



1859

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Facultad de Agropecuaria y de Recursos

Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Forestal

Análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo
del periodo 1989-2019, para el cálculo de indicadores
del subsistema natural en el cantón Saraguro,
provincia de Loja

TESIS DE GRADO PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

AUTOR:

Dennis Joel Benalcázar Naranjo

DIRECTOR:

Ing. Óscar Lenin Juela Sivisaca

LOJA - ECUADOR

2021

Loja, 30 de junio de 2021

Ing. Oscar Lenin Juela Sivisaca, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA

Que el señor egresado Dennis Joel Benalcázar Naranjo, con C.I. 1104901796, ha culminado con su tesis titulada: **Análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo del periodo 1989-2019, para el cálculo de indicadores del subsistema natural en el cantón Saraguro, provincia de Loja**; la misma que ha sido desarrollada de acuerdo a la planificación y cronograma establecido. Se autoriza la continuación del trámite de graduación.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**OSCAR LENIN
JUELA**

Ing. Oscar Lenin Juela Sivisaca, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TESIS



Universidad
Nacional
de Loja

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES

RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

Loja, 23 de agosto de 2021

Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc.,

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL CALIFICADOR DE LA TESIS

CERTIFICA:

En calidad de presidente del Tribunal de Calificación de la Tesis titulada: **Análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo del periodo 1989-2019, para el cálculo de indicadores del subsistema natural en el cantón Saraguro, provincia de Loja**, de autoría del señor Dennis Joel Benalcázar Naranjo, portador de la cédula N° 1104901796, se informa que la misma ha sido revisada y se ha incorporado todas las sugerencias efectuadas por el tribunal, motivo por el cual se procede a la aprobación y calificación del trabajo de Tesis de Grado.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**JUAN ARMANDO
MAITA CHAMBA**

Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc.,

PRESIDENTE



Ing. Darwin Alexander Pucha Cofrep Phd.,

VOCAL

LUIS ALFREDO YAGUACHE ORDONEZ Firmado digitalmente por LUIS ALFREDO YAGUACHE ORDONEZ
Fecha: 2021.08.23 15:36:16 -05'00'

Ing. Luis Alfredo Yaguache Ordoñez Mg. Sc.

VOCAL

AUTORÍA

Yo, Dennis Joel Benalcázar Naranjo, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**DENNIS JOEL
BENALCAZAR
NARANJO**

Autor: Dennis Joel Benalcázar Naranjo

Cédula: 1104901796

Fecha: 14/09/2021

CARTA DE AUTORIZACIÓN

Yo, Dennis Joel Benalcázar Naranjo declaro ser autor, de la tesis titulada: “**Análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo del periodo 1989-2019, para el cálculo de indicadores del subsistema natural en el cantón Saraguro, provincia de Loja**”, como requisito para optar al grado de: Ingeniero Forestal, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los catorce días del mes de septiembre de dos mil veintiuno, firma el autor.

Firma:  Firmado electrónicamente por:
**DENNIS JOEL
BENALCAZAR
NARANJO**

Autor: Dennis Joel Benalcázar Naranjo

Número de Cédula: 1104901796

Dirección: Barrio Daniel Álvarez

Correo electrónico: dennis.benalcazar@unl.edu.ec

Celular: 0982578103

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Tesis: Ing. Oscar Lenin Juella Sivisaca, Mg. Sc.

Tribunal de Grado: Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc., **Presidente**

Ing. Darwin Alexander Pucha Cofrep Phd., **Vocal**

Ing. Luis Alfredo Yaguache Ordoñez Mg. Sc. **Vocal**

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento se dirige a quien ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, que en todo momento me ha acompañado.

Gracias a mi familia, porque son lo más importante que tengo en la vida, por ser mi mayor motivación y apoyo personal.

A la Universidad Nacional de Loja y en especial a la carrera de Ingeniería Forestal por darme la oportunidad de cumplir una meta profesional y a cada docente que contribuyo al aprendizaje y formación durante todos los años de carrera.

A mi director de tesis Ing. Óscar Juela, por su conocimiento, apoyo y dirección durante el desarrollo de la investigación.

Y demás personas que han sido parte de esta larga travesía, a las cuales agradezco de corazón por su apoyo y ánimo en cada momento.

-Dennis Joel Benalcázar Naranjo

DEDICATORIA

Principalmente a Dios y a la virgen del Cisne, quiénes me guían y me acompañan en cada momento, cada logro y tropiezo en mi vida.

A mis padres, por ser lo más importante en mi vida, por todo su cariño y apoyo en todo momento, muchos de mis logros y en especial este, se los debo a ustedes. Gracias a mi madre por estar al pendiente de mí y a mi padre por siempre desearme lo mejor para mi vida, sus consejos y cada una de sus palabras me guiaron hacia un buen camino.

A mis hermanos que día a día con su presencia, respaldo y cariño me impulsan para seguir adelante, además de saber que mis logros también son los suyos.

A mi abuelita paterna quién estuvo conmigo en cada momento, en cada larga y agotadora noche de estudio, sumado a su gran apoyo incondicional. Quién además de ser mi abuela, mi segunda madre.

A mis compadres, que estuvieron conmigo desde el inicio de este largo camino, en cada risa, en cada desvelada de estudio, siempre han estado ahí presentes con palabras de ánimo y su gran apoyo.

A mi novia Michelle por su motivación y apoyo incondicional a lo largo de mi vida universitaria y por aquellas palabras de aliento a cada momento. Y demás familiares y amigos por su apoyo durante toda mi etapa de estudio.

-Dennis Joel Benalcázar Naranjo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	I
CERTIFICACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS	II
CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO	III
AUTORÍA	IV
CARTA DE AUTORIZACIÓN	V
AGRADECIMIENTO	VI
DEDICATORIA	VII
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE ANEXOS	XII
TÍTULO	XIII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. El cambio de uso del suelo	4
2.2. Los Sistemas de Información Geográfica y Teledetección	5
2.3. Análisis multitemporal para determinar el cambio de uso del suelo	5
2.4. Importancia de los indicadores del subsistema natural para el ordenamiento territorial	14
2.4.1. Indicadores del subsistema natural	15
2.4.2. Ordenamiento territorial	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1. Área de estudio	17
3.2. Identificación de los cambios de cobertura y uso de suelo	18

3.3.	Cálculo de indicadores del subsistema natural	25
3.4.	Lineamientos estratégicos para la atenuación de los cambios significativos en el uso del suelo	27
4.	RESULTADOS	29
4.1.	Identificación de los cambios de cobertura y uso del suelo.....	29
4.2.	Indicadores del subsistema natural	34
4.2.1.	Tasa de deforestación	35
4.2.2.	Tasa de cambio de la vegetación y uso del suelo	36
4.2.3.	Relación cobertura Natural/Antrópica.....	37
4.2.4.	Extensión de la frontera Agrícola.....	38
4.2.5.	Áreas Naturales Protegidas.....	39
4.3.	Lineamientos estratégicos para la atenuación de los cambios significativos en el uso del suelo	40
5.	DISCUSIÓN	44
6.	CONCLUSIONES	49
7.	RECOMENDACIONES	50
8.	BIBLIOGRAFÍA	51
9.	ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Evolución de satélites Landsat	8
Tabla 2.	Combinaciones y uso de las composiciones Landsat 8	10
Tabla 3.	Sensores MS, TM y ETM+ y sus Aplicaciones	11
Tabla 4.	Indicadores del Subsistema Natural	15
Tabla 5.	Sensores y fechas de las imágenes satelitales.....	18
Tabla 6.	Clases de Coberturas Adaptado.....	20
Tabla 7.	Matriz de Cuantificación de Coberturas y Uso del Suelo	22
Tabla 8.	Matriz de confusión.....	23
Tabla 9.	Categoría de concordancias de validación para el coeficiente Kappa.....	24
Tabla 10.	Superficie y porcentaje total de las coberturas de uso del suelo en el cantón Saraguro en los años 1989, 1999, 2013, 2019.	30
Tabla 11.	Resumen de valores del índice Kappa.....	30
Tabla 12.	Tasa de deforestación en porcentaje del cantón Saraguro.....	35
Tabla 13.	Indicador de antropización del cantón Saraguro	37
Tabla 14.	Extensión de la frontera agrícola del cantón Saraguro.....	38
Tabla 15.	Cobertura de Áreas Naturales definidas por el MAE, del cantón Saraguro .	40
Tabla 16.	Lineamientos estratégicos de las coberturas con cambios significativos en el periodo 1989 - 2019 correspondientes al cantón Saraguro.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de ubicación del cantón Saraguro	17
Figura 2.	Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 1989	31
Figura 3.	Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 1999	32
Figura 4.	Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 2013	33
Figura 5.	Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 2019	34
Figura 6.	Mapa de Tasa de deforestación correspondiente al periodo 1989 – 2019 ...	36
Figura 7.	Tasa de cambio de las coberturas de uso de suelo correspondientes a cada periodo de estudio.....	37
Figura 8.	Mapa del índice de antropización del cantón Saraguro correspondiente al periodo 1989 – 2019	38
Figura 9.	Mapa de la extensión de la frontera agrícola del cantón Saraguro correspondiente al periodo 1989 - 2019	39
Figura 10.	Mapa comparativo de la cobertura de bosque y de las áreas del programa Socio Bosque existentes en del cantón Saraguro correspondiente al año 2019	40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 1989	57
Anexo 2.	Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 1999	60
Anexo 3.	Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 2013	63
Anexo 4.	Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 2019	66
Anexo 5.	Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 1989.	69
Anexo 6.	Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 1999	70
Anexo 7.	Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 2013.	71
Anexo 8.	Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 2019	72
Anexo 9.	Índice de antropización de 1989	73
Anexo 10.	Índice de antropización de 1999	74
Anexo 11.	Índice de antropización de 2013	75
Anexo 12.	Índice de antropización de 2019	76
Anexo 13.	Toma de puntos de control de las diferentes coberturas de estudio para la verificación de resultados.....	77

**Análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo del periodo
1989-2019, para el cálculo de indicadores del subsistema natural
en el cantón Saraguro, provincia de Loja**

RESUMEN

Los seres humanos han sido quienes han generado cambios significativos en el uso del suelo, provocando grandes desafíos ambientales, económicos y sociales, por lo que el análisis multitemporal resulta de gran utilidad, debido a que brinda información del cambio de uso de suelo en un determinado periodo y lugar.

En el presente estudio multitemporal se identificaron los cambios de uso de suelo en el cantón Saraguro entre los años 1989 y 2019, para el establecimiento de indicadores del subsistema natural y desarrollar lineamientos estratégicos para la atenuación de los cambios más significativos. Para llevar a cabo esta investigación se recopiló información satelital del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) e información cartográfica del Sistema de Información Nacional, Instituto Geográfico Militar, dichas imágenes satelitales pasaron por un pre procesamiento y procesamiento donde se utilizó el método de clasificación supervisada, estos resultados se validaron a través del índice estadístico de Kappa con valores entre 0,79 % y 0,92 % de exactitud. Se realizó el cálculo de cinco indicadores del subsistema natural, para lo cual se utilizó la información de cambio de uso de suelo, además de algoritmos y la superposición de capas vectoriales en software. Para la elaboración de los lineamientos estratégicos se consideró los cambios más significativos presentes. Los resultados demostraron que la cobertura con mayor pérdida fue el suelo descubierto con 15 546,29 ha, reduciéndose a 6 134,38 ha en el año 2019, debido al aumento de áreas de pastizal y agrícola, siendo los pastizales la cobertura con mayor aumento en su superficie, presentando una tasa de cambio de 1,95 %. El índice de mayor antropización fue en el año 2019 con el 30 %. Además, alrededor del 27 % del total de la superficie del cantón se encuentra en alguna categoría de conservación y protección natural. A pesar de dicho porcentaje de áreas naturales, se evidenció que existe reducción en áreas de páramo y bosques por lo que se desarrollaron lineamientos donde se ejecuten programas de manejo sostenible de pastizales y el posible establecimiento de nuevas áreas de protección. En relación a lo expuesto se señala que los pastizales son la cobertura con mayor incremento y mayor superficie en la actualidad, debido a que la ganadería es uno de los principales factores de producción económica en el cantón.

Palabras claves: Sistemas de Información Geográfica, Análisis Multitemporal, Subsistema Natural, Índice Kappa, Ordenamiento Territorial.

ABSTRACT

Humans have generated significant changes in land use, causing major environmental, economic and social challenges, making multitemporal analysis very useful because it provides information of land use changeover in a given period and place.

In this multitemporal study, land use changes in Saraguro canton were identified between 1989 and 2019, for the establishment of indicators of the natural subsystem and to develop strategic guidelines for the mitigation of the most significant changes. To carry out this research collected information satellite of the United States Geological Survey (USGS) and cartographic information from the National Information System, Institute of Geographic Military, these satellite images passed through a pre-processing corrections, geometric and atmospheric) and processing where it was used the method of supervised classification, these results were validated through the index statistical Kappa values between 0,79 % and 0,92 % accuracy. The calculation of five indicators of the natural subsystem was carried out, for which the land use change information was used, as well as algorithms and the superposition of vector layers in software. For the elaboration of the strategic guidelines, the most significant changes present were considered. The results showed that the coverage with the greatest loss was bare soil with 15 546,29 ha, reducing to 6 134,38 ha in 2019, due to the increase in grassland and agricultural areas, being grasslands the coverage with the greatest increase in its surface, presenting a change rate of 1,95 %. The highest anthropization rate was in 2019 with 30 %. In addition, about 27 % of the total area of the canton is in some category of conservation and natural protection. Despite this percentage of natural areas, it was evidenced that there is a reduction in areas of páramo and forests so guidelines were developed where sustainable management programs of grasslands are executed, the possible establishment of new protection areas and integration programs with communities to slow the growth of grasslands. In relation to the above, it is pointed out that grasslands are the coverage with the greatest increase and the largest area at present, because livestock is one of the main factors of economic production in the canton.

Keywords: Geographic Information Systems, Multitemporal Analysis, Natural Subsystem, Territorial Ordering.

1. INTRODUCCIÓN

Los seres humanos en las últimas décadas han generado una constante presión sobre los recursos naturales, generando grandes impactos, siendo la mayoría de ellos negativos como es la alteración de los procesos naturales, pérdida de hábitat de especies, reducción de los recursos forestales, incremento de la erosión y pérdida de la fertilidad de los suelos (Cuevas *et al.*, 2009), lo cual ha generado cambios en el uso del suelo, de forma específica se evidencia las alteraciones de forma antrópica en áreas de bosque para después destinar estos espacios al uso agrícola, industrial o al desarrollo urbano que actualmente es uno de los mayores desafíos ambientales (Montaño, 2018).

En este contexto la planificación y gestión del uso del suelo es de fundamental importancia, puesto que nos permite reconocer las relaciones existentes entre el crecimiento de la población, la economía y protección de la cobertura vegetal y del suelo que son la base de apoyo para la existencia de biodiversidad y muchos de los procesos naturales de los que depende la vida (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2004). No obstante el Ecuador ha pasado por muchos cambios repentinos en el tema de políticas públicas, como es el caso de adoptar nuevos preceptos constitucionales, creando una ruptura de un modelo económico tradicional por un modelo de recuperación de la institucionalidad y una buena planificación y desarrollo territorial del país (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018).

Ecuador presenta una tasa anual de deforestación neta de 0,48 % para el periodo 2014-2016 con una deforestación neta anual promedio de 61 112 ha/año, asimismo en la provincia de Loja se presenta una deforestación neta anual promedio de 2 070 ha/año donde se evidenció que el 96,2 % de la deforestación ocurre debido a cambios de bosque a tierra de uso agropecuario (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2017). El cantón Saraguro

es un territorio que ha presentado acelerados cambios de usos del suelo en su territorio, donde se aprecia la expansión de la frontera agrícola y zonas de pastizales, reduciendo principalmente zonas de páramo y bosques naturales (Sánchez, 2015).

El estudio y análisis de imágenes satelitales, resulta de gran utilidad debido a que nos permite conocer ¿Cómo se han modificado los diferentes usos del suelo? y ¿Cómo han afectado estos cambios al subsistema natural?, información muy pertinente para realizar el cálculo de los indicadores del subsistema natural que juegan un rol fundamental en la ordenación del territorio, debido a que permiten conocer cómo funciona nuestro entorno y a su vez permite identificar los cambios, problemáticas y potencialidades que enfrentan los recursos naturales del territorio (Palacio *et al.*, 2004), permitiendo así el planteamiento de lineamientos estratégicos con la finalidad de aportar al Ordenamiento Territorial del cantón Saraguro.

Este proyecto de investigación tiene como fin generar un beneficio para el Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Saraguro, al proporcionar la información correspondiente a los cambios de uso de suelo del cantón que contribuirá como un diagnóstico de la realidad actual del área de estudio. Además, la información generada aportará a un proyecto de mayor magnitud que se está desarrollando en el Centro de Investigaciones Territoriales (CIT) de la Universidad Nacional de Loja, con el objetivo de generar una propuesta de uso y gestión del suelo con base en la planificación del medio físico, que faculte la construcción del modelo territorial rural y que oriente los procesos de ordenamiento territorial de los GADs de la provincia de Loja.

La presente investigación se llevó a cabo con el fin de “Contribuir con información multitemporal de la cobertura y uso de suelo mediante técnicas de teledetección, para estimar los indicadores del subsistema natural del periodo 1989 - 2019 como insumo para

el diagnóstico de los planes de ordenamiento territorial en el cantón Saraguro, provincia de Loja”, en base a los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los cambios de cobertura y uso de suelo del cantón Saraguro en el periodo 1989 – 2019.
- Determinar los indicadores de tasa de deforestación, tasa de cambio en vegetación y uso del suelo, relación cobertura natural/cobertura antrópica, extensión de frontera agrícola, áreas naturales protegidas en función de los cambios de uso de suelo.
- Establecer lineamientos estratégicos para la atenuación de los cambios significativos en el uso de suelo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cambio de uso del suelo

La cobertura de suelo está relacionada directamente con todo el material físico existente sobre la superficie terrestre, por otra parte, el término “uso del suelo” se refiere a todas las acciones derivadas de las diferentes actividades humanas en un territorio. A pesar de las diferencias, ambos conceptos se encuentran estrechamente relacionados, por tal razón en la mayoría de los proyectos combinan el mapeo de uso y la cobertura del suelo (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2020).

El cambio de uso de suelo surge como el resultado de las actividades del ser humano a través del tiempo sobre la cubierta del suelo, sea para la industria, construcción de infraestructura, minería, agricultura, pastoreo, etc., lo que genera graves impactos ambientales donde se ve afectada la biodiversidad y la humanidad (Pinos, 2016). Una de las mayores preocupaciones en Ecuador es el cambio de uso del suelo, debido a la presión ejercida sobre los bosques nativos. Por otra parte, uno de los factores más influyentes es la expansión de la frontera agrícola debido a la distribución demográfica del país (Barrantes, Chávez y Vinueza, 2000).

Ecuador en los últimos años ha experimentado fuertes cambios en el uso de suelo. Principalmente por el avance de la frontera agrícola, incluyendo los pastizales y un acelerado crecimiento de las áreas urbanas, siendo estas actividades las que mayor presión ejercen sobre el territorio, generando el desplazamiento total de montañas, deforestación de los bosques por lo que origina cambios ecológicos y sociales (Pinos, 2016).

2.2. Los Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son sistemas que integran la tecnología informática, las personas e información geográfica donde cada uno de estos sistemas se encuentra conectado y su finalidad es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados. De tal manera que la información espacial puede ser aprovechada progresivamente, incluso en dispositivos portátiles que permiten que estos sistemas se adapten al trabajo en campo, ayudándose de otros sistemas de navegación, por lo que los SIG son una herramienta sumamente útil y clave para muchos análisis (Olaya, 2014).

Según Chuvieco (2008), “la teledetección es la técnica que permite la obtención de imágenes de la superficie terrestre a partir de sensores aéreos o espaciales” y a su vez nos permite la obtención de datos sobre el territorio, donde algunos de los datos pueden ser accesibles en tiempo real, por lo que es importante recurrir a un ordenador electrónico, debido a que permiten ampliar la capacidad de análisis y ayudan a elaborar una interpretación rápida del problema de estudio.

2.3. Análisis multitemporal para determinar el cambio de uso del suelo

El análisis multitemporal es un estudio de carácter espacial donde se realiza la comparación de las coberturas representadas en dos imágenes satelitales o entre mapas de un mismo lugar con respecto a diferentes fechas, de tal manera que se pueda evaluar los diferentes cambios en cada una de las coberturas que han sido clasificadas (Chuvieco, 2008). Para realizar este análisis del cambio de uso del suelo es necesario el uso de imágenes satelitales que son la representación visual de los datos reflejados por la superficie terrestre que se obtienen al capturar la radiación emitida por la superficie mediante un sensor existente en un satélite artificial; estos datos son emitidos hacia una

estación presente en la Tierra donde son procesados y convertidos en imágenes, lo que nos permite ampliar nuestro conocimiento de las características de la Tierra a diferentes escalas espaciales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013).

Existen tres tipos de imágenes satelitales que son obtenidas mediante un sensor digital existente en un satélite.

a) Imágenes pancromáticas

Son aquellas que son captadas por medio de un sensor digital que mide la reflectancia de energía en la mayor parte del espectro electromagnético, disponen de una sola banda espectral y se obtiene como resultado una imagen que usualmente se muestra en una escala de grises (Labrador *et al.*, 2012; Sánchez, 2012).

b) Imágenes multiespectrales

Son imágenes que tiene asociados valores numéricos a cada pixel, son el producto más útil en la actualidad ya que nos proporciona la firma espectral de los diferentes elementos existentes en la imagen. Mientras mayor sea el número de bandas proporcionados por el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos existentes en la imagen. Gracias a estas imágenes, es posible distinguir los elementos de la superficie terrestre como las rocas superficiales y el suelo debido a su composición, así como también la estimación de la profundidad de agua en zonas litorales, por lo que este tipo de imágenes son de fundamental importancia en la actualidad, puesto que se alcanza un mayor detalle en la imagen (Sánchez, 2012).

c) Imágenes hiperespectrales

Este tipo de imágenes se caracterizan por tener información en un gran número de bandas, lo que permite detectar características y diferencias muy agudas entre los rasgos de la superficie, de manera especial en vegetación, suelo y rocas. Cabe destacar que estas imágenes son muy similares a una fotografía.

De la misma forma es importante conocer los tipos de resolución de imágenes satelitales que según Labrador *et al.*, (2012) los clasifica en:

- **Resolución espacial**

Es una dimensión de la distancia angular o lineal más pequeña de la superficie de la tierra que es captada por un sensor remoto y está representada por un píxel que se puede observar en la imagen medida en metros sobre el terreno, lo cual depende de la altura del sensor con respecto a la superficie terrestre, mientras mayor resolución espacial, menos superficie representada en un píxel y viceversa.

- **Resolución espectral**

Es el número y ancho de bandas espectrales que es capaz de captar un sensor, si existe un incremento en la resolución espectral se obtendrá un número mayor de bandas espectrales y viceversa.

- **Resolución radiométrica**

Se refiere al máximo número de niveles digitales que son detectados por un sensor. Esta resolución es similar al número de tonalidades de gris en una fotografía en blanco y negro ya que ambos se relacionan con el contraste.

- **Resolución temporal**

Es la frecuencia con la que pasa un satélite sobre un punto específico de la superficie terrestre (Sánchez, 2012). Además, es importante conocer la existencia del satélite LANDSAT que inicio sus investigaciones en el año de 1962 con el apoyo de ciertas agencias federales de los Estados Unidos, utilizando el nombre de Programa Satelital EARTS (Earth Resource Technology Satellite). Todo el éxito del programa se debe a factores como la combinación de sensores con bandas espectrales que tienen como finalidad la observación de la superficie terrestre (Rodríguez y Arredondo, 2005).

Las imágenes obtenidas de este satélite se caracterizan por la variedad de bandas que las componen. El primer satélite fue enviado en 1972 y desde entonces existe una serie de satélites Landsat que han ido evolucionando como se muestra a continuación (Sánchez, 2012) (ver Tabla 1):

Tabla 1. Evolución de satélites Landsat

Satélite	Lanzamiento	Notas
Landsat 1	1972	Primero de la serie, se llamó originalmente Earth Resources Technology Satellite 1. Estuvo activo durante casi tres años y fue operado por la NASA Incorporaba un escáner multiespectral (MSS) de cuatro canales.
Landsat 2	1975	De características similares a Landsat 1 y estuvo activo por cerca de 7 años Operado por la NASA.
Landsat 3	1978	Tenía el mismo diseño de Landsat 2 estuvo activo por unos 5 años y fue operado por la NASA A diferencia de sus antecesores incluyó además un sensor en una banda térmica pero este instrumento falló al poco tiempo del despliegue del satélite.
Landsat 4	1982	Operado por Earth Observation Satellite Company (EOSAT).

Satélite	Lanzamiento	Notas
		Fue el primero en incluir un sensor Thematic Mapper (TM) de 7 bandas, una de estas termal.
Landsat 5	1984	Idéntico a Landsat 4 Fue operado por EOSAT y posee el récord como el satélite de observación terrestre de mayor tiempo de actividad en la historia con 29 años de servicio. Transmitió más de 2,5 millones de imágenes.
Landsat 6	1993	Fue lanzado el 5 de octubre de 1993 pero no alcanzó su órbita.
Landsat 7	1999	Incluye una banda en pancromático con 15 m de resolución espacial Aún está activo pero la calidad de sus imágenes bajo al ocurrir una falla en el Scan Line Corrector (SLC) en mayo de 2003 que provoca que se pierdan líneas de escaneo que suman un 22 de cada escena Es operado por el USGS
Landsat 8	2013	Activo desde febrero de 2013 Incorpora dos sensores por una parte el Operational Land Imager (OLI) con 9 bandas que incluyen una pancromática y, por otro, el Thermal Infrared Sensor (TIRS) con dos bandas.
Landsat 9	2021	Lanzamiento tentativo para septiembre de 2021 Lo construirá la NASA y sus datos serán administrados por el USGS

Fuente: Rodolfo (2017); Servicio Geológico de los Estados Unidos (2021)

Para un adecuado uso de estas imágenes satelitales se utiliza la composición satelital de imágenes Landsat que corresponde a una imagen compuesta por la combinación de tres bandas que son diferentes del sensor y cada una de ellas ubicada en tres canales de proyección en pantalla: Rojo (R), Verde (G) y Azul (B). El panorama RGB da como resultado una imagen a color (Rodolfo, 2017). A continuación, se muestra el uso de algunas de las combinaciones más comunes y las diferentes aplicaciones de los sensores (ver Tabla 2 y 3):

Tabla 2. Combinaciones y uso de las composiciones Landsat 8

Combinación RGB en LANDSAT 8	Aplicación principal / Descripción
431	Batimetría Permite destacar objetos en cuerpos de agua
432	Color Natural Es una composición que se aproxima al color real de las coberturas ante la vista humana. Su equivalente en Landsat 7 es la combinación 321
543	Infrarrojo Color Esta combinación da como resultado una imagen muy similar a la tradicional fotografía aérea infrarrojo color. Es útil para estudios de vegetación y monitoreo de drenajes. La vegetación saludable tiende a una apariencia rojo brillante.
562	Combinación útil para distinguir vegetación saludable
564	Combinación útil para diferenciar tierra agua y para destacar áreas de bosque
652	Agricultura
654	Análisis de vegetación
742	Geología Permite destacar elementos geológicos
753	Natural con remoción atmosférica
754	Combinación de infrarrojos
764	Permite destacar formaciones rocosas. Útil para distinguir áreas urbanas.
765	Penetración Atmosférica. Debido a que no incorpora bandas del espectro visible esta combinación reduce las influencias atmosféricas en la imagen.

Fuente: Rodolfo (2017)

Tabla 3. Sensores MS, TM y ETM+ y sus Aplicaciones

Número de bandas	Faja espectral (um)	Aplicaciones
1	0,45 a 0,52 (azul)	Mapeo de aguas costeras Diferenciación entre suelo y vegetación Diferenciación entre vegetación conífera y decidua
2	0,52 a 0,60 (verde)	Mapeo de vegetación Calidad de agua
3	0,63 a 0,90 (rojo)	Absorción de clorofila Diferenciación de especies vegetales Áreas urbanas y uso del suelo Agricultura
4	0,76 a 0,90 (infrarrojo cercano)	Delimitación de cuerpos de agua Mapeo geomorfológico y geológico Identificación de áreas de incendios Agricultura y vegetación
5	1,55 a 1,75 (infrarrojo termal)	Uso del suelo Medición de la humedad en la vegetación Diferenciación entre nubes y nieve Agricultura
6	10,40 a 12,50 (infrarrojo termal)	Mapeo de stress térmico en plantas Corrientes marinas Propiedades termales del suelo
7	2,08 a 2,35 (infrarrojo medio)	Identificación de minerales Mapeo hidrotermal

Fuente: INEGI (1993)

Para determinar el cambio de uso del suelo se emplea en primera instancia el pre procesamiento digital de imágenes que implica la corrección geométrica que consiste en

que las imágenes satelitales eliminen cualquier tipo de distorsión geométrica indeseable ocasionada por la geometría del sensor, así como también la asignación de coordenadas a cada pixel (Sánchez, 2012) y la corrección radiométrica que busca mejorar la precisión de las medidas de reflectancia que se obtuvieron mediante un sensor remoto. Están direccionados a eliminar ruidos en los niveles digitales (ND) de la imagen compensando las diferencias en los valores de radiancia y la transformación de los ND a valores de radiancia y reflectancia usando modelos de atmósfera y geometrías de observación (Administración de Parques Nacionales de Argentina, 2005).

También se utiliza el procesamiento digital de imágenes que es la aplicación de técnicas matemáticas, estadísticas y computacionales que permiten mejorar, corregir, analizar y extraer información a partir de las imágenes captadas por los sensores digitales. Este proceso permite realizar operaciones de alta complejidad, muy costosas o que son inaccesibles para el análisis visual, tiene como ventaja brindar una rápida comparación de fenómenos multitemporales debido a la gran accesibilidad de información que posee (Sánchez, 2012). En esta fase considera la fase de entrenamiento cuando los datos ya hayan pasado las correcciones requeridas, se realiza la definición de clases mediante dos métodos complementarios en las imágenes satelitales:

a) Clasificación no supervisada

En esta clasificación no se requiere conocer el área de estudio, por lo que se centra más en la interpretación, aunque es necesario establecer el número de clases que se desea y se utilizan algoritmos matemáticos de forma automática (Sarría, 2006).

b) Clasificación supervisada

Esta clasificación requiere el conocimiento del área de estudio, que se realiza por trabajos de campo o experiencia, esta relación nos permite delimitar áreas representativas de cada categoría, donde estas áreas se denominan “áreas de entrenamiento”, con la utilización de estas áreas se entrena al software a utilizar para que reconozca las categorías y después sea posible asignar aquellas categorías al resto de píxeles en función de los ND de los píxeles acordes (Chuvieco, 2008). Por otra parte en la fase de asignación es donde se adjudica a cada uno de los píxeles a una clase ya definida, donde se pueden utilizar distintos clasificadores que se describen a continuación (Sarría, 2006):

a) Clasificación por mínima distancia

Esta clasificación no es muy buena debido a que sobre clasifica la imagen, es decir ninguno de los píxeles queda sin clasificar.

b) Clasificación por paralelepípedos

Se utilizan paralelepípedos tomando en cuenta valores máximos y mínimos de reflectancia para cada una de las bandas, de esta manera se definen las fronteras correspondientes a cada clase.

c) Clasificación por máxima verosimilitud

Se realiza el cálculo de la media y desviación típica de cada clase y utiliza modelos de distribución de probabilidad. Esta clasificación puede realizarse de manera automática o se puede establecer algún criterio que permita asignar píxeles a una clase únicamente si la probabilidad corresponde o es superior a determinado umbral.

d) Clasificaciones multitemporales

Si se busca realizar una distinción entre clases cuya respuesta espectral varía con el tiempo como es el caso de la cobertura y uso de suelo, se debe integrar imágenes en diferentes fechas. Es imprescindible realizar una buena corrección atmosférica de las imágenes al utilizar esta clasificación.

En el post procesamiento digital de imágenes y validación de resultados la clasificación debe ser la adecuada donde se realiza una evaluación teórica del error en base a las características del algoritmo de clasificación o analizar una serie de áreas test permitiendo una estimación más realista de los errores cometidos en la clasificación (Chóez, 2018). Varios autores consideran realizar un muestreo de 50 píxeles aproximadamente por clase temática, así como también realizar el muestreo utilizando la clase con menor extensión para marcar la proporción del área a muestrear para las demás categorías (Chuvienco, 2008).

Para verificar una imagen ya clasificada se realiza una matriz de confusión donde se toma primero los puntos de verificación en los que se conoce la cobertura real mediante la validación realizada en campo. Los valores de la tabla se expresan en píxeles y constituyen la relación entre las clases reales en las filas y las clases obtenidas en las columnas, los diagonales de esta matriz muestran los puntos acordes entre la clasificación obtenida y la realidad (Chuvienco, 2008; Sarría, 2006).

2.4. Importancia de los indicadores del subsistema natural para el ordenamiento territorial

Los indicadores del subsistema natural pertenecen a un grupo mayor de indicadores para el ordenamiento territorial, donde surgió la necesidad de crear indicadores referentes al

medio natural, económico y social, permitiendo así la generación de fuentes de datos correspondientes a cada indicador y que los mismos estén orientados a la caracterización del territorio (Palacio *et al.*, 2004). Es por ello la importancia en este caso del subsistema natural, mismo que está conformado los elementos, procesos y recursos del medio natural; estos indicadores juegan un papel fundamental en la ordenación del territorio, puesto que nos permite conocer el funcionamiento de nuestro entorno, a la vez que permite identificar problemas, cambios y potencialidades en cualquier territorio (Palacio *et al.*, 2004).

2.4.1. Indicadores del subsistema natural

El objetivo principal del subsistema natural o el entorno físico es el conocimiento de cómo esté se encuentra y cuál es su funcionamiento, además comprender que problemas afronta el territorio y cuáles son las potencialidades que tiene de tal manera que a futuro se puedan establecer medidas y estrategias de conservación y protección. Para caracterizar este subsistema existen algunos indicadores específicos (ver Tabla 4) que van a permitir la obtención de datos donde se evidencie la vulnerabilidad del territorio frente a ciertas actividades antrópicas, el estado actual y los cambios de uso del suelo, entre otros factores que aportaran al ordenamiento y gestión de cualquier territorio (Palacio *et al.*, 2004).

Tabla 4. Indicadores del Subsistema Natural

Indicador	Descripción
Tasa de deforestación	Indica la presión ejercida sobre los recursos forestales.
Tasa de cambio en vegetación y uso del Suelo	Es uno de los indicadores más importantes, puesto que muestra los cambios en la cobertura vegetal, tomando en cuenta únicamente los de carácter antrópico.
Relación cobertura	Expresa la relación existente entre la cobertura natural del terreno con respecto a las coberturas resultantes de las

Indicador	Descripción
Natural/cobertura antrópica	actividades antrópicas, puesto que permite aproximarnos al grado de impacto generado por esta relación.
Extensión de frontera agrícola	Este indicador está relacionado con los anteriores, determina el crecimiento de la frontera agrícola en un periodo de tiempo determinado.
Áreas Naturales Protegidas	Cuantifica las áreas naturales protegidas existentes.

Fuente: Palacio *et al.* (2004)

2.4.2. Ordenamiento territorial

El ordenamiento territorial es un proceso y una estrategia de planificación que permite la organización de actividades y recursos existentes en un determinado territorio; a través del cual se busca establecer a corto, mediano o largo plazo una adecuada organización del uso y ocupación del territorio, acorde a las potencialidades y limitaciones de este. Aquello se concreta y se expresa mediante los Planes De Ordenamiento Territorial (PDOT) a largo plazo y las estrategias mediante las cuáles se actuará sobre la realidad de territorio para evolucionar hacia el modelo deseado (Palacio *et al.*, 2004).

Para una correcta planificación del territorio, partiendo de objetivos bien definidos, las variables a considerar para la toma de decisiones muchas veces dependen de la disponibilidad de información. Sin embargo, se debe incluir aspectos ecológicos, sociales, económicos y legales (Faustino, 2008).

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El cantón Saraguro, está ubicado en la provincia de Loja al Sur del Ecuador, limita al Norte con la provincia del Azuay, al Sur con el cantón Loja, al Este la provincia de Zamora Chinchipe y al Oeste con la provincia de El Oro, tiene una extensión de 108 270,25 ha (Figura 1).

Actualmente está integrado por diez parroquias rurales: San Pablo de Tenta, El Paraíso de Celén, Selva Alegre, Lluzhapa, Manú, San Sebastián de Yúluc, Urdaneta, San Antonio de Cumbe, El Tablón y Sumaypamba. Además Saraguro como cabecera cantonal está constituido por 13 comunidades indígenas urbanas: Chukidel – Ayllullakta – Lagunas; Iincho – Totoras – Ayllullakta; Puente Chico – Payama; Yucucapac; Quisquinchir – Ayllullakta; Tuncarta; Berbenas – Tucalata – Pasabón; Gunudel – Gulakpamba; Oñacapac; Tambopamba; Tambopamba; Ñamarín; La Matara y Gera (Encalada, 2020).

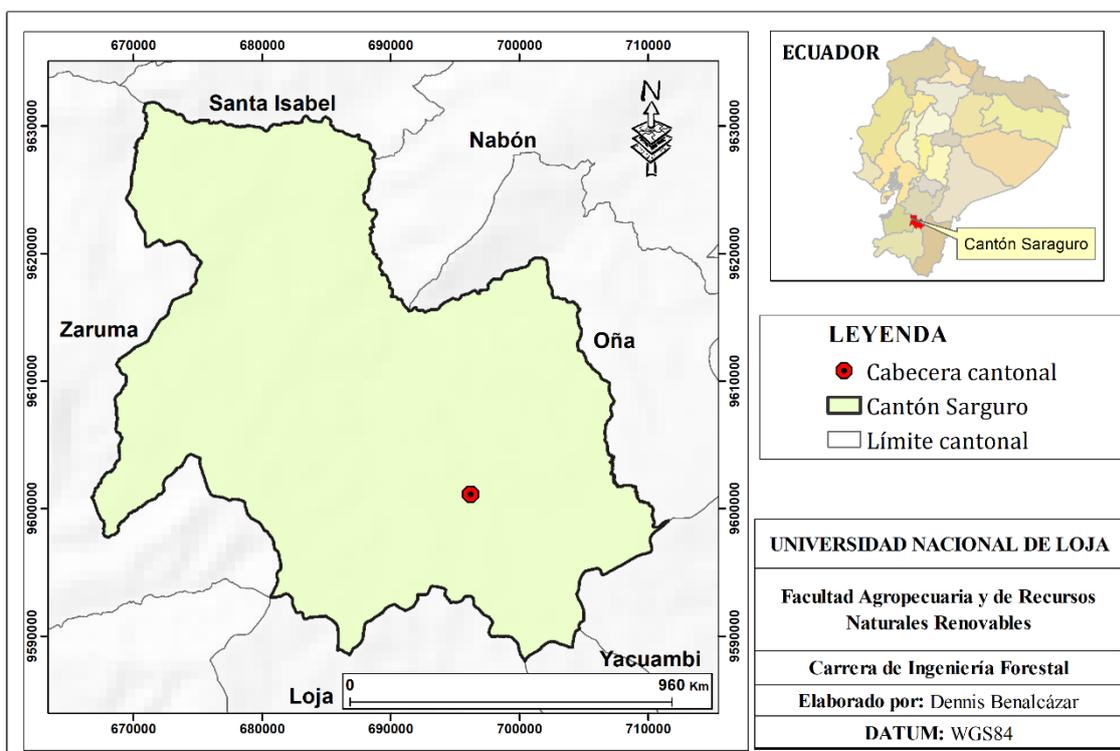


Figura 1. Mapa de ubicación del cantón Saraguro

3.2. Identificación de los cambios de cobertura y uso de suelo

Se identificó y detalló los cambios de usos de suelo que se han suscitado en el cantón Saraguro por medio de técnicas de teledetección. La presente investigación no requiere ningún tipo de muestra debido a que el análisis multitemporal será de toda la superficie del cantón Saraguro.

- **Recopilación de información y corrección de imágenes**

Se seleccionó información cartográfica cantonal y provincial del Ecuador en formato vectorial (shape) y a escala 1:50 000 contenida en repositorios de libre acceso del Ecuador como el Instituto Geográfico Militar (IGM): <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>, de la misma forma se descargó imágenes del satélite Landsat, contenidas en repositorios gratuitos como el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS): <https://glovis.usgs.gov/> correspondientes a los años de 1989, 1999, 2019, 2019 del cantón Saraguro (ver Tabla 5). Es importante mencionar que se consideró que las imágenes tengan el 20 % máximo de nubosidad dentro del área de estudio (Chuvieco, 2008).

Tabla 5. Sensores y fechas de las imágenes satelitales

Nave espacial	Sensor	Fecha
Landsat 5	TM	1989 – 11 - 10
Landsat 5	TM	1999 – 08 - 18
Landsat 8	OLI TIRS	2013 – 08 - 08
Landsat 8	OLI TIRS	2019 – 03 - 02

Posteriormente mediante el programa GRASS GIS 7.4.1 se realizó las correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas para cada imagen. Para lo cual se ingresó el archivo en formato shape del cantón Saraguro utilizando el comando “v.in.gdal” y

también cada una de las bandas correspondientes a cada imagen satelital, esto en formato ráster donde se utilizó el comando “*r.in.gdal*”. En el mismo software se realizó la corrección geométrica donde se ajustaron las imágenes de forma correcta para cada una de las imágenes, seguido se efectuó la corrección radiométrica convirtiendo la información de los píxeles en niveles digitales (ND) a radiancia que es captada por el sensor, por último, se realizó la corrección atmosférica para eliminar cualquier tipo de interferencia de la atmosfera donde se incluyen los porcentajes de nubes y problemas de ruido.

De igual manera para mejorar la interpretación visual y realce de las imágenes se procedió a realizar composiciones RGB de imágenes mediante la utilización de los comandos “*r.composite*” y “*r.colors*” a cada una de las bandas de las imágenes. De este modo es imprescindible mencionar que no se pudo seleccionar adecuadamente un periodo de 10 años para cada imagen como es el caso del año 2009, el cual presento un gran porcentaje de nubes superior al 50% de la superficie total del cantón por lo que no fue considerada en la presente investigación y se escogió al año 2013, el cual presento menor cantidad de nubes.

- **Clasificación digital de las imágenes satelitales**

Se efectuó la clasificación supervisada, tomando como referencia las categorías definidas por el protocolo metodológico para la elaboración del Mapa de Cobertura y uso de la Tierra del Ecuador Continental (MAE y MAGAP, 2015), considerando las clases de coberturas de primer y segundo nivel se agregó un tercer nivel denominado “Nivel de Trabajo” que se utilizó para asignar la fase de entrenamiento donde se digitalizó áreas de entrenamiento para cada tipo de cobertura. Así mismo, las imágenes a trabajar a nivel de región se considerará el tamaño de pixel, es decir de 30 m x 30 m para el satélite

Landsat 5 (años 1989 – 1999) y el tamaño de pixel remuestreado a 15 m para el caso de los satélites Landsat 7 y 8 (años 2013 – 2019) (Chuvienco, 2008).

En cuanto al tercer nivel de coberturas denominado Nivel de Trabajo se aplicaron todas las categorías, la cobertura de zona desértica se incluyó dentro de "Suelo descubierto" En la Tabla 6, se muestran los usos de suelos y coberturas vegetales I y II de interés adaptadas del MAE para el presente estudio.

Tabla 6. Clases de Coberturas Adaptado

Nivel I	Nivel II	Nivel de Trabajo
Bosque	Bosque nativo	Bosque
Tierra Agropecuaria	Plantación forestal Cultivo anual Cultivo semipermanente Cultivo permanente Mosaico agropecuario Pastizal	Agrícola Pastizal
Vegetación Arbustiva y herbácea	Vegetación arbustiva Vegetación herbácea Páramo	Vegetación arbustiva Vegetación herbácea Páramo
Cuerpo de agua	Natural Artificial	Cuerpo de agua
Zona antrópica	Área poblada Infraestructura	Zona antrópica
Otras tierras	Área sin cobertura vegetal Zona Desértica Glaciar	Suelo descubierto

Fuente: Adaptado del protocolo metodológico para la elaboración del Mapa de Cobertura y uso de la Tierra del Ecuador Continental. (MAE y MAGAP, 2015).

Se realizó el método de clasificación supervisada, donde las áreas de entrenamiento se digitalizaron de forma manual para cada una de las imágenes satelitales, por medio de la diferencia de tipos de cobertura, seguido se seleccionó las zonas donde ya se conoce la cobertura, para identificar coberturas específicas se aplicó combinación de bandas RGB, en el caso de las imágenes del satélite Landsat 5 se utilizó las combinaciones (432),(321), mientras que para Landsat 8 las combinaciones más utilizadas fueron (654), (564) y (753). Para determinar las áreas de entrenamiento se utilizó una capa de tipo polígonos trazados sobre la imagen satelital, la misma que contiene su respectiva tabla de atributos conforme al tipo de clase (Olaya, 2014).

Estos archivos vectoriales en formato (shape) de las áreas de entrenamiento de cada imagen fueron ingresados al programa QGIS 3.14, donde se lo transformó a formato ráster. Posteriormente se crearon grupos y subgrupos con las bandas respectivas de cada imagen, usando el comando *"i.group gr"*. Luego en el mismo programa se procedió a subir los archivos ráster de las áreas de entrenamiento de cada imagen usando el comando *"r.in.gdal in"*.

Finalmente se realizó la clasificación supervisada mediante el comando *"i.gensigset gr"* con el fin ingresar los datos y reconocer los grupos y subgrupos de la imagen satelital, seguido se aplicó dos algoritmos de clasificación, Máxima Verosimilitud con el comando *"i.maxlik"* y Máxima Secuencialidad a posteriori con el comando *"i.smap"*, que es el algoritmo de clasificación usado por el software para la identificación y cuantificación de cada cobertura de uso del suelo. Una vez se tuvo las imágenes clasificadas se escogió entre los dos algoritmos de clasificación, siendo el de Máxima Secuencialidad a posteriori el que mejores resultados mostró debido a que este algoritmo realiza una clasificación de los pixeles por regiones y no de manera individual.

Localización de cambio de uso de suelo

Se cuantificó el cambio de coberturas y uso del suelo a través de las imágenes ya clasificadas considerando cada uno de los periodos. A la información recolectada se la ingresó en la siguiente matriz (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Matriz de Cuantificación de Coberturas y Uso del Suelo

Nº	Uso de suelo	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
		Ha (%)	Ha (%)	Ha (%)
1	Bosque			
2	Zona desértica			
3	Vegetación arbustiva			
4	Agrícola			
5	Pastizal			
6	Vegetación herbácea			
7	Otros usos			
8	Nubes			
9	Otros cultivos			
	Total	Σ Periodo 1	Σ Periodo 2	Σ Periodo n

Fuente: Rodriguez (2011)

• Verificación de resultados

Después de haber realizado el mismo procedimiento para cada una de las imágenes, se obtuvieron cuatro imágenes ya clasificadas correspondientes a los cuatro años de estudio, estas imágenes se exportaron al programa QGIS 3.14 donde se verificó y validó la clasificación mediante la matriz de confusión. Es decir, se realizó un muestreo aleatorio simple de 150 puntos de control de las cuatro imágenes ya clasificadas, en el caso de las tres primeras imágenes estos puntos se generaron mediante el software QGIS 3.14, donde se los colocó en la matriz de confusión y se comparó los resultados obtenidos de la clasificación con las imágenes reales, para lo cual se utilizó las imágenes satelitales correspondientes a cada año de estudio. También se utilizó como referencia información

de cobertura y uso del suelo del Ecuador (2016) en formato shape a escala 1:25 000 que se encuentra en la página web del Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS): <http://metadatos.sigtierras.gob.ec:8080/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/home>, y la información de cobertura vegetal del Ecuador de los años 1982, 1990 y 2002 a escala 1:250 000, ubicada en el portal web del Sistema Nacional de Información (SNI) del Ecuador: <https://sni.gob.ec/coberturas> (Ver Tabla 8).

Es importante mencionar que se realizaron dos salidas de campo donde se tomaron 30 puntos de control de forma aleatoria a lo largo del recorrido de la vía principal panamericana que atraviesa el cantón, así como también dentro de los poblados y lugares donde se concentra cada cobertura de uso de suelo. Por lo que estos puntos fueron incluidos en la muestra total de 150 puntos referentes únicamente al año más actual que es 2019 (Anexo 1, 2, 3 y 4).

Tabla 8. Matriz de confusión

Real	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase n	Total	Exactitud usuario	Error comisión
Clasificada							
Clase 1	X_{11}				X_{1+}	X_{11}/ X_{1+}	$1-X_{11}/ X_{1+}$
Clase 2		X_{22}			X_{2+}	X_{22}/ X_{2+}	$1-X_{22}/ X_{2+}$
Clase 3			X_{33}		X_{3+}	X_{33}/ X_{3+}	$1-X_{33}/ X_{3+}$
Clase n				X_{nn}	X_{n+}	X_{nn}/ X_{n+}	$1-X_{nn}/ X_{n+}$
Total	X_{+1}	X_{+2}	X_{+3}	X_{+n}	X_{ij}		
Exactitud productor	X_{11}/ X_{+1}	X_{22}/ X_{+2}	X_{33}/ X_{+3}	X_{nn}/ X_{+n}			
Error omisión	$1-X_{11}/ X_{+1}$	$1-X_{22}/ X_{+2}$	$1-X_{33}/ X_{+3}$	$1-X_{nn}/ X_{+n}$			

Fuente: Chuvieco (2008)

Posteriormente se cuantificó la exactitud global en la que se calcularon los siguientes parámetros para cada uno de los años (Anexo 5, 6, 7 y 8):

- **Errores de omisión:** Para determinar elementos que pudiesen pertenecer a dicha categoría, pero se encuentren incluidos erróneamente en otra.
- **Errores de comisión:** Para determinar elementos que no pertenecen a dicha categoría, pero se encuentra en ella.
- **Exactitud del usuario:** Va en relación inversa a los errores de comisión.
- **Exactitud del productor:** Va en relación inversa a los errores de omisión.

Posteriormente se aplicó el coeficiente estadístico Kappa (K) (Ecuación 1) para cada imagen clasificada, donde se determinó la exactitud o el nivel de concordancia entre los datos de referencia y de clasificación del cantón Saraguro, donde los valores presentan un rango de 0 a 1, entre más se acerque a la unidad, nos indicará que la concordancia es muy alta (Chuvienco, 2008) (ver Tabla 9).

$$k = \frac{n \sum_{i=1,n} X_{ii} - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}} \quad [\text{Ec } 1]$$

Donde:

K= nivel de concordancia

n = tamaño de la muestra

X_{ii}= acuerdo entre lo observado

(X_{i+}+X_{+i}) = producto de los marginales

i= acuerdo esperado en cada categoría

Tabla 9. Categoría de concordancias de validación para el coeficiente Kappa

Rango	Concordancia
0	Nula
0,01 - 0,20	Leve
0,21 - 0,40	Aceptable

Rango	Concordancia
0,41 - 0,60	Moderada
0,61 - 0,80	Considerable
0,81 - 1,00	Casi perfecta

Fuente: Cerda y Villaroel (2008).

3.3. Cálculo de indicadores del subsistema natural

Para el cálculo de los Indicadores del Subsistema Natural se aplicó la metodología de Palacio *et al* (2004) a cada una de las imágenes correspondientes a los periodos 1989-1999, 1999-2013 y 2013-2019.

- **Tasa de Deforestación.**

Mediante la herramienta de álgebra de mapas se agregaron las coberturas de bosque y coberturas antrópicas (pastizales, cultivos y poblados) de nivel de trabajo, donde se realizó el cálculo de cambio de porcentaje de las superficies correspondientes a cada periodo, mediante la siguiente ecuación (Palacio *et al.*, 2004).

$$dn = \left(\sqrt[n]{\frac{S_2}{S_1}} - 1 \right) * 100 \quad [\text{Ec } 2]$$

Donde:

dn= Tasa de cambio

S₁ = Superficie en la fecha 1

S₂ = Superficie en la fecha 2

n = Número de años entre las dos fechas

- **Tasa de cambio de la vegetación y uso del suelo.**

Se utilizó la sobreposición geométrica de las coberturas de uso de suelo y vegetación para determinar la tasa de cambio por categoría vegetal donde se obtuvieron mapas de

cobertura vegetal para los periodos de 1989-1999,1999-2013 y 2013-2019, mediante la siguiente ecuación (Palacio *et al.*, 2004).

$$C = \left(\left(\sqrt[n]{\frac{T_2}{T_1}} \right) - 1 \right) * 100 \quad [\text{Ec } 3]$$

Donde:

C= Tasa de cambio

T₁=Año de inicio

T₂=Año actual o más reciente

n= Número de años entre T₁ y T₂

- **Relación cobertura Natural/Antrópica.**

Se utilizó el álgebra de mapas donde se agregaron las coberturas naturales que integran todas las formaciones referentes a bosques sobre las antrópicas que abarca todo lo relacionado a pastizales, cultivos y asentamientos humanos anteriormente categorizadas, esto para representar el grado de antropización del territorio donde se obtuvieron mapas de coberturas naturales y antrópicas (Palacio *et al.*, 2004).

- **Extensión de la frontera Agrícola.**

Se realizó mediante la sobreposición de mapas de las coberturas agrícolas previamente categorizadas donde indicará la extensión de la frontera agrícola en mapas de áreas agropecuarias y no agropecuarias.

- **Áreas Naturales Protegidas.**

Se realizó mediante la sobreposición de información cartográfica correspondiente a: Reservas de Biosfera, Bosques Protectores, Humedales, áreas anexas al programa Socio Bosque y parte del corredor Sangay – Podocarpus que atraviesa el cantón Saraguro. Esta información pertenece a las áreas naturales que se encuentran dentro de la zona de estudio,

donde se procedió a cuantificar la superficie de cada área natural, y se obtuvo un mapa donde muestre las áreas naturales existentes.

3.4. Lineamientos estratégicos para la atenuación de los cambios significativos en el uso del suelo

Con base a los resultados obtenidos del análisis multitemporal se procedió a elaborar lineamientos de planificación estratégica para contrarrestar los efectos generados por los distintos cambios de uso de suelo sobre la cobertura vegetal en el territorio. Por lo que se establecieron medidas de mitigación, conservación y prevención que sirvan de guía para los procesos de Ordenamiento Territorial del cantón Saraguro.

Los lineamientos de planificación estratégica están adaptados a la metodología proporcionada por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, (2012) en la que se desarrolló las siguientes fases:

- Fase de diagnóstico: En esta fase se analizó y se identificó las coberturas con mayores cambios presentados en el periodo de 1989 – 2019, determinando las posibles causas para que se hayan dado estos cambios en el uso del suelo.

- Fase de proyección estratégica: A continuación, con base a la revisión de información secundaria, el Plan de Ordenamiento Territorial de Saraguro y el diagnóstico realizado a cada cobertura, se procedió a plantear lineamientos estratégicos para las coberturas seleccionadas. Asimismo, los lineamientos están basados según la prioridad del sector afectado con mayores cambios significativos (pastizales, páramo y vegetación herbácea).

Por otra parte, es importante mencionar que se adaptó esta metodología debido a la emergencia sanitaria relacionada con la pandemia mundial precedente del virus COVID-19. Por tanto, esta metodología según la SENPLADES (2012), se realiza en

cuatro fases de planificación estratégica que consiste en primera instancia realizar un diagnóstico a través de información primaria con la realización de encuestas e información secundaria, después de aquello realizar un análisis FODA con base al análisis de las encuestas y finalmente establecer los lineamientos estratégicos.

4. RESULTADOS

4.1. Identificación de los cambios de cobertura y uso del suelo

Con base a la identificación y cuantificación de la cobertura vegetal y uso del suelo en el cantón Saraguro se evidenció que la cobertura de bosque con el 9,1 % (9 834 ha) en 1989 reduce su cobertura al 5,8 % (6 283 ha) para el año 1999, mientras que para el año 2019 se incrementa su cobertura dando un valor del 9,1 % (9 812 ha) semejante al valor inicial en 1989 donde se muestra el cambio con una cantidad mínima de hectáreas. De la misma forma la cobertura agrícola reduce su cobertura del 9,3 % (10 039 ha) en 1989 a un 9,2 % (9 941 ha) para el año de 2019. La vegetación herbácea en el año 1989 presentó un valor del 29,3 % (31 763 ha) mientras que para el año 2019 su cobertura se vio reducida al 19,5 % (21 249 ha) (Tabla 10).

Además, una de las coberturas que mayor pérdida obtuvo fue la cobertura de suelo descubierto con un 14,4 % (15 546 ha) en 1989 reduciéndose a 5,7 % (6 134 ha) para el 2019. De igual manera se evidenció que la cobertura de páramo disminuyó presentando un valor de 16,3 % (17 595 ha) para el año 1989 y 11,6 % (12 518 ha) para el año 2019. Por otra parte, los pastizales con 10,9 % (11 809 ha) en 1989 tuvieron un incremento para el año 2019 mostrando un valor de 19,5 % (21 103 ha).

Por el contrario, en el año 2019 con base a la información verificada en campo se evidenció que, en las áreas de páramo en los años 1989, 1999 y 2013, actualmente un porcentaje de estas áreas están ocupadas por plantaciones forestales principalmente de pino, así como también se observó que existe remoción y preparación del suelo para la implementación de nuevas plantaciones forestales fragmentando el páramo del cantón. Por lo que en el año 2019 se implementó una categoría de plantaciones forestales, la cual cuenta con un valor de 1,5 % (1 633 ha).

Tabla 10. Superficie y porcentaje total de las coberturas de uso del suelo en el cantón Saraguro en los años 1989, 1999, 2013, 2019.

Cobertura	Año 1989		Año 1999		Año 2013		Año 2019	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Bosque	9 834,3	9,1	6 283,3	5,8	16 831,6	15,5	9 813,0	9,1
Agrícola	10 039,0	9,3	15 711,6	14,5	7 596,9	7,0	9 941,4	9,2
Pastizal	11 809,5	10,9	16 263,7	15,0	27 271,3	25,2	21 103,7	19,5
Vegetación herbácea	31 763,7	29,3	27 463,0	25,4	23 410,7	21,6	21 249,6	19,6
Páramo	17 595,6	16,3	11 604,6	10,7	16 395,9	15,1	12 518,4	11,6
Agua	4,7	0,0	294,7	0,3	1 082,0	1,0	801,2	0,7
Zona Antrópica	3 056,7	2,8	2 523,4	2,3	3 423,3	3,2	1 149,0	1,1
Suelo	15 546,3	14,4	9 439,8	8,7	5 492,7	5,1	6 134,4	5,7
Descubierto								
Nubes	5 516,7	5,1	13 669,2	12,6	3 444,3	3,2	20 330,5	18,8
Sombras de nubes	3 094,1	2,9	5 006,3	4,6	3 310,2	3,1	3 584,9	3,3
Plantaciones							1 633,4	1,5
Total	108260,74	100,00	108259,61	100,00	108258,83	100,00	108259,43	100,00

Se verificó la información utilizando el estadístico Kappa, con la utilización de matrices de confusión (Anexo 9, 10, 11 y 12), donde el menor valor obtenido fue de 0,79 en el año de 1989 que según el nivel de concordancia es considerable, mientras que los años de 1999, 2013 y 2019 presentaron valores altos (0,84), (0,83) y (0,92) respectivamente, que de acuerdo con el nivel de concordancia son casi perfectos (Tabla 11).

Tabla 11. Resumen de valores del índice Kappa.

Años	Coefficiente Kappa
1989	0,79
1999	0,84
2013	0,83
2019	0,92

En las Figuras 2, 3, 4 y 5 se observa los mapas de cobertura y uso del suelo correspondiente a cada año de investigación, como producto final de las clasificaciones. Cabe mencionar que en todas las imágenes satelitales existía cierto porcentaje mínimo de nubes y sombras de nubes, mismas que fueron contabilizadas como otra cobertura en la clasificación y cuantificación de coberturas en cada uno de los años.

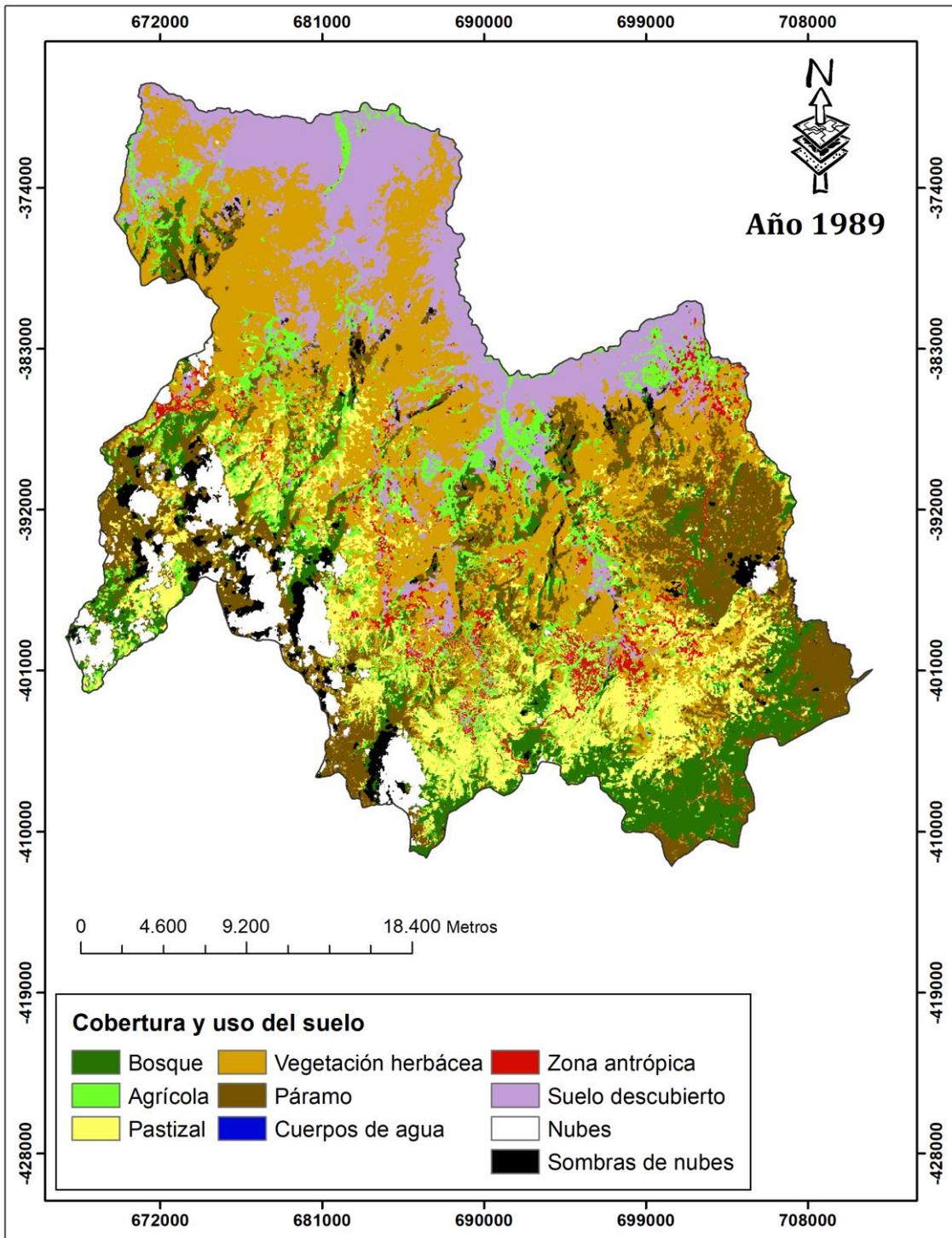


Figura 2. Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 1989

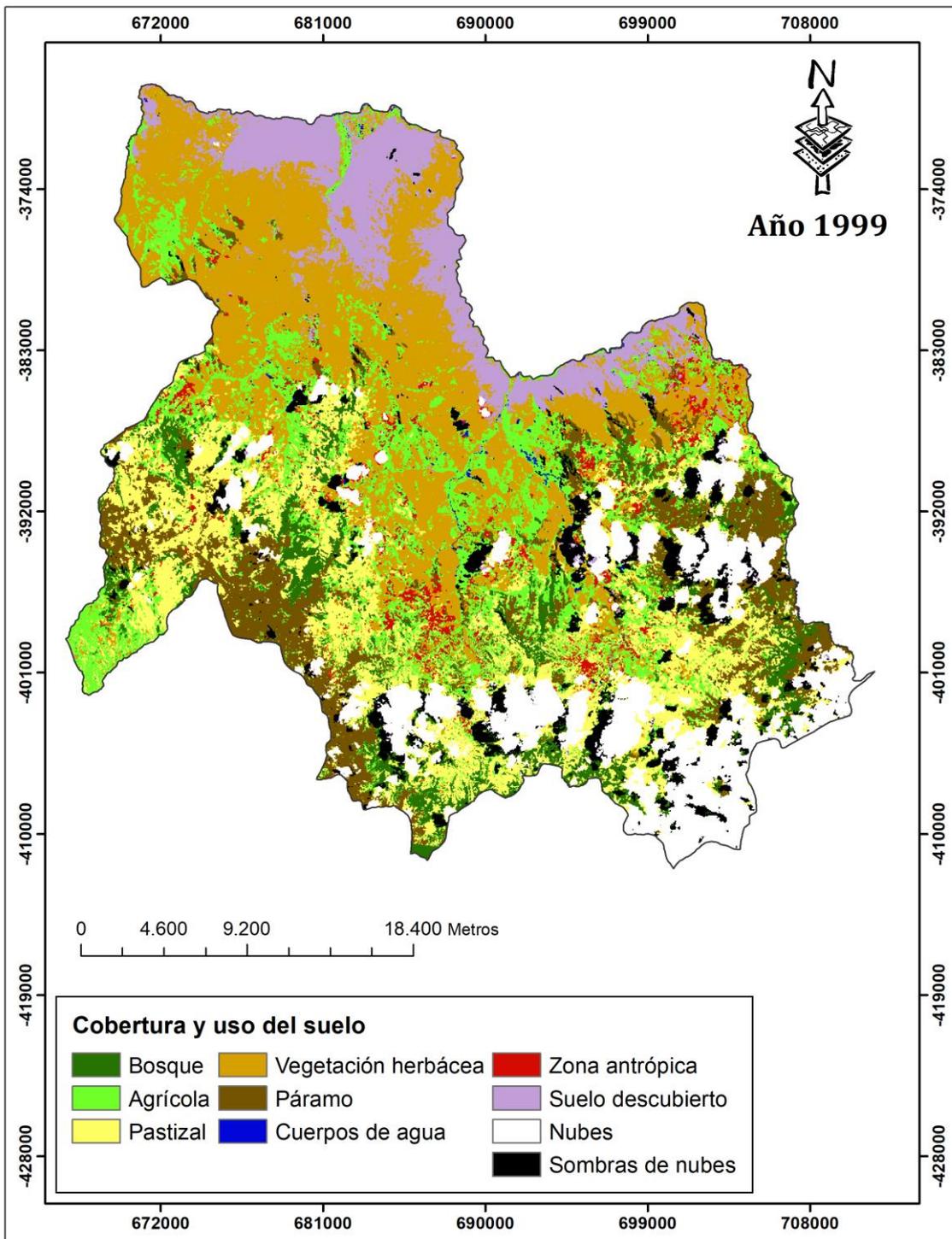


Figura 3. Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 1999

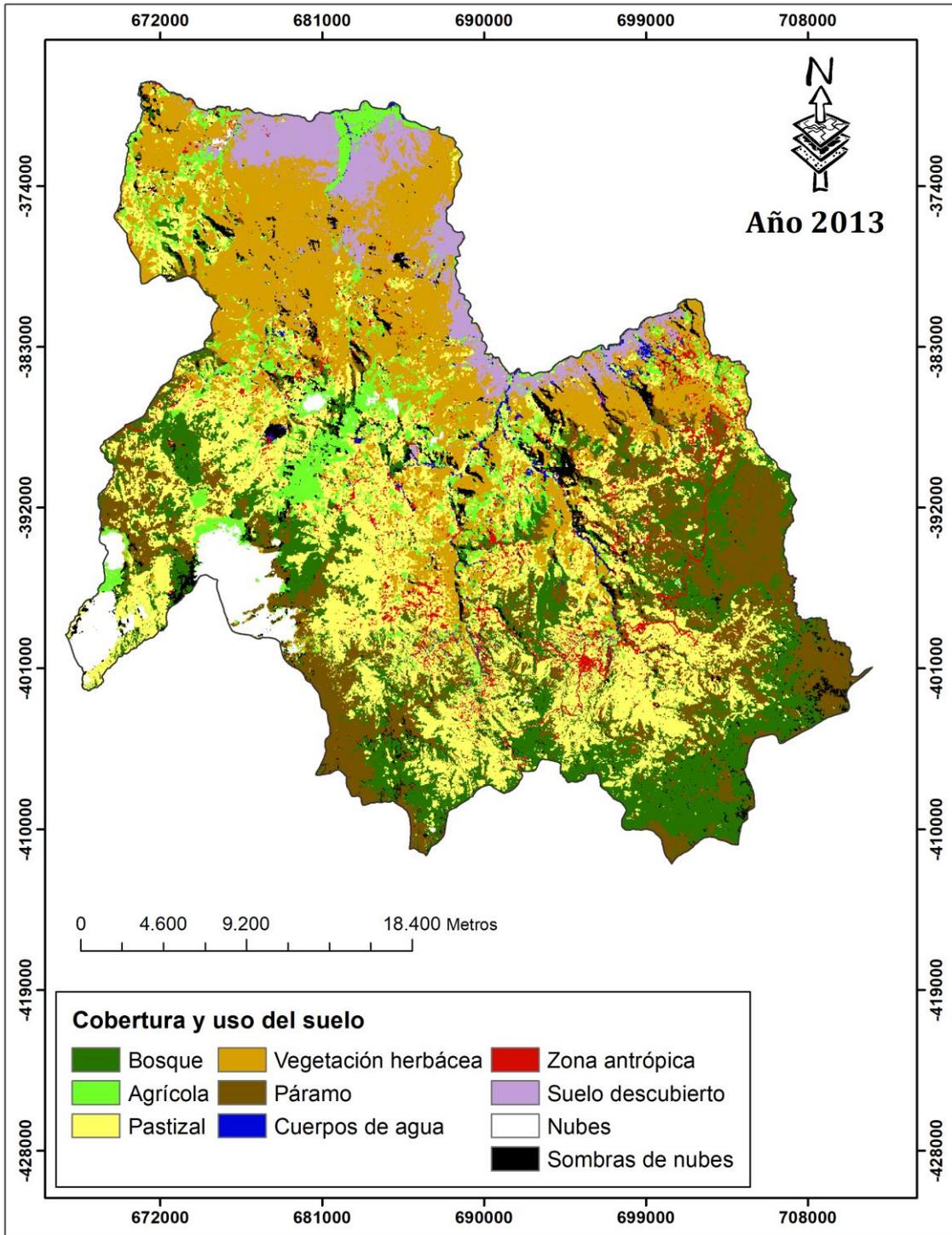


Figura 4. Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 2013

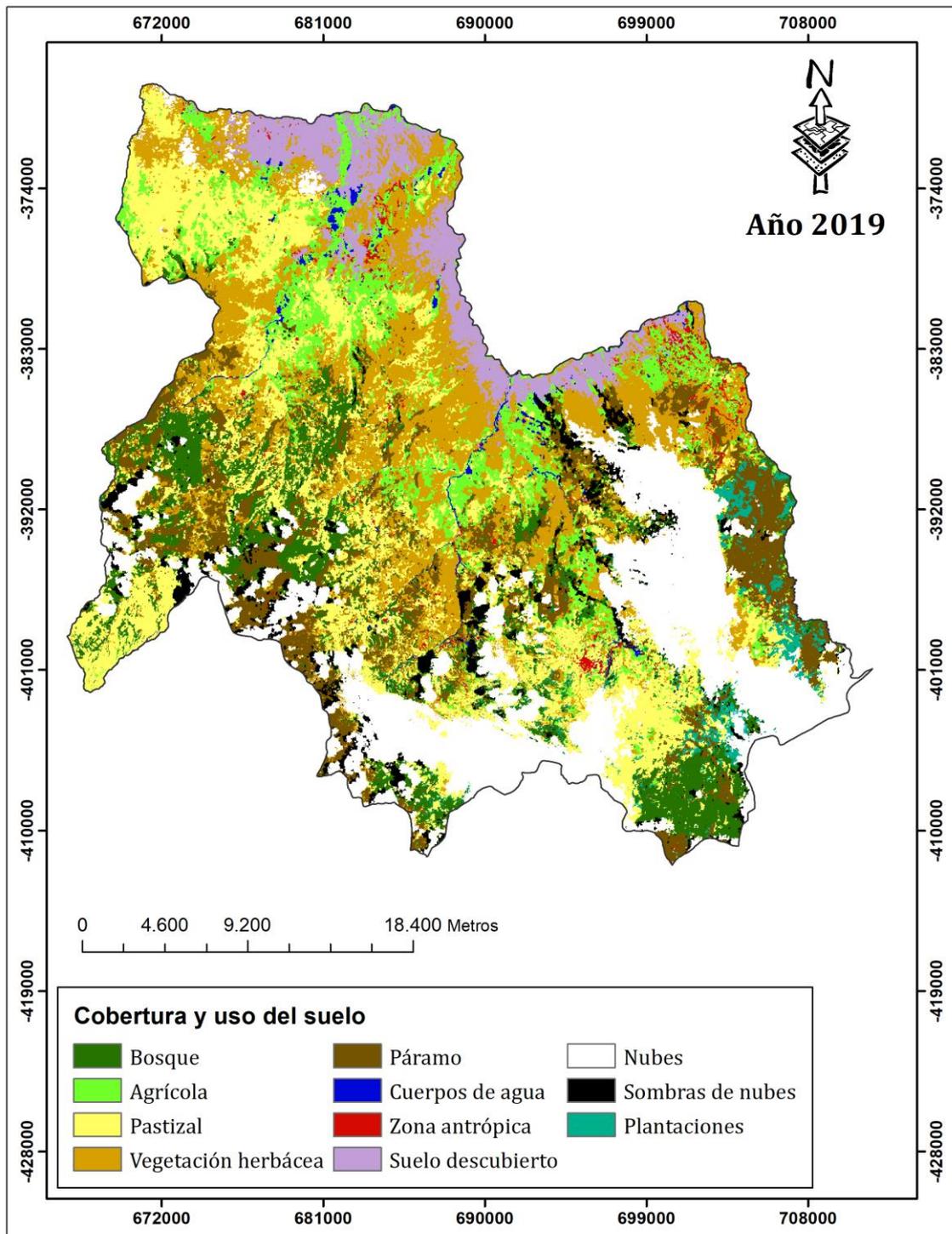


Figura 5. Mapa de cobertura y uso del suelo del cantón Saraguro perteneciente al año 2019

4.2. Indicadores del subsistema natural

Con base a la información de la cuantificación realizada de coberturas y uso del suelo, se calculó cada uno de los indicadores del subsistema natural, de tal manera que se utilizaron

para sugerir lineamientos de atenuación estratégica para el Ordenamiento Territorial del cantón Saraguro.

4.2.1. Tasa de deforestación

En la Tabla 12, la tasa de deforestación realizada en cuatro periodos de comparación, se muestra que la mayor pérdida se suscitó entre los años 2019 y 2013 con un valor de -8,6 %, de igual manera entre los años 1999 y 1989 se dio una pérdida con un valor de -4,38 %. Por otra parte, entre los años 2013 y 1999 se dio un incremento de la cobertura boscosa del 7,2 %. De manera general en los treinta años de estudio entre los años 1989 y 2019 se obtuvo una mínima pérdida de cobertura de bosque de -0,007 % (Figura 6).

Tabla 12. Tasa de deforestación en porcentaje del cantón Saraguro.

Años de comparación	Periodo a comparar (años)	% de deforestación
1989 - 1999	10	-4,38
1999 - 2013	14	7,29
2013 - 2019	6	-8,60
1989 - 2019	30	-0,01

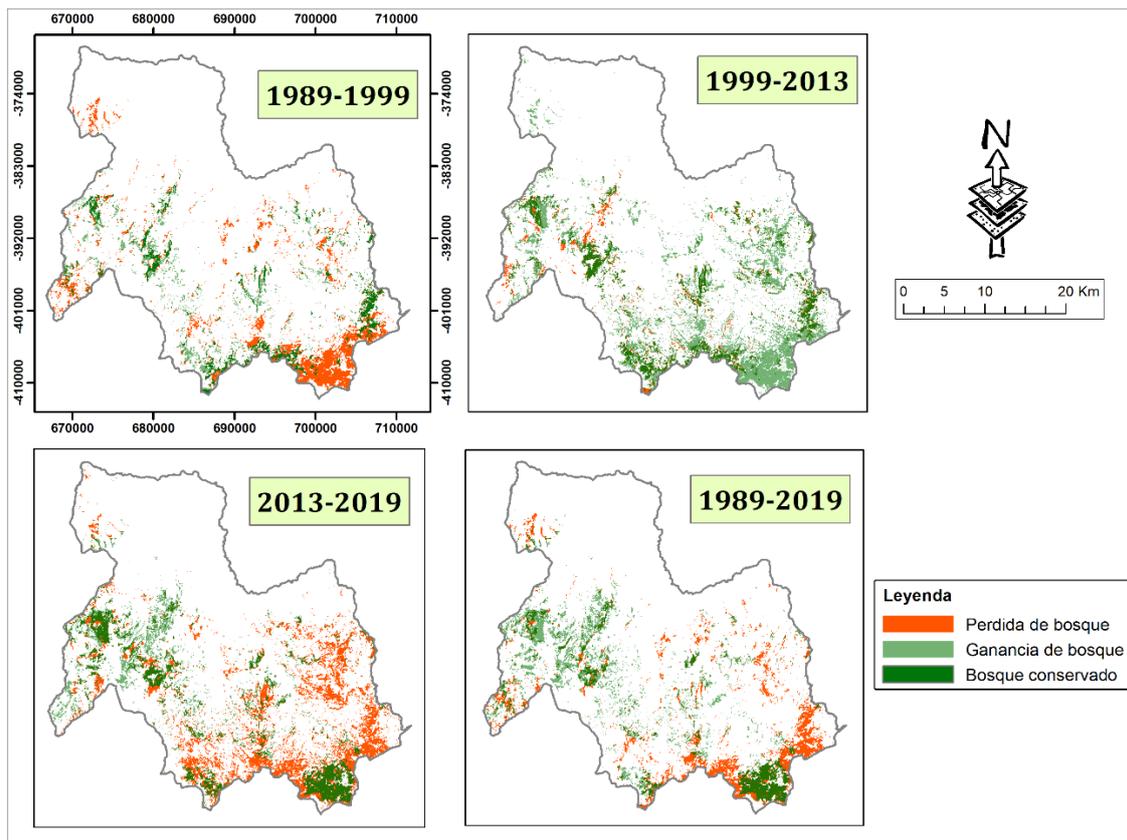


Figura 6. Mapa de Tasa de deforestación correspondiente al periodo 1989 – 2019

4.2.2. Tasa de cambio de la vegetación y uso del suelo

La cobertura o uso del suelo con mayor cambio durante los treinta años son los cuerpos de agua con un valor de 18,68 %, seguido se encuentran los pastizales con el 1,95 %, siendo estas dos coberturas las que presentan mayor ganancia. De igual manera las coberturas de bosque (-0,007 %), agrícola (-0,032 %), vegetación herbácea (-1,33 %) y el páramo con un valor de -1,13 % que demuestran una tasa de cambio intermedia. Por otra parte, la zona antrópica (-3,21 %) y el suelo descubierto (-3,05 %) presentando un mayor cambio en este caso de pérdida de dichas coberturas (Figura 7).

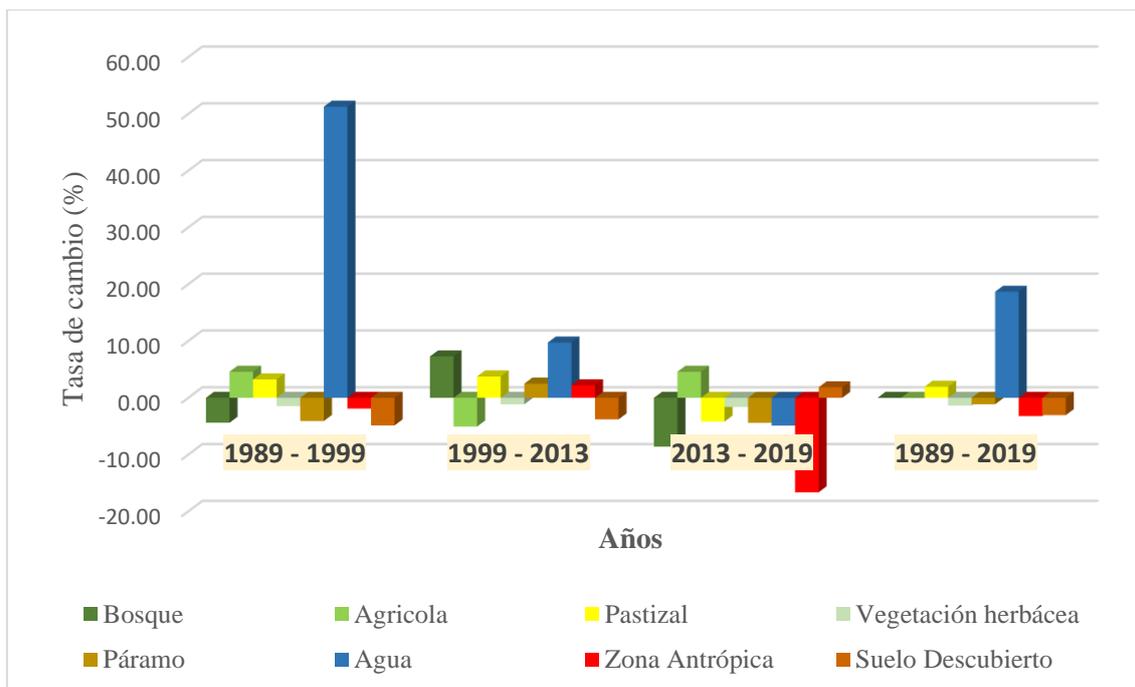


Figura 7. Tasa de cambio de las coberturas de uso de suelo correspondientes a cada periodo de estudio

4.2.3. Relación cobertura Natural/Antrópica

En la Tabla 13 del índice de antropización del cantón, se muestra que el mayor nivel de antropización fue en el año 2019 con un valor del 30 %, mientras que en los tres primeros años presentan valores similares de antropización alrededor del 27 % (Figura 8).

Tabla 13. Indicador de antropización del cantón Saraguro

Año	Porcentaje
1989	27,13
1999	27,41
2013	27,68
2019	30,3

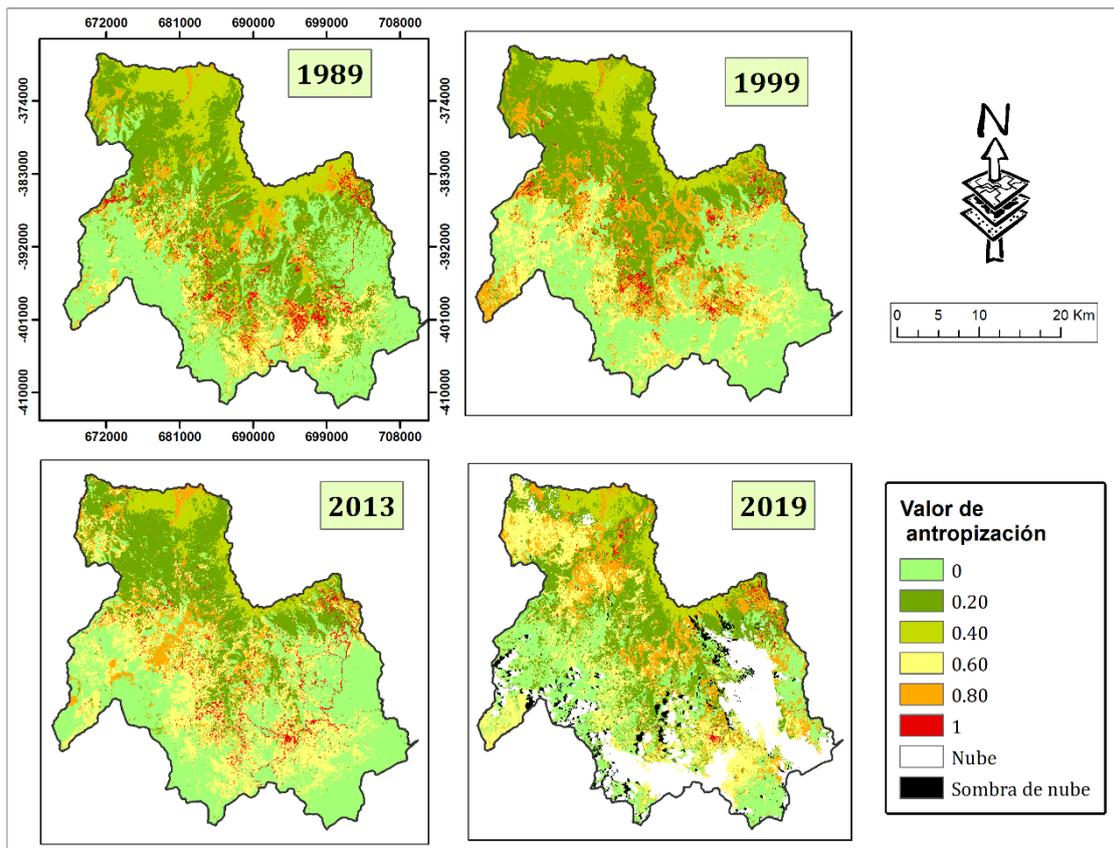


Figura 8. Mapa del índice de antropización del cantón Saraguro correspondiente al periodo 1989 – 2019

4.2.4. Extensión de la frontera Agrícola

Con respecto a la extensión de la frontera agrícola en la Tabla 14, se muestran las hectáreas y porcentajes por cada uno de los años de estudio donde en el año 1999 se dio el mayor crecimiento de la frontera agrícola con el 14,51 %, mientras que los demás años muestran un crecimiento de la frontera agrícola menor al 10 % respectivamente (Figura 9).

Tabla 14. Extensión de la frontera agrícola del cantón Saraguro

Años	ha	%
1989	10039,03	9,27
1999	15711,64	14,51
2013	7596,94	7,02
2019	9941,36	9,18

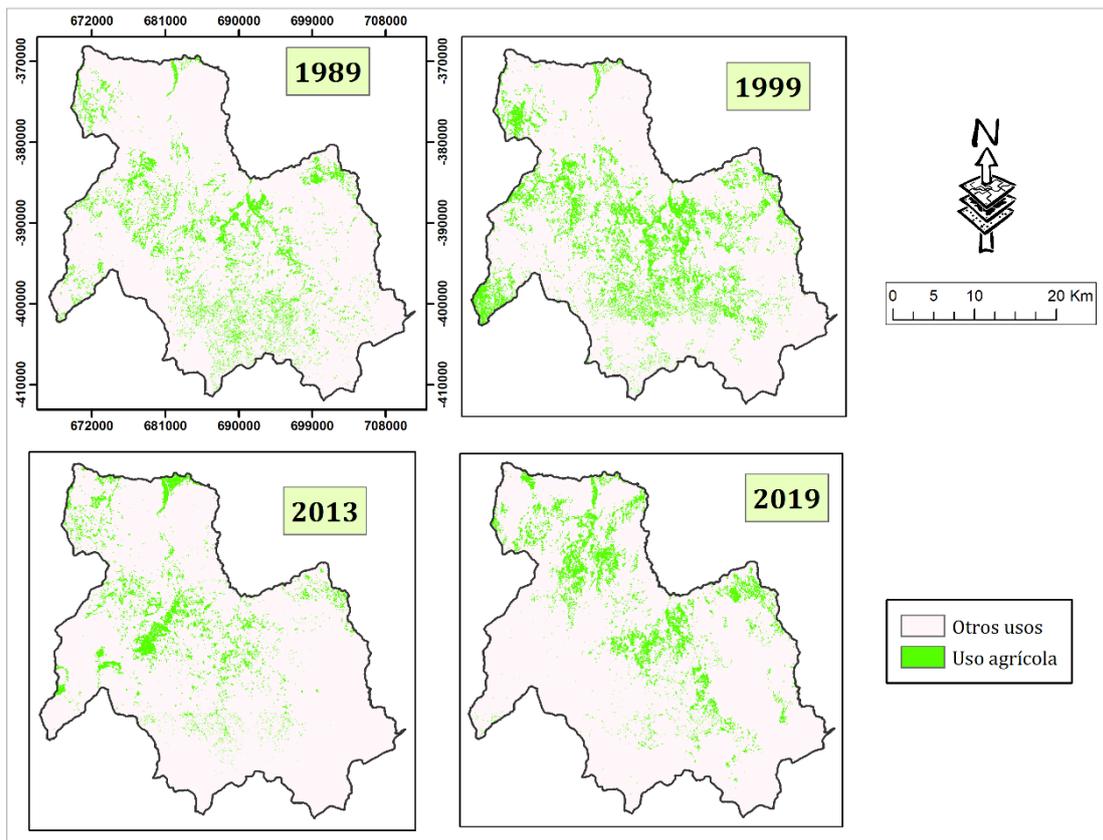


Figura 9. Mapa de la extensión de la frontera agrícola del cantón Saraguro correspondiente al periodo 1989 - 2019

4.2.5. Áreas Naturales Protegidas

En cuanto a las áreas naturales existentes dentro del cantón, se determinó que las Reservas de Biosfera de Podocarpus el Cóndor y Macizo del Cajas representan el mayor porcentaje de áreas naturales protegidas con un valor del 17,74 %, seguido de la cobertura de bosque y parte del Corredor Sangay – Podocarpus existente en el cantón, con valores de 8 y 9 % respectivamente. Por otra parte, los humedales, Bosques Protectores, Áreas anexas al programa Socio Bosque presentan un menor porcentaje, con valores menores al 2 %. Además, dentro del programa Socio Bosque se evidenció la existencia de cinco áreas adjuntas a este programa siendo 3 de estas individuales y 2 colectivas o comunales, tal como se visualiza en la Tabla 15 y Figura 10.

Tabla 15. Cobertura de Áreas Naturales definidas por el MAE, del cantón Saraguro

Cobertura de áreas naturales	Cantón Saraguro	
	ha	%
Reservas de Biósfera	19 206,56	17,74
Programa Socio Bosque	1 787,76	1,65
Bosques Protectores	339	0,31
Humedales	20,32	0,02
Corredor Sangay - Podocarpus	8 754,18	8,09
Total	30 107,82	27,81

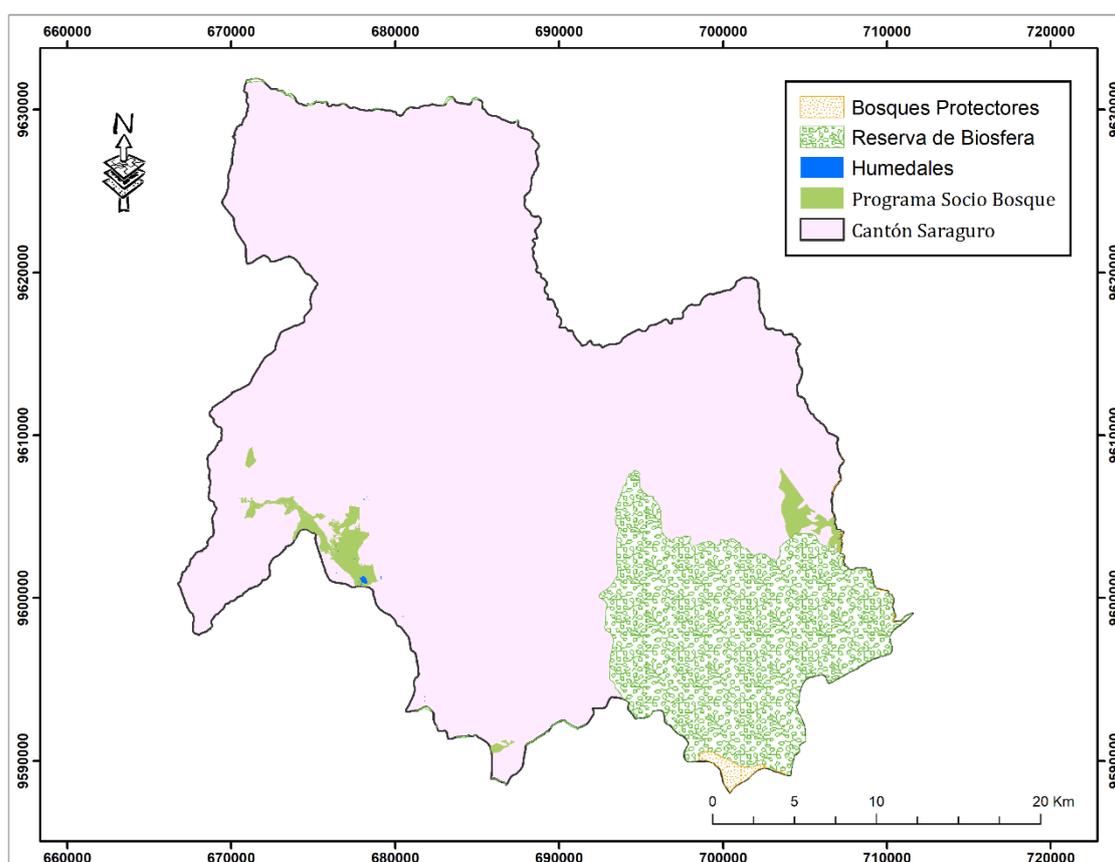


Figura 10. Mapa de áreas naturales del cantón Saraguro correspondiente al año 2019

4.3. Lineamientos estratégicos para la atenuación de los cambios significativos en el uso del suelo

Realizado el análisis multitemporal y obtenido cada uno de los indicadores del subsistema natural es de fundamental importancia la aplicación de lineamientos estratégicos para la atenuación de los cambios significativos en el uso del suelo. Con base a los resultados obtenidos se determinó que las coberturas con mayor cambio en el cantón Saraguro son

los pastizales, suelo descubierto, vegetación herbácea y el páramo, siendo los pastizales de mayor crecimiento en el periodo de estudio (Tabla 16).

Tabla 16 . Lineamientos estratégicos de las coberturas con cambios significativos en el periodo 1989 - 2019 correspondientes al cantón Saraguro.

Lineamiento 1: Crecimiento intensivo de áreas de pastizal
Hallazgo
Las coberturas de bosque, vegetación herbácea y páramo, siendo estas últimas las que en mayor magnitud han sido reemplazadas por los pastizales que durante el periodo 1989 – 2019 han incrementado en un 8,58 %. En el cantón la mayor producción y principal actividad desarrollada es la crianza de ganado vacuno para la producción de lácteos, por tal razón la existencia de amplias áreas de pastos.
Lineamientos estratégicos
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Promover la ganadería con doble propósito, uno realizando las prácticas adecuadas, disminuyendo el uso de herbicidas y propiciar la producción ganadera sustentable, de esta manera se muestre una actitud positiva frente a la conservación del ambiente y otro de los propósitos es seguir obteniendo beneficios económicos rentables referentes a la producción ganadera. ▪ Realizar programas de manejo sostenible con la aplicación de sistemas silvopastoriles, utilizando especies forrajeras ricas en nutrientes y con buena producción de biomasa (hojas y ramas). Estas especies pueden ser arbustivas como: <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Flemingia macrophylla</i>, y arbóreas como: <i>Cedrela odorata</i>, <i>Caryodendron orinocense</i> y especies de cítricos. Estos sistemas serán de fundamental importancia para reponer la fertilidad de los suelos, fijación de nitrógeno, reducción del estrés climático y aporte de nutrientes. Por otra parte, genera mayores ingresos económicos mejorando la producción a corto y largo plazo. Además, con la aplicación de estos sistemas se puede reducir la presión hacia las áreas de páramo y demás ecosistemas. ▪ Ejecutar diversas capacitaciones semestrales a todos quienes realizan actividades ganaderas, formando comisiones barriales, principalmente sobre la aplicación de sistemas silvopastoriles para el mejoramiento de la producción ganadera y de esta manera sensibilizar sobre la preservación y cuidado del ambiente. Así mismos talleres prácticos para implementar como alternativa la ganadería sustentable para disminuir el uso de herbicidas, promoviendo la utilización de herbicidas naturales.
Promotores
Gobierno autónomo descentralizado (GAD) de Saraguro Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)

Lineamiento 2: Disminución de las áreas de páramo y vegetación herbácea

Hallazgo

El páramo representa alrededor del 11% del total de la superficie en el año 2019, mientras que en el año de 1989 fue del 16,25%. Esto se vio afectado por la extensión de las áreas de pastizales y la introducción de plantaciones forestales principalmente de *Pinus patula* y *Eucalyptus globulus* en menor porcentaje. Por otra parte, la vegetación herbácea en mayor magnitud fue reemplazada por los pastizales, esta cobertura perdió aproximadamente el 10 % de superficie en el periodo de estudio.

Lineamientos estratégicos

- Frenar la extensión de las actividades de pastoreo en las zonas cercanas a los páramos y a la vegetación herbácea existente, a través de las acciones realizadas conjuntamente con el MAG para el manejo sostenible de pastos.
- Frenar el incremento masivo de plantaciones forestales comerciales que alteran la funcionalidad de estos ecosistemas.
- Establecer áreas de protección y conservación de los páramos naturales con la finalidad de proteger estos ecosistemas que son fundamentales para mantener los ciclos de agua, son esenciales para la mitigación del cambio climático y sobre todo la protección de la biodiversidad.
- Establecer programas de educación ambiental donde se integre directamente a las comunidades, donde se discutan temas de conservación y preservación de los ecosistemas de páramo, explicando su funcionalidad y los diferentes beneficios que brinda sobre la población y el ambiente. Este esfuerzo conjunto a las acciones del MAG con la finalidad también de reducir el impacto y sobre todo generar un bienestar común.
- Considerar la aplicación de las medidas del proyecto de Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques (REED), aplicado a la deforestación de los páramos del cantón Saraguro tomando en cuenta los seis niveles propuestos en su metodología:
 - El nivel político dado a causa de la debilidad de políticas forestales que aseguren un buen manejo de los ecosistemas y eviten la tala ilegal.
 - El nivel institucional causado por debilidades en la administración, así como conflictos interinstitucionales.
 - Nivel tecnológico relacionado al mejoramiento de las técnicas de producción agrícola y de pastoreo.
 - Nivel social tomando en cuenta el crecimiento y desarrollo poblacional y falta de planes de integración con comunidades para el manejo sostenible.
 - Nivel financiero considerando la demanda de bienes y servicios.
 - Nivel cultural respetando las tradiciones y creencias de las comunidades y pueblos indígenas. En otro sentido también la educación ambiental de la población, su falta de

comprensión y entendimiento de la conservación, esto acompañado de la falta de apoyo para el desarrollo de programas sostenibles.

Promotores

Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador (MAAE)
Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)
Gobierno autónomo descentralizado (GAD) de Saraguro

5. DISCUSIÓN

El cambio de uso de suelo y la creciente extensión masiva de actividades antrópicas son una realidad patente para la población actual del cantón, la extensión de las áreas de pastoreo destinadas a la producción ganadera, es una de las principales causas de la destrucción de los ecosistemas naturales.

Según Encalada (2020), en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Saraguro en cuanto al análisis las dinámicas en el cambio de cobertura y uso del suelo en el periodo de 1990 a 2018, establece que la cobertura con mayores cambios es el pastizal con 17,18 % en 1990 y 32,33 % para el año 2018, lo cual coincide con la presente investigación según los datos obtenidos en el cantón Saraguro en el periodo 1989 – 2019 siendo los pastizales la cobertura con mayores cambios en el sentido de crecimiento de estas áreas existiendo alrededor del 10 % en 1989, mientras que para el año 2019 fue del 19,49 %.

Por otra parte, las dos coberturas con mayor superficie en el año 2019 son los pastizales y la vegetación herbácea con porcentajes alrededor del 19 % respectivamente. Esto contrasta con los resultados propuestos por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2015), en el proyecto de levantamiento de información cartográfica de la cobertura y uso del suelo sistemas productivos y zonas homogéneas de cultivo del cantón Saraguro, donde menciona que los pastizales representan el 32,4 % y la vegetación herbácea el 37,47 %, siendo estas coberturas las de mayor porcentaje en el 2015. De igual manera en el PDOT realizado por Encalada (2020), establece que los pastizales y la cobertura de vegetación herbácea son aquellas que representan un mayor porcentaje del total de la superficie del cantón, de igual manera el MAGAP (2015), en el proyecto de levantamiento de cartografía temática con respecto a la cobertura y uso de la tierra, sistemas productivos y

zonas homogéneas de cultivo, menciona que la cobertura con mayor entidad en el cantón son los pastizales cultivados, seguidos de los cultivos de ciclo corto.

De acuerdo al estudio de Encalada (2020), del reciente PDOT del cantón Saraguro también se muestra que las áreas de páramo se redujeron un 5,4 % entre los años de 1990 a 2018 teniendo una reducción de alrededor de 5 878,31 ha del ecosistema. Hecho que se relaciona con la presente investigación, donde existió una reducción de 5 077,22 ha, representando el 4,69 % de pérdida de esta cobertura. Igualmente de forma general en la provincia de Loja según el Sistema Nacional de Información (2015), en su estudio de cobertura y uso del suelo a nivel general de la provincia de Loja menciona que para el año 2013 el área de páramo representó el 4,42 % del total, siendo un porcentaje muy reducido a causa del incremento de áreas agrícolas y de pastoreo, así como también debido al establecimiento de plantaciones forestales, resultados semejantes se obtuvieron en el presente estudio.

De la misma forma la cobertura de bosque se vio reducida para el año de 1999, perdiendo 3 551,01 ha con respecto al año 1989, mientras que para los años 2013 y 2019 se dio un incremento de la cobertura de bosque donde se han recuperado aproximadamente 3 529,98 ha, resultados similares presento Encalada (2020), donde menciona que la cobertura de bosque se redujo en un 9,25 %, en el periodo 1990 – 2018, perdiendo 10 054,99 ha; en su estudio sustenta que el bosque andino se vio afectado principalmente por la implementación de plantaciones forestales y pastizales. No obstante, menciona que a partir de acciones naturales o de forma antrópica se ha logrado la regeneración y reforestación de un aproximado de 1 879,95 ha en el periodo mencionado en su estudio.

En lo que respecta a la vegetación herbácea en el año 2015 se registró un total de 26 722 ha, con un grado de alteración de mediano a muy alterado, tal como lo menciona

el MAGAP (2015), esto se ve reflejado en el presente estudio, donde esta cobertura presenta una superficie de 21 249,57 ha para el año 2019, evidenciando la reducción continua de esta cobertura, siendo reemplazada por pastos y cultivos para la producción.

Según Intriago (2001), en su estudio de análisis de la deforestación en Ecuador menciona que los valores de deforestación tienden a crecer en relación con los años 1980 a 1996 donde se deforestó alrededor del 11,7 %, existiendo una tasa promedio de deforestación de 186 908 ha por año. De igual forma según el MAE (2017), en su estudio de deforestación del Ecuador continental en el periodo 2014 – 2016 establece que la tasa de deforestación anual neta es de -0,48 % donde se perdieron aproximadamente 188 706 ha, tomando en cuenta que también se reportó una ganancia de bosque nativo de 66 483 ha, resultando una pérdida neta de 122 224 ha en dicho periodo. Por lo que se sustenta la existencia de deforestación en el país y por ende en el cantón Saraguro donde se obtuvo una tasa de deforestación del -0,007 %, donde se han perdido alrededor de 21 ha en dicho periodo; cabe mencionar que en el cantón Saraguro la cobertura natural que más se perdió fue páramo con 5 077,22 ha pérdidas.

En el caso de la tasa de cambio según Encalada (2020), establece que en el periodo 1990 – 2018 existió una pérdida de páramo de 5 878,31 ha con un valor de -1,20 %, de igual manera otra de las coberturas con mayor tasa de cambio en su estudio son los pastizales con un valor de 2,28 % incrementando su cobertura. Lo que contrasta con los resultados obtenidos en el caso de los páramos presentando una tasa de cambio de -1,13 % en el periodo de estudio y una tasa de cambio de 1,95 % en la cobertura de pastizales existiendo un incremento notable.

En cuanto a la tasa de cambio obtenida de bosque nativo es de -0,007 % en el cantón Saraguro, estos resultados coinciden con los obtenidos de forma general en el Ecuador

por el MAE (2012), donde obtuvo una tasa de cambio de bosque nativo de -0,71 % en el periodo de 1990 – 2000 y un valor de -0,66 % para el periodo 2000 – 2008, donde se evidencia que cada vez se encuentra reduciendo el bosque nativo.

Con base a los resultados se apreció que en el periodo de estudio el índice de antropización oscila de 27,13 % para 1989 y 30,3 % para el 2019, lo cual indica que esta cobertura no ha tenido un incremento significativo en dicho periodo. Estos resultados guardan relación con Encalada (2020), donde menciona que la infraestructura antrópica no ha tenido cambios significativos en los 28 años de análisis.

En lo que respecta a la extensión de la frontera agrícola según menciona Contento (2017), que la mayor parte del cantón es ocupada por los pastizales y seguido de áreas agrícolas en menor cantidad. Aquello presenta una relación estrecha con los resultados obtenidos, donde los valores de extensión agrícola del cantón no son significativos, tomando en cuenta que en el año 1989 ocupaba un 9,27 % del total, mientras que para el 2019 fue de 9,18 % demostrando así que esta cobertura no ha tenido grandes cambios, a diferencia de los pastizales que en el presente estudio es una de las coberturas con mayor superficie del cantón con 21 103.66 ha, al igual que la vegetación herbácea con 21 249.57 ha.

Las áreas protegidas naturales en el cantón representan el 27,81 % del total de la superficie, entre estas áreas se encuentran reservas de biósfera, bosques protectores, humedales, corredor de conectividad Sangay – Podocarpus y zonas anexas al programa socio bosque. Por otra parte, aunque estas áreas de protección representen dicho porcentaje es notable la existencia de áreas de páramo y bosques que están siendo deforestados y estos aún no se encuentran en ninguna categoría de protección, lo que demuestra que no hay la suficiente eficiencia política y administrativa con un fin común de realizar esfuerzos de conservación sobre todo de las áreas de páramo donde se pudo

evidenciar de manera directa el cambio de uso de estas áreas para la ampliación de pastizales y áreas de plantaciones forestales.

El análisis de los indicadores del subsistema natural utilizados en la presente investigación, son de fundamental importancia en cuanto a su aplicación y utilización en los PDOT. Esto corrobora lo expuesto por Palacio *et al.* (2004), donde menciona que los indicadores propuestos están encaminados a la caracterización del territorio, dando como resultados fuentes de datos fundamentados y compilados para la utilización de estos en los PDOT, de tal manera que se establezcan criterios para evaluar el estado de los recursos y así aportar al mejoramiento de la calidad de vida de la población.

Por lo mencionado es de fundamental importancia atender y adoptar los lineamientos estratégicos planteados en el cantón Saraguro incluyendo la participación de las diferentes comunidades para atenuar los cambios significativos y reducir las presiones a los páramos y bosques, considerando las actividades económicas de la población. Aquello contrasta con lo que Lopez (2015), menciona en su investigación, destacando la importancia de la planificación del desarrollo del país donde considera al ordenamiento territorial como una política de estado, siendo este muy importante en cada uno de los gobiernos autónomos para promover el buen vivir, el ordenamiento de los territorios y el crecimiento económico de las poblaciones.

De igual manera Valarezo (2014), establece que la implementación de los sistemas silvopastoriles es una alternativa óptima para incrementar la producción de leche y carne de forma sostenible, mejorando así los niveles de vida de las comunidades. Evidenciando de esta manera los resultados de la presente investigación en cuanto a los lineamientos propuestos para atenuar los cambios existentes en el cantón Saraguro.

6. CONCLUSIONES

Los pastizales son la cobertura que mayor crecimiento obtuvo, presentó un incremento del 8,6 % de 1989 a 2019, por lo que en la actualidad es una de las coberturas con mayor porcentaje del territorio y forma parte de uno de los principales factores de producción económica en el cantón Saraguro. En lo que respecta a la cobertura de bosque no presentó cambios significativos reduciéndose un 0,2% en el periodo de estudio.

La vegetación herbácea y el páramo son dos de las coberturas más importantes del cantón, mismas que se redujeron significativamente alrededor de un 10 % de 1989 a 2019. Estas coberturas fueron sustituidas por la ganadería, siendo reemplazadas por extensos pastizales y áreas agrícolas para satisfacer la demanda económica de la población.

Se evidenció de manera in situ el desbroce de extensas áreas de páramo y vegetación herbácea con el fin aparente de establecer plantaciones forestales comerciales.

En 2019 se suscitó el mayor índice de antropización con un valor del 30,3 %, debido al constante crecimiento poblacional. Por otra parte, el 27,81 % de la superficie total del cantón se encuentra dentro de alguna categoría de conservación y protección de los recursos naturales.

7. RECOMENDACIONES

Considerar los lineamientos estratégicos planteados en la presente investigación para estudios a futuro, de tal manera que se promueva la importancia de la protección y conservación de los recursos naturales, incluyendo estos lineamientos dentro de los planes de Ordenamiento Territorial en el Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Saraguro.

Considerar que las imágenes satelitales a utilizar en siguientes investigaciones, posean la menor cantidad de nubes, de tal manera que se pueda aprovechar la información completa, contenida en cada una de estas.

Implementar estrategias de conservación de los páramos naturales y áreas de bosque, debido a su vital importancia tanto biológica y ecológica, dotando de bienes y servicios ambientales a la población.

8. BIBLIOGRAFÍA

Administración de Parques Nacionales de Argentina. (2005). *Protocolo para el pre procesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la Administración de Parques Nacionales*.

https://sib.gob.ar/archivos/Protocolo_Landsat.pdf

Barrantes, G., Chaves, H., & Vinuesa, M. (2000). El Bosque en el Ecuador Una visión transformada para el desarrollo y la conservación. *Comafors*, 1–47.

<http://comafors.org/wp-content/uploads/2010/05/El-Bosque-en-el-Ecuador.pdf>

Cerda, J., & Villaroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 1, 54–58. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-41062008000100008

Chóez, I. (2018). *Análisis de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo en el área de influencia del canal azúcar-río verde mediante teledetección* [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/35083>

Chuvieco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio* (3ed.). Ariel, S. A.

https://books.google.com.ec/books/about/Teledeteccion_ambiental.html?id=aKsNXCVcQC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2020). *Monitoreo de la cobertura de suelo. Biodiversidad Mexicana*.

<https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/cobertura-suelo/>

- Contento, L. (2017). *La Sociedad Agraria en el cantón Saraguro, siglo XXI* [Tesis de grado, Universidad de Cuenca].
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/26432/1/Trabajo de Titulación.pdf>
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Luis, J., Damián, P., y Iura, Y. D. (2009). *Las cuencas hidrográficas de México- Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural*. Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. (96). <https://micrositios.inecc.gob.mx/cuenca/diagnostico/20-cambio-uso-suelo.pdf>
- Encalada, P. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2020-2030 conteniendo el Plan de Uso y Gestión de Suelos*. Alcaldía de Saraguro.
<https://saraguro.gob.ec/wp-content/uploads/PDYOT/PDyOT2020.pdf>
- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. (2004). *Vivir con el riesgo : Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. Planificación del uso de la tierra (346). <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/cds/vivirconelriesgo/pdf/ch5 Section 2.pdf>
- Faustino, J. (2008). *Ordenamiento territorial y zonificación participativa como componentes de la gestión de cuencas y del riesgo a desastres*. Manejo y gestión integral de cuencas hidrográficas. Turrialba, Costa Rica
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1993). *Aspectos técnicos de las imágenes Landsat*.
https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos_tecnicos_landsat.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Imágenes de satélite: Elementos de percepción remota*. (28).

http://www3.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/imagenes/imgsatelite/metadatos/elem_per_rem.pdf

Intriago, J. (2001). *Análisis Dinámico de la Deforestación en el Ecuador*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].

<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/4048/6576.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Labrador, M., Évora, A., y Arbelo, M. (2012). *Satélites de Teledetección para la gestión del territorio: Vol. (5)*. Litografía Romero.

https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio

Lopez, M. F. (2015). *El sistema de planificación y el ordenamiento territorial para Buen Vivir en el Ecuador*. 19, 297–312. Quito, Ecuador.

https://www.flacsoandes.edu.ec/sites/default/files/%25f/agora/files/agora_lopez.pdf

Ministerio de Agricultura y Ganadería y Pesca. (2015). *Levantamiento De Cartografía Temática escala 1:25000, Lote 2*. 1–75.

http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/Memoria_tecnica_Coberturas_SARAGURO_20150601.pdf

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2018). *“Ley Orgánica de ordenamiento territorial uso y gestión del Suelo: conceptos básicos.”* (1Ed). Quito, Ecuador

<https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/57830.pdf>

Ministerio del Ambiente y Ministerio de Agricultura y Ganadería y Pesca. (2015).

Protocolo metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador Continental 2013-2014, escala 1:100.000.

[http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/Portal SNI 2014/uso de la tierra/01-metodologia_mapa_cobertura_uso.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/Portal%20SNI%202014/uso%20de%20la%20tierra/01-metodologia_mapa_cobertura_uso.pdf)

Ministerio del Ambiente. (2012). *Línea base de deforestación del Ecuador continental.*

Quito, Ecuador. [http://sociobosque.ambiente.gob.ec/files/Folleto mapa-parte1.pdf](http://sociobosque.ambiente.gob.ec/files/Folleto%20mapa-parte1.pdf)

Ministerio del Ambiente. (2017). *Deforestación del Ecuador Continental Periodo 2014-2016.* Quito, Ecuador.

[http://reddecuador.ambiente.gob.ec/redd/wp content/uploads/2019/12/Anexo-5.-Informe-de-Deforestaci%C3%B3n-Ecuador-Continental-periodo-2014-2016.pdf](http://reddecuador.ambiente.gob.ec/redd/wp-content/uploads/2019/12/Anexo-5.-Informe-de-Deforestaci%C3%B3n-Ecuador-Continental-periodo-2014-2016.pdf)

Montaño, A. (2018). *Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo en la zona minera del Cantón Portovelo entre los años 2001-2016* [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/29536>

Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica.*

https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Palacio, J. L., Sánchez, M., Casado, J., Propin, E., Delgado, E., Velázquez, A., Chías, L., Ortiz, M., Gonzáles, J., Negrete, G., Morales, J., y Márquez, R. (2004).

Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México

https://www.researchgate.net/publication/288840782_Indicadores_para_la_Caracterizacion_y_Ordenamiento_del_Territorio

Pinos, N. (2016). *Prospectiva del uso de suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial - Caso cantón Cuenca*. 5(9). Azuay, Ecuador.

<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/estoa/article/view/1019>

Rodolfo, F. (2017). *Composiciones Landsat En ArcGIS*. Guía básica

<http://wp.me/p2IwQU-1bh>

Rodriguez, A. F. (2011). *Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio, Meta* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. 94.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8573/andresfeliperodriguezvasquez.2011.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

Rodríguez, O., y Arredondo, H. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto Modis de la NASA, aplicado en estudios de Ingeniería Civil* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. 25–27.

[https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7050/tesis123.pdf?sequ
enc](https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7050/tesis123.pdf?sequence)

Sánchez, J. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón*

Saraguro periodo 2014-2019. Saraguro, Ecuador. [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/portal_sni/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1160001130001_diagnostico, propuesta y modelo de gestión- pdyot abril 2015_18-04-2015_21-36-07.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/portal_sni/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1160001130001_diagnostico_propuesta_y_modelo_de_gesti%C3%B3n_pdyot_abril_2015_18-04-2015_21-36-07.pdf)

Sánchez, P. (2012). *La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales* [Tesis de grado, Universidad de Cuenca].

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/779>

Sarría, F. A. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*.

<https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2012). *Guía metodológica de planificación institucional*. Subsecretaría de Planificación Nacional Territorial y Políticas Públicas.

<http://www.planificacion.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2016/03/guia-de-planificacion-institucional.pdf>

Servicio Geológico de los Estados Unidos. (2021). *Misiones Landsat: Landsat 9*.

https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-9?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con

Sistema Nacional de Información. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Loja*.

http://app.sni.gob.ec/sinlink/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1160000160001_Diagnóstico15052015_15-05-2015_14-16-18.pdf

Valarezo, J. M. (2014). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción sostenible de bovinos en la amazonía sur ecuatoriana. *CEDAMAZ*, 2, 7.

https://www.flacsoandes.edu.ec/sites/default/files/%25f/ agora/files/agora_lopez.pdf

9. ANEXOS

Anexo 1. Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 1989

Número	Y	X	Número	Y	X
1	9599654,492	708306,246	76	9612841,522	686677,232
2	9603682,186	684281,808	77	9609052,081	700381,747
3	9614343,779	687573,650	78	9613809,974	685801,433
4	9592656,673	702857,138	79	9595042,249	702144,288
5	9608112,722	673728,528	80	9596945,228	692760,548
6	9591334,543	686504,971	81	9595721,374	697229,950
7	9625312,078	673628,833	82	9608381,623	690532,215
8	9605074,998	695390,725	83	9602403,306	689843,281
9	9591413,738	685448,444	84	9620010,531	682155,087
10	9611580,226	702941,573	85	9615182,217	704011,088
11	9607044,076	686200,091	86	9598518,268	708983,374
12	9601252,727	677190,036	87	9603169,621	703241,638
13	9596645,723	681355,300	88	9613325,717	691212,104
14	9600565,970	688591,382	89	9609807,935	681027,658
15	9598330,374	685679,466	90	9598654,079	692344,230
16	9603212,998	680409,740	91	9625300,868	685297,642
17	9620186,102	688539,898	92	9599420,999	687712,223
18	9626794,006	686848,483	93	9623792,247	683951,205
19	9611369,168	698072,474	94	9603352,593	672887,398
20	9601453,769	702855,479	95	9622557,000	686685,458
21	9600638,300	707161,661	96	9599043,339	691181,182
22	9621258,281	682615,913	97	9601480,413	697584,698

Número	Y	X	Número	Y	X
23	9598189,507	710219,811	98	9614719,276	691805,965
24	9614839,465	684262,821	99	9591027,936	699971,201
25	9617944,021	678940,976	100	9602752,262	693568,599
26	9598421,830	696580,185	101	9600008,753	697753,277
27	9593862,809	683403,520	102	9611659,477	677631,535
28	9593098,234	704118,564	103	9603126,651	701880,772
29	9623445,072	670978,503	104	9609966,407	692625,570
30	9615044,087	688755,072	105	9605599,948	698118,902
31	9613960,150	678384,249	106	9591809,131	704934,132
32	9607634,887	703305,507	107	9596985,650	684664,715
33	9593759,981	691372,923	108	9597249,605	701604,970
34	9605257,162	689434,149	109	9598911,157	688631,100
35	9590145,989	698699,836	110	9610339,584	703085,374
36	9595455,034	687700,283	111	9625479,012	682525,901
37	9611509,933	681700,718	112	9610873,125	682819,440
38	9600795,010	705344,633	113	9611414,984	700399,719
39	9624386,400	670488,299	114	9611129,062	687903,287
40	9603569,594	686706,742	115	9630330,919	673163,427
41	9623948,557	674308,432	116	9600012,883	668931,306
42	9607611,735	689505,915	117	9608697,058	679239,323
43	9614221,106	698564,138	118	9610078,175	689727,509
44	9593215,647	689796,668	119	9598989,503	683568,111
45	9603074,871	688668,035	120	9598978,272	703010,813
46	9606901,570	680117,787	121	9609525,968	682311,012
47	9608899,582	673007,530	122	9601087,985	708453,635
48	9593206,984	699518,715	123	9622186,418	670848,239
49	9595448,340	698509,426	124	9609400,405	671620,869

Número	Y	X	Número	Y	X
50	9616648,785	686097,383	125	9599420,245	686170,740
51	9610750,113	686425,322	126	9626670,113	683892,447
52	9624304,239	681235,960	127	9618560,091	685547,416
53	9595167,887	706520,051	128	9616267,798	699574,443
54	9616230,106	674524,770	129	9628443,781	672328,742
55	9618942,291	688172,411	130	9601399,385	693540,122
56	9596477,995	696493,993	131	9605580,321	706570,266
57	9627884,582	674209,212	132	9605330,353	685682,319
58	9611858,503	694678,443	133	9595243,867	685430,655
59	9628354,126	680809,178	134	9593265,008	700735,324
60	9600115,793	692156,185	135	9614734,655	702235,456
61	9629586,810	679220,841	136	9618738,863	700202,180
62	9595221,995	689566,203	137	9615517,226	682231,895
63	9601986,036	669375,159	138	9608261,150	698273,118
64	9605605,773	702775,807	139	9597151,439	687821,831
65	9628271,602	684084,877	140	9592713,575	688027,076
66	9595479,506	691415,972	141	9602946,935	704579,500
67	9610495,976	671824,684	142	9599002,035	706085,946
68	9613110,229	688403,394	143	9605442,498	679433,836
69	9600828,243	669797,672	144	9601768,888	704640,075
70	9615177,198	674172,516	145	9606434,297	703457,315
71	9598763,457	680904,258	146	9608038,349	691649,134
72	9622499,702	688416,139	147	9602557,135	685128,860
73	9611102,161	704889,968	148	9620883,875	683901,840
74	9608482,441	693407,795	149	9607938,432	705851,671
75	9607234,693	696863,634	150	9611644,407	690167,439

Anexo 2. Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 1999

Número	X	Y	Número	X	Y
1	694527,947	9605820,115	76	675284,651	9614641,661
2	682551,905	9625316,509	77	704650,510	9599429,545
3	703090,199	9610998,660	78	697860,444	9597107,717
4	680258,767	9601956,143	79	691777,456	9614348,432
5	695836,358	9607454,483	80	691572,612	9602416,138
6	670362,813	9608277,223	81	701475,212	9614268,149
7	677388,218	9613245,934	82	681713,471	9595959,442
8	692590,964	9599421,979	83	706808,268	9599812,677
9	693337,001	9614568,425	84	698232,262	9611309,664
10	696674,186	9595792,976	85	699445,018	9590473,343
11	688262,590	9614616,580	86	670874,613	9602787,183
12	671081,650	9629486,790	87	681089,718	9627799,441
13	695378,835	9611754,165	88	706656,886	9605301,433
14	702255,892	9614966,859	89	700649,801	9616117,428
15	686648,940	9616420,529	90	694495,238	9602572,235
16	704728,507	9598020,499	91	704082,695	9614862,751
17	677199,745	9629638,753	92	700150,595	9599855,506
18	688351,554	9595473,475	93	673286,089	9611149,106
19	685689,540	9621870,835	94	687909,671	9610021,445
20	696867,732	9593522,421	95	681485,723	9623424,829
21	700056,197	9608108,949	96	676753,737	9625632,257
22	699031,712	9610156,192	97	678971,452	9615568,047
23	688289,126	9616188,963	98	674529,051	9629032,946
24	695492,734	9593705,853	99	700161,490	9602416,413
25	670581,732	9610044,919	100	677553,027	9601523,831

Número	X	Y	Número	X	Y
26	675431,642	9629838,584	101	706880,516	9602447,748
27	675036,732	9621077,905	102	679882,629	9611801,563
28	687628,170	9605387,706	103	700534,191	9596864,570
29	704636,338	9600547,325	104	681480,129	9603018,222
30	675698,060	9610711,491	105	697897,974	9595983,674
31	685515,846	9596036,331	106	702010,530	9605532,416
32	700692,970	9610821,102	107	684067,458	9621669,856
33	675700,818	9615667,991	108	688005,799	9627771,741
34	687136,147	9612870,925	109	694948,742	9608742,067
35	671708,849	9627727,272	110	673311,618	9623019,505
36	702743,607	9593210,212	111	683669,900	9597831,095
37	684770,978	9602703,655	112	707928,812	9598121,990
38	690324,173	9616179,084	113	679554,381	9618631,563
39	683051,816	9607067,338	114	676790,217	9623367,550
40	706837,284	9607823,183	115	701670,850	9608194,889
41	691757,868	9608868,446	116	698690,344	9604776,878
42	671122,099	9607370,251	117	689113,661	9601724,783
43	700167,537	9609940,634	118	685044,342	9619413,249
44	706939,525	9596802,573	119	671345,900	9603793,732
45	677281,466	9619445,396	120	679009,724	9603776,308
46	683637,497	9595639,495	121	704932,421	9610017,152
47	680796,541	9605401,985	122	684153,302	9593104,568
48	699097,199	9598025,946	123	672529,230	9629388,351
49	679553,548	9599505,104	124	700124,570	9594941,594
50	686887,424	9594475,464	125	702239,855	9599352,314
51	682307,130	9615324,154	126	671666,831	9608922,649
52	698974,889	9614356,713	127	672674,876	9625759,802

Número	X	Y	Número	X	Y
53	706753,533	9603953,712	128	691117,321	9594688,461
54	690982,958	9611204,033	129	682784,008	9592685,143
55	667915,132	9601678,533	130	676429,173	9627814,776
56	704774,530	9596059,168	131	690713,458	9597121,984
57	685421,253	9606938,568	132	710245,522	9600189,136
58	703142,908	9591137,744	133	694039,747	9610886,962
59	682209,685	9605454,772	134	681584,232	9621524,017
60	677842,778	9603247,415	135	691687,683	9606611,287
61	687527,458	9623529,106	136	706269,879	9601018,304
62	672206,394	9621202,856	137	709429,544	9596660,740
63	698101,024	9601364,478	138	674538,346	9608235,648
64	675230,986	9603603,615	139	703637,988	9594491,102
65	690453,060	9608144,177	140	701434,323	9595117,742
66	676100,160	9612213,816	141	685784,325	9608415,780
67	682439,840	9628967,978	142	685953,181	9610420,153
68	676757,833	9602922,832	143	689860,348	9598243,558
69	705669,847	9602464,476	144	681454,675	9617970,620
70	684514,661	9596411,712	145	673122,897	9624121,924
71	681614,152	9600023,236	146	708372,499	9596457,595
72	691695,074	9593650,432	147	689112,095	9608045,777
73	687006,853	9614193,445	148	687903,304	9593854,501
74	689451,931	9617812,473	149	699404,027	9605607,437
75	703789,318	9612443,513	150	676519,985	9620427,383

Anexo 3. Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 2013

Número	X	Y	Número	X	Y
1	698687,919	9601142,571	76	703724,283	9591086,715
2	669492,326	9607171,759	77	683262,476	9597811,992
3	687836,206	9619800,659	78	701460,560	9607919,437
4	676188,966	9618047,623	79	671937,061	9613663,288
5	691202,329	9603830,307	80	701798,111	9590574,753
6	683663,966	9615117,965	81	704111,486	9601993,251
7	684750,651	9603467,200	82	697909,665	9608944,522
8	677204,861	9615117,243	83	682790,698	9603975,537
9	672203,430	9608688,562	84	696897,910	9613336,967
10	688149,142	9606751,967	85	683189,189	9605926,622
11	693883,811	9608379,098	86	679043,528	9626670,671
12	690009,394	9608614,946	87	694044,427	9615655,364
13	679610,179	9610631,382	88	698157,169	9602513,806
14	680951,648	9601431,228	89	682174,603	9613456,112
15	687551,627	9600940,716	90	681810,894	9615535,444
16	681144,126	9597931,988	91	674880,283	9610076,727
17	679084,683	9612243,181	92	673072,157	9616267,378
18	686677,856	9618208,921	93	684334,460	9626714,053
19	703777,699	9608491,330	94	672261,329	9628564,572
20	703155,986	9614843,461	95	679838,479	9601103,551
21	683865,014	9604596,678	96	699276,449	9602050,069
22	678393,410	9608415,261	97	677286,840	9623830,868
23	707032,963	9597457,655	98	697738,178	9592527,150
24	695823,942	9601052,510	99	706039,644	9596934,355

Número	X	Y	Número	X	Y
25	703964,243	9605279,059	100	687917,435	9616209,486
26	682468,301	9609588,544	101	696463,097	9598402,875
27	680548,557	9623837,751	102	700870,046	9617779,832
28	670716,709	9622663,917	103	685029,000	9597489,378
29	709478,141	9599953,250	104	693455,341	9601470,400
30	680610,532	9607075,622	105	680392,301	9598867,029
31	684649,518	9624041,229	106	694417,163	9593513,292
32	703931,576	9603480,496	107	704679,430	9595380,627
33	674198,516	9622009,400	108	685076,196	9600102,302
34	677339,665	9611532,140	109	699763,454	9609808,550
35	699315,988	9607482,617	110	698627,913	9593183,717
36	690071,544	9614436,334	111	693186,701	9595756,240
37	678261,497	9619196,055	112	688345,114	9625879,712
38	684957,074	9595604,962	113	702468,949	9592851,409
39	687994,833	9598278,736	114	703066,356	9604783,574
40	692050,684	9601600,034	115	706568,998	9600526,181
41	671980,100	9607454,167	116	702318,746	9601030,895
42	702523,765	9596873,838	117	677567,490	9622287,663
43	682752,663	9624452,705	118	673660,749	9611997,782
44	698910,215	9605643,534	119	696018,951	9602597,014
45	699747,193	9599938,111	120	706042,321	9608166,357
46	705765,001	9609236,707	121	684385,483	9611067,482
47	686157,161	9625301,305	122	686790,156	9603249,350
48	685915,179	9628688,651	123	680860,217	9593295,575
49	689668,627	9604602,098	124	675925,582	9605828,204
50	673563,725	9615355,154	125	675740,543	9629219,509
51	678526,985	9624608,861	126	689790,770	9594172,348

Número	X	Y	Número	X	Y
52	683455,073	9592547,378	127	702134,386	9613026,332
53	677184,094	9624886,486	128	705251,856	9601914,049
54	700301,161	9606968,039	129	670713,146	9628263,746
55	698690,167	9589987,876	130	707115,349	9595707,577
56	683585,852	9594544,953	131	693111,193	9607435,909
57	688251,600	9613454,803	132	685722,326	9594090,854
58	701935,035	9611766,990	133	679455,472	9614991,534
59	672015,005	9621498,979	134	683047,944	9619233,162
60	691936,967	9597416,090	135	692966,545	9611554,792
61	703235,805	9599945,451	136	699628,473	9614667,174
62	687175,711	9590464,977	137	695804,524	9610553,225
63	685896,245	9621643,123	138	676924,995	9625960,455
64	699460,626	9597845,637	139	680742,926	9619946,968
65	692810,212	9598855,227	140	673453,048	9625291,903
66	699833,989	9596163,873	141	689979,972	9597031,954
67	676771,285	9619163,973	142	681983,337	9608528,026
68	667876,532	9597828,858	143	711178,007	9598743,638
69	689973,018	9600560,044	144	673322,785	9626327,398
70	680679,992	9611294,482	145	695340,501	9598607,293
71	699021,914	9616267,072	146	672395,941	9603041,810
72	674508,901	9627058,362	147	685088,841	9616344,933
73	677637,071	9627464,923	148	687087,686	9607252,226
74	688432,124	9627444,983	149	693054,999	9613613,952
75	702150,466	9602321,293	150	708040,584	9599294,054

Anexo 4. Coordenadas de puntos de control para la validación de datos del año 2019

Número	X	Y	Número	X	Y
1	703354,000	9609510,000	76	688125,535	9619127,064
2	698236,000	9601267,000	77	700857,604	9595468,013
3	696809,000	9599123,000	78	688264,627	9608964,842
4	696164,000	9599456,000	79	673490,277	9612552,659
5	694975,000	9599953,000	80	677048,575	9606788,808
6	694925,000	9600101,000	81	676300,848	9626393,053
7	695701,000	9599409,000	82	680928,513	9613215,179
8	695525,000	9598919,000	83	673265,815	9616041,922
9	693829,000	9596648,000	84	699111,456	9595229,858
10	703079,040	9608745,510	85	672297,587	9602150,344
11	702844,160	9609117,500	86	698065,539	9597770,820
12	703801,160	9608929,530	87	678478,824	9620588,241
13	696193,400	9599276,460	88	672941,103	9620819,377
14	694968,310	9597376,130	89	699455,123	9596175,000
15	694801,830	9596915,370	90	700487,313	9604725,385
16	695807,120	9597628,930	91	692058,179	9595938,893
17	695555,110	9598138,590	92	672895,132	9627542,401
18	693718,300	9596658,090	93	707281,865	9601140,119
19	693939,780	9596433,890	94	679915,876	9624156,377
20	698353,950	9600062,310	95	703276,576	9614559,430
21	703196,110	9610810,870	96	675431,929	9612764,769
22	703060,510	9609999,830	97	686844,448	9605086,533
23	698262,990	9601461,950	98	700241,393	9590436,043
24	699194,040	9601148,350	99	686415,251	9596840,256

Número	X	Y	Número	X	Y
25	698205,140	9600539,780	100	672914,703	9603274,852
26	681356,192	9623444,747	101	681434,810	9607664,706
27	696007,940	9608642,618	102	693609,489	9595185,637
28	671625,617	9624295,775	103	679950,727	9622758,963
29	667046,545	9600531,183	104	696633,070	9611044,924
30	686208,614	9599939,387	105	684278,426	9607136,666
31	698200,797	9607385,196	106	683679,140	9626672,566
32	669356,454	9601560,330	107	674682,716	9605120,042
33	684767,297	9599010,599	108	705904,711	9600413,723
34	672930,717	9622482,153	109	686070,250	9627467,630
35	697274,615	9616324,557	110	682406,652	9626511,322
36	700118,527	9592550,099	111	702545,252	9595412,906
37	673809,484	9625178,930	112	701843,180	9603423,173
38	684245,710	9603464,390	113	703234,334	9611516,704
39	677846,887	9612685,624	114	698594,772	9602187,740
40	677205,941	9621352,193	115	682366,127	9613341,035
41	690025,612	9613795,532	116	685057,236	9594771,043
42	679279,925	9617136,238	117	692108,559	9606020,925
43	687465,595	9626365,595	118	674643,073	9613695,353
44	675672,673	9617609,004	119	702779,369	9605194,403
45	684467,147	9610983,070	120	691297,847	9610154,048
46	669579,926	9610491,324	121	673810,104	9629746,629
47	681373,113	9604952,838	122	697019,276	9614934,456
48	678013,727	9624659,248	123	679907,433	9611556,554
49	706185,070	9598495,866	124	695142,652	9606721,900
50	701352,471	9616275,920	125	684283,004	9614089,119

Número	X	Y	Número	X	Y
51	679486,187	9621481,284	126	690015,965	9593013,229
52	672582,157	9611503,169	127	694264,707	9598018,451
53	687543,217	9627870,052	128	698508,223	9603912,322
54	680400,130	9603528,669	129	680534,478	9618565,012
55	702274,858	9613291,719	130	692223,561	9600983,962
56	682952,658	9599370,925	131	671064,062	9626757,008
57	696715,861	9601336,767	132	688316,766	9616055,909
58	677603,130	9619852,593	133	695342,959	9594213,917
59	683728,268	9598399,038	134	687382,809	9613957,715
60	690607,795	9595728,777	135	698047,630	9600910,759
61	681726,213	9620391,055	136	679306,823	9613541,895
62	674568,772	9609232,486	137	673296,241	9613941,905
63	674613,794	9607962,760	138	684962,157	9627618,653
64	696060,180	9600480,290	139	698228,310	9605858,777
65	671864,142	9625678,520	140	689598,945	9616657,282
66	710330,662	9598607,391	141	684769,809	9622186,745
67	700721,626	9609753,211	142	691314,334	9614330,084
68	678824,773	9619365,562	143	693129,614	9613795,877
69	690570,393	9599292,750	144	686611,046	9622586,887
70	697028,005	9612693,589	145	678073,833	9623460,896
71	702074,680	9606881,595	146	675878,797	9605735,286
72	693437,450	9604679,022	147	676876,501	9627849,720
73	698026,049	9592692,937	148	700420,624	9614854,947
74	674623,028	9617325,286	149	695438,028	9609759,536
75	680590,147	9617472,376	150	685371,548	9607893,504

Anexo 5. Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 1989

Cobertura	Bosque	Agrícola	Pastizal	Vegetación herbácea	Páramo	Agua	Zona antrópica	Suelo descubierto	Nubes	Sombras de nubes	Total	Exactitud de usuario	Error de comisión
Bosque	18										18	1,00	0,00
Agrícola	2	10					1				13	0,77	0,23
Pastizal	1		13	1	1						16	0,81	0,19
Vegetación herbácea	3			30	7			4			44	0,68	0,32
Páramo		1		3	14						18	0,78	0,22
Agua						0					0	0,00	0,00
Zona Antrópica				1			6	1	1		9	0,67	0,33
Suelo Descubierto								21			21	1,00	0,00
Nubes									7		7	1,00	0,00
Sombras de nubes										4	4	1,00	0,00
Total	24	11	13	35	22	0	7	26	8	4	150		
Exactitud del productor	0,75	0,91	1,00	0,86	0,64	0,00	0,86	0,81	0,88	1,00			
Error de omisión	0,25	0,09	0,00	0,14	0,36	0,00	0,14	0,19	0,13	0,00			

Anexo 6. Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 1999

Cobertura	Bosque	Agrícola	Pastizal	Vegetación herbácea	Páramo	Agua	Zona Antrópica	Suelo Descubierto	Nubes	Sombras de nubes	Total	Exactitud de usuario	Error de comisión
Bosque	8										8	1,00	0,00
Agrícola	1	14		4	1					1	21	0,67	0,33
Pastizal		1	18	2	4						25	0,72	0,28
Vegetación herbácea		3		28							31	0,90	0,10
Páramo		1			19						20	0,95	0,05
Agua						0					0	0,00	0,00
Zona Antrópica							1				1	1,00	0,00
Suelo Descubierto			1	1				12			14	0,86	0,14
Nubes									19		19	1,00	0,00
Sombras de nubes				1						10	11	0,91	0,09
Total	9	19	19	36	24	0	1	12	19	11	150		
Exactitud del productor	0,89	0,74	0,95	0,78	0,79	0,00	1,00	1,00	1,00	0,91			
Error de omisión	0,11	0,26	0,05	0,22	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09			

Anexo 7. Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 2013

Cobertura	Bosque	Agrícola	Pastizal	Vegetación herbácea	Páramo	Agua	Zona Antrópica	Suelo Descubierto	Nubes	Sombras de nubes	Total	Exactitud de usuario	Error de comisión
Bosque	26		2								28	0,93	0,07
Agrícola		8		3							11	0,73	0,27
Pastizal	1		33	6							40	0,83	0,18
Vegetación herbácea			1	30							31	0,97	0,03
Páramo	1	2		1	21					1	26	0,81	0,19
Agua						1					1	1,00	0,00
Zona Antrópica			1	1			4				6	0,67	0,33
Suelo Descubierto							1	3			4	0,75	0,25
Nubes									1		1	1,00	0,00
Sombras de nubes										2	2	1,00	0,00
Total	28	10	37	41	21	1	5	3	1	3	150		
Exactitud del productor	0,93	0,80	0,89	0,73	1,00	1,00	0,80	1,00	1,00	0,67			
Error de omisión	0,07	0,20	0,11	0,27	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,33			

Anexo 8. Matriz de confusión de la imagen clasificada correspondiente al año 2019

Cobertura	Bosque	Agrícola	Pastizal	Vegetación herbácea	Páramo	Agua	Zona Antrópica	Suelo Descubierto	Nubes	Sombras de nubes	Plantaciones	Total	Exactitud de usuario	Error de comisión
Bosque	7		2									9	0,78	0,22
Agrícola		17	1	1								19	0,89	0,11
Pastizal			39									39	1,00	0,00
Vegetación herbácea			1	21				1				23	0,91	0,09
Páramo				2	7							9	0,78	0,22
Agua						1						1	1,00	0,00
Zona Antrópica							8					8	1,00	0,00
Suelo Descubierto					1			10				11	0,91	0,09
Nubes									22			22	1,00	0,00
Sombras de nubes								1		4		5	0,80	0,20
Plantaciones											4	4	1,00	0,00
Total	7	17	43	24	8	1	8	12	22	4	4	150		
Exactitud del productor	1,00	1,00	0,91	0,88	0,88	1,00	1,00	0,83	1,00	1,00	1,00			
Error de omisión	0,00	0,00	0,09	0,13	0,13	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00			

Anexo 9. Índice de antropización de 1989

Unidad de Análisis	Bosque y Páramo	Vegetación herbácea	Suelo Descubierto	Pastizal	Agrícola	Zona Antrópica	INRA
1	10	25	35	0	30	0	25,00
2	55	20	20	0	5	0	15,63
3	20	30	20	5	25	0	23,96
4	20	65	5	5	5	0	35,21
5	45	50	0	0	5	0	25,63
6	23	45	2	10	20	0	27,17
7	45	45	0	5	5	0	23,96
8	44	40	10	2	4	0	23,33
9	20	20	0	45	10	5	23,75
10	10	25	0	20	15	30	47,71
Total	292	365	92	92	124	35	1 000
%	29,2	36,5	9,2	9,2	12,4	3,5	
						Promedio	27,13

Anexo 10. Índice de antropización de 1999

Unidad de Análisis	Bosque	Vegetación herbácea	Suelo Descubierto	Pastizal	Agrícola	Zona Antrópica	INRA
1	10	25	35	0	30	0	25,00
2	30	40	20	0	10	0	26,25
3	10	50	0	0	40	0	30,00
4	30	20	0	10	35	5	21,04
5	37	30	0	0	30	3	21,75
6	10	30	0	30	25	5	28,13
7	35	25	0	15	20	5	22,50
8	15	30	0	12	35	8	29,38
9	35	10	0	35	20	0	13,33
10	7	5	0	30	10	48	56,75
Total	219	265	55	132	255	74	1 000
%	21,9	26,5	5,5	13,2	25,5	7,4	
						Promedio	27,41

Anexo 11. Índice de antropización de 2013

Unidad de Análisis	Bosque	Vegetación herbácea	Suelo Descubierto	Pastizal	Agrícola	Zona Antrópica	INRA
1	4	20	15	25	35	1	23,29
2	15	70	0	10	5	0	37,29
3	5	15	0	45	35	0	19,38
4	35	20	0	40	5	0	17,29
5	30	30	0	20	20	0	20,83
6	10	40	0	50	0	0	28,33
7	40	12	0	30	11	7	19,38
8	30	20	0	40	10		17,92
9	40	0	0	35	5	20	26,46
10	3	2	0	30	5	60	66,63
Total	212	229	15	325	131	88	1 000
%	21,2	22,9	1,5	32,5	13,1	8,8	
						Promedio	27,68

Anexo 12. Índice de antropización de 2019

Unidad de Análisis	Bosque	Vegetación herbácea	Suelo Descubierto	Pastizal	Agrícola	Zona Antrópica	INRA
1	0	5	30	5	60	0	18,33
2	10	70	10	0	10	0	38,75
3	0	30	0	20	50	0	24,58
4	30	35	0	5	30	0	22,08
5	30	50	0	10	5	5	32,29
6	5	40	0	22	30	3	30,42
7	25	20	0	32	15	8	25,21
8	30	15	0	7	40	8	21,67
9	10	10	0	70	3	7	24,04
10	0	2	0	38	5	55	62,96
Total	140	277	40	209	248	86	1 000
%	14	27,7	4	20,9	24,8	8,6	
Promedio							30,03

Anexo 13. Toma de puntos de control de las diferentes coberturas de estudio para la verificación de resultados

