

**Análisis del cambio del uso del suelo 2018 - 2023 del municipio de Monguí, Boyacá
mediante el uso de sensores remotos y la clasificación de coberturas del IDEAM**

Gina Alejandra Valderrama Pelayo

11792225273

Universidad Antonio Nariño

Facultad De Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil

Especialización En Sistemas De Información Geográfica

Bogotá D.C.

2023

**Análisis del cambio del uso del suelo 2018 - 2023 del municipio de Monguí, Boyacá
mediante el uso de sensores remotos y la clasificación de coberturas del IDEAM**

Gina Alejandra Valderrama Pelayo

Trabajo de investigación presentado para obtener el título de:

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director: Msc. Raúl Echeverry

Universidad Antonio Nariño

Facultad De Ingeniería Ambiental E Ingeniería Civil

Especialización En Sistemas De Información Geográfica

Bogotá D.C.

2023

Resumen

El objetivo del estudio fue analizar y evaluar los cambios en el uso del suelo del municipio de Monguú durante el periodo comprendido entre 2018 y 2023, utilizando imágenes satelitales. El propósito principal fue determinar el porcentaje de cambio en las distintas coberturas identificadas. Para ello, se derivaron y clasificaron los cambios de uso del suelo a partir de las imágenes satelitales capturadas por el sensor Sentinel-2, con una resolución espacial de 10 metros, tomada el 30 de enero de 2023. Se procedió a la identificación y clasificación de las coberturas del suelo basándonos en la clasificación desarrollada en el estudio nacional de conflictos de uso del suelo presentado por el IGAC. Esta clasificación se utilizó como base para la identificación del uso del suelo en nuestra área de estudio.

Se tomaron un total de 9 coberturas que representan los diferentes tipos de cobertura de la tierra según la Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia en el estudio nacional de conflictos de uso del suelo y utilizada por el IGAC en la clasificación de coberturas para el año 2018. Dentro de los resultados se encontró un aumento en cultivos y zonas de pastos correspondiente al 10,4% para el año 2023 en comparación con el año 2018. Además, se encontró que, en el año 2018, el municipio de Monguú tenía más cobertura vegetal de "Herbazal" con un porcentaje del 25,9%, lo que indica que la agricultura no estaba tan extendida en todo el territorio como lo está actualmente. Adicionalmente, las imágenes muestran de manera evidente los cambios en los alrededores del casco urbano de Monguú, donde se ha producido una transición hacia los pastos y cultivos.

Palabras clave: Qgis, ArcMap, Clasificación, Cobertura, Análisis Multitemporal, imágenes Sentinel ,

Abstract

The objective of the study was to analyze and evaluate the changes in land use in the municipality of Mongu during the period from 2018 to 2023, using satellite images. The main purpose was to determine the percentage of change in the different identified land cover types. To achieve this, the changes in land use were derived and classified from the satellite images captured by the Sentinel-2 sensor, with a spatial resolution of 10 meters, taken on January 30, 2023. The identification and classification of land cover were conducted based on the classification developed in the national study of land use conflicts presented by the IGAC. This classification served as the basis for identifying land use in our study area.

A total of 9 land cover types representing different types of land cover were considered, following the Corine Land Cover Methodology adapted for Colombia in the national study of land use conflicts and utilized by the IGAC for the year 2018 classification. Among the results, an increase of 10.4% was found in crops and pasture areas for the year 2023 compared to 2018. Additionally, it was found that in 2018, the municipality of Mongu had a higher vegetation cover of "Herbazal" with a percentage of 25.9%, indicating that agriculture was not as widespread throughout the territory as it is currently. Furthermore, the images clearly show the changes in the surroundings of the urban area of Mongu, where a transition to pastures and crops has occurred.

Key words: QGIS, ArcMap, Classification, Coverage, Multitemporal Analysis, Sentinel Images

Tabla de contenido

Resumen.....	3
Introducción	8
Objetivos.....	10
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos	10
Marco teórico	11
Percepción remota.....	11
Corine Land Cover.....	11
Métodos de análisis de cobertura.....	12
Cobertura/uso del suelo.....	14
Selección de imágenes satélites para procesamiento	17
Planteamiento del problema.....	18
Metodología	22
Área de estudio	23
Fuentes de datos.....	24
Procesamiento de imágenes satelitales	25
Clasificación de la cobertura del suelo	30
Validación de la clasificación.....	30
Resultados.....	30

Mapa de cobertura del suelo	33
Análisis de la precisión de la clasificación	35
Clasificación Supervisada.....	35
Comparación e interpretación con otras fuentes de información de los resultados	39
Limitaciones del estudio	41
Recomendaciones para futuros estudios	41
Conclusiones	42
Referencias bibliográficas.....	43

Lista de tablas

Tabla 1 Cambios de cobertura para periodos 2018 – 2023.....	40
---	----

Lista de Figuras

Figura 1 Procedimiento realizado para la determinación cambio del uso del suelo.	22
Figura 2 Mapa de localización	23
Figura 3 Color Natural, Sentinel 2, Monguí Boyacá, Año 2018.	26
Figura 4 Color Natural, Sentinel 2, Monguí Boyacá, Año 2023.	26
Figura 5 Procedimiento Isocluster 2018.	27
Figura 6 Procedimiento Isocluster 2023.	28
Figura 7 Clasificación disuelta en 4 clases, para el año 2018, Área en hectáreas.	29
Figura 8 Clasificación disuelta en 4 clases, para el año 2023, Área en hectáreas.	29

Figura 9 Coberturas de uso de tierra 2018	31
Figura 10 Coberturas de uso de tierra 2023	32
Figura 11 Mapa de cobertura del suelo no supervisada 2028.....	33
Figura 12 Mapa de cobertura del suelo no supervisada 2023.....	34
Figura 13 Datos tomados IDEAM, Corine Land Cover	36
Figura 14 Mapa de Cobertura 2018, Clasificación Supervisada.....	37
Figura 15 Mapa de Cobertura 2023, Clasificación Supervisada.....	38
Figura 16 Variación de la cobertura vegetal, periodo 2028 - 2023.	39

Introducción

El cambio en el uso del suelo es una de las principales preocupaciones ambientales que enfrentan diferentes regiones del mundo en la actualidad. El uso inadecuado del suelo puede tener efectos negativos en el medio ambiente, tales como la degradación del suelo, la pérdida de la biodiversidad, la disminución de la calidad del aire y del agua, entre otros impactos. (Turner, 2010). Por esta razón, se hace necesario estudiar y monitorear los cambios en el uso del suelo para implementar medidas de conservación y uso sostenible del territorio.

El municipio de Monguí, ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia, no es ajeno a esta problemática. Durante los últimos años, se han observado cambios significativos en el uso del suelo del municipio, como la expansión de áreas urbanas, la deforestación y la transformación de tierras para cultivos agrícolas. Estos cambios pueden afectar significativamente la biodiversidad y los ecosistemas locales, por lo que es fundamental realizar un análisis detallado de los mismos.

Para llevar a cabo este análisis, se empleará la metodología denominada como la CORINE LAND COVER, basada en la empleada para el año 2018 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La utilización de sensores remotos y la clasificación de coberturas son técnicas ampliamente utilizadas en el análisis del uso del suelo debido a su capacidad para obtener información detallada de grandes áreas en poco tiempo (Lillesand y Kiefer, 2007). Además, el IDEAM cuenta con información actualizada y de alta calidad sobre la cobertura del suelo del municipio de Monguí, lo que permitirá obtener mejores resultados.

El objetivo principal de esta investigación es analizar los cambios en el uso del suelo del municipio de Monguí durante el período de 2018 a 2023, utilizando imágenes satelitales y la clasificación de coberturas Corine Land Cover del IDEAM. La clasificación de coberturas consiste en la identificación y categorización de diferentes tipos de superficies terrestres a partir de datos de sensores remotos y ha demostrado ser una herramienta valiosa para la identificación de cambios en el uso del suelo en grandes extensiones de terreno.

En este estudio, se utilizarán imágenes satelitales y otros datos de sensores remotos del IDEAM para identificar y clasificar diferentes tipos de cobertura del suelo en Monguí en dos momentos diferentes: 2018 y 2023. De esta manera, se podrán identificar las zonas en las que se ha producido un cambio en el uso del suelo. Los resultados obtenidos tendrán un valor significativo para los responsables de la planificación del territorio y la gestión del medio ambiente en Monguí, ya que podrán utilizarse para desarrollar estrategias y políticas de conservación y uso sostenible del suelo y los recursos naturales.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el cambio de los usos del suelo en el municipio de Monguí mediante el uso de información obtenida por técnicas de percepción remota para el año 2018 – 2023.

Objetivos específicos

1. Cuantificar los cambios de coberturas de suelo en el municipio de Monguí para el periodo 2018 – 2023.
2. Precisar el porcentaje de cambio de las coberturas identificadas mediante el uso de técnicas de sensores remotos.
3. Discriminar los principales cambios específicos entre coberturas en el período de estudio.

Marco teórico

Percepción remota

Percepción remota es una técnica que utiliza sensores para capturar información de la superficie terrestre sin necesidad de estar en contacto directo con la misma (Lillesand & Kiefer, 2000). Una de las aplicaciones de la percepción remota es la clasificación de la cobertura terrestre, para lo cual existen diferentes métodos de análisis de cobertura.

Existen diferentes métodos para analizar la cobertura terrestre utilizando imágenes. Uno de los enfoques más utilizados es la clasificación supervisada, que consiste en seleccionar muestras representativas de diferentes categorías de cobertura para entrenar un algoritmo capaz de clasificar automáticamente el resto de la imagen (Jensen, 2016). Por otro lado, la clasificación no supervisada es otro método común, en el cual se agrupan píxeles similares en diferentes clases de cobertura sin necesidad de utilizar muestras previas (Richards y Jia, 1999).

Metodología Corine Land Cover

La metodología Corine Land Cover es ampliamente utilizada para la clasificación de la cobertura terrestre debido a su capacidad para proporcionar información detallada sobre el uso del suelo en Europa, según lo señalado por la Agencia Europea de Medio Ambiente en 2019. Esta metodología se basa en la interpretación de diferentes características visuales en imágenes satelitales y utiliza una taxonomía estandarizada para clasificar la cobertura terrestre en diversas categorías. Con el tiempo, se ha mejorado la precisión de la clasificación de Corine Land Cover, y ahora se considera una herramienta valiosa para la gestión del territorio y la evaluación del impacto ambiental.

Además, se han adaptado versiones locales de la metodología Corine Land Cover para su uso en otras partes del mundo, como América Latina, donde los conjuntos de datos locales (como el IDEAM en Colombia y el CONABIO en México) se han desarrollado para clasificar la cobertura terrestre. Estos datos han sido cruciales para monitorear los cambios en la cobertura terrestre y planificar la gestión ambiental a nivel regional y nacional.

Es importante señalar que la clasificación de la cobertura terrestre puede presentar desafíos en áreas con vegetación densa o estructuras urbanas complejas, lo que puede limitar su precisión. Por lo tanto, se necesita una cuidadosa evaluación y validación de los resultados utilizando información de campo y otros datos complementarios para garantizar la exactitud y la calidad de los resultados (Jensen, 2016).

Métodos de análisis de cobertura

Existen diferentes tipos de sensores que se utilizan para realizar análisis espaciales en la tierra en función de las variables que se deseen estudiar. Estos sensores son una fuente importante de información, y entre las ventajas que presentan destaca el hecho de que las imágenes satelitales que generan pueden ser procesadas y analizadas para obtener información valiosa mediante aplicaciones de fácil acceso. Otra ventaja es su rapidez en el tiempo de obtención de información, ya que pueden cubrir grandes territorios en tan solo unos pocos días, a diferencia de otros métodos. Por último, estos sensores son de fácil acceso y en muchos casos gratuitos, como es el caso de las imágenes de sensores remotos que se pueden descargar desde la página de la NASA o incluso mediante herramientas de análisis de imágenes satelitales como Google Earth (Cardozo & Da Silva, 2013).

Es importante destacar que la elección del sensor adecuado dependerá de la variable que se desee estudiar y de las características del territorio en el que se llevará a cabo el análisis. Además, es fundamental contar con la experiencia y el conocimiento técnico necesarios para la interpretación y el análisis de las imágenes generadas, con el fin de obtener resultados precisos y útiles para la toma de decisiones en la gestión del territorio y el medio ambiente. En la actualidad se encuentran imágenes de libre acceso disponibles en diferentes plataformas, es el caso de las imágenes proporcionadas por Sentinel 2, que proveen oportunidad para la obtención de la cartografía de la cobertura del suelo en escalas locales con resolución temporal de 5 días y espacial de 10m; estos productos de teledetección han sido implementados para el monitoreo de la cobertura y uso de la tierra, específicamente en el monitoreo de bosques, cultivos, recursos hídricos y áreas urbanas. (Phiri et al., 2020)

Esta es una técnica que se utiliza ampliamente en la investigación científica (Kong et al., 2019), ya que los sensores remotos son dispositivos que se utilizan para recopilar información sobre la superficie terrestre desde una distancia (Baatz & Schäpe, 2000). Los datos recopilados por estos sensores pueden utilizarse para clasificar diferentes tipos de cobertura terrestre, lo que permite a los investigadores analizar los diferentes cambios presentados en el uso del suelo a lo largo del tiempo (Congedo, 2016).

La clasificación del uso del suelo utilizando sensores remotos implica la identificación de patrones y características en los datos recopilados (Lu et al., 2020). Estos patrones pueden ser utilizados para determinar los diferentes tipos de cobertura terrestre, como bosques, tierras agrícolas, áreas urbanas, cuerpos de agua, entre otros (Jensen, 2007). La identificación de estos patrones es posible gracias a la capacidad de los sensores remotos para recopilar información en

diferentes bandas del espectro electromagnético, permitiendo la discriminación de diferentes tipos de superficies terrestres (Lu et al., 2020).

Uno de los principales tipos de sensores remotos utilizados para la clasificación del uso del suelo es el satélite. Los satélites son dispositivos que orbitan alrededor de la Tierra y recopilan información utilizando diferentes tipos de sensores remotos, como cámaras y radares (Baatz & Schäpe, 2000). Los datos recopilados por los satélites se utilizan para crear imágenes satelitales que pueden ser procesadas utilizando técnicas de clasificación para identificar diferentes tipos de cobertura terrestre (Kong et al., 2019).

El LiDAR (Light Detection and Ranging) es otro tipo de sensor remoto que se emplea para la clasificación del uso del suelo. Este sistema utiliza pulsos de luz láser para medir la distancia entre la superficie terrestre y el sensor (Lu et al., 2020), lo que permite obtener información detallada sobre la topografía del terreno. A partir de estos datos, se pueden crear modelos digitales del terreno que son utilizados para identificar diferentes tipos de cobertura terrestre (Jensen, 2007).

El LiDAR tiene la ventaja de proporcionar información tridimensional muy precisa, lo que permite realizar análisis detallados del relieve del terreno y la vegetación presente. Estos datos son útiles para la planificación del uso del suelo y la gestión de recursos naturales. Sin embargo, el costo de adquisición de datos LiDAR es alto y la cobertura del área puede ser limitada en comparación con otros sensores remotos como las imágenes satelitales. En resumen, los sensores remotos son dispositivos que se utilizan para recopilar información sobre la superficie terrestre desde una distancia. La clasificación del uso del suelo utilizando sensores remotos implica la identificación de patrones y características en los datos recopilados.

Cobertura/uso del suelo

Corine Land Cover es una metodología utilizada para hacer la clasificación de usos de suelos, encontrando la forma más práctica de utilizar sensores remotos y sistemas de información geográfica, en las cuales utilizamos una leyenda que nos especifica como representar cartográficamente la cobertura de la tierra. Esta metodología está representada bajo cinco capítulos de manera que cada uno de ellos representa la leyenda de Corine Land Cover, como establece el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010). El primer capítulo hace referencia a terrenos antrópicos que comprenden áreas de a ciudades, centros poblados y zonas urbanas. El segundo capítulo corresponde a territorios agrícolas, áreas de cultivos permanentes o transitorios, pastos y zonas agrícolas heterogéneas. También, el tercer capítulo habla sobre coberturas de bosques, arbustos, cultivos herbáceos, suelos desnudos y afloramientos rocosos. Seguidamente, los capítulos cuatro y cinco corresponden a coberturas de áreas húmedas y cuerpos de agua.

El análisis del cambio del uso del suelo es un área importante en la investigación geográfica y ambiental. La cobertura y el uso del suelo se refieren a las características físicas de la superficie terrestre, incluyendo la vegetación, la agricultura, la urbanización y los cuerpos de agua (Lillesand et al., 2015). La clasificación de la cobertura y el uso del suelo toma importancia ya que proporciona información sobre cómo se están utilizando los recursos naturales y cómo estos recursos están siendo afectados por las actividades antrópicas (Weng, 2012).

En el mundo, la expansión urbana es una de las principales causas de cambio en el uso del suelo (Seto & Fragkias, 2005). La urbanización tiene un impacto significativo en la calidad del aire, el agua y la biodiversidad local, así como en el acceso a los recursos naturales (Grimm

et al., 2008). El análisis del cambio en el uso del suelo en áreas urbanas puede ayudar a los planificadores y a los tomadores de decisiones a entender mejor cómo se está desarrollando la ciudad y cómo se puede planificar el crecimiento futuro.

El cambio en el uso del suelo también puede tener un impacto en la productividad agrícola y en la seguridad alimentaria (Foley et al., 2005). La expansión agrícola puede llevar a la deforestación y a la pérdida de hábitats naturales, lo que puede tener un impacto negativo en la biodiversidad local (Lambin & Meyfroidt, 2010). La clasificación de la cobertura y el uso del suelo en áreas agrícolas puede ayudar a los investigadores a entender mejor cómo se está utilizando la tierra y cómo se pueden mejorar las prácticas agrícolas para reducir el impacto en el medio ambiente.

Los resultados derivados del análisis de la cobertura y el uso del suelo en el transcurso del tiempo también revisten importancia para comprender los efectos del cambio climático en el medio ambiente (Lillesand et al., 2015). Los cambios en el uso del suelo pueden tener repercusiones en la capacidad de absorción de carbono en la atmósfera, lo cual puede incidir significativamente en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2019). El análisis de la cobertura y el uso del suelo en áreas afectadas por el cambio climático puede contribuir a una mejor comprensión de cómo el entorno se está transformando y de qué manera se pueden tomar medidas para mitigar los impactos negativos del cambio climático.

Este análisis es importante para entender cómo se están utilizando los recursos naturales y cómo se está afectando el medio ambiente por la actividad humana. La expansión urbana y agrícola, la biodiversidad y los efectos del cambio climático son algunos de los factores clave que pueden ser estudiados a través del análisis de la cobertura y el uso del suelo.

Procesamiento de imágenes satélites

Para el procesamiento de imágenes es necesario de los sensores que captura la información de objetos por medio de dispositivos satélites, estos son capaces de monitorear los recursos y fenómenos naturales categorizados que están dentro de programa específicos que permiten monitories actividades que pueden afectar a los humanos. Bajo este criterio, los sensores permiten recolección de información sobre la zona de interés para el respectivo análisis y estudio que se desee tomar (Tinajero León et al., 2019).

La selección de imágenes satelitales adecuadas es un paso crítico en el procesamiento de datos de sensores remotos para el análisis del cambio en el uso del suelo. La elección de las imágenes debe basarse en una serie de factores, incluyendo la resolución espacial y temporal, la cobertura de la nube, la calidad de la imagen y la disponibilidad de datos (Lu et al., 2019).

La resolución espacial se refiere a la cantidad de detalles que pueden ser vistos en una imagen satelital. Una resolución más alta significa que la imagen puede mostrar objetos más pequeños, pero a costa de cubrir un área menor. Por otro lado, una resolución más baja cubre un área más grande, pero con menos detalle. La resolución temporal hace referencia a la frecuencia con la que se pueden obtener imágenes de una determinada área.

La cobertura de nubes es importante porque las nubes pueden obstruir la vista de la superficie terrestre, lo que puede afectar la precisión del análisis (Ji et al., 2018). La calidad de la imagen es importante porque una imagen de baja calidad puede contener errores y afectar la precisión del análisis. Por último, la disponibilidad de datos es importante porque algunas áreas pueden tener menos datos disponibles que otras, lo que puede afectar la calidad del análisis.

En la selección de imágenes satelitales también es importante considerar la banda espectral adecuada para el análisis. Las bandas espectrales se refieren a la cantidad de energía electromagnética emitida o reflejada desde la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda. (Weng, 2012). La elección de la banda espectral adecuada dependerá de los objetivos específicos del análisis y la información deseada.

La selección de imágenes satelitales adecuadas es esencial para el procesamiento y análisis de datos de sensores remotos en el análisis del cambio de uso del suelo. La resolución espacial y temporal, la cobertura de nubes, la calidad de la imagen y la disponibilidad de datos deben ser considerados en la selección de las imágenes adecuadas. Además, la elección de la banda espectral adecuada es importante para lograr los objetivos específicos del análisis.

Planteamiento del problema

El 70% del municipio de Monguú está clasificado como páramo, un importante ecosistema que ha sido afectado por diversos factores, tales como la agricultura, el turismo, la agronomía, la minería y, especialmente, el calentamiento global. Estos factores han contribuido al deterioro de la vegetación en los páramos. Las actividades agrícolas, como el cultivo de papa, la minería y el turismo, han ocasionado cambios en la composición y estructura de los páramos, resultando en la pérdida de su cobertura vegetal y de especies autóctonas. Además, se ha observado la invasión de especies como la manejada (Pino), lo cual afecta negativamente la capacidad de retención y almacenamiento de agua en los páramos y subpáramos. Estos impactos representan una amenaza significativa para la salud y la sostenibilidad de los ecosistemas de páramo.

El cambio de uso del suelo es uno de los factores más importantes que afectan la calidad y la sostenibilidad del medio ambiente. El seguimiento y análisis de los cambios de uso del suelo es fundamental para una gestión adecuada del suelo en su territorio y una toma de decisiones informada en las políticas públicas y privadas. (Giri et al., 2019).

El municipio de Monguí, ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia, no ha sido ajeno a este problema. El cambio en el uso del suelo en esta región ha sido significativo en los últimos años debido a la actividad humana y los factores ambientales. Sin embargo, la información actual y precisa sobre el cambio en el uso del suelo en Monguí es limitada, lo que dificulta la planificación y la toma de decisiones informadas (IDEAM, 2021).

Por lo tanto, el problema que se aborda en esta investigación da como resultado falta de información precisa y actualizada sobre el cambio en el uso del suelo en el municipio de Monguí, Boyacá, y la necesidad de utilizar técnicas de sensores remotos y clasificación de coberturas del IDEAM para obtener información detallada y precisa sobre este cambio. El propósito de este estudio es llenar este vacío de información para mejorar la toma de decisiones informadas en el municipio y ayudar a administrar adecuadamente el uso de suelo en el territorio.

El municipio de Monguí en su extensión es un ecosistema natural único y propio, atrayendo actividades humanas desde hace varios años a pesar de que gran parte de su territorio es parque natural, y como consecuencia, su suelo ha sufrido alteraciones en su cobertura y uso del mismo. Para determinar un estudio que proporcione herramientas y saber el porcentaje de cambio de cobertura o uso del suelo dentro del periodo de 2018-2023, se presenta bajo el desarrollo de un análisis de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales para a clasificación de suelos con las definiciones de clases por leyenda nacional de coberturas de tierra Corine Land Cover.

El cambio de uso del suelo es un factor crucial que afecta la calidad y la sostenibilidad del medio ambiente. El seguimiento y análisis de estos cambios son fundamentales para una gestión adecuada del suelo y la toma de decisiones informadas en las políticas públicas y privadas (Giri et al., 2019).

En el caso específico del municipio de Monguí, ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia, este problema también ha sido evidente. En los últimos años, ha experimentado un cambio significativo en el uso del suelo debido a la actividad humana y factores ambientales. Sin embargo, la disponibilidad de información precisa y actualizada sobre el cambio de uso del suelo en Monguí es limitada, lo que dificulta la planificación y la toma de decisiones informadas (IDEAM, 2021).

Por lo tanto, esta investigación aborda la falta de información precisa y actualizada sobre el cambio de uso del suelo en el municipio de Monguí, Boyacá, y la necesidad de utilizar técnicas de sensores remotos y clasificación de coberturas del IDEAM para obtener información detallada y precisa sobre este cambio, por tal razón, el objetivo principal de este estudio es llenar esta brecha de información para mejorar la toma de decisiones informadas en el municipio y promover una adecuada gestión del uso del suelo en el territorio.

El municipio de Monguí, con su extensa área, alberga un ecosistema natural único que ha atraído actividades humanas a lo largo de los años, a pesar de que gran parte de su territorio es un parque natural. Como consecuencia, el suelo ha experimentado alteraciones en su cobertura y uso. Por tal razón, es necesario realizar un estudio que proporcione herramientas y determine el porcentaje de cambio en la cobertura y uso del suelo durante el periodo de 2018-2023, para

cumplir con este objetivo se empleará un análisis de sistemas de información geográfica mediante el uso de imágenes satelitales, junto con la clasificación de suelos basada en la leyenda nacional de coberturas de tierra Corine Land Cover , para esta investigación se plantea la siguiente pregunta ¿Ha cambiado la cobertura terrestre el municipio de Monguí entre el año 2018 y 2023 a partir de un análisis de imágenes satelitales?.

Metodología

La metodología utilizada en esta investigación se basó en la recopilación y procesamiento de datos de sensores remotos y la clasificación de coberturas del uso del suelo tomado del IDEAM para analizar el cambio en el tiempo del uso del suelo en el municipio de Monguí, Boyacá.

En primer lugar, se seleccionaron imágenes satelitales adecuadas para el análisis, considerando factores como la resolución espacial, espectral y temporal, la cobertura de nubes y la disponibilidad de datos (Lu et al., 2019). Se utilizaron imágenes Sentinel-2 MSI, adquiridas por el Copernicus Open Access Hub.

Posteriormente se tomó una capa de clasificación de coberturas del IDEAM, dicha clasificación fue realizada por la metodología europea Corine Land Cover, esta capa la utilizamos para nombrar los polígonos producto de la clasificación no supervisada de las imágenes satelitales por medio ArcMap (IDEAM, 2018).

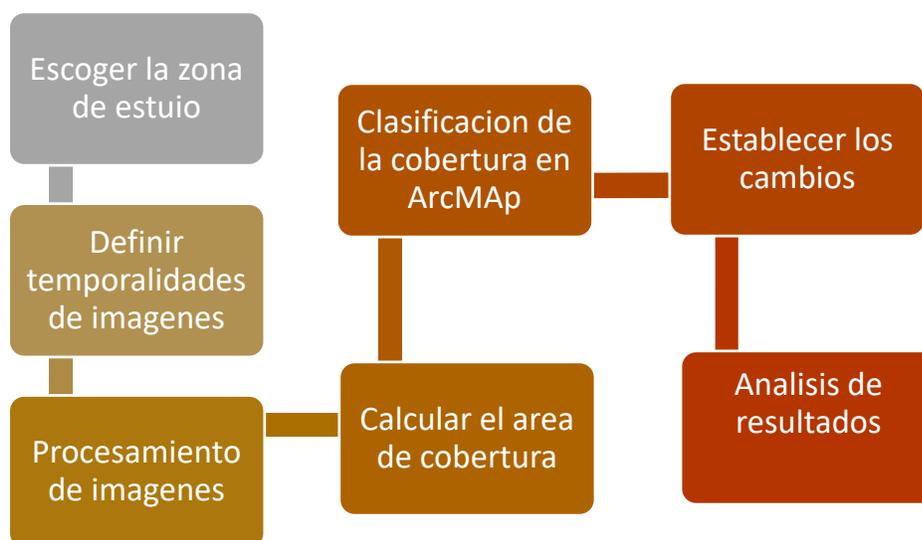


Figura 1 Procedimiento realizado para la determinación cambio del uso del suelo.

Fuentes de datos

Las fuentes de datos utilizadas en este estudio incluyeron imágenes satelitales de alta resolución adquiridas a través de Google Earth Pro y Copernicus Open Access Hub, así como datos de campo obtenidos mediante el uso de GPS y herramientas de medición topográfica (Pérez, 2023).

Es importante mencionar que, en el análisis del cambio del uso del suelo, para la selección de fuentes de datos es importante para garantizar la calidad de los resultados. En este sentido, se deben considerar diferentes tipos de fuentes de datos, como imágenes satelitales, datos de campo y bases de datos de instituciones gubernamentales, entre otros.

Para las imágenes de satélite, es importante seleccionar aquellas con suficiente resolución espacial para el estudio en cuestión, lo que dependerá del tamaño del área de estudio y la escala de análisis. Además, se deben tener en cuenta aspectos como la fecha de adquisición de la imagen y las condiciones atmosféricas en el momento de la adquisición, ya que pueden afectar a la calidad de la imagen.

Finalmente, las bases de datos de instituciones gubernamentales pueden proporcionar información valiosa sobre los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo, así como sobre las políticas y regulaciones existentes en la zona de estudio en relación con el uso del suelo. Estos datos pueden provenir de instituciones como el IDEAM, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entre otros.

En conclusión, la selección adecuada de las fuentes de datos es un aspecto crítico en el análisis del cambio del uso del suelo, y requiere una cuidadosa consideración de diferentes factores, como la resolución espacial, la fecha de adquisición, las condiciones atmosféricas, la disponibilidad de datos de campo y las bases de datos gubernamentales.

Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales fueron procesadas mediante el uso de software especializado ArcGis y QGIS, donde se aplicaron técnicas de corrección radiométrica y georreferenciación para garantizar la precisión espacial y temporal de los datos (Pérez, 2023).

Para procesar las imágenes satelitales, es necesario utilizar software especializado que permita la manipulación de las imágenes y la extracción de información relevante. El primer paso para poder obtener un dato fidedigno es componer una imagen en color verdadero por medio de las 3 bandas espectrales, la banda 4 (Rojo), la banda 3 (Verde) y la banda 2 (Azul), esta composición es conocida como “Color Natural” que para este programa espacial corresponde al RGB_432, con este producto ya podemos iniciar con los demás procesamientos, entre las técnicas de procesamiento de imágenes más comunes se encuentran la corrección atmosférica, la clasificación y la detección de cambios.



Figura 3 Color Natural, Sentinel 2, Monguí Boyacá, Año 2018.



Figura 4 Color Natural, Sentinel 2, Monguí Boyacá, Año 2023.

La corrección atmosférica es un proceso mediante el cual se eliminan los efectos de la atmósfera sobre las imágenes satelitales. Esto es importante porque la atmósfera puede afectar la calidad de las imágenes, distorsionando los colores y reduciendo el contraste. La corrección atmosférica permite obtener imágenes más precisas y comparables entre sí.

Para la clasificación de las imágenes se usó la herramienta para una clasificación no supervisada del módulo ArcMap perteneciente al Software ArcGis, esta clasificación está supeeditada a las clases que el operador elija, en este caso se tomaron 12 clases para el análisis de las imágenes, los archivos raster descargados del programa espacial Sentinel 2, fueron subdivididos en 12 clases, esto quiere decir que los valores de pixel se agruparon en 12 conjuntos, cuyos elementos comparten características numéricas y en términos prácticos representan rasgos del terreno similares entre sí.



ID	Valor	Count	Class Name
1	1	34306	Arbustal
2	2	31524	Herbazal
3	3	32400	Herbazal
4	4	17862	Mosaico de Pastos y Cultivos
5	5	38854	Herbazal
6	6	26638	Mosaico de Pastos y Cultivos
7	7	51999	Herbazal
8	8	35262	Herbazal
9	9	23405	Mosaico de Pastos y Cultivos
10	10	32400	Mosaico de Pastos y Cultivos
11	11	17573	Mosaico de Pastos y Cultivos
12	12	4128	Tejido Urbano Continuo

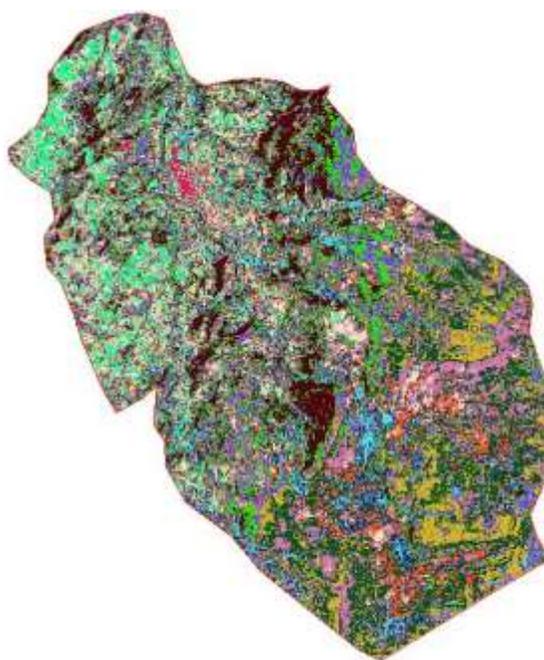


Figura 5 Procedimiento Isocluster 2018.

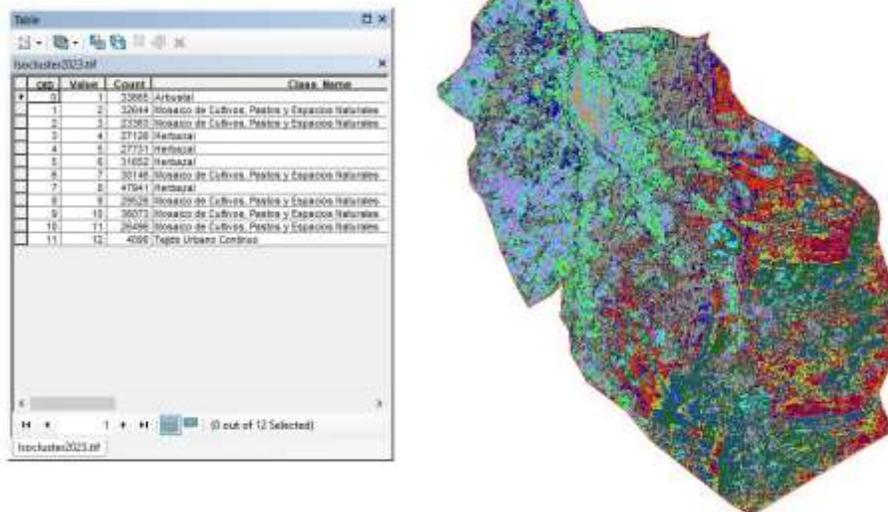


Figura 6 Procedimiento Isocluster 2023.

Estas 12 clases fueron agrupadas según las diferentes coberturas del suelo tomadas de la capa vector del IDEAM con metodología Corine Land Cover, posteriormente se disolvieron los polígonos con las mismas características creando un gran polígono que agrupa toda una misma cobertura de suelo, de esta manera podemos hacer comparaciones cuantitativas del cambio de las coberturas en el intervalo de tiempo propuesto.

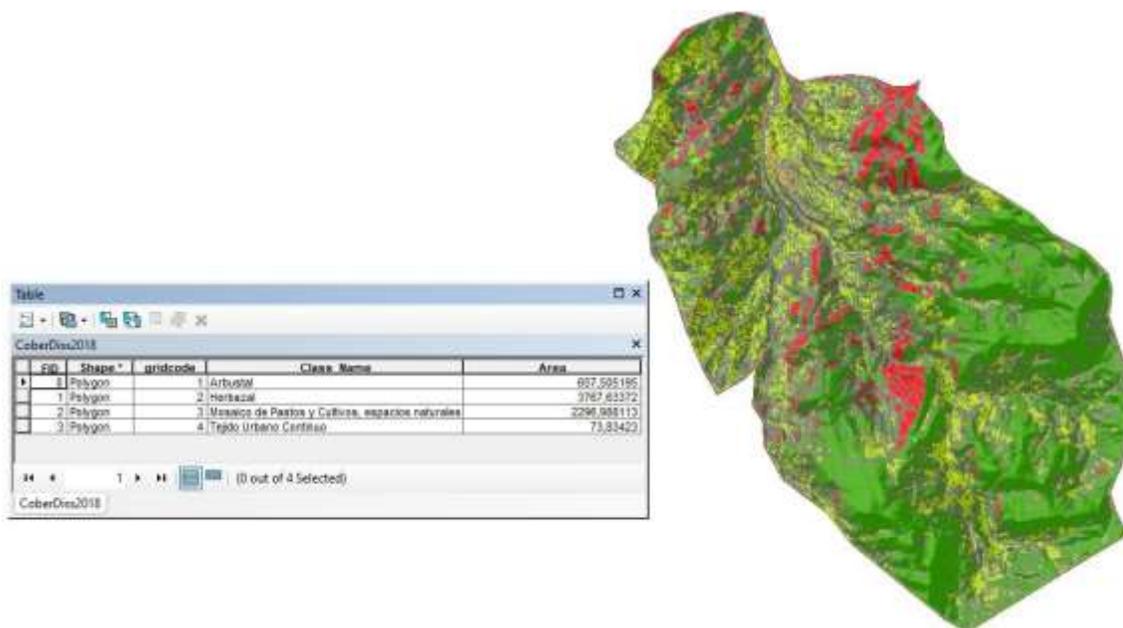


Figura 7 Clasificación disuelta en 4 clases, para el año 2018, Área en hectáreas.

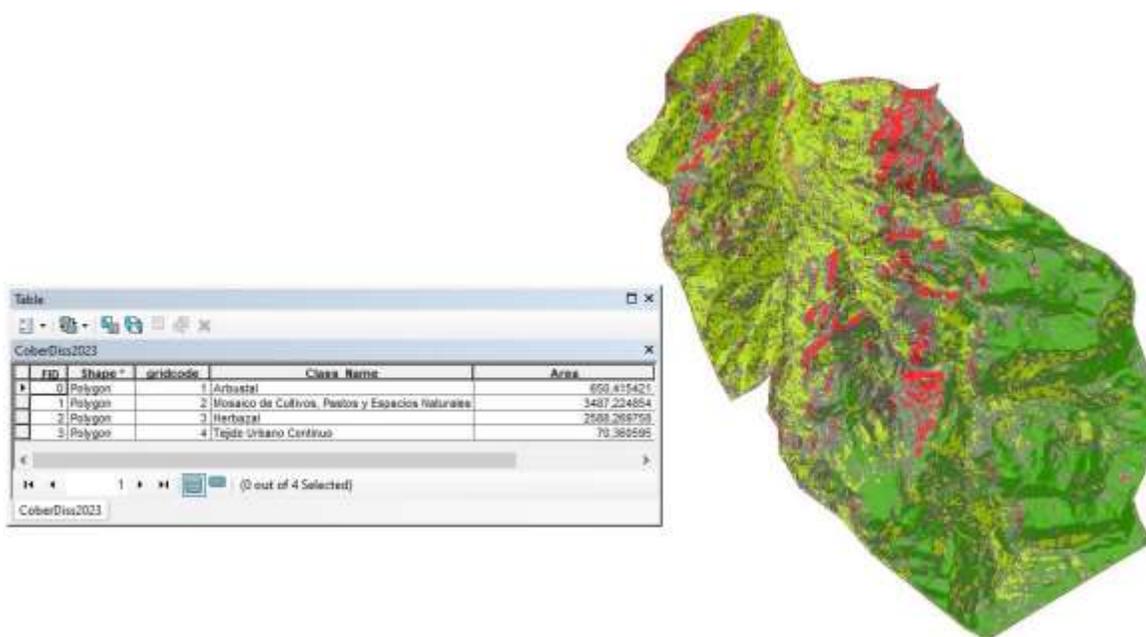


Figura 8 Clasificación disuelta en 4 clases, para el año 2023, Área en hectáreas.

Clasificación de la cobertura del suelo

Siguiendo la metodología Corine Land Cover se generaron 12 grupos (clases) los cuales tomaron un atributo definido por un intervalo en el valor del pixel, esto no quiere decir que hayan 12 coberturas de suelo completamente distintas entre sí, ya que hay clases que comparten una gran similitud con otras clases, en estos casos es necesario acudir a la imagen en color natural para hacer una comparación visual de los parches de vegetación que se pueden apreciar a simple vista, de esta manera estas 12 clases se agrupan por sus similitudes hasta crear una nueva imagen más simplificada y ajustada a la realidad del terreno con un número inferior de clases.

Validación de la clasificación

La validación de la clasificación se realizó mediante la comparación de los resultados obtenidos con las imágenes satelitales de alta resolución y los datos de campo, el ajuste que se hace en el software es una comparación con los estudios anteriores realizados para la identificación de las coberturas del suelo, como lo es el archivo en formato vector producido por el IDEAM, con estos datos previos se realizan las comparaciones y ajustes necesarios.

Resultados y Discusión

Las imágenes satelitales se procesaron para analizar 9 coberturas de la tierra, de la Metodología Corine Land Cover con el programa Arcgis; procediendo por medio de una clasificación mixta, es decir, la clasificación supervisada fue apoyada en una clasificación no supervisada.

Como primera medida se ejecutó la clasificación no supervisada calculada por el software, En la clasificación no supervisada se observó que algunas de las coberturas se igualaban, por lo cual, se fue necesario simplificar las clases y se consideraron las más importantes para hacer una homogenización y hacer un análisis de estas entre los años 2018 y 2023. Estos cambios de cobertura corresponden a los cambios sociales por las regulaciones de ley en territorio de páramo. El área de páramo en Monguú es muy extensa, por eso lo que más abunda en este territorio son los herbazales, arbustales y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, siendo esta vegetación es nativa de este bioma.

Como primera medida se ejecutó la clasificación no supervisada calculada por el software, es decir se basa en la resolución espectral y el nivel de detalle de la imagen que tenemos para separar a su modo las coberturas de uso de tierra presentes en nuestra zona de estudio, las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

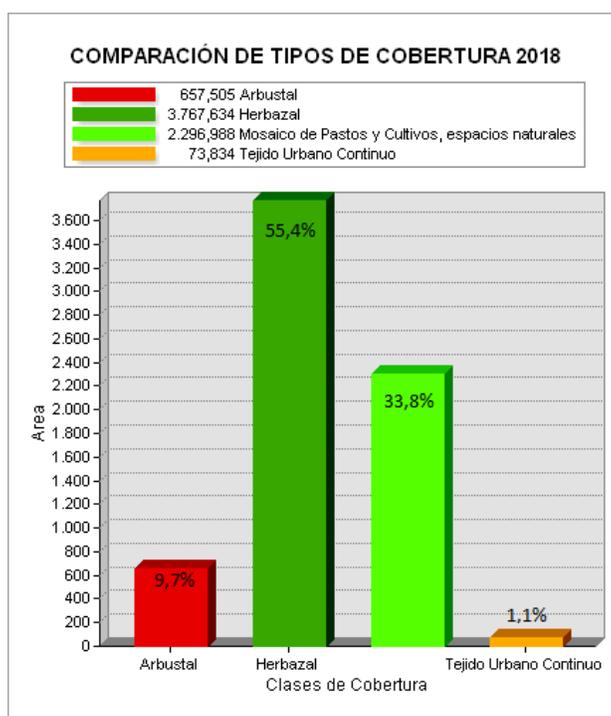


Figura 9 Coberturas de uso de tierra 2018

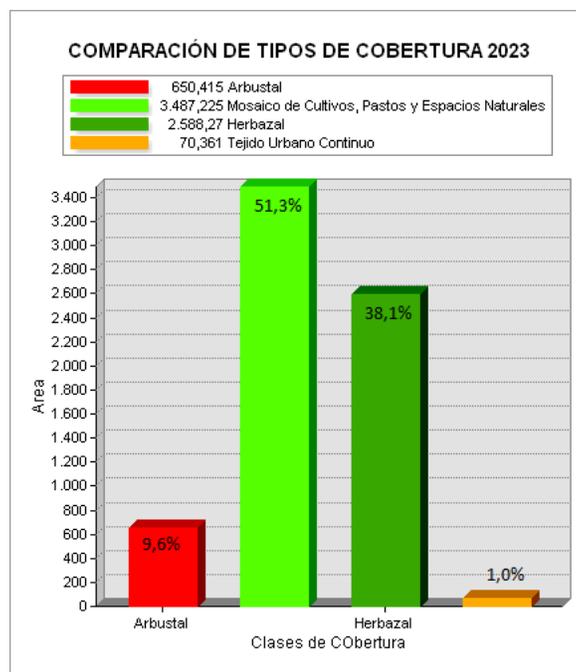


Figura 10 Coberturas de uso de tierra 2023

La comparación entre las coberturas en los dos periodos analizados mostro que los cambios más pronunciados se muestran en herbazal y mosaico de pastos y cultivos, espacios naturales, y través del tiempo las coberturas que más han aumentado son las áreas de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con un 51,3% y la unidad que presento la mayor pérdida de área fue la cobertura de herbazal estando en 2018 en (3768 ha) pasando en 2023 a (2588 ha). Hay que tener presente que puede darse un margen de error en la resolución espacial de las imágenes utilizadas para los dos periodos de tiempo.

Mapa de cobertura del suelo

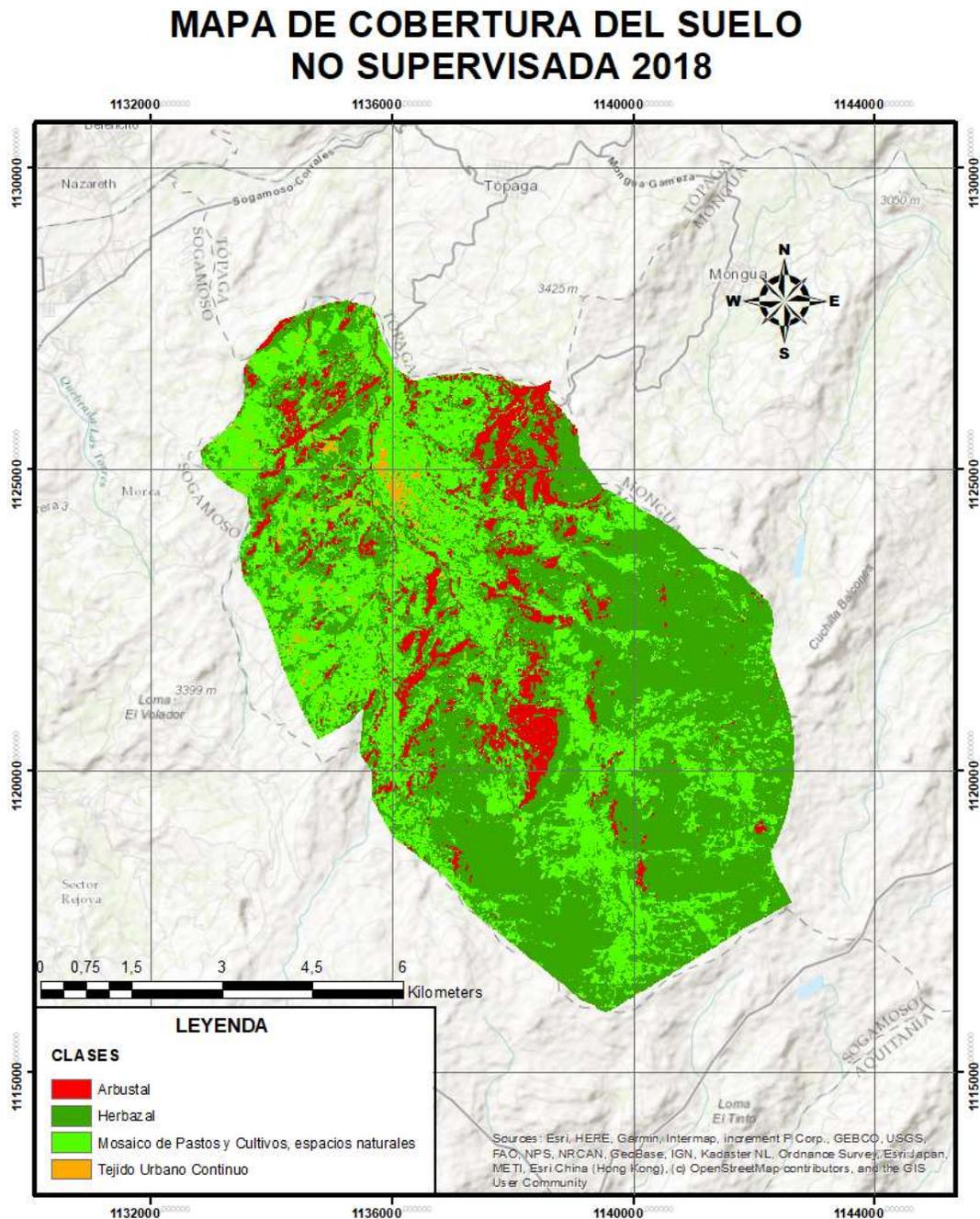


Figura 11 Mapa de cobertura del suelo no supervisada 2018

MAPA DE COBERTURA DEL SUELO NO SUPERVISADA 2023

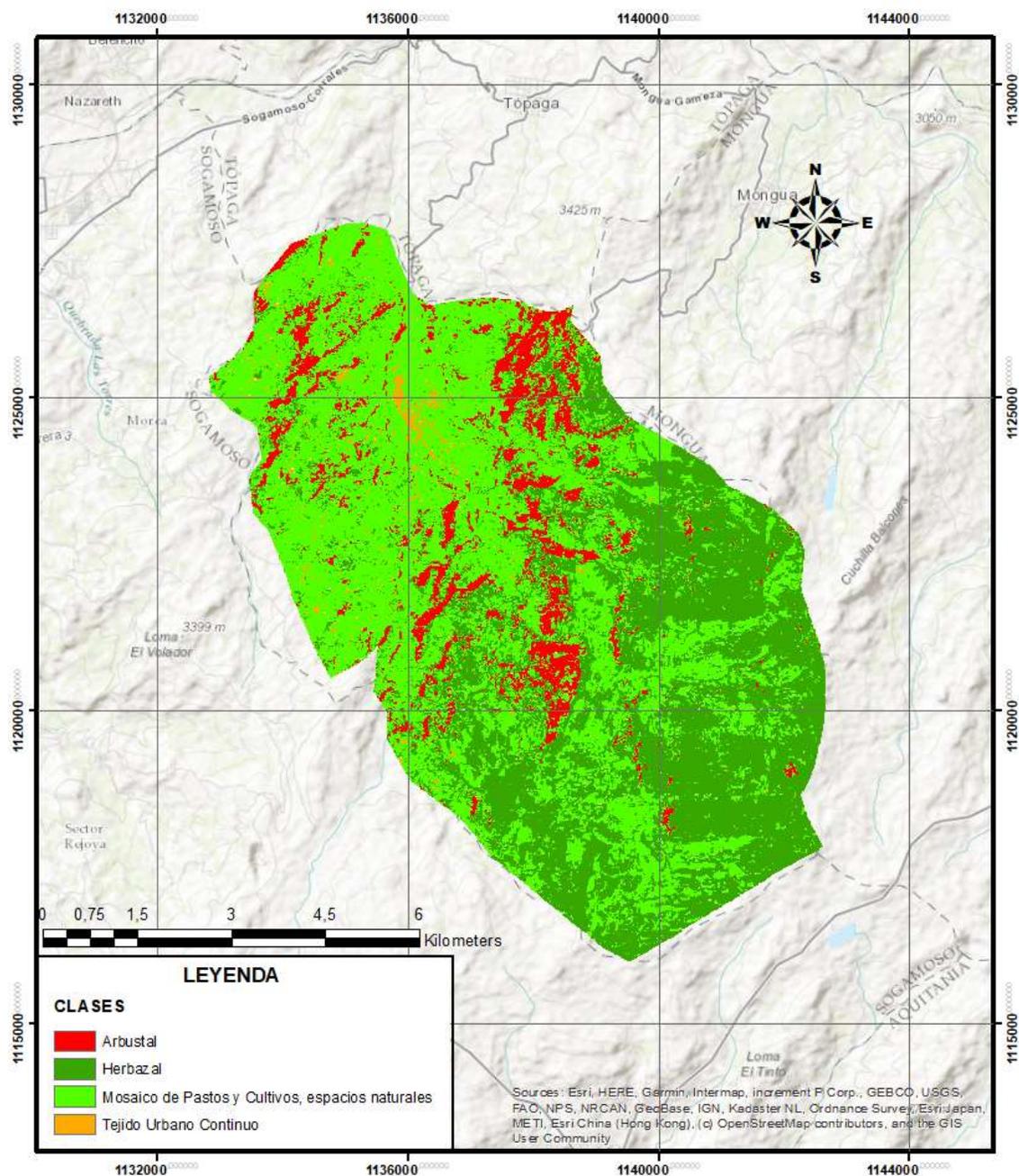


Figura 12 Mapa de cobertura del suelo no supervisada 2023

Análisis de la precisión de la clasificación

Este método utilizado para la clasificación es preciso si tenemos en cuenta el análisis exhaustivo pixel a pixel, la precisión de esta metodología está directamente relacionada con la resolución espacial de la imagen, la ausencia de nubes y el número de clases que se elija, este método tiene resultados similares al procedimiento por medio de una clasificación supervisada, por medio de esta metodología el usuario “entrena” al software para asignar ciertos valores de pixel específicos a una cobertura indicada, esta metodología puede arrojar un resultado más certero sí y solo sí se toman las recomendaciones de calidad para los insumos.

Clasificación Supervisada

A continuación, se muestran los resultados de la metodología efectuada a través de una clasificación supervisada por el Software, para una mejor interpretación de las coberturas.

Por medio de este método tenemos unos resultados que se pueden comparar de una manera más ideal con los datos tomados del IDEAM, ya que las clases arrojadas corresponden estrictamente al número de clases que nos da la institución.

MAPA DE COBERTURA DEL SUELO SUPERVISADA IDEAM 2018

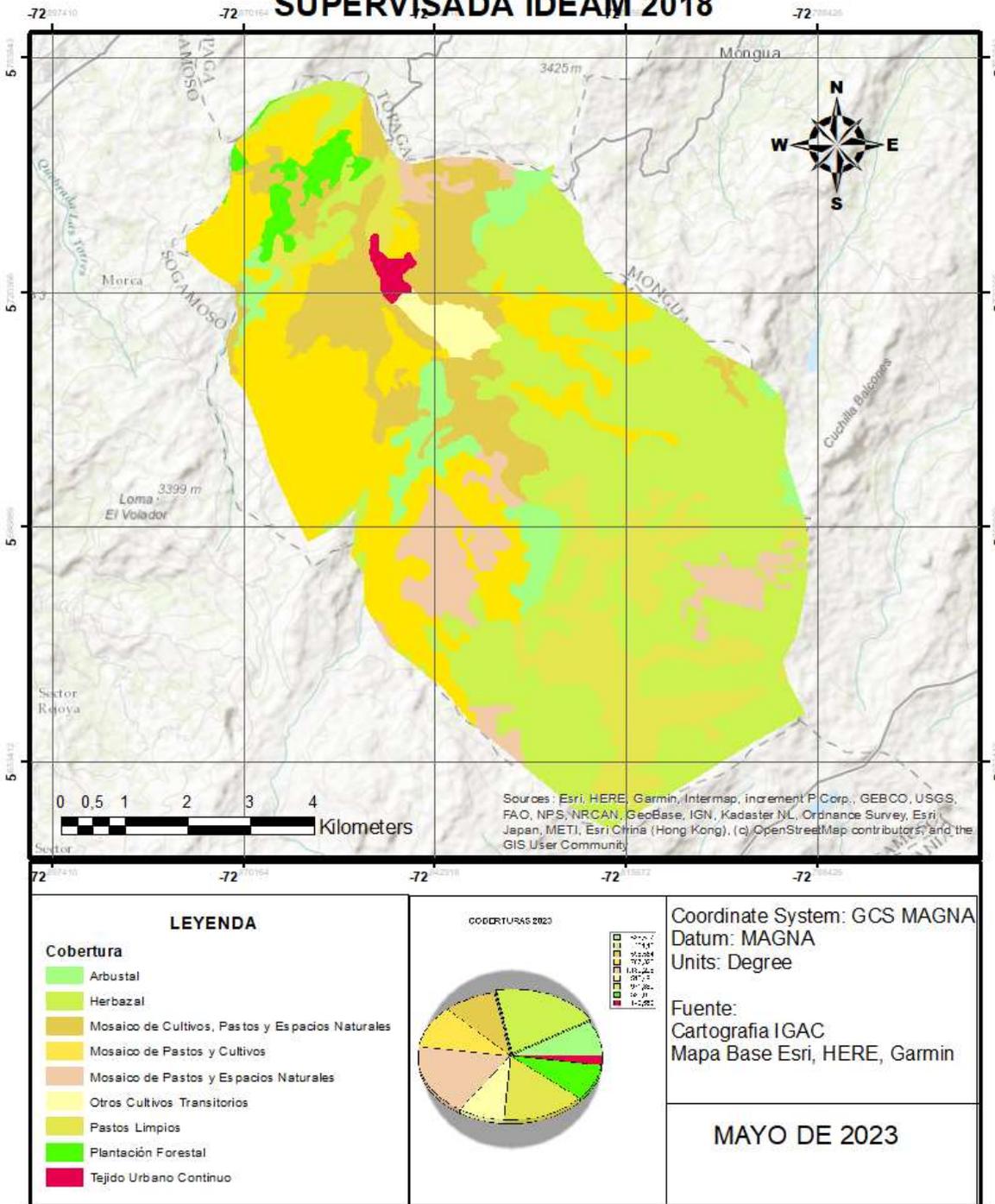


Figura 13 Datos tomados IDEAM, Corine Land Cover

MAPA DE COBERTURA DEL SUELO SUPERVISADA 2018

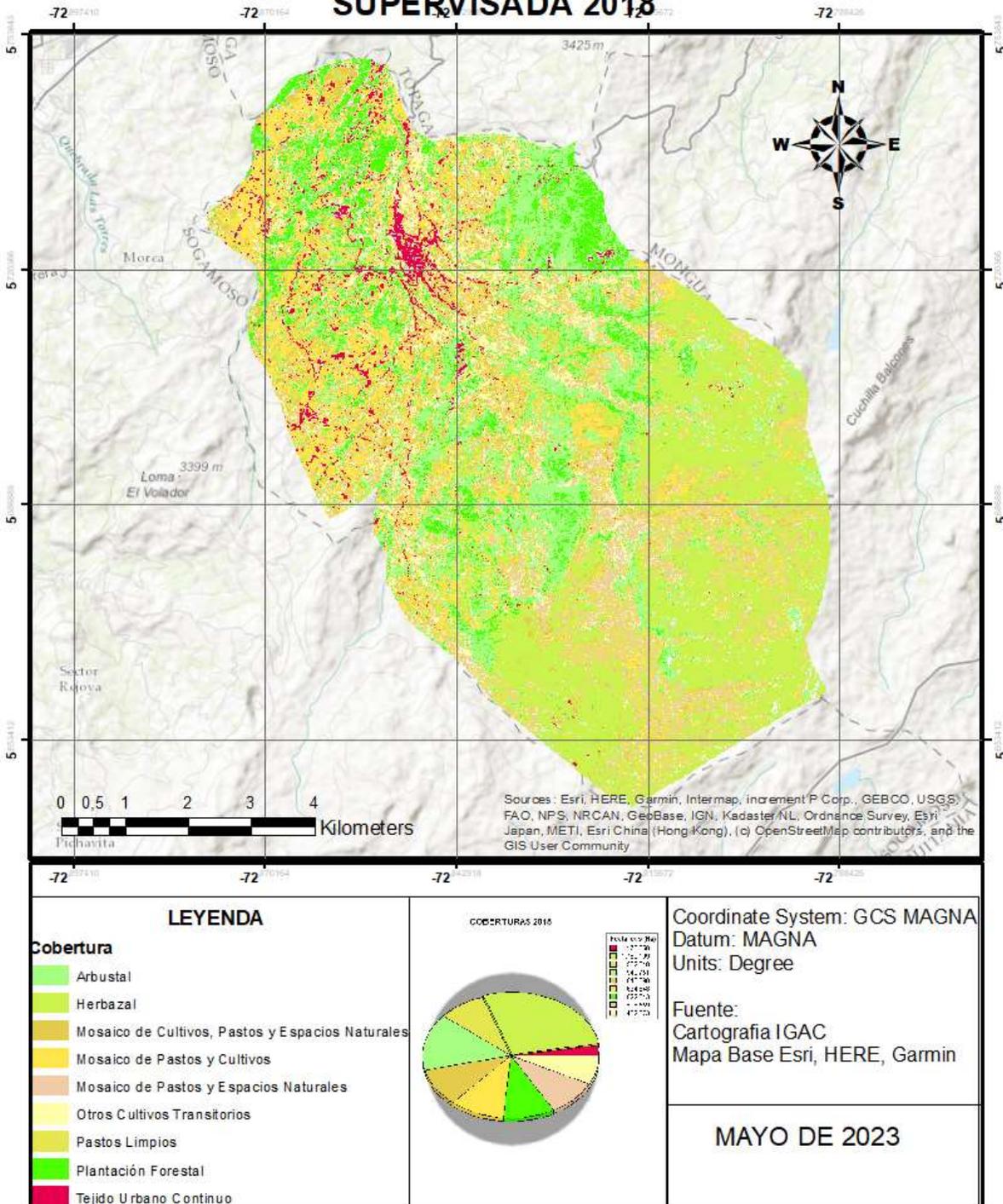


Figura 14 Mapa de Cobertura 2018, Clasificación Supervisada.

MAPA DE COBERTURA DEL SUELO SUPERVISADA 2023

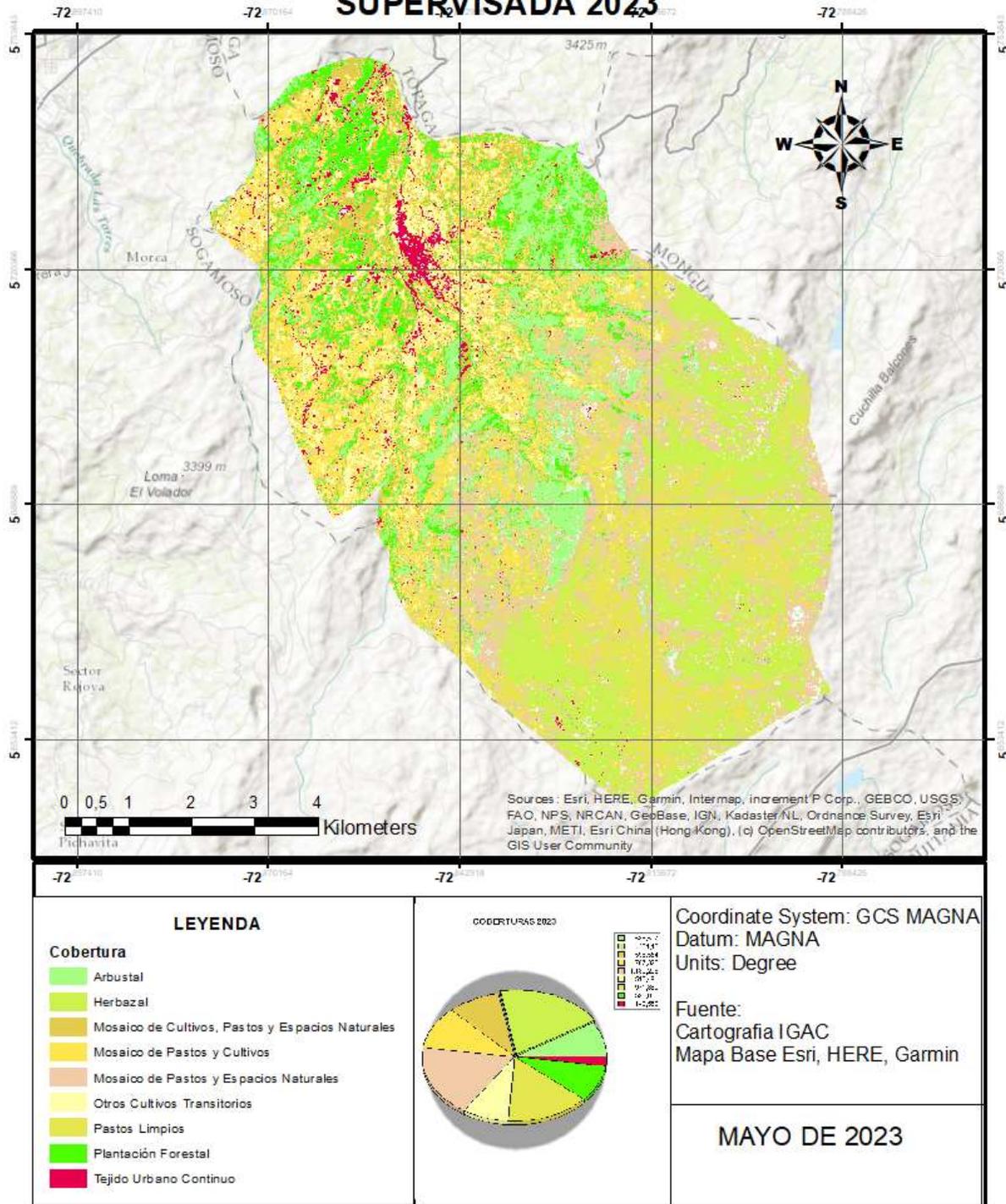


Figura 15 Mapa de Cobertura 2023, Clasificación Supervisada.

Comparación e interpretación

Una vez analizada la información se observan cambios generados entre los dos años por medio de esta clasificación, la cobertura con mayor predominancia en el área de estudio para 2018 y 2023 es herbazales, siendo también la de mayor impacto de cambio de coberturas estando 1762 hectáreas en 2018, pasando a 1234 hectáreas en 2023 disminuyendo casi un 7,8%

El análisis del periodo 2018-2023 de las coberturas del municipio de Monguí, en un intervalo de 5 años, expresa que los factores antrópicos que agobian la zona se ven reflejados en la disminución de las coberturas nativas. La cobertura que ha presentado una mayor depreciación ha sido la cobertura de vegetación de bosques de páramo. Como se observa en la grafica

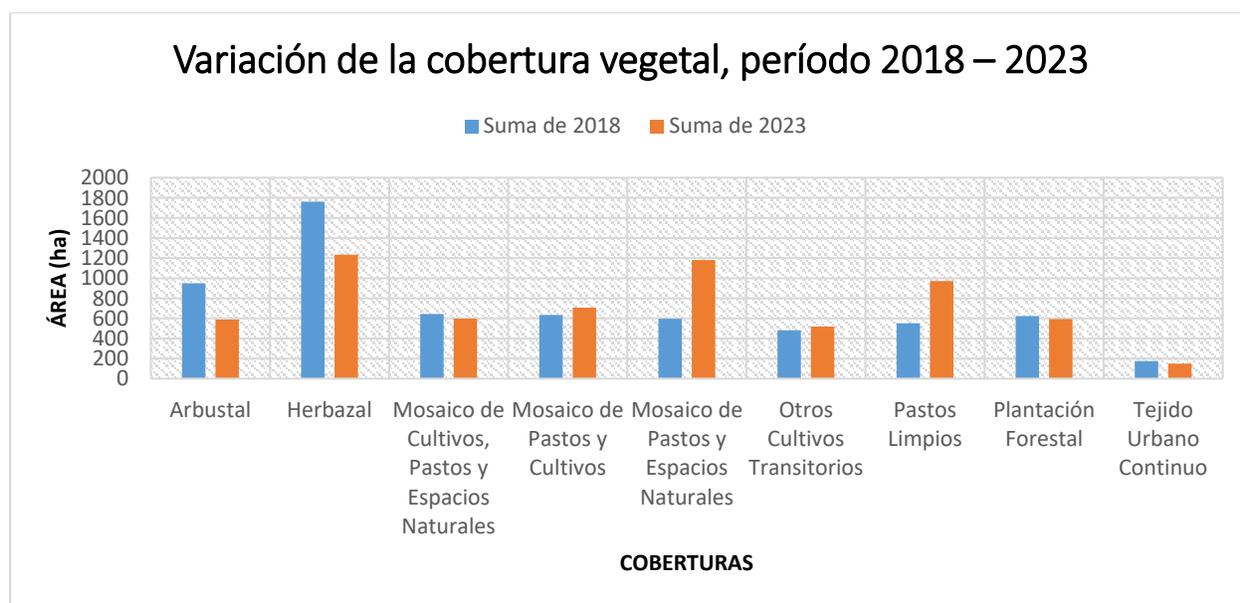


Figura 16 Variación de la cobertura vegetal, periodo 2018 - 2023.

Para la cuantificación del cambio de uso de coberturas, se tomó como base a información la última clasificación de coberturas del IDEAM.

Para cuantificar este indicador se va a utilizar la siguiente expresión:

Cambio de uso de cobertura (ha)= (Área de cobertura del año a evaluar (ha) / Área total clasificación IDEAM (ha)) *100

Se calcula las hectáreas y porcentajes de coberturas identificadas en el área de estudio para los periodos analizados, el cual permite identificar que para el año 2023 la mayor área de coberturas son las áreas de herbazal 1234 ha equivalentes 18,2%, seguido por Mosaico de Pastos y Espacios Naturales con 1180 ha correspondiente al 17,4%.

COBERTURA DEL USO DEL SUELO	IDEAM 2018		2018		2023	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Arbustal	314	4,6%	950	14,0%	589	8,7%
Herbazal	2618	38,5%	1762	25,9%	1234	18,2%
Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	864	12,7%	644	9,5%	599	8,8%
Mosaico de Pastos y Cultivos	1533	22,5%	635	9,3%	707	10,4%
Mosaico de Pastos y Espacios Naturales	429	6,3%	597	8,8%	1180	17,4%
Otros Cultivos Transitorios	88	1,3%	482	7,1%	518	7,6%
Pastos Limpios	798	11,7%	553	8,1%	972	14,3%
Plantación Forestal	115	1,7%	623	9,2%	593	8,7%
Tejido Urbano Continuo	39	0,6%	175	2,6%	150	2,2%
Total 9 coberturas	6796	100,0%	6419	94,5%	6542	96,3%

Tabla 1 Cambios de cobertura para periodos 2018 – 2023

En el año 2018, la clasificación del IDEAM se identificó un total de 9 coberturas donde las componentes con mayor extensión fueron los herbazales (38,5%), seguido por mosaico de pastos y cultivos (22,05%), mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (12,7%) y los pastos limpios (11,7%) y la que menor extensión se identificó fue tejido urbano (0,60%). Las nueve agrupan el 100% de clasificación para el año 2018, dato originario de IDEAM.

En el año 2018 de nuestra clasificación supervisada, se identificaron igualmente 9 coberturas donde las componentes con mayor extensión fueron los herbazales (25,9%), seguido

por arbustales (14,0%) y la que menor extensión se identificó fue tejido urbano (2,6%). Las nueve agrupan el 94%, dándonos cuenta que el margen de error es del 6% la cual puede ser por la calidad de la imagen analizada para esta clasificación. Para el año 2023 el margen de error es de un 3,7%, concluyendo que la calidad de la imagen nos deja analizar y llegar a una clasificación más detallada.

Limitaciones del estudio

Este estudio presenta limitaciones en las resoluciones de los insumos utilizados para los procesamientos y las interpretaciones, al tomar productos hechos con drones desde una altura mucho menor, se pueden mapear a detalle los cultivos, los pastos, los bosques entre otras coberturas, con muchísima más precisión, disminuyendo los errores por instrumento y ajustando los resultados a la realidad del terreno.

Para los cálculos de las áreas los valores son datos aproximados de la realidad, teniendo en cuenta que las proporciones no cambian de manera importante, se pueden estimar los cambios de coberturas en el tiempo.

Recomendaciones para futuros estudios

Es recomendable utilizar insumos de mayor calidad en cuanto a resolución espacial, esto nos brindaría un resultado mucho más confiable y ceñido a la realidad del terreno de estudio, cabe mencionar que para este estudio no se realizó una verificación de campo detallada, lo cual es importante para la confirmación y verificación de los datos que se generan a través de información satelital, puede que estas tengan margen de error muy mínimo para zonas de estudio complejas de coberturas de tierra.

Conclusiones

La selección adecuada de las fuentes de datos es un aspecto crítico en el análisis del cambio del uso del suelo, y requiere una cuidadosa consideración de diferentes factores, como la resolución espacial, la fecha de adquisición, las condiciones atmosféricas, la disponibilidad de datos de campo y las bases de datos gubernamentales.

Se presenta un aumento en los cultivos y zonas de pastos para el año 2023, los datos nos muestran que para el año 2018 el municipio de Monguí tenía más cobertura vegetal de “Herbazal” lo que quiere decir que la agricultura no estaba tan presente en todo el territorio como ahora sí lo está, visualmente las imágenes de cobertura nos arrojan información evidente sobre los alrededores del casco urbano de Monguí y su actual cambio hacía los cultivos y los pastos.

Los terrenos de Arbustales tuvieron una disminución en extensión y en ubicación, es preocupante ver que la cobertura natural de Herbazal es la más abundante en ecosistemas de páramo, comparando los valores y las gráficas arrojadas por los procesamientos, nos arroja una disminución de la vegetación autóctona del páramo para convertirse en terrenos invadidos por los cultivos y los pastos, generando impactos ambientales, comprendidos los cambios y transiciones en el suelo, que amenazan el autosustento y el desarrollo de las especies en el entorno.

Las actividades antrópicas y el cambio de coberturas son fundamentales para el manejo de los recursos en el complejo de paramo, no solo como una forma de entender los cambios a través del tiempo, sino como una forma de reconocer la construcción socioambiental de las zonas de reserva natural de paramo.

Referencias bibliográficas

- Ingeominas y Uniandes. (1998). Estudio general de Amenaza Sísmica de Colombia. *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*. Publ, Esp.
- Álvarez, J. (1983). Geología de la Cordillera Central y occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides mesocenozoicos. *Ingeominas, Boletín Geológico*, 26(2).
- Ballesteros, C. I. (1983). Mapa geológico generalizado del departamento de Bolívar escala: 1:500.000. *Bogotá: Ingeominas. Ecology of Monumental Earthwork Construction in the Bolivian Amazon*". *Diversity*, 2, 618-652.
- Barrera, R. (1996). Compilación Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Sucre Escala 1:250.000. *Ingeominas*.
- Bogotá, J., y Aluja, J. (1981). Geología de la Serranía de San Lucas: Geología Norandina, v. 4. *Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79(10), 1421-1443.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., y Martínez, F. (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. *Agencia Nacional de Hidrocarburos. Petroleum and Tectonics in Mobile Belts*, edited by J. Letouzey, 81-100.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras. (1988). *Cartografía fotogeológica de las terrazas aluviales en el Bajo Cauca y Bajo Río Samaná norte y la estación de Gamarrucha que sería el punto de cierre, Departamento de Antioquia*. Ingeominas.

- Universidad de Caldas y Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2009). *Estudio integrado de los núcleos y registros obtenidos de los pozos someros tipo "slim holes" en la Cuenca Sinú: Reporte interno a la ANH. Informe Final. Tomos I y II.*
- Ingeominas. (2012). Catastro Minero Colombiano. *Ingeominas*. Obtenido de <http://www.ingegominas.gov.co/Catastro.aspx>
- Clavijo, J., y Barrera, R. (2001). Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún. *Instituto de Investigaciones e información Neocientífica, minero-ambiental y nuclear*. Ingeominas.
- Clavijo, J., Mantilla, L. Pinto, J., Bernal, L., y Pérez, A. (2008). Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, norte del Valle Medio del Magdalena y noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30(1), 45-62.
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). Cartografía Geológica de la Plancha 83 Río Samaná norte y la estación de Gamarrucha que sería el punto de cierre. *Boletín Geológico*, 30(1).
- CONTRALORÍA GENERAL DE ANTIOQUIA. (2008). *Encuesta Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en Córdoba*.
- Mantilla, L. C., Clavijo, J., Pinto, J., Páez, L., Pérez, A., Quintero, I., y Cuellar, M. (2006). Cartografía geológica de 9.600 km² de la serranía de San Lucas: Planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco de Loba), 85 (Simití) y 96 (Bocas del Rosario). *Aporte a su evolución geológica. Memoria explicativa de la Plancha*.
- Corporación Autónoma Regional. (2001). *Objetivos de Calidad del Recurso Hídrico en Jurisdicción de Corantioquia*. CORANTIOQUIA: Subdirección de Recursos Naturales.

- Caballero, H., Gamboa, M., Machado, J., y Echeverri, B. (2002). *Mapa Geomorfológico, de Amenazas y Áreas Degradadas de la Jurisdicción de CORANTIOQUIA a Escala 1:100.000. Geomorfología de la Plancha 83-Río Samaná norte y la estación de Gamarrucha que sería el punto de cierre.* CORANTIOQUIA y Universidad Nacional.
- DANE. (2005). *Censo General 2005, Nivel Nacional.* ISBN: 978-958-624- 072-7.
- De Porta, J. (1974). *Lexique Stratigraphique International, Vol. 5, Amerique Latine, Fasc. 4b, Colombie, 2eme. Partie, Tertiaire et Quaternaire.* París: Centre National de la Recherche Scientifique.
- Porras, O. (2012). *Plan Integral de Ordenamiento Ambiental y Desarrollo Territorial de la Región de la Mojana. Caracterización Territorial.* Departamento Nacional De Planeación.
- Dueñas, H. y Duque, H. (1981). Geología del Cuadrángulo F-8, Planeta Rica. Ingeominas. *Boletín Geológico, 24(1),1-35.*
- Duque-Caro, H. (1990). Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobigraphy in Northwest South America and the evolution of the Panama Seaway. *Elsevier Science Publisher. Paleogeography, Paleoclimatology and Paleoecology, 203-234.*
- Espinal, S. (1977). Zonas de Vida o formaciones vegetales de Colombia: memoria explicativa sobre el mapa ecológico. *Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" Subdirección Agrológica, 13(11).*
- Estrada, A. (1972). *Geology and Plate Tectonic History of the Colombian Andes.* Stanford University.

- Feininger, T. Barrero, D., y Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona II-B). *Ingeominas, Boletín Geológico*, 20(2), 1-173p.
- Frantz, C., Ordóñez-Carmona O., y Chemale, J. (2007). Caracterización de Ambientes Geológicos con mineralizaciones de oro en los Andes Colombianos. *VIII Congreso Colombiano de Minería. Memorias CD*.
- Gobernación de Antioquia. (2009). *Perfil de la subregión del Bajo Cauca*. Gobernación de Antioquia.
- Universidad de Antioquia. Instituto de Estudios Regionales., Gobernación de Antioquia., Gómez, L., Guerra, D., Gómez, S., Durango, C., Vega Berrio, C., Correa, D. y Montoya, C. (2005). Las fronteras de Antioquia: aspectos físicos, jurídicos, históricos, económicos y socioculturales. Medellín: *Departamento Administrativo de Planeación*.
- González, H. (2001). Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. *Memoria Explicativa, Ingeominas*.
- González, H. C. (1999). Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Bogotá: *Ingeominas*.
- González, H., y Londoño, A. (2002). Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia, Diorita de Segovia. Cordillera Central, departamentos de Antioquia y Bolívar. *Ingeominas*.
- Holdridge, L. R. (1967). *Life Zone Ecology*. (rev. ed). Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia. Parte III Aspectos Departamentales*. Imprenta Nacional de Colombia.

IGAC. (s.f.). *Servicio Geológico Colombiano Cartografía Geológica de la Plancha 83 Río Samaná norte y la estación de Gamarrucha que sería el punto de cierre, Departamento de Antioquia 91 . 23(2).*

IGAC-ESAP. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial Río Samaná norte y la estación de Gamarrucha que sería el punto de cierre- Antioquia.*

Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2007) *Remote Sensing and Image Interpretation*. 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.

Congedo, L. (2016). *Semi-automatic classification plugin documentation*. Release, 4(0.1).

Xiuping Jia and J. A. Richards. (1999). *Segmented principal components transformation for efficient hyperspectral remote-sensing image display and classification*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 538-542, doi: 10.1109/36.739109.

Jia, X., & Richards, J. A. (2002). *Cluster-space representation for hyperspectral data classification*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(3), 593-598.

Da Silva, C., Insaurralde, J., y Cardozo, O. (2014). *Cartografía de coberturas del suelo mediante sensores remotos, de la ciudad de Resistencia, Argentina (2013)*. Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Humanidades. Instituto de Geografía.

Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., y Ranagalage, M. (2020). *Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review*. *Remote Sensing*, 12(14), 22-91.

Baätz, M. & Schäpe, A. (2000). Multiresolution segmentation: An optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung XII*, J. Strobl, T. Blaschke, and G. Griesebner, Eds. Karlsruhe, Germany: Wichmann Verlag, 12–23.

Jensen, J., & Im, J. (2007). Remote sensing change detection in urban environments. *Geo-spatial Technologies in Urban Environments: Policy, Practice, and Pixels*, 7-31.

Jensen, J. (2007). Thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, 249-290.

Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 34-49.