizó una revisión preliminar de los títulos y resúmenes de los artículos y se seleccionaron 45, finalmente se realizó una revisión detallada donde se definió trabajar con 33 publicaciones para el análisis. Estos artículos fueron publicados entre los años 2002 y 2023.

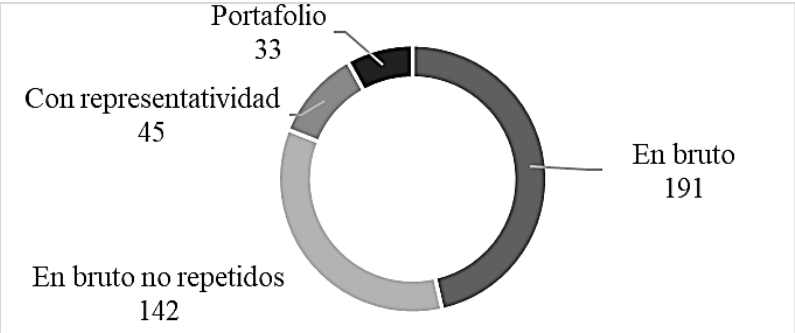

Ilustración 1. Resultado de la revisión inicial

Al realizar un análisis de la distribución temporal de los artículos, se evidencia una tendencia creciente en la producción de artículos a lo largo del tiempo, indicando un incremento en la actividad de investigación y publicación en el tema de interés. Sin embargo, para el año 2020 se observa la producción más alta de artículos publicados en análisis de cambio de cobertura vegetal, posiblemente debido al aumento de la aplicación de información remota para la investigación, a causa, de las limitaciones de movilidad que se dieron ese año en el país por la pandemia COVID 19.

5.1. Fuentes de datos:

En Sistemas de Información Geográfica, las fuentes de datos se refieren a las distintas fuentes de información capturadas desde plataformas espaciales o aéreas, que proporcionan datos sobre la superficie de la tierra y sus características. Para implementar el análisis de cambios de cobertura vegetal en áreas protegidas primero se debe seleccionar una fuente de datos que permita generar información necesaria para lograr los objetivos de estudio. La escala de tiempo y resolución de una imagen satelital son factores importantes para seleccionar los datos y el satélite adecuado para el alcance de nuestro estudio.

Hay tres clasificaciones de resolución espacial dependiendo de tamaño del pixel, se puede encontrar resolución baja en productos MODIS que son utilizados a escala global, también están los sensores de resolución media donde encontramos a Landsat, el cual ha presentado gran utilidad para el análisis de cambio de cobertura vegetal a escala regional y finalmente están las imágenes de alta resolución aplicables a estudios locales y áreas protegidas más pequeñas, como las imágenes de QuickBird.

En los artículos revisados, se puede encontrar la siguiente distribución de fuentes de datos, donde se destaca principalmente las imágenes Landsat, con la combinación de diversas fuentes, como se observa a continuación:

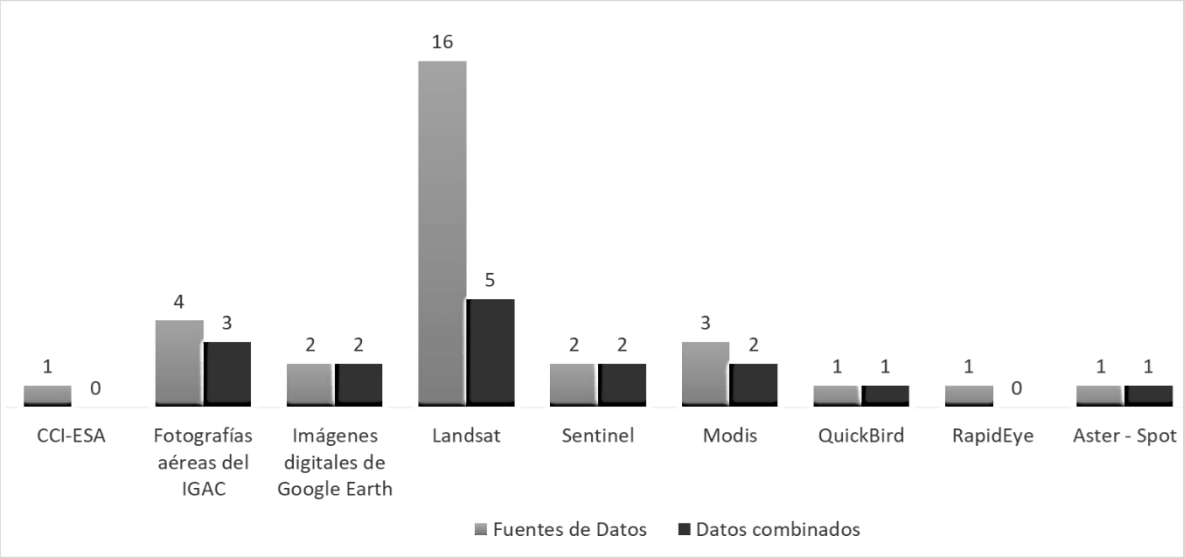

Ilustración 2. Tipos de fuentes de datos identificados.

Los autores utilizaron fotografías aéreas e imágenes multiespectrales para estimar la cobertura vegetal. Las imágenes Landsat fueron las principales fuentes de datos utilizadas, aproximadamente el 52% de los artículos implementaron este tipo de fuente, todas las imágenes Landsat tenían una resolución espacial de 30 m, en las cuales se utilizó

principalmente imágenes Landsat 5, 7 y 8 capturadas por los sensores Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Operational Land Imager (OLI). Según lo indicado por Schubert et al. (2018), estas imágenes son adecuadas para mapear el cambio de cobertura a escala regional, así mismo, sugieren utilizar la herramienta "Survey" (SGS) para obtener una vista preliminar de las imágenes y poder seleccionar las mejores escenas sin nubes.

Según lo explicado por Miranda-Castro et al. (2023)40, se concluye que las imágenes utilizadas presentan altos valores de precisión para estudiar la afectación a nivel de especie, estimar índices de vegetación, identificar tipos de cobertura y monitorear cambios en la vegetación a lo largo del tiempo en áreas protegidas (caso de estudio santuario de fauna y flora); tal como lo indican Veneros et al. (2020) las imágenes Landsat se pueden utilizar para determinar la producción de biomasa, cálculo de índices de vegetación, plagas de la vegetación, monitoreo de bosques y tipos de suelo.

Las series Landsat son adecuadas para estudiar los cambios de cobertura que se han dado en los últimos 40 años, dado que estos sensores han estado activos desde el año 1972 (Almalki et al., 2022), lo que proporciona una amplia información para comparar cambios de coberturas en diferentes escalas temporales. Diversos autores discuten que las imágenes Landsat en una escala pequeña, pueden aumentar los errores de clasificación afectando la detección de cambio de cobertura vegetal, sin embargo, sugieren combinar las imágenes Landsat con otros sensores de alta resolución y datos auxiliares como pendiente y elevación, para mejorar la calidad de la información y posibilitar el mapeo a nivel de especie dentro de las diferentes áreas protegidas.

Aunque Landsat proporciona una resolución espacial más alta que facilita la detección de pequeños cambios, existen lagunas importantes debido a la nubosidad. Se ha demostrado que las escenas QuickBird son más precisas, con un error promedio de 2 metros de desacuerdo

entre los puntos de control terrestre (Sánchez-Cuervo et al., 2012). La mayoría de satélites de alta resolución se lanzaron durante los últimos 20 años como QuickBird, RapidEye y Sentinel. La combinación de imágenes de resolución media-baja con imágenes de alta resolución mejora la calidad visual y la resolución espacial de las imágenes permitiendo detectar mejor los cambios de cobertura vegetal (Sánchez-Cuervo et al., 2012).

Dentro de los artículos revisados, se encuentra también la implementación de otras fuentes de datos como son: Fotografías aéreas del IGAC con un porcentaje del 13%, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS con el 10%, Imágenes digitales de Google Earth con el 7%, Sentinel con el 6,5 % QuickBird con un 4% y metodologías combinadas, entre otras.

Otros estudios de cambio de cobertura vegetal utilizaron como fuente de datos los productos MODIS, que por su baja resolución espacial son utilizados principalmente para grandes escalas (Sánchez-Cuervo et al., 2012) como son Parques Nacionales Naturales. Sin embargo, la combinación de imágenes MODIS con imágenes de mejor resolución como QuickBird pueden proporcionar información más útil para monitoreo de cambio de cobertura en áreas protegidas de pequeña escala como Parques Naturales Regionales.

Tal como lo explican Calbi et al. (2020), su trabajo se basó en la implementación de fotografías aéreas del IGAC e imágenes digitales de Google Earth, las cuales fueron escaneadas en alta resolución, esto les permitió discutir la composición real de las especies forestales y los parámetros estructurales dentro del área y relacionarlo con la evaluación de la vegetación en el sitio. Estos tipos de datos suelen ser utilizados con otros datos como Landsat y MODIS, que, en conjunto son de gran utilidad para generar mapas detallados de cobertura vegetal, planificar el uso del suelo y la gestión de recursos naturales en Colombia. Además, estos autores identificaron una limitación de la interpretación de las tendencias de cambio de cobertura debido a información incompleta de la serie temporal de las imágenes

aéreas en su zona de estudio, sin embargo, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) viene realizando el levantamiento de más fotografías aéreas a lo largo de todo el territorio colombiano.

Los productos de datos satelitales del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) son herramientas confiables y útiles para monitorear el cambio de cobertura (Sanchez-Cuervo & Aide, 2013). Aunque MODIS tiene una resolución espacial mínima de 250 m, las ventajas incluyen: alta resolución temporal (diaria) de imágenes que se pueden componer para reducir la cobertura de nubes y una rápida disponibilidad de datos sin costo alguno (Sánchez-Cuervo et al., 2012), lo que permite monitorear la vegetación a escala global y regional, calcular índices de vegetación, estimar la productividad vegetal y detectar cambios en la vegetación.

Por último, como lo evidencian Sánchez-Cuervo et al. (2012), quienes combinaron datos MODIS (producto MODIS MOD13Q1, colección 5 con índices de vegetación de 150 metros) con datos de referencia interpretados a partir de imágenes de alta resolución espacial de QuickBird en Google Earth, lo que indicó altos valores de precisión y permitió cuantificar el cambio de cobertura en múltiples escalas espacio-temporales (Sánchez-Cuervo et al., 2012). Con esta metodología, los autores identificaron grandes diferencias tanto en ganancias como pérdidas de cobertura forestal que no coincidían con lo reportado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), sin embargo, los autores determinaron que sus estimaciones concordaban con los resultados levantados en campo, por lo que se concluye que estas diferencias se pueden atribuir al uso de diferentes entradas de imágenes MODIS, recomendando esta metodología de fuentes de datos combinada para mejorar la precisión de los estudios enfocados en cambios de cobertura vegetal.

5.2. Preprocesamiento:

Existen diversos tipos de corrección que se realizan a las fuentes de datos, entre los que tenemos la *corrección geométrica* u ortorrectificación que tiene como finalidad adaptar la imagen a un sistema de coordenadas o a determinada proyección cartográfica, las distorsiones pueden ser originadas por movimientos en la plataforma, cambios en la altitud, rotación de la tierra y/o relieve del terreno (Veneros et al., 2020). También se implementa la *corrección atmosférica* que tiene como finalidad eliminar el efecto de los aerosoles, esto incluye la compensación de la dispersión de la luz y otros fenómenos atmosféricos. Finalmente, está la *corrección radiométrica* en la cual se restablecen los valores de la imagen y se depura cualquier anomalía en la radiancia del objetivo alterada por la atmósfera o por los defectos del sensor (Veneros et al., 2020).

A continuación, se ilustra la distribución del preprocesamiento en los artículos revisados:

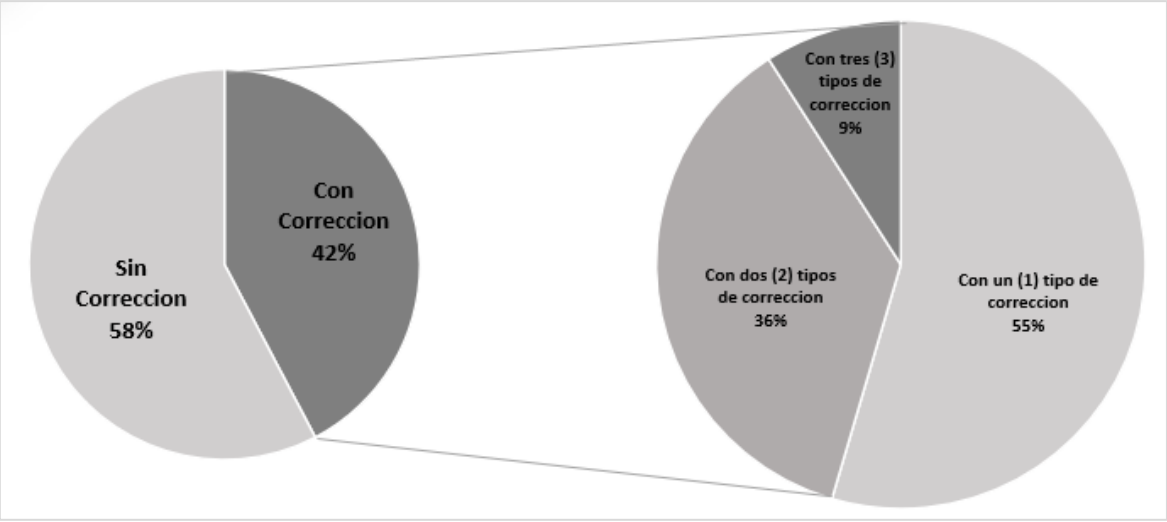

Ilustración 3. Resultado revisión datos de preprocesamiento.

En los artículos revisados, cerca del 58 % de los autores no realizaron ningún tipo de corrección a sus fuentes de datos (imágenes satelitales), debido que, al mejorar la calidad de

los datos mediante la combinación de diferentes tipos de fuentes de datos, los autores no consideraron necesario hacer correcciones, también otros autores utilizaron productos finales que no requieren ninguna corrección, como es el caso de los productos de la CCI- ESA. Sin embargo, el 42% de los artículos implementaron algún tipo de corrección sobre sus datos. Por ejemplo, tal como lo realizaron López Bolaños et al. (2023), quienes implementaron en su preprocesamiento correcciones de tipo geométrica, atmosférica y radiométrica debido a la diversidad de fuentes de datos con las que trabajaron.

Tal como lo explica Miranda-Castro et al. (2023), se realizó una corrección radiométrica para convertir el número digital (DN) en radiancia superficial, así mismo realizaron corrección atmosférica de las imágenes Landsat mediante FLAASH, que incorpora el código de transferencia radiativa MODTRAN6 para estimar los valores de radiancia superficial; para esto requirieron datos auxiliares como condiciones atmosféricas, adquisición de fecha, ubicación de la escena, ubicación del sensor y datos de elevación (Miranda-Castro et al., 2023).

Así mismo, como lo mencionan Anzoategui et al. (2023), quienes realizaron preprocesamiento a las imágenes satelitales mediante corrección de distorsión u ortorectificación, el cual a partir de puntos conocidos capturados en campo y su correlación con cada imagen satelital, permiten el cálculo del error cuadrático medio (RMSE), el cual considera los valores tendientes a 1 como imágenes ajustadas geométricamente.

Existen varios métodos para la corrección radiométrica de los niveles digitales (ND) a niveles de reflectancia, que permiten realizar una relación lineal entre los ND de una imagen y la reflectancia superficial. Como lo realizaron Anzoategui et al. (2023), quienes convirtieron los ND en valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibración del sensor Landsat. Además, como lo mencionan Perea Ardila et al. (2022), quienes realizaron ajuste radiométrico a los niveles digitales de la imagen de RapidEye, utilizando las herramientas de ajuste de ENVI y el método "Dark Subtract", con el fin de eliminar los efectos de dispersión

atmosférica presentes en la imagen y minimizar los errores radiométricos en el momento de la captura.

Finalmente, un error común en los artículos revisados en la presente monografía se le atribuye a algunas imágenes Landsat, debido a que las imágenes Landsat ETM+ recopiladas después del 31 de mayo de 2003, pueden tener lagunas de datos resultantes de la falla del Scan Line Corrector (Miranda-Castro et al., 2022). Por lo tanto, las imágenes con esta peculiaridad frecuentemente fueron excluidas de las investigaciones o fueron tratadas como nubes o sombras de nubes a las cuales se les aplicó corrección.

5.3. Tipos de clasificación y técnicas de teledetección de cambios.

Las técnicas de teledetección de cambios utilizados se refieren a métodos y enfoques específicos para realizar el análisis de los cambios en la superficie de la tierra, con el fin de detectar, cuantificar y comprender la evolución de la cobertura vegetal. Uno de los métodos de teledetección más utilizados en el análisis de cambios de cobertura dentro de áreas protegidas de Colombia es el análisis de series temporales de Imágenes, el cual implementa el uso de una secuencia de imágenes de satélite tomadas en diferentes momentos para monitorear y analizar los cambios en la cobertura vegetal. El análisis de series temporales de imágenes puede implicar una variedad de técnicas, incluyendo el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y otros índices derivados de bandas espectrales específicas (Miranda-Castro et al., 2022). Estos pueden ser analizados con métodos de clasificación, regresión u otros enfoques para detectar cambios significativos en la cobertura vegetal.

La clasificación supervisada fue la principal técnica utilizada en los casos de estudio, representando un 70% de estos. Los métodos de clasificación supervisada requieren que los analistas ingresen muestras representativas (conjuntos de entrenamiento) (Almalki et al.,

2022), construyendo a partir de estas, una identificación numérica con la que se compara cada píxel de la imagen. (Veneros et al., 2020). La mayoría de los autores utilizaron algoritmos combinados con esta técnica, lo que permitió reconocer patrones complejos y procesar grandes cantidades de datos rápidamente con mayor precisión, facilitando una interpretación más profunda de las imágenes y una comprensión más exacta de la evolución del ecosistema en áreas protegidas.

Tal como lo explica Miranda-Castro et al. (2023), se implementó clasificación supervisada y el algoritmo de máxima verosimilitud, lo cual les presentó altos valores de precisión en los datos e identificaron cambios significativos en la cobertura vegetal. Su objetivo era detectar y cuantificar los cambios de cobertura del bosque de la especie *Pterocarpus officinalis* dentro del Área Protegida (AP) Santuario de Fauna y Flora (El mono Hernández), estas técnicas les permitieron evidenciar en diferentes periodos el comportamiento de la especie en el AP, inicialmente identificaron una pérdida del 7% de extensión, posteriormente, durante un periodo de 5 años observaron una disminución del 49.59% (1998 - 2003), esta tendencia continuó por 10 años, donde se perdieron cerca de 78 hectáreas de AP. Sin embargo, para el último período evaluado (2013 - 2018) se evidenció una ganancia de cobertura; esta recuperación puede deberse a las acciones de restauración y conservación implementadas en el área protegida.

Además, los autores implementaron el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), con esto, identificaron que donde se presentaron más variaciones del índice, la conversión de bosque y la vegetación había sido más afectada. Así mismo, determinaron que la disminución del NDVI era resultado de la mortalidad de la especie evaluada. (Miranda-Castro et al., 2023). Finalmente, con este análisis los autores concluyen que la mayor parte del área se convirtió a otra cobertura vegetal, por lo que recomiendan hacer un estudio más detallado para comprender los procesos de sucesión ecológica que se presentan en el área.

También, como concluye Calbi et al. (2020) en su artículo, en el cual la clasificación supervisada de la cobertura terrestre se realizó satisfactoriamente y arrojó buenos valores de precisión general; en cuanto a los valores de precisión específicos también arrojó buenos valores para diferentes clases de cobertura como fueron: pastos, cultivos, arbustos bajos, arbustos altos y árboles. Sin embargo, esta clasificación arrojó valores bajos para los suelos desnudos o construidos, lo que puede significar un error por omisión (Calbi et al., 2020).

Tal como lo mencionan Clark et al. (2021), quienes utilizaron clasificación supervisada con el algoritmo Random Forests, basada en análisis y regresión utilizando combinaciones aleatorias de variables y observaciones para crear múltiples árboles de decisión (Clark et al., 2021). Con este análisis, los autores pudieron determinar el estado de protección de la vegetación en diferentes ecosistemas, identificando pérdidas y ganancias de bosques en las áreas protegidas; estos, implementaron su metodología para grandes extensiones de área y recomiendan sea replicada en investigaciones a escala regional y local utilizando una fuente de datos con una resolución más fina, dados los buenos resultados para monitorear la pérdida de cobertura en un periodo de tiempo. Además, como lo indican Sánchez-Cuervo et al. (2012), quienes incorporaron variables predictoras como EVI (Índice de vegetación mejorado), NIR (Infrarrojo cercano) y MIR (Infrarrojo medio), con lo que lograron establecer al clasificador de Random Forest como una herramienta de gran ventaja para el objeto de su estudio, además, de que les proporcionó una evaluación del error baja (Sánchez-Cuervo et al., 2012).

También, otros autores aplicaron el algoritmo de clasificación supervisada de máxima probabilidad en un área de conservación deforestada, la cual se basa en un enfoque matemático y probabilístico, generando resultados de reducciones y aumento significativos en la cobertura vegetal (Veneros et al., 2020). Además, como identifican Almalki et al. (2022) una de las principales ventajas de esta técnica es la detección y corrección de errores al clasificar la cobertura vegetal.

Para diferenciar las coberturas vegetales, tal como lo realizaron Anzoategui et al. (2023), quienes implementaron una clasificación supervisada en base al Nivel III de la leyenda nacional CORINE Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM 2010), encontrando que aquellas coberturas que en su límite están más cercanas a zonas de mosaicos y cultivos, son más susceptibles al cambio, concordando con los hallazgos que se encontraron en situ dentro del Área Protegida Páramo Cortadera. También, como lo indican López Bolaños et al. (2023), la clasificación supervisada con la metodología Corine Land Cover es útil para mapear e identificar diferentes categorías y cambios del uso del suelo y de la cobertura terrestre, lo que resulta fundamental para comprender la dinámica del ecosistema y respalda la toma de decisiones informadas en el ámbito de prioridades de conservación en áreas protegidas.

Por último, tal como mencionan Sánchez-Cuervo et al. (2012), quieres analizaron las tendencias de tres tipos principales de cobertura, utilizando regresión lineal mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), donde los valores positivos de R representan un aumento en la cobertura y los valores negativos de R representan una disminución. En general, encontraron puntos críticos de deforestación, ubicados principalmente en los Llanos y los Andes, en biomas de Bosque Seco y Bosque Húmedo; dentro de estos puntos críticos de deforestación se identificaron 14 Áreas Protegidas, donde se pudo evidenciar que solo el 4% del área conserva la estructura de protección.

Cerca del 4% de los artículos revisados, evidencian la implementación de métodos de clasificación no supervisada. Este método ofrece las ventajas de ser más rápido y libre de errores humanos, en vista que, el analista no requiere conocimientos previos detallados. Aquí, los datos se agrupan y luego todos los píxeles se clasifican en función de los grupos (Almalki et al., 2022). Sin embargo, algunos autores complementan sus análisis con clasificación mixta (supervisada y no supervisada), como lo mencionan Rodríguez Eraso et al. (2013), quienes implementaron tanto clasificación supervisada y no supervisada con el fin de mejorar la precisión de las imágenes estudiadas, ayudándoles a identificar los puntos críticos de deforestación en el área de estudio (Rodríguez Eraso et al., 2013).

La segmentación y análisis basada en objetos identifica los objetos de la imagen convirtiéndolos en elementos básicos de análisis, a diferencia de las técnicas mencionadas anteriormente que basan su análisis al estudio de píxeles individuales. Para el análisis de cambio de cobertura, se menciona que las variables dependientes para la predicción del cambio son los mapas clasificados de cambio de cobertura vegetal, mientras que las variables independientes pueden ser pendiente, elevación, aspecto, entre otras. (Almalki et al., 2022).

Tal como lo mencionan Calbi et al. (2020), estos buscaban analizar la dinámica del paisaje durante varias décadas en unas áreas establecidas, para lo cual, estudiaron imágenes aéreas y segmentación basada en objetos con el fin de mejorar los resultados de clasificación y obtener algunas ideas sobre la calidad de la recuperación forestal. Además, los autores complementaron la clasificación de la cobertura del suelo con el análisis de patrones espaciales morfológicos e implementaron un diseño de muestreo para simplificar las respuestas (diseño de bloques de 3 × 3 píxeles alrededor de la imagen). Finalmente, como resultado de la investigación se obtuvo una respuesta favorable, sin embargo, se observa que faltaban análisis con buena resolución espacial durante un largo período de tiempo que permitieran comprender los principales factores de la pérdida o recuperación de los bosques y darles un seguimiento preciso a los cambios en la cobertura para pequeñas escalas geográficas.

Tal como lo concluye Miranda-Castro et al. (2023), la segmentación y el análisis de imágenes basado en objetos puede presentar una precisión superior al 70% para detectar cambios en los bosques dentro de áreas protegidas (Huang et al., 2007; Valožic y Cvitanovic 2011; Souza et al., 2013; Sieber et al., 2013; Sanchez -Reyes et al., 2017; Gambo et al., 2018), demostrando su aplicabilidad como buenos métodos para estimar la cobertura forestal.

Se determinó que, a partir de la obtención de imágenes satelitales en estudios de pequeña a mediana escala, se puede analizar información de la cobertura boscosa, índices de vegetación,

cambio de coberturas vegetales y deforestación. Así mismo, se identificó que se puede realizar investigación con datos de alta resolución que pueden dar información sobre la abundancia vegetal y dinámica de la población de plantas.

También se puede concluir que las imágenes de alta resolución espectral y baja resolución espacial, se utilizan principalmente para monitorear y mapear la vegetación de grandes áreas de cobertura. Además, la combinación de imágenes de resolución media- baja con imágenes de alta resolución mejora la calidad visual y la resolución espacial de las imágenes siendo más útiles para monitorear áreas medianas.

Finalmente, se determinó que el uso de datos MODIS compuestos, reduce en gran medida la cantidad de píxeles afectados negativamente por cobertura de nubes lo que permite analizar el cambio de LULC. También, se determinó que al usar datos de referencia de Google Earth para la formación de clasificadores en lugar de datos de referencia terrestres, proporciona una forma rápida y económica de adquirir datos de referencia, principalmente en áreas que presentan dificultad en el acceso. Vale la pena señalar que una de las limitaciones más importantes para el uso de datos de teledetección para el monitoreo de Áreas Protegidas es la variante de precisión cartográfica y el costo de adquirir datos terrestres para su verificación y validación (Wang et al., 2020).

Se presenta a continuación, una relación con los principales usos o propósitos de las fuentes de datos implementadas por los autores:

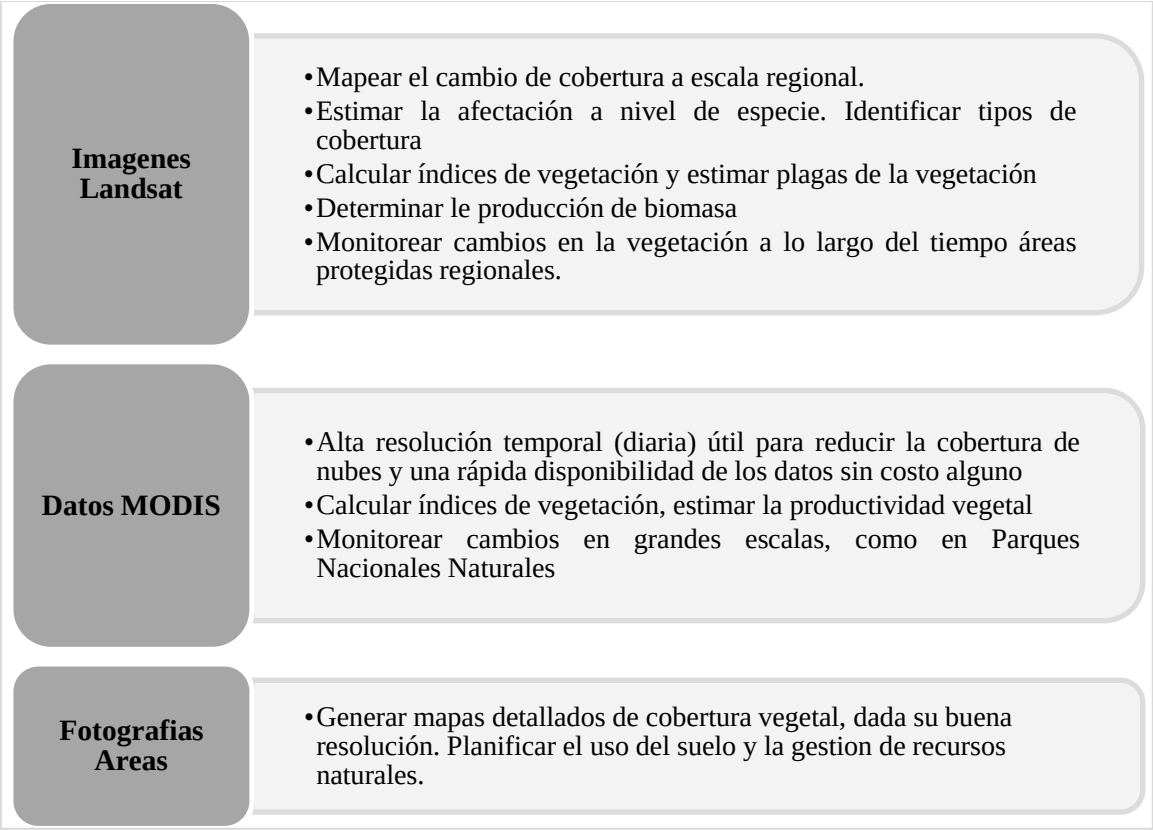

Ilustración 4. Principales usos o propósitos de las fuentes de datos analizadas.

También, se realizó un análisis de las fortalezas y limitaciones en las principales técnicas implementadas en el análisis del cambio de cobertura vegetal en áreas protegidas.

Tabla 1. Fortalezas y Limitaciones generales de las principales técnicas detección de cambio de cobertura en áreas protegidas.

Técnicas	Fortalezas	Limitaciones
Clasificación supervisada	▪ **Mayor precisión y confiabilidad** en la identificación de clases específicas de cobertura.	▪ La recopilación de **datos de entrenamiento** es una tarea costosa y requiere de mucho tiempo. ▪ Requiere una cantidad significativa de datos de entrenamiento.

	▪ Permite una **interpretación más detallada** en los cambios en áreas protegidas. ▪ El analista tiene el **control** y se pueden **detectar y corregir errores**.	▪ Puede ser susceptible a errores si la selección de muestras de entrenamiento no es representativa.
Clasificación no supervisada	▪ El analista no requiere conocimientos previos de las clases de cobertura lo que facilita el análisis exploratorio. ▪ **Más rápido.** Los datos se agrupan y luego todos los píxeles se clasifican en función de los grupos. ▪ Permite la identificación de **clases desconocidas**.	▪ Puede generar **resultados menos precisos y más difíciles de interpretar** en comparación con la clasificación supervisada. ▪ Puede resultar en la inclusión de **clases irrelevantes** que pueden resultar en ruido en el análisis.
Clasificación basada en objetos	▪ Al considerar la relación espacial y contextual de los objetos, **mejora la precisión de la clasificación**. ▪ Reduce los efectos de variabilidad entre clases, mejorando la discriminación de tipo de cobertura. ▪ Útil para datos de **alta resolución**.	▪ Requiere una **segmentación precisa.** ▪ Los **métodos** de definición de objetos pueden ser **complejo**s y sensibles a ciertos parámetros. ▪ Puede requerir un **tiempo de procesamiento** mayor.

Fuente: Elaboración propia.

Una ventaja particular que la teledetección puede proporcionar para el inventario y monitoreo de áreas protegidas es información para comprender mejor el estado pasado y actual, de los cambios que ocurrieron bajo diferentes factores de impacto y prácticas de gestión (Duan et al., 2020), donde se destaca principalmente el análisis de áreas de gran extensión. Sin embargo, una de las principales limitaciones que se evidencia es el análisis dentro de pequeñas áreas o regiones de menor extensión, debido a que, el análisis en estas puede perder importancia dado a la resolución espacial de las fuentes de datos.

3. CONCLUSIONES

La teledetección se encuentra entre las fronteras más fascinantes de la ciencia y la tecnología que mejoran constantemente nuestra comprensión de las áreas protegidas. El desafío es integrar los datos y metodologías apropiados que mejor se adapten a los ecosistemas locales en un marco de monitoreo eficiente, transferible y continuo, que proporcione una base para evaluar la efectividad de las prácticas de manejo y las estrategias de conservación de las áreas protegidas.

Al finalizar la revisión, se logró identificar que para el análisis de cambio de cobertura vegetal a escala regional las imágenes Landsat son las fuentes de datos más utilizadas, como lo corrobora Schubert et al. (2018) en su artículo. También, se logró identificar que, para estudiar la afectación a nivel de especie, estimar índices de vegetación, identificar tipos de cobertura y monitorear cambios en la vegetación a lo largo del tiempo en áreas protegidas esta fuente de datos presenta altos valores de precisión, según lo mencionada por Miranda-Castro et al. (2023). Sin embargo, es importante resaltar que algunos autores implementan la combinación de imágenes Landsat con otros sensores de alta resolución y/o datos auxiliares, para mejorar la calidad de la información y posibilitar el mapeo a nivel de especie dentro de las diferentes áreas protegidas.

Así mismo, se logró identificar que, para analizar grandes escalas de área, como son los Parques Nacionales Naturales, se utilizan productos MODIS. Sin embargo, la selección de fuentes de datos depende del alcance que los investigadores quieran lograr. Para este caso, se recomienda la combinación de los productos MODIS con imágenes de alta resolución, que pueden proporcionar información útil para monitorear el cambio de cobertura en áreas protegidas de menor escala, como son los Parques Naturales Regionales. Además, para mejorar el nivel de detalle en los estudios, se recomienda implementar metodologías que combinen datos de resolución temporal alta (Por ejemplo: MODIS) con datos de resolución

espacial alta (Por ejemplo: QuickBird). Finalmente, se concluye que para evaluar cambios en la cobertura forestal a escala de fragmentos de bosque es de gran utilidad analizar una serie temporal más larga con una resolución espacial más alta.

Además, se determina que para estudios locales se puede utilizar imágenes Quickbird (alta resolución), con la que se puede analizar índices de vegetación, abundancia vegetal y dinámica de la población de plantas.

Se pudo identificar que la aplicación de la teledetección ha sido muy escasa e incipiente en la evaluación de áreas protegidas en Colombia, esto puede ser debido al difícil acceso de imágenes de alta resolución como las mencionadas anteriormente. Estos tipos de estudios son especialmente valiosos en el contexto de áreas protegidas donde la detección precisa de cambios es crucial para la conservación y gestión de la biodiversidad.

Se logró identificar que, para analizar la composición real de las especies forestales y los parámetros estructurales dentro de un área, se pueden utilizar combinaciones de imágenes digitales y fotografías aéreas del IGAC, como lo hicieron Calbi et al. (2020) en su artículo. Este tipo de imágenes también proporciona una forma rápida y económica de adquirir datos de referencia, principalmente en áreas que presentan dificultad en el acceso, cabe señalar que una de las limitaciones más importantes para el uso de datos de teledetección para el monitoreo de Áreas Protegidas es la variante de precisión cartográfica y el costo de adquirir datos terrestres para su verificación y validación.

Otra limitación encontrada, está relacionada a la falta de información completa y detallada de alta resolución, sin embargo, se observa un esfuerzo continuo por parte de instituciones como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para mejorar la disponibilidad de datos aéreos y, por ende, la precisión de los estudios de cambio de cobertura vegetal.

Con base a lo anterior, se puede concluir que el uso estratégico y combinado de múltiples fuentes de datos, junto con un enfoque continuo en la mejora de la resolución espacial y la precisión de las técnicas de monitoreo, es crucial para comprender y abordar los cambios de cobertura vegetal en áreas protegidas de Colombia.

Se logra concluir que una de las principales limitaciones de la teledetección está relacionada con la cobertura de nubes y otros tipos de correcciones, por lo que la aplicación adecuada de correcciones geométricas, atmosféricas y radiométricas, junto con el uso de métodos específicos y la consideración de posibles limitaciones técnicas, son elementos esenciales para garantizar la fiabilidad y precisión de los resultados de la investigación en el contexto de áreas protegidas en Colombia. Para corregir los errores asociados a las nubes o sombras de nubes, se recomienda utilizar la herramienta “Survey” (SGS) para obtener una vista preliminar de las imágenes y así poder seleccionar las mejores; para realizar correcciones radiométricas o atmosféricas se recomienda utilizar herramientas específicas de software como ENVI y el método "Dark Subtract" respectivamente.

En aproximadamente el 58% de los artículos revisados no se aplicaron correcciones a las imágenes satelitales, optando por combinar diferentes fuentes para mejorar la calidad de los datos. El restante 42% implementó correcciones geométricas, atmosféricas y radiométricas según sus necesidades.

Según los artículos revisados, la técnica más utilizada es la clasificación supervisada, con un 70% de los casos de estudio. Esta técnica involucra el uso de algoritmos combinados para reconocer patrones complejos y procesar grandes cantidades de datos con mayor precisión. Los métodos de clasificación supervisada han demostrado ser particularmente útiles para identificar clases específicas de cobertura, lo que facilita una interpretación más detallada de los cambios en áreas protegidas.

Para determinar el estado de protección de la vegetación en diferentes ecosistemas y la identificación de pérdidas y ganancias de bosques en estas áreas, tal como lo mencionan Clark et al. (2021) quienes implementaron exitosamente la clasificación supervisada con el algoritmo Random Forests, por lo que recomiendan, sea replicada en investigaciones a escala regional y local utilizando una fuente de datos con una resolución más fina. Además, como concluyen Almalki et al. (2022) esta técnica presenta ventajas en la detección y corrección de errores al clasificar la cobertura vegetal.

Así mismo, se logró determinar que para mapear e identificar diferentes categorías y cambios del uso del suelo, la clasificación supervisada con la metodología Corine Land Cover es de gran utilidad, como lo mencionaron López Bolaños et al. (2023) en su artículo. Además, se logró concluir que cuando se quiere realizar la conversión de bosque y vegetación se puede implementar índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Sin embargo, se reconoce que estas técnicas no están exentas de limitaciones y requieren una cantidad considerable de datos de entrenamiento, lo que puede resultar costoso y dispendioso.

Por otro lado, las técnicas de clasificación no supervisada, aunque son más rápidas, pueden generar resultados menos precisos y más difíciles de interpretar en comparación con la clasificación supervisada, en el caso de los estudios analizados se concluye que ninguno de los autores implementa únicamente la clasificación no supervisada, sino que la complementan con otro tipo de técnica como lo mencionan Rodríguez Eraso et al. (2013) quienes realizan clasificación mixta.

Es importante destacar que la clasificación de la cobertura vegetal generada mediante imágenes aéreas carece de información multiespectral, lo que puede limitar el rendimiento de la clasificación. Por esta razón, surge la necesidad de generar información complementaria a largo plazo y a escala local sobre los cambios en la cobertura vegetal.

Por otro lado, según lo expresado por Miranda-Castro et al. (2023) se concluye que la segmentación y el análisis de imágenes basado en objetos es un buen método para estimar los cambios en los bosques dentro de áreas protegidas, el cual presenta una precisión superior al 70%. Esta técnica mejora la precisión al considerar la relación espacial y contextual de los objetos, sin embargo, requiere de una segmentación precisa y puede implicar un tiempo de procesamiento más largo.

A continuación, se describen los principales enfoques y las técnicas implementadas por los autores en la revisión bibliográfica:

Tabla 2. Principales enfoques y las técnicas implementadas.

Propósito	Enfoque / Técnica	Autores
Determinar el estado de protección de la vegetación en diferentes ecosistemas, identificar pérdidas y ganancias de bosques en las áreas protegidas.	Clasificación supervisada con el algoritmo Random Forests	Mateo L. Clark, Maria C. Fandino y David López Carr
Detectar y corregir errores al clasificar la cobertura vegetal.	Clasificación supervisada de máxima probabilidad	Raid Almalki, Mehdi Khaki, Patricia M. Saco y José F. Rodríguez
Mapear e identificar diferentes categorías y cambios del uso del suelo y de la cobertura terrestre.	Clasificación supervisada basada en CORINE Land Cover adaptada para Colombia	Laura Victoria Anzoategui, Pablo Andrés Gil Leguizamón, Rigaud Sanabria Marin
Comprender la dinámica del ecosistema y respaldar la toma de decisiones informadas en el ámbito de prioridades de conservación en áreas protegidas.	Clasificación supervisada con la metodología Corine Land Cover	Portillo Daza, A. N., López Bolaños, M. A., y Narváez Bravo, G. E.
Identificar los puntos críticos de deforestación en el área de estudio.	Combinación de clasificación supervisada y no supervisada	Nelly Rodríguez Asalto, Dolores Armenteras-Pascual y Javier Retana Alumbreros

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la aplicación de técnicas de clasificación supervisada y no supervisada, así como el análisis basado en objetos y la segmentación, ha proporcionado una visión integral de los cambios en la cobertura vegetal. A pesar de los avances logrados, persisten desafíos significativos, como la necesidad de mejorar la resolución espacial de los datos y la disponibilidad limitada de imágenes satelitales de alta calidad para el monitoreo continuo. Esto resalta la importancia de adoptar enfoques multidisciplinarios y tecnologías innovadoras para mejorar la capacidad de detección temprana y la respuesta efectiva a los cambios en la cobertura vegetal en áreas protegidas, salvaguardando así la biodiversidad y los servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano y la salud del planeta.

Se identificó, en los resultados de algunos artículos estudiados, tendencias positivas de cobertura vegetal que coinciden parcialmente con la creación de áreas protegidas, lo que muy probablemente impulsó la recuperación de parches de bosque, a pesar de que el cambio de cobertura vegetal es un escenario dinámico y difícil de definir, donde las tendencias en el cambio dependen del área de estudio y las características ambientales y socioeconómicas. Esta recuperación brinda una oportunidad para ampliar las áreas protegidas actuales y promover la conectividad del hábitat. Identificando una excelente oportunidad para complementar, ampliar e interconectar las áreas protegidas para crear una red de conservación.

La implementación de áreas protegidas es un mecanismo importante para reducir la conversión de bosques y la posterior pérdida de especies. En Colombia, según lo indica Sánchez-Cuervo et al. (2012), existen 56 áreas protegidas (12% del territorio nacional) que están reduciendo efectivamente la probabilidad de tala de bosques. Sin embargo, en los artículos analizados se evidencia que a pesar de estar declaradas como áreas protegidas, algunas áreas denotan una clara necesidad de abordar acciones que minimicen las pérdidas en los cambios de coberturas vegetal, como son los casos del santuario de fauna y flora El Mono Hernández y el Páramo Cortadera, donde se requieren activar procesos de conservación, restauración y preservación con acción participativa de actores del territorio.

Las áreas protegidas generalmente se designan en sitios remotos y de baja accesibilidad, impidiendo el uso de métodos tradicionales de monitoreo, por lo que se concluye que el monitoreo por teledetección es recomendado para abordar estas áreas, ya que es menos costoso, requiere menos tiempo y es más objetivo que los enfoques basados en el campo. La implementación de técnicas avanzadas de teledetección ha brindado una comprensión más profunda de los impactos de la actividad humana en la cobertura vegetal. Sin embargo, estas técnicas no están necesariamente enfocadas en áreas protegidas en Colombia, lo cual representa una desventaja considerando los notables beneficios y aplicaciones que podrían ofrecer en este contexto.

En los artículos analizados, se logra evidenciar que la investigación específica en áreas protegidas ha sido limitada hasta el momento, e incipiente en áreas de pequeña escala. Las principales áreas estudiadas son los Parques Naturales Nacionales y el Hotspot Andes tropicales, debido a su gran extensión y prioridad para la conservación. Sin embargo, para el análisis de cambio de cobertura vegetal dentro de áreas protegidas de menor escala, se evidencia una ausencia de estudios desde las herramientas SIG, esto puede deberse a la resolución espacial y temporal de las imágenes y principalmente al tamaño del píxel, donde un área local no tendría como ser estudiada detalladamente con una resolución de pixel de 30 x 30 metros.

Este tipo de análisis, podría presentar desventajas y limitaciones para áreas específicas como son las Reservas Naturales de la Sociedad Civil (RNSC), que si bien existen algunas con grandes extensiones, la mayoría de estas áreas son pequeñas, como es el caso de la RNSC El Ensueño 2 con una extensión de 0.4 ha y la RNSC El Laurel con una extensión de 0.2 ha, que, por poseer una extensión de área tan pequeña, el análisis de cambio de cobertura con imágenes satelitales pierde claridad y nitidez, resultando en una baja objetividad del análisis de estas áreas mediante técnicas de teledetección, por lo que se intuye, que esta sea una de las principales razones por la que no evidenciamos estudios en estas áreas.

Al revisar las categorías de análisis en esta revisión bibliográfica podemos evidenciar que los autores mencionan fortalezas y limitaciones en el análisis del cambio de cobertura vegetal en áreas protegidas en Colombia, las cuales se describen a continuación:

Tabla 3. Fortalezas y limitaciones generales de la detección de cambio de cobertura en áreas protegidas en Colombia.

FORTALEZAS	LIMITACIONES
Permite la detección precisa de cambios a lo largo del tiempo para un monitoreo efectivo.	Dependencia de la disponibilidad de imágenes satelitales con una resolución espacial y temporal adecuada.
Proporciona una visión completa de los procesos de cambio en áreas protegidas	Limitaciones relacionadas con las lagunas de datos y la presencia de nubes en las imágenes satelitales.
Facilita la integración de datos de múltiples fuentes para un análisis más exhaustivo.	Requiere la aplicación de correcciones geométricas, atmosféricas y radiométricas para garantizar la precisión de los datos.
Facilita la planificación y gestión efectiva de recursos en áreas protegidas.	Posible complejidad técnica y necesidad de habilidades especializadas para realizar el preprocesamiento de datos.
Permite la evaluación de la salud del ecosistema y la biodiversidad de manera sistemática.	Necesidad de considerar y abordar limitaciones específicas, como la interpretación de tendencias de cambio de cobertura.
Permite el análisis en grandes áreas de extensión, facilitando la gestión de información y resultando más rentable el análisis en estas áreas.	No se evidencia estudios en áreas de pequeña extensión, por lo que se pierde definición y calidad de los datos.

Fuente: Elaboración propia.

Si bien se plantean unas limitaciones, las ventajas que presenta la teledetección en el análisis de cambio de cobertura vegetal, son significativas e importantes, ya que han demostrado facilitar el análisis dentro de grandes extensiones y áreas con dificultad de acceso. Lo que puede favorecer el trabajo mancomunado de diferentes actores que buscan la gestión sostenible de los ecosistemas.

La principal recomendación es realizar nuevos estudios de teledetección en las áreas protegidas de Colombia, dado que la implementación en estas zonas de gran importancia para la conservación ambiental, aún es limitada e incipiente.

Se enfatiza la importancia de realizar futuros estudios que aprovechen datos de diversas fuentes, tecnologías avanzadas y análisis de campo, culminando en un marco de monitoreo continuo que integre conocimientos multidisciplinarios, especialmente a nivel local. Adicional, se recomienda examinar las áreas circundantes a las áreas protegidas que albergan ecosistemas naturales, con el objetivo de anticipar y mitigar su degradación a mediano y largo plazo.

Por último, se recomienda desarrollar estrategias de conservación más efectivas y adaptativas para preservar los entornos a nivel local, dentro Hotspot Andes Tropical, ya que es un área de importancia para la conservación que se ha estudiado principalmente a escala macro. Además, se recomienda crear nuevas áreas y potenciar las existentes mediante el monitoreo de teledetección en esta zona de gran importancia para la conservación ambiental.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allawai, M. F., & Ahmed, B. A. (2020). Using Remote Sensing and GIS in Measuring Vegetation Cover Change from Satellite Imagery in Mosul City, North of Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *757*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/757/1/012062

Almalki, R., Khaki, M., Saco, P. M., & Rodriguez, J. F. (2022). Monitoring and Mapping Vegetation Cover Changes in Arid and Semi-Arid Areas Using Remote Sensing Technology: A Review. In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 20). MDPI. https://doi.org/10.3390/rs14205143

Amaya Navas, Ó. D. (2018). Áreas protegidas en Colombia, definición, propiedad y bases constitucionales para su protección. *La Conservación de La Naturaleza Su Régimen Jurídico En Colombia y España*, 23–60. https://dspace-uexternado.metacatalogo.com/bitstream/handle/001/2316/MKA-spa-2018-Areas_protegidas_en_Colombia_definicion_propiedad_y_bases_constitucionales_para_su_proteccion?sequence=1&msclkid=d002c260b09b11ecab7277a2cefcb852

Atef, I., Ahmed, W., & Abdel-Maguid, R. H. (2023). Modelling of land use land cover changes using machine learning and GIS techniques: a case study in El-Fayoum Governorate, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(6). https://doi.org/10.1007/s10661-023-11224-7

Barrera, D., & Chaparro, J. (2021). *Análisis Del Cambio De Las Coberturas Vegetales Y Su Relación Con Las Variables Hidrológicas En El Río Morro, Ubicado En El*. 1–141.

Bisht, B. S., & Kothyari, B. P. (2001). Land-cover change analysis of Garur Ganga watershed using GIS/remote sensing technique. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *29*(3), 137–141. https://doi.org/10.1007/BF02989925

Butt, A., Shabbir, R., Ahmad, S. S., & Aziz, N. (2015). Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *18*(2), 251–259. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.07.003

Cespedes, T. V. C., Alvarez, S. M. G., Rojas, J. M. L., Fernández, G. I. L., & Puscan, M. W. V. (2022). Use of Geographic Information Systems in the Loss of Forest Coverage in the

Amazon. A Systematic Review between the years 2010-2020 [Uso de Sistemas de Información Geográfica en la Pérdida de Cobertura Forestal de la Amazonía. Una Revisión Sistemática ent. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, *2022-July*, 1–9. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85140040204&doi=10.18687%2FLACCEI2022.1.1.126&partnerID=40&md5=fb379ac081f288224004d15b5085cf0d

Clark, M. L., Ruiz, J., Fandino, M. C., & López-Carr, D. (2021a). Conservation priorities in terrestrial protected areas for latin america and the caribbean based on an ecoregional analysis of woody vegetation change, 2001–2010. *Land*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/land10101067

Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Proyecto tipo: Recuperación de cobertura vegetal en áreas disturbadas*. 48.

Dewan, A. M., & Yamaguchi, Y. (2009). Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960-2005. *Environmental Monitoring and Assessment*, *150*(1–4), 237–249. https://doi.org/10.1007/s10661-008-0226-5

Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, *79*(1), 74–87. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.05.017

Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-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 (Colombia)*, *84*(201), 95–101. https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759

Gitima, G., Teshome, M., Kassie, M., & Jakubus, M. (2022). Spatiotemporal land use and cover changes across agroecologies and slope gradients using geospatial technologies in Zoa watershed, Southwest Ethiopia. *Heliyon*, *8*(9). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10696

Gould, W. (2000). Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots. *Ecological Applications*, *10*(6), 1861–1870. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1861:RSOVPS]2.0.CO;2

Ideam. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover

adaptada para Colombia, escala 1:100.000. In *Area: Vol. TH-62-04-1* (Issue 257).

Mena, C., Ormazábal, Y., Morales, Y., Santelices, R., & Gajardo, J. (2011). Green area and vegetation cover indexes for Parral city (Chile) using photointerpretation and GIS. *Ciencia Florestal*, *21*(3), 517–527.

Muñoz-Rojas, M., De la Rosa, D., Zavala, L. M., Jordán, A., & Anaya-Romero, M. (2011). Changes in land cover and vegetation carbon stocks in Andalusia, Southern Spain (1956-2007). *Science of the Total Environment*, *409*(14), 2796–2806. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.009

Miranda-Castro, W., Acevedo-Barrios, R., & Guerrero, M. (2022). Monitoring Conservation of Forest in Protected Areas using Remote Sensing Change Detection Approach: a Review. *Contemporary Problems of Ecology*, *15*(6), 717–729. https://doi.org/10.1134/S1995425522060154

Miranda-Castro, W., Acevedo-Barrios, R., Guerrero, M., Guzmán, K., & de Gorostizaga, S. (2023). Assessing Forest Cover Loss Using Landsat Images and GIS: A Case Study in Colombian Protected Area. *Journal of Sustainable Forestry*, *42*(8), 831–847. https://doi.org/10.1080/10549811.2022.2123356

Pandey, P. C., Koutsias, N., Petropoulos, G. P., Srivastava, P. K., & Ben Dor, E. (2021). Land use/land cover in view of earth observation: data sources, input dimensions, and classifiers—a review of the state of the art. *Geocarto International*, *36*(9), 957–988. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1629647

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2013). ABC del Sistema Nacional de Áreas Protegidas SINAP 1-Antecedentes normativos y de política. *Minambiente*, *20*, 1–11. www.parquesnacionales.gov.co

Pasha, S. V., Reddy, C. S., Jha, C. S., Rao, P. V. V. P., & Dadhwal, V. K. (2016). Assessment of Land Cover Change Hotspots in Gulf of Kachchh, India Using Multi-Temporal Remote Sensing Data and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *44*(6), 905–913. https://doi.org/10.1007/s12524-016-0562-9

Reddy, C. S., Jha, C. S., & Dadhwal, V. K. (2013). Assessment and monitoring of long-term forest cover changes in Odisha, India using remote sensing and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, *185*(5), 4399–4415. https://doi.org/10.1007/s10661-012-2877-5

Redowan, M., Akter, S., & Islam, N. (2014). Analysis of forest cover change at Khadimnagar

National Park, Sylhet, Bangladesh, using Landsat TM and GIS data. *Journal of Forestry Research*, *25*(2), 393–400. https://doi.org/10.1007/s11676-014-0467-9

Sánchez, J. A., Sánchez, M., & Armando, J. (n.d.). *conservación y desarrollo*.

Sanchez-Cuervo, A. M., & Aide, T. M. (2013). Identifying hotspots of deforestation and reforestation in Colombia (2001-2010): Implications for protected areas. *Ecosphere*, *4*(11). https://doi.org/10.1890/ES13-00207.1

Sánchez-Cuervo, A. M., Aide, T. M., Clark, M. L., & Etter, A. (2012). Land Cover Change in Colombia: Surprising Forest Recovery Trends between 2001 and 2010. *PLoS ONE*, *7*(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043943

Schielein, J., Ponzoni Frey, G., Miranda, J., Souza, R. A. de, Boerner, J., & Henderson, J. (2021). The role of accessibility for land use and land cover change in the Brazilian Amazon. *Applied Geography*, *132*(June). https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102419

Shah, R. K., & Shah, R. K. (2023). Forest Cover Change Detection Using Remote Sensing and GIS in Dibru-Saikhowa National Park, Assam: A Spatio-Temporal Study. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*. https://doi.org/10.1007/s40011-023-01449-4

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Application of remote sensors for the analysis of vegetation cover and water bodies. *Idesia*, *38*(4), 99–107. https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099

Young, B. E., Comer, P. J., Hak, J., Diego, A., Rolando, D., & Moritan, G. (2015). *Hotspot de Biodiversidad de los Andes Tropicales -Perfil del ecosistema*. 491.

Zuria, I., & Martínez-Morales, M. Á. (2019). Herramientas de análisis espacial para estudios de biodiversidad. *La Biodiversidad En Un Mundo Cambiante: Fundamentos Teóricos y Metodológicos Para Su Estudio*, *2*(December 2019), 21–38. https://www.researchgate.net/publication/340386127

(Allawai & Ahmed, 2020; Atef et al., 2023; Bisht & Kothyari, 2001; Butt et al., 2015; Cespedes et al., 2022; Dewan & Yamaguchi, 2009; Flórez-Yepes et al., 2017; Gitima et al., 2022; Muñoz-Rojas et al., 2011; Pandey et al., 2021; Pasha et al., 2016; Reddy et al., 2013; Redowan et al., 2014; Schielein et al., 2021; Shah & Shah, 2023)