USO DE SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL RECONOCIMIENTO DE ÁREAS POTENCIALES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL COMPLEJO DE PÁRAMO DE GUERRERO

CARLOS MAURICIO GUERRERO TRIANA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA FORESTAL

BOGOTÁ D.C.

OCTUBRE

2020

USO DE SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL RECONOCIMIENTO DE ÁREAS POTENCIALES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL COMPLEJO DE PÁRAMO DE GUERRERO

TRABAJO DE GRADO MODALIDAD INVESTIGACIÓN- INNOVACIÓN

Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera Forestal

CARLOS MAURICIO GUERRERO TRIANA

Autor

FAVIO LÓPEZ BOTÍA

Director

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA FORESTAL

BOGOTÁ D.C.

OCTUBRE

2020

USO DE SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL RECONOCIMIENTO DE ÁREAS POTENCIALES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL COMPLEJO DE PÁRAMO DE GUERRERO

TRABAJO DE GRADO MODALIDAD INVESTIGACIÓN-INNOVACIÓN

Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera Forestal

APROBADO

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

FIRMANTES

_____

FAVIO LÓPEZ BOTÍA
DIRECTOR

_____

BRYAM FELIPE ESPINOSA
EVALUADOR

BOGOTÁ OCTUBRE 08 DE 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la energía del universo que mueve todo lo existente confabulando con un sinfín de sucesos para llevarme a este momento tan importante de mi vida.

A mi madre y familia les agradezco por cada esfuerzo y cada momento que me han brindado y me brindaran para el desarrollo de mi ser.

A mi novia Elizabeth Romero, por estar conmigo en las buenas y en las malas brindándome su cariño y consejos a cada momento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a mi familia y a mi pareja por el apoyo durante este proceso que ha significado tanto para mí, la vida nunca es fácil, pero gracias a eso soy la persona que soy y tengo junto a mí a estas personas maravillosas.

Agradezco a la universidad distrital y a todo su personal por permitirme experimentar esta gran experiencia en la formación como ingeniero forestal que ya culmina con este proceso juntándome a grandes personas como mi amigo Steven Blanco y mi amigo Juan David Sánchez quienes también brindaron su apoyo y compañía durante este proceso.

Al profesor Favio López Botía por su asesoría, instrucción y acompañamiento durante este trabajo de grado, haciendo un esfuerzo único para culminar este proceso de mi vida.

Al ingeniero Bryam Espinosa por brindarme además de su tiempo su conocimiento y respaldo durante la construcción y ejecución de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

1.RESUMEN 1
2.ABSTRACT 2
3.INTRODUCCIÓN 3
4.OBJETIVOS 4
4.1 Objetivo general 4
4.2 Objetivos específicos 4
5. ESTADO DEL ARTE 5
5.1 Situación de los Páramos 5
5.2 Legislación sobre páramos en Colombia 6
5.3 Características del Complejo de Páramo Guerrero 6
5.4 Restauración ecológica 9
5.5 Importancia de la restauración ecológica y tipos de restauración 9
5.6 Áreas potenciales de restauración ecológica activa 11
5.7 Imágenes satelitales 11
5.8 Series temporales 12
5.9 Análisis de imágenes satelitales 12
6. METODOLOGÍA 14
6.1 Dificultad operativa por grado de inclinación del terreno 14
6.2 Cambio multitemporal 14
6.3 Perdida de coberturas 17
6.4 Acceso operativo por redes y estructuras preexistentes 17
6.5 Áreas potenciales de restauración ecológica 18
7. RESULTADOS 19
7.1 Áreas óptimas operacionales sin dificultad por pendiente 19
7.2Cambio multitemporal 19
7.2.1 Resultados de la clasificación supervisada. 19
7.3 Pérdida de coberturas 24
7.4 Distancias óptimas a zonas de restauración ecológica 25
7.5 Áreas potenciales de restauración ecológica en el CPG 25
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS 28
9.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 30
10. BIBLIOGRAFÍA 31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.Distribución de los páramos en Centro y Sur América (Hofstede y Llambí, 2020)..... 5
Figura 2. Ubicación Complejo de Páramo de Guerrero. 7
Figura 3. Imágenes satelitales LandSat 5 TM y 8 OLITIRS respectivamente bajo la combinación de bandas usadas para el estudio. 15
Figura 4. Diagrama metodológico utilizado 17
Figura 5. Mapa de pendientes óptimas para procesos de restauración ecológica activa en el Complejo de Páramo de Guerrero..... 19
Figura 6.Clasificaciones supervisadas de todos los periodos de tiempo seleccionados 22
Figura 7. Mapas de coberturas para las imágenes de 2001 y 2018. 23
Figura 8.Mapa de transformación de cobertura periodo 2001 al 2018, Complejo de Páramo de Guerrero. 24
Figura 9.Mapa de distancias óptimas para procesos de restauración ecológica activa en el Complejo de Páramo de Guerrero..... 25
Figura 10.Mapa de áreas potenciales de restauración ecológica activa del CPG..... 27

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.Representación de áreas respecto a cada periodo de tiempo. 28
Gráfico 2. Área en ha por rangos de pendientes seleccionadas..... 29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de pendiente óptimas para trabajo operativo en restauración ecológica. 14
Tabla 2. Número de muestras para el año 2001. 20
Tabla 3.Número de muestras para el año 2018. 20
Tabla 4.Valores de Kappa (k). (Cerda L & Villarroel Del P, 2008). 21
Tabla 5. Matriz de separabilidad para el año 2001. 21
Tabla 6. Matriz de separabilidad para el año 2018. 22

1.RESUMEN

La identificación de áreas potenciales de restauración ecológica activa, para áreas mayores a 100 ha, se fundamenta en el uso y análisis de información espacial temática a nivel de paisaje y bajo premisas de comparación de distintas variables físico-ambientales, buscando reducir el área total de estudio a zonas de menor dificultad en el manejo operativo de procesos relacionados con la recuperación activa de áreas degradadas. Es por lo anterior, que las variables tenidas en cuenta para este estudio, se enmarcan en la priorización del trabajo operativo de restauración ecológica activa a desarrollar dentro del Complejo de Páramo de Guerrero, logrando reducir el área total de estudio de 43.229 ha (100%) a 56,16 ha (0,12%), usando una combinación metodológica, la cual se desarrolló por medio del cruce de información entre cambios de cobertura de la tierra en dos periodos de tiempo, dificultad operativa del terreno y capacidad de movilización a predios, por medio del distanciamiento óptimo a redes y estructuras disponibles en la zona. Este estudio consistió en identificar áreas potenciales para restauración ecológica activa, mediante el uso y análisis de información geográfica y espacial del Complejo de Páramo de Guerrero.

PALABRAS CLAVE: Landsat, pendientes, redes-estructuras, operatividad, área potencial de restauración ecológica.

2.ABSTRACT

The identification of potential areas of active ecological restoration, for areas greater than 100 ha, is based on the use and analysis of thematic spatial information at the landscape level and under the premises of comparison of different physical-environmental variables, seeking to reduce the total area of Study of less difficult areas in the operational management of processes related to the active recovery of degraded areas. It is for the above, that the variables taken into account for this study are framed in the prioritization of the operational work of active ecological restoration to be developed within the Páramo de Guerrero Complex, managing to reduce the total study area of 43,229 ha (100%) to 56.16 ha (0.12%), using a methodological combination, which is developed by crossing information between changes in land cover in two periods of time, operational difficulty of the terrain, and the ability to mobilize properties by means of the optimal distance to networks and structures available in the area. This study consists of identifying potential areas for active ecological restoration through the use and analysis of geographic and spatial information of the Páramo de Guerrero Complex.

KEYWORDS: Landsat, slopes, networks-structures, operability, potential ecological restoration area.

3.INTRODUCCIÓN

Los páramos cumplen un papel de muy importante en la economía, en el ecosistema y en la regulación hídrica de las regiones en las cuales se encuentran ubicados, al tener estas características de riqueza y unos suelos muy productivos, la presión que se ejerce sobre estas zonas es bastante fuerte, afectando la estructura, la composición y la función que presentan estas áreas (Díaz-Granados_Ortiz et al., 2005; Garavito_Rincón, 2016; Hofstede et al., 1995).

Debido a la presión ejercida por la frontera agrícola sobre los páramos, es importante realizar estudios de restauración ecológica, para obtener condiciones similares a las que presentaban estas áreas antes de las actividades ejercidas por el hombre y su afectación sobre las mismas; es importante reconocer espacios los cuales requieren prioridad al momento de restaurar, esta prioridad depende tanto de factores medio ambientales físicos y culturales, pero también tienen en cuenta la accesibilidad al terreno y la cercanía de estructuras que permitan el desplazamiento a estas áreas con prioridad de restauración ecológica (González_Ovando et al., 2016; Salamanca, B., Y Camargo, G., 2000).

Teniendo en cuenta lo anterior, con el presente estudio se buscó identificar áreas potenciales para restauración ecológica en el Complejo de Páramo de Guerrero, para lo cual se incorporaron criterios como son pendiente, redes - estructuras presentes en el área de estudio y cambios de cobertura, obtenidos mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales LandSat de los años 2001 y 2018

4.OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Usar series temporales de imágenes satelitales para el reconocimiento de áreas potenciales de restauración ecológica en el Complejo de Páramo de Guerrero.

4.2 Objetivos específicos

- Definir y clasificar las pendientes aptas para desarrollo de actividades de restauración presentes en el Complejo de Páramo Guerrero.
- Clasificar las coberturas presentes en el Páramo de Guerrero mediante la metodología CORINE Land Cover en dos periodos de tiempo.
- Realizar el cruce de las coberturas resultantes para definir las áreas afectadas por actividades antrópicas.
- Identificar redes y estructuras presentes en el área de estudio que faciliten el acceso a las áreas prioritarias.

5. ESTADO DEL ARTE

5.1 Situación de los Páramos

Los páramos se sitúan aproximadamente entre los 11°Norte y 8°Sur, son ecosistemas de alta montaña y su altura está entre los 3000 a los 4700 m.s.n.m aproximadamente, su distribución está en la parte norte de Sudamérica y parte de Centroamérica con un área de 7'500.000 de ha, los países más representativos son Costa Rica, Ecuador, Colombia, Perú y Venezuela (García et al., 2019; Hofstede y Llambí, 2020). Cerca del 99% de los páramos se encuentran en la cordillera de los andes y sus límites se encuentran definidos por el Superpáramo en la parte superior y en la parte inferior se encuentran los Subpáramos y la franja de bosque alto andino, en la **figura 1** se puede observar la distribución de los páramos en Sur y Centro América (Garavito_Rincón, 2016; Izco et al., 2007).

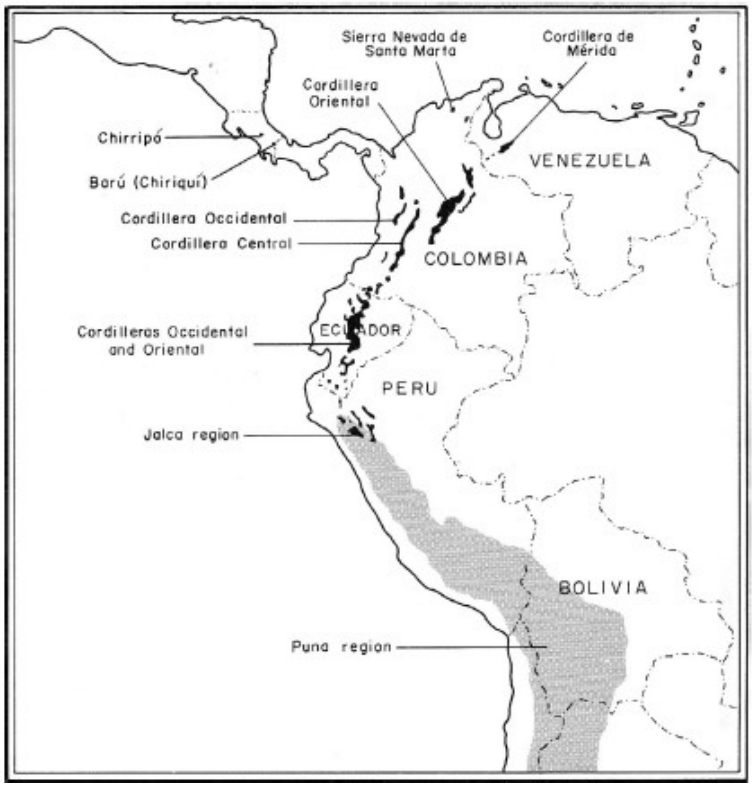

Figura 1.Distribución de los páramos en Centro y Sur América (Hofstede y Llambí, 2020).

En Colombia se encuentran aproximadamente el 60% de los páramos, lo cual representa un 1.3 % de la extensión del territorio colombiano, estos se encuentran en

Boyacá, Cundinamarca, Santander, Cauca, Tolima y Nariño con valores del 18.3%, 13.3%, 9.4%, 8.1%, 7.9% y 7.5% respectivamente (Alonso et al., 2020).

Los páramos son de gran importancia, no solo por su riqueza ecológica, sino porque también cumplen un papel en la economía y su desempeño en la regulación del ciclo hídrico (Díaz-Granados_Ortiz et al., 2005; Garavito_Rincón, 2016; Hofstede et al., 1995). Esto implica que actividades antrópicas deterioren la composición, estructura y función de los páramos de manera agresiva (Buytaert et al., 2006; Poulenard et al., 2003). Las principales actividades que lo deterioran son la deforestación y los cambios de cobertura de la tierra a suelos de uso agrícola, que a su vez cambian la retención hídrica y la evapotranspiración (Buytaert et al ., 2004; Buytaert et al., 2007)

5.2 Legislación sobre páramos en Colombia

Los páramos se definen principalmente por la ley 99 de 1993 la cual lo define como zona de protección especial, la Ley 1382 del 9 de Febrero de 2010 modifica el código de minas Ley 685 de 2001 con el principio de exceptuarse de actividades productivas y determinar las áreas correspondientes a los páramos. Posteriormente se designaron las leyes 1450 de 2011 y la Ley 1753 de 2015 que delimitaron el páramo en sí, fueron corroboradas por la Ley 1930 de 2018, posteriormente se realizó la sentencia C-035 de 2016 la cual indica que el ministerio debe corroborar los criterios científicos establecidos por el Instituto Alexander Von Humboldt para buscar resguardar estas áreas debido a la dualidad de los criterios presentados.

5.3 Características del Complejo de Páramo Guerrero

El Complejo de Páramo de Guerrero (CPG) se encuentra ubicado en la Cordillera Oriental de la Republica de Colombia, al norte del departamento de Cundinamarca y al sureste del departamento de Boyacá, tal como se muestra en la **figura 2**. Cuenta con una extensión total de 43.229 ha, las cuales se distribuyen mayormente en el departamento de Cundinamarca con un 99.9 % de su área (Instituto Alexander Von Humboldt, 2017). Según la clasificación Caldas Lang, el CPG se clasifica como Húmedo y semihumedo; cuenta con una precipitación multianual que fluctúa entre los 1.542 y los 712 mm/año, y a su vez presenta un régimen de lluvias bimodal y una temperatura que varía entre los 7° a los 11°C a lo largo del año siendo así Julio y agosto

los meses en los cuales se presenta menor temperatura. En el CPG se encuentran 4 subzonas hidrográficas y todas poseen POMCA (Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas); la SZH (Sub Zona Hídrica) del Río Bogotá que corresponde a la ZH (Zona Hídrica) del Alto Magdalena, las SZH del Río Carare y Río Negro que pertenecen ZH del Medio Magdalena y por último la SZH del Río Suárez que hace parte de la ZH de Sogamoso, el más importante de sus ríos es el Río Cubillos el cual aporta 103 millones de litros. El 75% del CPG se está bajo las figuras de protección con Registro Único de Áreas Protegidas "RUNAP". El CPG (Complejo de Páramo de Guerrero) se distribuye principalmente en los municipios de Tausa, Zipaquirá, Carmen de Carupa, Subachoque, Cogua, Pacho, Susa y San Cayetano. El CPG hacia el año 2000 contaba con un 30% de su área en ecosistemas naturales, áreas que contaban con poca intervención debido a su relación con el ciclo hídrico y con vegetación característica de Páramos, su transición entre el páramo como tal y el bosque alto andino es difícil de observar debido al grado de intervención que se presenta en el CPG. (Instituto Alexander Von Humboldt, 2017).

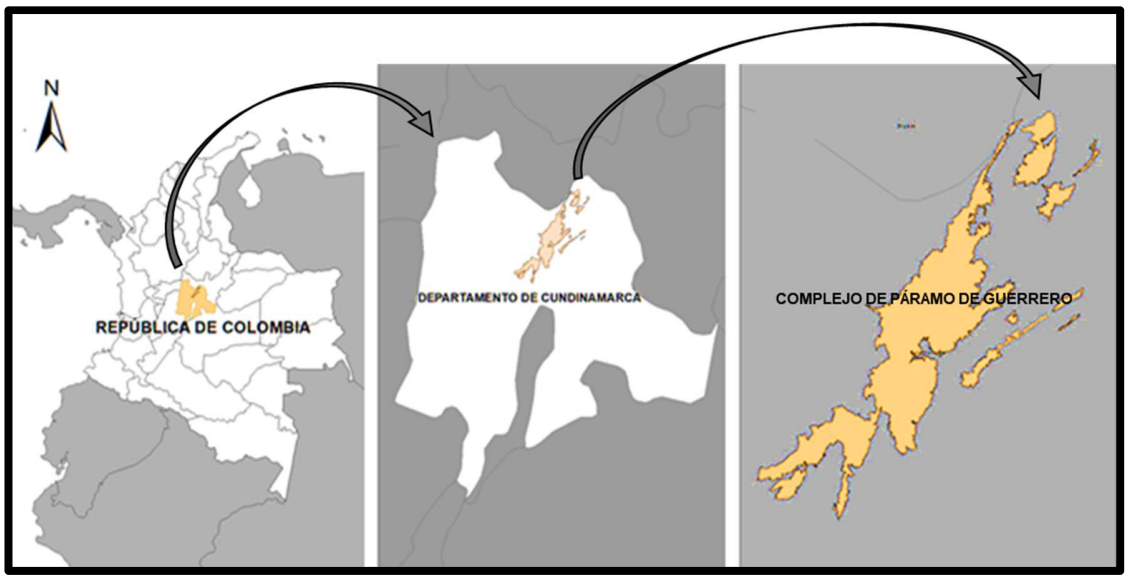

Figura 2. Ubicación Complejo de Páramo de Guerrero.

Geológicamente, el CPG se encuentra sobre las formaciones del Cretácico Chipaque y Guadalupe, del Terciario (Guaduas,Bogotá y Regadera), y también del cuaternario que cuenta con depósitos morrénicos (coluviales y aluviales); estas formaciones tienen gran importancia debido a las funciones que cumplen en la dinámica hídrica que se

presenta en el CPG, por ejemplo se resalta las formaciones presentes del Cretácico pues son áreas con gran potencial hídrico y con gran capacidad de recarga. La geomorfología presente en esta área es dominante por un relieve compuesto por crestones y cuestas, cimas tendidas y laderas empinadas, en ciertas zonas se presentan valles que han sido modificados a través del tiempo por el hielo debido a fenómenos de tipo Glaciar. Por otra parte, las clases de suelos aquí presentes son Haplofibrists, Dystrudeps, Hapludands y Udorthens, presenta características ácidas con baja saturación, con altos porcentajes de MO (materia orgánica) y estos suelos pueden presentar una profundidad moderada pero también pueden presentarse suelos superficiales (Instituto Alexander Von Humboldt, 2017; Morales et al, 2007).

En cuanto a la vegetación el CPG presenta rastrojos y vegetación de subpáramo, bosques alto andinos asociados a matorrales y páramo; las comunidades de páramo están representadas principalmente por Frailejones y pajonales, pero también se identificaron 110 especies que pertenecen principalmente a las familias Rubiaceae, Poaceae, Melastomataceae, Ericaceae, Asteraceae y Rosaceae. Debido a la gran explotación colonial los bosques alto andinos del CPG los relictos de vegetación de bosque alto andino son inaccesibles aun asi alberga especies pertenecientes a las familias Melastomataceae, Myricaceae, Ericaceae, Asteraceae y Polipodiaceae, destacando Encenillos, Ají de páramo y Rodamonte. Las especies de matorrales y rastrojos que se encuentran presentes en bosques alto andinos asociadas a ericáceas (Cortes J., 2017; Morales et al, 2007).

Son tres actividades productivas las que se presentan en el CPG: agricultura, minería y ganadería; la papa es la principal fuente de recursos que la población cultiva para obtener dinero, conjuntamente con los pastos estas representan la mayor parte de las áreas del CPG, aun así, también se presentan cultivos de arveja y otros cultivos temporales estos cultivos son la principal amenaza del páramo pues continuamente se vienen expandiendo y reemplazando la cobertura aquí presente. Por otra parte, la ganadería de la cual se presentan razas como Holstein, Normando y Criollo principalmente, su alimento principal las gramíneas como el pasto kikuyo el carretón, la falsa poa y finalmente la minería constituye como una fuente significativa de empleo en esta área debido a la formación Guaduas, su producción por mes es cercana a las 12

toneladas por mes y su destino principal es térmico (Morales et al , 2007; Rodríguez, 2011).

5.4 Restauración ecológica

La restauración ecológica se define como el proceso de reparar un daño causado antrópicamente a la diversidad y dinámicas que se presentan en un ecosistema, esta tiene como base un estado anterior del ecosistema antes de la intervención humana, el enfoque ecológico a restaurar, establecer metas y métodos de evaluación y tener en claro las limitaciones que se pueden presentar por los diferentes factores en el proceso de restauración (Jackson et al., 1995; Wyant et al., 1995).

Para entender la definición de restauración ecológica es necesario entender ciertos conceptos, el primero de ellos se fundamenta en el ecosistema, y su tamaño con respecto a la relación que se presenta entre sus componentes bióticos y abióticos, estos componentes no se pueden alterar debido a que, ya que, si se altera alguno de ellos, los demás se ven comprometidos; estos mismos son dinámicos y presentan cambios intrínsecos y extrínsecos a esto se denomina sucesión ecológica; la recuperación de los ecosistemas puede presentarse por sí misma, siempre y cuando no existan factores que intervengan en ella, si los ecosistemas se encuentran muy degradados y necesitan intervención humana esto se reconoce como restauración ecológica activa; se requiera también un conocimiento e información previa a la afectación a todos los campos del ecosistema, la restauración cuando se presenta a nivel de paisaje debe darse como prioridad, debido a las grandes escalas que se presentan y por último el éxito de la restauración depende directamente de los costos y la participación de todas las partes interesadas incluyendo la participación de las comunidades locales (Vargas O, 2011).

5.5 Importancia de la restauración ecológica y tipos de restauración

La gran importancia de la restauración ecológica es una herramienta debido a que apoya la conservación y el manejo de los ecosistemas y su sustentabilidad, debido al deterioro creciente de las áreas a tratar. Es vital en estos procesos de restauración mantener el seguimiento y monitoreo. La restauración ecológica activa en sí se trata de realizar una plantación de especies autóctonas de la región de cualquier procedencia (plantaciones o naturales), debido a que la resiliencia del ecosistema es muy baja o el

ecosistema presenta grandes alteraciones por ende no puede restaurarse por sí mismo, en la restauración pasiva se eliminan los factores tensionantes que intervienen con la regeneración del ecosistema (Lozano L. et al, 2017)

Por lo tanto, se debe generar una estructura jerárquica que permita optimizar los tiempos y criterios relevantes, que repercutan de la mejor forma en el presupuesto y tiempo de ejecución del proyecto de restauración (Muñoz_Flores et al., 2018; Zhinin y Aguirre, 2018). Sumado a esto, se debe contar con información preliminar geográfica y espacial, que aporte información pertinente del área de estudio, para su debida interpretación y posterior tratamiento con software, logrando identificar preliminarmente la zona a intervenir (Cabello y Paruelo, 2008; Yu et al., 2012).

En diferentes latitudes la metodología ROAM en español "Metodología de Evaluación de Oportunidades de Restauración", ha determinado que 2000 millones de ha o más pueden ser restauradas en todo el mundo (Maginnis y Verdeone, 2014; Zhinin & Aguirre, 2018). En sí, las metodologías se basan en encontrar los criterios que van a ser primordiales, destacando los sistemas naturales, las redes, estructuras y el sector socioeconómico para poder definir con facilidad el acceso a las áreas, muchas veces dando una escala de prioridad a las áreas desde alta a muy baja (González_Ovando et al., 2016; Muñoz_Flores et al., 2018).

En Colombia la identificación de áreas prioritarias toman como base la selección de subcriterios para la selección de áreas prioritarias, en unos casos se toman aspectos biofísicos y socioeconómicos para determinar las áreas prioritarias de los procesos de restauración, por otra parte, se toman características de las sucesiones vegetales asociadas a características del sitio como el suelo, geomorfología, entre otras y las relacionan con el clima (Bohórquez, 2013; Diaz_Santamaría & Torres, 2001).

Metodologías consultadas para dar sustento a este trabajo, se enfocan en criterios ambientales, socioeconómicos y sucesos intrínsecos los cuales van desde movimientos en masa hasta la probabilidad de inundaciones. Teniendo en cuenta que los subcriterios de cada criterio van desde baja hasta muy alta y se seleccionan de acuerdo a las necesidades de cada proceso de restauración ecológica (Bohórquez, 2013; González_Ovando et al., 2016). A su vez también toman sitios de referencia teniendo

en cuenta las coberturas presentes en el área de estudio y su porcentaje, clasificación del área según SNAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas) y la presión socioeconómica sobre ese territorio (Zhinin & Aguirre, 2018). Estos estudios se enfocan en dar una escala de prioridad para sus áreas identificadas y su metodología permite encontrar de acuerdo a la gran cantidad de factores las áreas prioritarias con mayor categoría y enfocarse en el desarrollo del proyecto.

5.6 Áreas potenciales de restauración ecológica activa

Las áreas potenciales de restauración ecológica activa, se definen como los procesos humanos para mejorar la estructura, composición, y función de ecosistemas afectados, se basan en entender la factibilidad de acceso a los recursos y sitios de referencia con los cuales se quiere trabajar (González_Ovando et al., 2016; Salamanca, B., Y Camargo, G., 2000). Este depende de las interacciones de los sistemas socioeconómicos, biofísicos y el objeto de la restauración, con el fin de lograr proyectar el presupuesto para este tipo de proyectos y definir las variables que más afectan el desarrollo de las actividades de restauración (Bohórquez, 2013; Wyant et al., 1995). Buscando generar beneficios medioambientales y económicos para los distintos actores de las zonas de influencia de los proyectos (Brancalion et al., 2019; Strassburg et al., 2019).

5.7 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son el resultado de captar la radiación que se refleja sobre la superficie terrestre por medio de sensores que se encuentran instalados en satélites artificiales ubicados sobre la órbita de la Tierra, las imágenes satelitales pueden variar de acuerdo a características como lo son elevación, colores, resolución entre otras. Aparte de lo mencionado anteriormente las imágenes satelitales se ven influenciadas por las condiciones meteorológicas de la obtención del proceso de teledetección y en este proceso se presentan varias interacciones que van desde la fuente de iluminación hasta la interpretación, análisis y aplicación. Hay dos tipos de teledetección la pasiva y la activa, la pasiva se refiere a qué el sensor capta la radiación emitida desde alguna fuente externa y la activa se presenta cuando el sensor emite la radiación. En este proceso son de vital importancia y claridad la reflectancia y la longitud de onda, la

reflectancia es la capacidad de un objeto de reflejar radiación que incide sobre el mismo. La longitud de onda determina qué tipo de radiación pueden captar los sensores (Sánchez P., 2012).

5.8 Series temporales

Las series temporales son colecciones de observaciones que se realizan sobre variables que se dan en periodos de tiempo, para este estudio las series temporales son una colección de dos imágenes satelitales de distintos periodos de tiempo 2001-2018, estas imágenes son del programa Landsat, específicamente Landsat 5 TM y Landsat 8 OLITIRS. El programa Landsat se inició en 1972 inicialmente llamado ERTS-1, equipado con una cámara VIDICON (RBV) y un MSS (Multiespectral Scanner System), posteriormente precedieron los satélites Landsat 2 y 3, estos poseían un MSS de 4 bandas y tenía una resolución espacial de 79. Hacia el año de 1982 se presenta el lanzamiento de Landsat 4 el cual tuvo una corta duración en cuanto a su vida útil siendo remplazado por el Landsat 5 TM (Thematic Mapper), este cuenta con 7 bandas, cuenta con una resolución espacial de 30m exceptuando el infrarrojo térmico que cuenta con 120m. Posteriormente se inició el programa Landsat 6 en el año de 1993 el cual tuvo problemas, debido a esto prosigue el Landsat 7 ETM (Enhanced Thematic Mapper), su uso se presenta hasta el año 2013 donde entra el satélite LAndsat 8 OLI TIRS (Operal Land Imager y Thermal Infrared Sensor), se encuentra en actual funcionamiento (Lopez M., y Denore B., 2000; Pimple et al., 2020).

5.9 Análisis de imágenes satelitales

El análisis de imágenes satelitales mediante herramientas SIG permite complementar y detallar los cambios ambientales que se producen en un área, a partir de cualquier disturbación y también permite una cuantificación indirecta y aproximada de las áreas afectadas, es por ello que se pueden tomar imágenes satelitales correspondientes a distintos periodos de tiempo para analizar el cambio presentado entres los dos periodos de tiempo, esto se denomina uso de series temporales para un análisis multitemporal (Flórez_Yepes et al., 2017). El contrastar dos imágenes en dos periodos de tiempo diferentes permite observar los cambios que se han presentado en estas zonas e identificar posibles amenazas y permite a su vez poder hacer una predicción de lo que

sucederá en estas áreas y poder formular planes de manejo o proyectos que permitan reducir el impacto y restaurar estas zonas para recuperar la función de los ecosistemas afectados de manera antrópica; el principal factor determinador a la hora de encontrar áreas potenciales de restauración ecológica, se relaciona con los cambios de la cobertura de la tierra en cuanto a la transformación de bosques o espacios naturales (ecosistemas) a suelos de uso agrícola, durante una temporalidad definida. Adaptando las metodologías propuestas por (Shao y Wu, 2008; Ibarra_Montoya et al., 2011; Osuna et al., 2015; Sun et al., 2015), se implementa el análisis supervisado de interpretación de coberturas y se determina los cambios en las dinámicas temporales del uso de suelo dentro del área de estudio.

6. METODOLOGÍA

6.1 Dificultad operativa por grado de inclinación del terreno

La pendiente es un factor que limita la operatividad del terreno, debido a la estabilidad e inclinación del sitio a trabajar, lo que hace necesario identificar aquellas áreas que por su grado de inclinación del suelo no se pueden trabajar.

En virtud de lo anterior se generó un mosaico a partir de un Modelo Digital de Elevación DEM obtenido en la plataforma ASTER: ASTGTMV003 N04W074, ASTGTMV003 N04W075, ASTGTMV003 N05W074 y ASTGTMV003 N05W075. Para el procesamiento se generó un mosaico en el programa ArcMap 10.7 creando polígonos de pendientes, las cuales se clasificaron en porcentaje óptimo para labores en campo, adaptando la propuesta de la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2020). En la **tabla 1** se puede observar la clasificación de pendientes implementada, resaltando en gris las pendientes que son óptimas para los trabajos operativos de restauración ecológica activa.

ID	CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES
1	**< 3 % Casi plano**
2	**3% a 7% Ligeramente ondulado - Ligeramente inclinado.**
3	**7% a 12% Moderadamente ondulado – Moderadamente inclinado.**
4	12% a 25% Fuertemente ondulado – Fuertemente inclinado.
5	25% a 50% Ligeramente empinado.
6	50% Fuertemente empinado – Escarpado.

Tabla 1. Clasificación de pendiente óptimas para trabajo operativo en restauración ecológica.

6.2 Cambio multitemporal

Inicialmente las imágenes satelitales LandSat 5 y LandSat 8 fueron objeto de corrección radiométrica y atmosférica, operación realizada de acuerdo a la combinación falso color como se observa en la **figura 3**(imagen 2001 LandSat 5 TM (453) y 2018 LandSat 8 OLI TIRS (564)), se realizó una clasificación supervisada de las coberturas visibles en las imágenes satelitales por medio del software PCI

Geomatics y ArcMap 10.7 (GIS,ESRI 2019), para cada una de las dos épocas 2001 y 2018. La intercepción y análisis de cambios de cobertura se fundamentaron principalmente en áreas de coberturas naturales que durante la temporalidad trabajada fueron transformados en suelos de uso agrícola, lo que permitió identificar polígonos de transformación de uso de suelo, dentro del CPG, sitios potenciales a intervenir bajo procesos de restauración ecológica activa. Siguiendo y modificando las metodologías presentadas por (Shao y Wu, 2008; Ibarra_Montoya et al., 2011; Osuna et al., 2015; Sun et al., 2015).

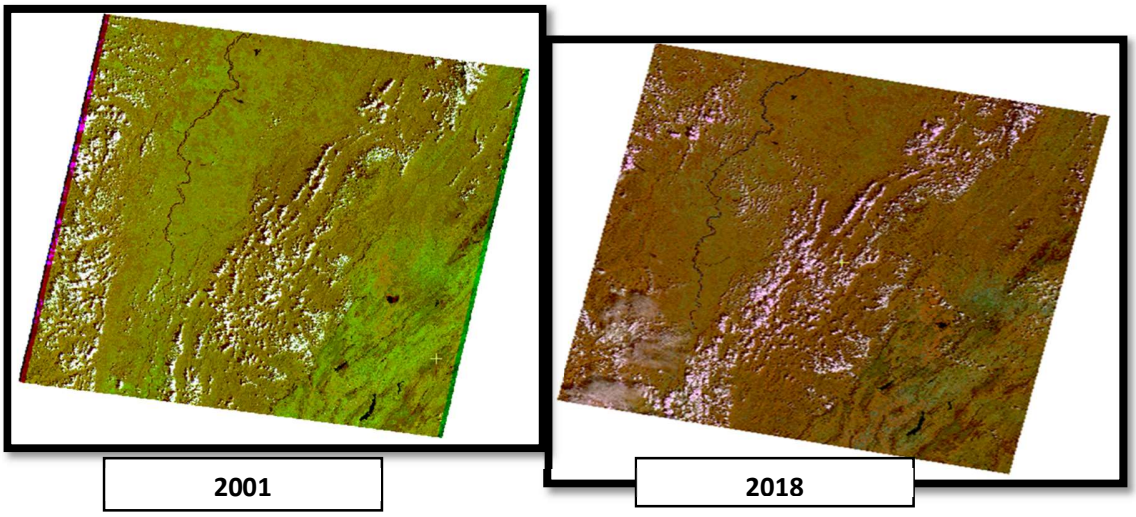

Figura 3. Imágenes satelitales LandSat 5 TM y 8 OLITIRS respectivamente bajo la combinación de bandas usadas para el estudio.

Se utilizó el programa PCI geomática más específicamente FOCUS, el cual es un programa con gran uso en el campo de la geomática, este posee múltiples funciones y algoritmos, en este caso para el manejo de la información Raster conjuntamente con el software ArcGIS 10.2 pues los dos poseen compatibilidad para el manejo, procesamiento y análisis de las mismas.

Para la imagen del año 2001, se utilizó la combinación de falso color 453, ya que hace una gran diferenciación entre los distintos tipos de vegetación, con una variación de

colores que van desde el color marrón, naranja y verde, establece una diferenciación marcada entre las coberturas del suelo y el agua, siendo así usada para análisis del contenido de humedad presente en el suelo y la cobertura presentada en vegetación (Fernández-Coppel & Herrero E.,2001). Por otra parte, la combinación para hacer una clara diferenciación entre el agua y la tierra y para diferenciar la vegetación se utiliza la combinación 564 para las imágenes Landsat 8; esta última combinación es homóloga para la combinación 453 que se utilizó en la imagen del satélite Landsat 5. Para la imagen del año 2018 se realizó un cambio de escala debido a que la imagen presentaba un rango radiométrico de 12 bits el cual fue transformado a 8 bits para que se pudiera trabajar con el programa PCI geomatics. Con las capas obtenidas del páramo se hicieron cortes ajustados para trabajar en el área de interés.

Para procesar las imágenes se utilizó la herramienta clasificación supervisada, la cual consistió en tomar muestras de las diferentes coberturas a clasificar, Según Gómez C y Calderón D.(2012), las clases son delimitadas por el intérprete representativas, conocidas también como áreas de entrenamiento las cuales facilitan que el programa asocié con las muestras las coberturas distribuidas en toda la imagen, por otra parte Chuvieco E.(1990) menciona que al definir las clases informacionales por el método de clasificación supervisada puede lograr un avance, siempre y cuando el intérprete tenga claridad de las clases informacionales presentes en dicha imagen.

Por cada cobertura se tomaron 2 muestras para 5 coberturas cada una de ellas con una desviación estándar menor al 5%, posterior a esto se realizó una matriz de separabilidad la cual indicó qué tan diferente son los píxeles seleccionados entre cada una de las coberturas, y así poder realizar la clasificación. Por consiguiente, al verificar la diferenciación de píxeles, se procede con la clasificación, que para este caso se eligió la mínima distancia.

Posteriormente se hizo un proceso de agregación en el cual se unen los pixeles de las distintas muestras seleccionadas por cobertura, unificándola en sí en una como tal. Para generar un producto con mayor calidad se generan unas máscaras para corregir los errores cometidos en la clasificación por cada una de las clases o cobertura, finalizado este proceso de corrección se genera un filtrado modal 3x3 donde se discriminan ciertos

pixeles que son mínimos para el área manejada. Todo este procedimiento se ve en la **figura 4.**

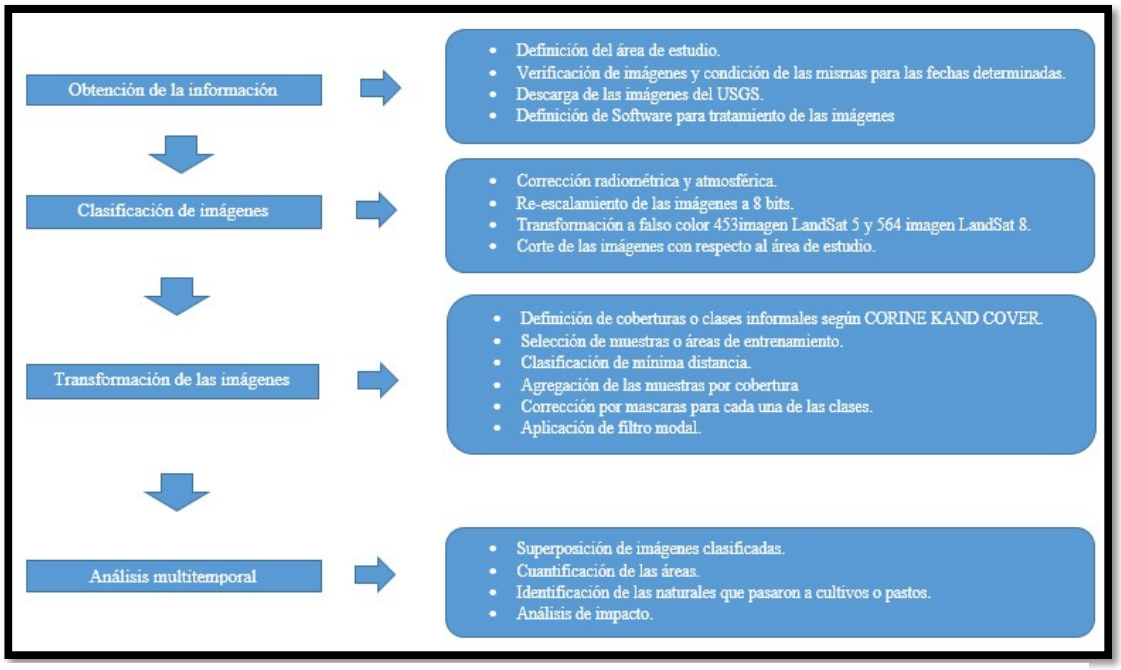

Figura 4. Diagrama metodológico utilizado

6.3 Perdida de coberturas

Al obtener los mapas de coberturas de los dos periodos de tiempo, se hace un cruce de capas para poder evidenciar el cambio multitemporal, pero para el caso de este estudio solo se tienen en cuenta las áreas naturales que pasaron a ser áreas agrícolas heterogéneas y pastos, permitiendo así observar las áreas de riesgo que pueden entrar dentro de la categoría de áreas prioritarias para la restauración ecológica.

6.4 Acceso operativo por redes y estructuras preexistentes

Un factor que dificulta la operatividad de los procesos de restauración ecológica activa, se relaciona con el acceso a las áreas potenciales de restauración ecológica por parte de los operarios, es por lo anterior, que identificar las redes y estructuras del complejo de páramo, permite definir la distancia promedio que un operario puede trasladarse desde una estructura o red, hasta el sitio de trabajo. Para este estudio se define un recorrido óptimo por trayecto de 0.5 km debido al área del CPG.

Para el planteamiento anterior, se utilizó la herramienta Add Basemap seleccionando las opciones Street e image galery with labels de ArcMap 10.7, para poder digitalizar las vías y la vivienda rural, posteriormente se creó un buffer de 0,5 km sobre las vías y los puntos que representan las viviendas, esto permitió observar, posibles desplazamientos óptimos para las áreas seleccionadas en las jornadas de trabajo para futuros proyectos de restauración ecológica, el valor promedio óptimo de desplazamiento se obtiene con base a información no publicada de los rendimientos operativos (JBB, 2019).

6.5 Áreas potenciales de restauración ecológica

El cruce de las capas correspondientes a los anteriores procesos, ofrece la capa final que permitió obtener las áreas prioritarias para restauración ecológica en el complejo de páramo de guerrero.

7. RESULTADOS

7.1 Áreas óptimas operacionales sin dificultad por pendiente

En la **figura 5**, se puede observar las áreas cuya inclinación del suelo permiten el trabajo operativo sin colocar en riesgo a las personas que apoyan el proceso de restauración ecológica activa, en color amarillo están las pendientes menores al 3%, las cuales tienen un área de 458,22 ha y un porcentaje del área total de 1.06%, en color rojo se presentan las pendientes entre el 3% y el 7% con un área de 1773,3 ha y un área con respecto al total del complejo de 4,1% y en color azul oscuro se encuentran todas las pendientes entre el 7% y el 12%, con un área 3464,40 ha y un porcentaje de 8,01% con relación al área total de estudio.

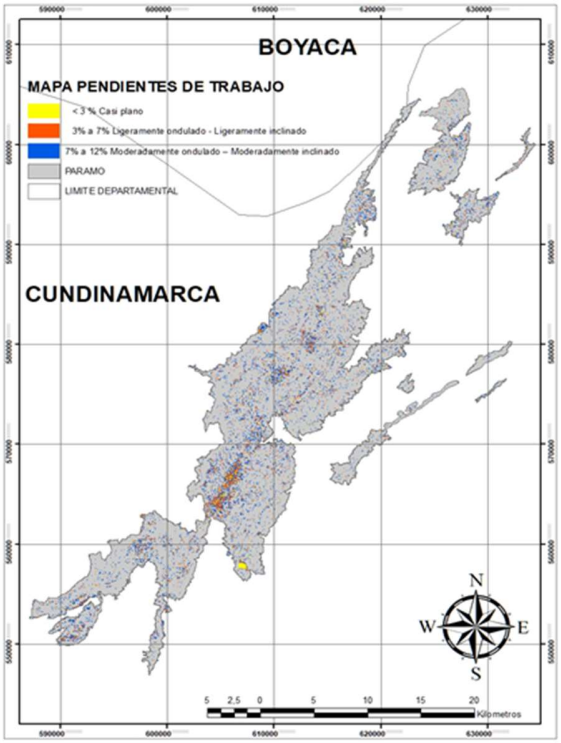

Figura 5. Mapa de pendientes óptimas para procesos de restauración ecológica activa en el Complejo de Páramo de Guerrero

7.2Cambio multitemporal

7.2.1 Resultados de la clasificación supervisada.

Para la imagen del año 2001 se tomaron 63447 muestras, en la tabla 2 se muestran el número de muestras por cobertura en la clasificación.

En la clasificación supervisada el primer resultado a tener en cuenta fue la matriz de separabilidad, pues esta muestra que tan diferentes son las muestras tomadas entre sí, entre el valor se acerque más a 0, más similares serán las coberturas.

Para el año de 2001 tenemos un total de 6.447 muestras en total por todas las coberturas, para el año 2018 el número de muestras que se tomaron fueron de 114.221 tal como se observa en la **Tabla 2** y **3** donde se muestran los totales, y número de muestras por cobertura.

COBERTURAS	# DE MUESTRAS
Bosques 1	77
Bosques 2	174
Bosques 3	658
CVHA 1	4575
CVHA 2	451
Pastos 1	63
Pastos 2	20
Pastos 3	26
Cultivos 1	47
Cultivos 2	10
Cultivos 3	16
C. de Agua	330
Total	6.447

Tabla 2. Número de muestras para el año 2001.

COBERTURAS	# DE MUESTRAS
Bosques 1	11655
Bosques 2	95
Bosques 3	20479
CVHA 1	68972
CVHA 2	3346
Pastos 1	79
Pastos 2	82
Pastos 3	79
Cultivos 1	91
Cultivos 2	86
Cultivos 3	172
C. de Agua	9085
Total	114.221

Tabla 3.Número de muestras para el año 2018.

.

Al realizar la clasificación supervisada, el primer resultado a tener en cuenta fue la matriz de separabilidad, pues esta muestra qué tan diferentes son las muestras tomadas entre sí, entre el valor se acerque más a 0, más similares serán las coberturas.

En las **tablas 5 y 6** se evidencia que tanta diferencia se pudo encontrar entre las muestras, en general son muy diferentes las unas de las otras, exceptuando las Coberturas con Vegetación Herbácea y/o Arbustiva (CVHA). Como se mencionó anteriormente, se hizo uso del coeficiente Bhattacharyya. La clasificación supervisada muestra en si la precisión global por cada uno de los periodos y el coeficiente de kappa, este último brinda el nivel de concordancia que se obtuvo de la clasificación supervisada, teniendo así 6 rangos en los cuales se ubica la concordancia, estos valores se presentan en la **tabla 4**.

Kappa (k)	Grado de acuerdo
<0,00	Sin acuerdo
0,00-0,20	Insignificante
0,21-0,40	Mediano
0,41-0,60	Moderado
0,61-0,80	Sustancial
0,81-1,00	Casi perfecto

Tabla 4. Valores de Kappa (k). (Cerda L & Villarroel Del P, 2008).

El k para el año 2001 es de 0.56441 dejándolo con un grado de acuerdo moderado y una precisión global del 73.69 % y por último el año 2018 84.93% de precisión y un k de 0.82080 ubicándolo en casi perfecto.

	Bosques 1	Bosques 2	Bosques 3	CVHA 1	CVHA 2	Pastos	Pastos	Pastos	Cultivos	Cultivos 2	Cultivos 3
Bosques 2	1,3045										
Bosques 3	1,1015	1,4949									
CVHA 1	2,0000	2,0000	2,0000								
CVHA 2	2,0000	1,9999	2,0000	0,4669							
Pastos 1	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000						
Pastos 2	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000					
Pastos 3	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	1,7544	2,0000				
Cultivos 1	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000			
Cultivos 2	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	1,9986		
Cultivos 3	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	1,9201	1,8499	
C. de Agua	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000

Tabla 5. Matriz de separabilidad para el año 2001.

	Bosques 1	Bosques 2	Bosques 3	CVHA 1	CVHA 2	Pastos 1	Pastos 2	Pastos 3	Cultivos 1	Cultivos 2	Cultivos 3
Bosques 2	0,2624670										
Bosques 3	0,1182820	0,234166									
CVHA 1	1,4833400	1,668342	1,312085								
CVHA 2	1,5564440	1,784623	1,433434	0,244126							
Pastos 1	1,9999840	1,999999	1,999966	1,988078	1,990505						
Pastos 2	1,6741250	1,814915	1,579013	1,034156	1,231552	1,917857					
Pastos 3	1,9999420	2,000000	1,999912	1,995137	1,997977	1,578386	1,447376				
Cultivos 1	1,9999990	2,000000	1,999999	2,000000	1,999996	2,000000	2,000000	2,000000			
Cultivos 2	1,9999992	2,000000	1,999995	1,999997	1,999931	2,000000	1,999999	1,999995	1,869945		
Cultivos 3	1,9907970	1,999729	1,992131	1,982616	1,941792	1,999361	1,990597	1,998059	1,965763	1,686598	
C. de Agua	1,9747490	1,989849	1,964434	1,999972	1,999992	2,000000	1,999999	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000

Tabla 6. Matriz de separabilidad para el año 2018.

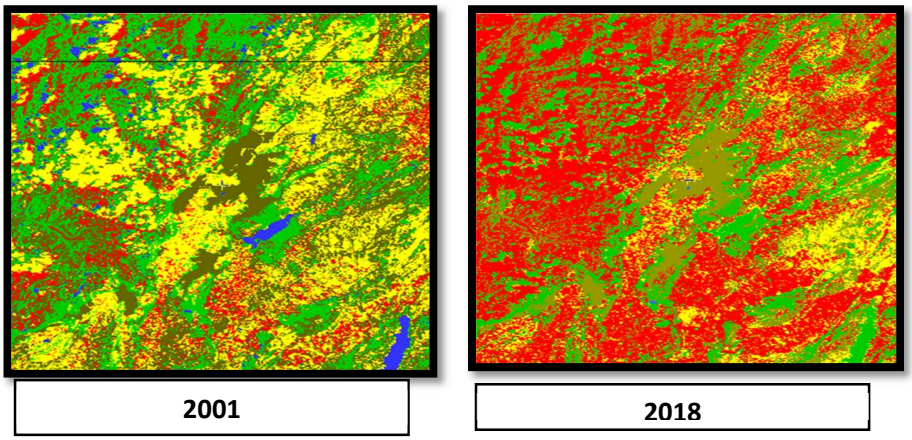

Figura 6. Clasificaciones supervisadas de todos los periodos de tiempo seleccionados

La **figura 6** muestra la clasificación supervisada realizada mediante el programa PCI geomatics, el programa utilizó las zonas de entrenamiento que se seleccionaron y a partir de estas clasificó cada uno de los pixeles que, de la imagen, en esta figura ya se hizo un recorte de la zona de estudio para poder focalizarse en la misma, y facilitar el desplazamiento a la hora de ser trabajada y manipulada.

La **figura 7** muestra la cartografía realizada a partir de cada una de las imágenes con 5 coberturas, todo esto trabajado a una escala 1:250.000; a simple vista se puede evidenciar los cambios que ocurren en cada una de las imágenes, pero no basta con eso

para poder hacer una predicción clara con respecto a que sucederá al pasar los años para estas zonas.

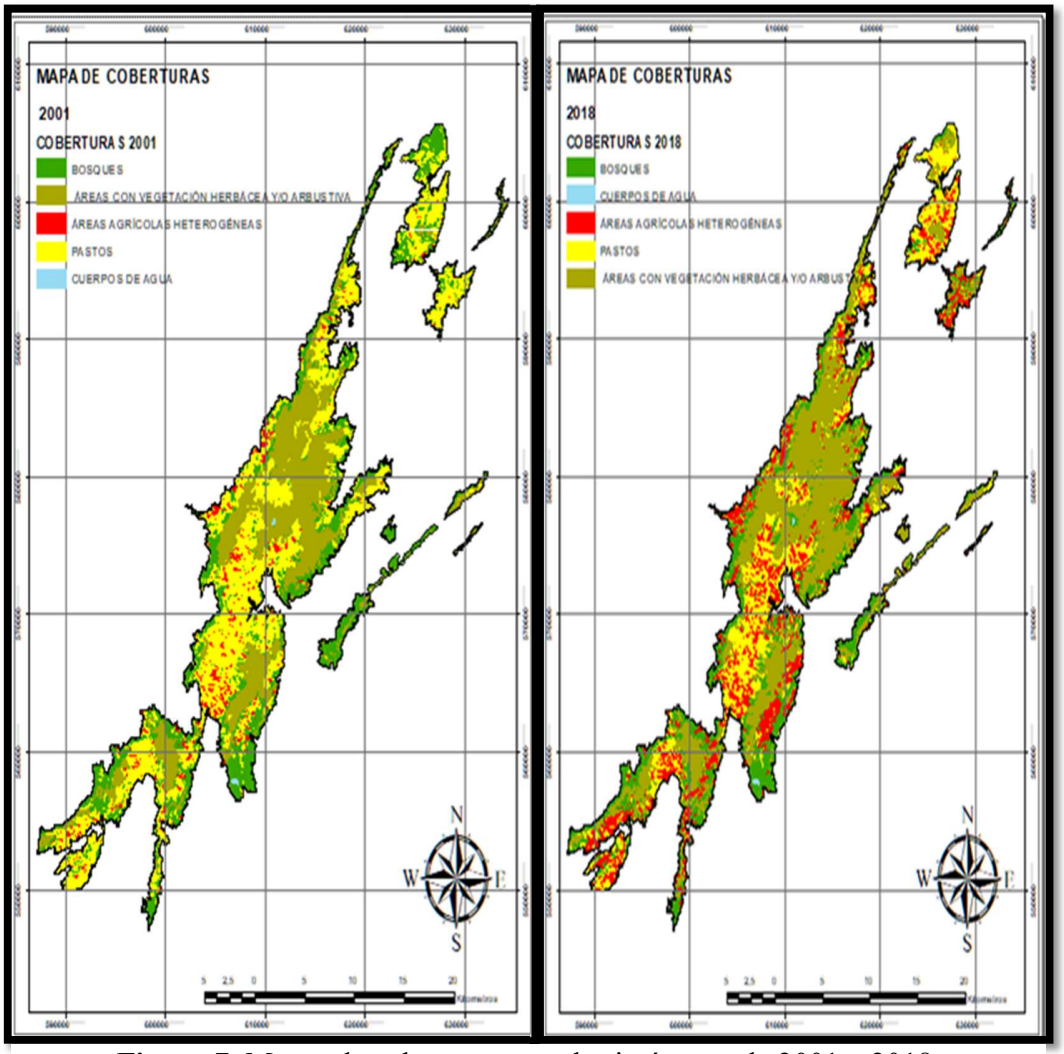

Figura 7. Mapas de coberturas para las imágenes de 2001 y 2018.

7.3 Pérdida de coberturas

El cambio de coberturas de la tierra, constituido principalmente por la alteración de la vegetación herbácea, arbustiva y arbórea nativa hacia coberturas de uso agropecuario como pastos y cultivos heterogéneos, durante la temporalidad 2001 al 2018, se vio reflejada en un total de área transformada de 676,16 ha. Lo anterior reflejó que el 1,6% del área total del Complejo de Páramo de Guerrero, fue objeto de cambio de la cobertura natural a uso antrópico en un periodo de 17 años, en la **figura 8** se puede observar en color rojo las áreas correspondientes a la pérdida de cobertura obtenida mediante el uso de series temporales, estas áreas se consideran en el estudio como las áreas objeto de implementación de restauración ecológica activa.



Figura 8. Mapa de transformación de cobertura periodo 2001 al 2018, Complejo de Páramo de Guerrero.

7.4 Distancias óptimas a zonas de restauración ecológica

Se identificaron casas y vías dentro del área de estudio como las principales redes y estructuras que brindan apoyo a los procesos de restauración ecológica activa, se identificaron 66 casas representadas en color azul oscuro en el mapa de la **figura 9**. En cuanto a las vías se identificó un total de 366,53 km, los cuales se representan en líneas de color rojo dentro de la **figura 9**. Se realiza un buffer de 0.5 km a las redes y estructuras identificadas logrando obtener las áreas con distancias óptimas operativas, representadas en 1709,9 ha.

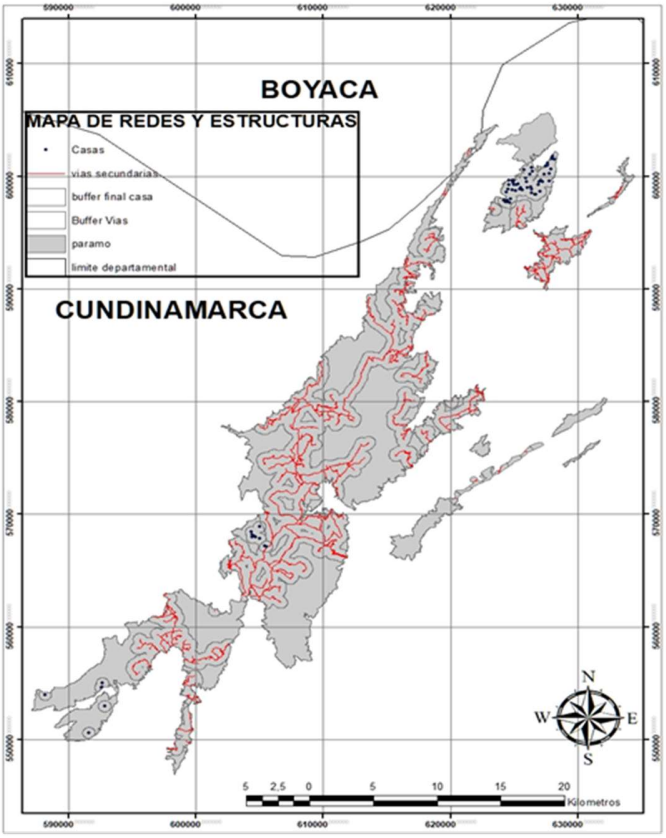

Figura 9.Mapa de distancias óptimas para procesos de restauración ecológica activa en el Complejo de Páramo de Guerrero.

7.5 Áreas potenciales de restauración ecológica en el CPG

El cruce de los mapas presentados anteriormente, permitió identificar las áreas potenciales de restauración ecológica activa, se logró reducir el área total de 43.223 ha

(100%) a 56,16 ha (0,12%), estas áreas se ven representadas de color rojo en la **figura 10** y se considerarán como las áreas que operativamente presentan las mejores condiciones para implementación de procesos de recuperación de áreas transformadas en suelos de uso agrícola.



Figura 10. Mapa de áreas potenciales de restauración ecológica activa del CPG.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El **Grafico 1** demuestra cómo lo cambian las coberturas entre el 2001 y 2018, se ve un aumento substancial en las áreas de Páramo, esto no quiere decir que no existan áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva que no hayan pasado a ser pastos y cultivo, como se puede ver en la **Figura 8**, donde se muestran las áreas afectadas por cambio de coberturas. El continuo aumento de la actividad agrícola en el páramo de guerrero se vio reflejado, y cómo estas actividades van afectando de gran manera los ecosistemas. En cuestión de bosques también se pudo observar que son reducidos en el lapso de 17 años y que su área perdida efectivamente paso a cultivos.

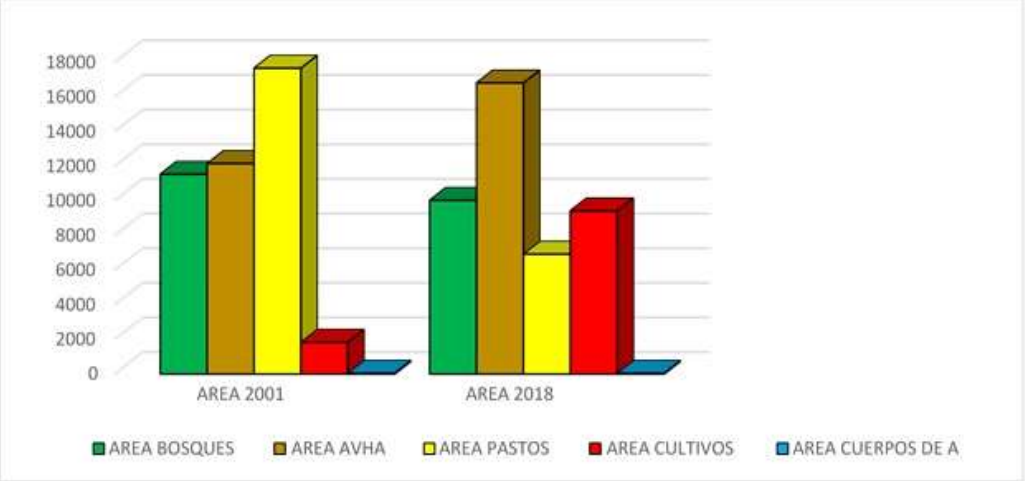

Gráfico 1. Representación de áreas respecto a cada periodo de tiempo.

Los valores obtenidos en el índice de Kappa y de precisión global son acordes a los encontrados en otros estudios siendo estos clasificados como muy buenos y presentan una buena concordancia con respecto a su varianza debido a que funciona como análisis estadístico lo cual confirma que la toma de los datos y la manipulación de los mismo fue efectiva (Chuvieco, 2008; González_Ovando et al., 2016)

En total las áreas que perdieron coberturas por cambio de uso de la tierra (676,16 ha) en 17 años evidencian claramente el avance de la frontera agrícola sobre esta importante área, lo cual es un signo de alarma, permitiendo dentro de estas áreas la realización de estudios y proyectos que promuevan la recuperación de sitios degradados.

En cuanto a las pendientes se pueden observar que en la **figura 5**, el área correspondiente a las pendientes óptimas para el trabajo fue de 5695,9 ha el valor restante de 37533,1 ha corresponde a pendientes no óptimas para el trabajo. El **gráfico 2** muestra el valor exacto entre las pendientes óptimas en la gráfica de barras. Esto ayudó a discriminar bastante área para poder ir seleccionando nuestras áreas prioritarias para la restauración en combinación con las otras capas correspondientes a los otros criterios seleccionados para cumplir el objetivo planteado.

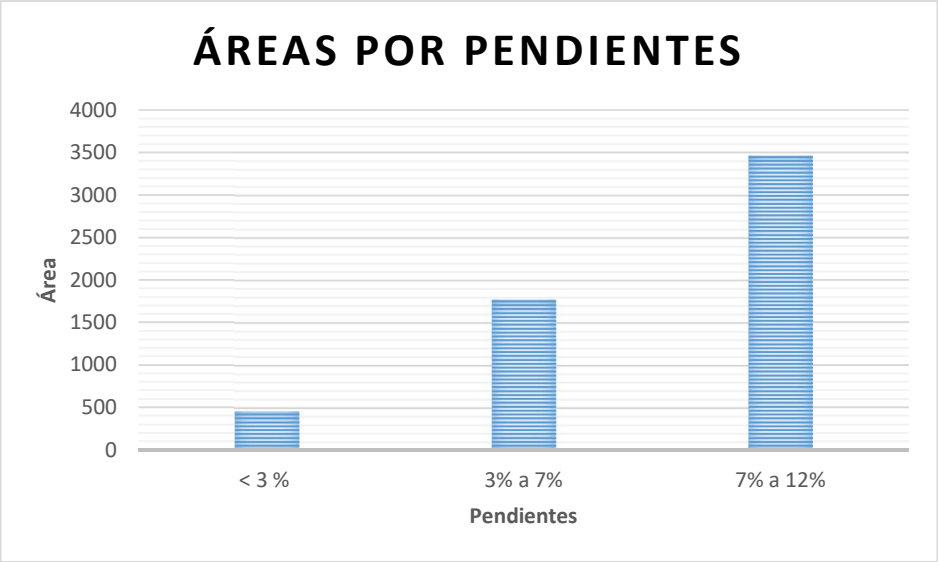

Gráfico 2. Área en ha por rangos de pendientes seleccionadas.

Las vías tienen una longitud total de 366,5 Km y 67 unidades de vivienda rural, el área de buffer fue de 20871,6 ha y 1709,9 ha respectivamente. Ocupan una mayor área debido al buffer de 0.5 km, un factor bastante importante para la selección de áreas debido su extensión y que tiene el mayor valor de área con respecto a los otros criterios utilizados para este proyecto.

Por último, es de gran importancia resaltar que la metodología usada para este proyecto permitió reducir el área total 43.229 ha (100%) a tan solo 56,16 ha (0.12%), estas áreas se pueden observar en la **Figura 10,** esto permite que se pueda focalizar estas áreas para la restauración activa.

9.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso y análisis de información espacial temática a nivel de paisaje, permitió fácilmente identificar las áreas potenciales para restauración ecológica, lo que generó la reducción del área total de estudio a una zona de trabajo con menor escala, que tiene a su vez accesibilidad y permite facilidad de trabajo al tener en cuenta las pendientes. El uso de imágenes LandSat es gratuito y permite el estudio de grandes áreas como lo es el Complejo de Páramo de Guerrero, pero su resolución espacial de 30 m dificulta la clasificación de coberturas, se recomienda el uso de imágenes satelitales con mejor resolución espacial.

Por otra parte, el uso de DEM es muy favorable en cuanto la facilidad de uso de estos modelos en cuanto a la generación de curvas de nivel y mapas de pendiente media. Es evidente el cambio de cobertura en una temporalidad de 17 años, por lo cual es recomendable seguir haciendo este tipo de estudios y/o análisis multitemporales que permitan evaluar el avance de la frontera agrícola sobre las coberturas que se presentan allí originalmente, el uso y generación de políticas medioambientales, como también opciones factibles para el cambio de actividades productivas para las personas que allí residen, estas acciones pueden contribuir notablemente en la conservación y restauración del CPG.

Es importante generar este tipo de estudios por que se tienen en cuenta actividades operativas con respecto a la restauración ecológica activa, muchos estudios de restauración ecológica no tienen en cuenta la priorización de áreas de restauración por lo cual es importante hacerlos para futuros proyectos y así poder incidir directamente en los presupuestos.

10. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, D. L., Pérez, R., Okio, C. K. Y. A., & Castillo, E. (2020). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán paramo, Colombia. *Journal of Environmental Management*, *264*, 110478. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110478

Bohórquez, D. C. (2013). Determinación del potencial de restauración ecológica en el parque nacional enrique Olaya Herrera, II ETAPA. *Colombia Forestal*, *16*(2), 200-215.

Brancalion, P. H. S., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F. S. M., Zambrano, A. M. A., Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J. L., Strassburg, B. B. N., Wilson, S., & Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances*, *5*(7), eaav3223. https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3223

Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, *79*(1), 53-72. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002

Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bièvre, B. D. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, *251*(1), 22-30. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035

Cabello, J., & Paruelo, J. M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Revista Ecosistemas*, *17*(3), Article 3. https://doi.org/10.7818/re.2014.17-3.00

Cerda L, J., & Villarroel Del P, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena*

de pediatría, *79*(1), 54-58. https://doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008

Díaz-Granados_Ortiz, M. A., Navarrete_González, J. D., & Suárez_López, T. (2005). Páramos: Sensitive Hydrosystems. *Revista de Ingeniería*, *22*, 64-75.

Diaz_Santamaría, W. R. D., & Torres, C. E. T. (2001). Estudio básico de restauración vegetal en áreas de subpáramo degradadas de la vereda Monquentiva-Guatavita. *Colombia forestal*, *7*(14), 116-123. https://doi.org/10.14483/2256201X.3212

Flórez_Yepes, G. Y., Rincon_Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate_Alvarez, A. M. (2017). Multitemporal analysis of the vegetation cover in the area of influence of the mines located in the high part of Maltería in Manizales, Colombia. *DYNA*, *84*(201), 95-101. https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759

Garavito_Rincón, L. N. (2016). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Revista Ingeniare*, *19*(19), 127-136.

García, V. J., Márquez, C. O., Isenhart, T. M., Rodríguez, M., Crespo, S. D., & Cifuentes, A. G. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon*, *5*(10), e02701. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701

González_Ovando, M. L., Plascencia_Escalante, F. O., & Martínez_Trinidad, T. (2016). Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán. *Madera y bosques*, *22*(2), 41-52. https://doi.org/10.21829/myb.2016.2221323

Hofstede, R. G. M., Castillo, M. X. M., & Osorio, C. M. R. (1995). Biomass of Grazed, Burned, and Undisturbed Páramo Grasslands, Colombia. I. Aboveground Vegetation. *Arctic and Alpine Research*, *27*(1), 1-12. https://doi.org/10.1080/00040851.1995.12003091

Hofstede, R. G. M., & Llambí, L. D. (2020). Plant Diversity in Páramo—Neotropical High Mountain Humid Grasslands. En M. I. Goldstein & D. A. DellaSala (Eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 362-372). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11858-5

Instituto Alexander von Humboldt. (2017). Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del Complejo de Páramos Guerrero a escala 1:25.000. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt – Fondo Adaptación.

Izco, J., Pulgar, Í., Aguirre, Z., & Santin, F. (2007). Estudio florístico de los páramos de pajonal meridionales de Ecuador. *Revista Peruana de Biología*, *14*(2), 237-246.

Jackson, L. L., Lopoukhine, N., & Hillyard, D. (1995). Ecological Restoration: A Definition and Comments. *Restoration Ecology*, *3*(2), 71-75. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1995.tb00079.x

Lopez, M.J., Denore B.J (2000). Los Satélites de observación de la tierra en el 2000. Cudrad. de Geografía. 65-66.

Lozano L., Montealegre J., Bonilla, J., Niño, F., Bonilla, H., Buenaventura, J. y whisner J., (2017). Monitoreo de la restauración ecológica. Universidad del Tolima. Ibague.

Muñoz_Flores, H. J., Sáenz_Reyes, J. T., Rueda_Sánchez, A., Gómez_Cárdenas, M., Castillo_Quiroz, D., Castillo Reyes, F. (2018). Áreas potenciales para plantaciones forestales con Brosimum alicastrum Sw., con fines de restauración. *Revista mexicana de ciencias forestales*, *9*(45), 7-35. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.133

Pimple, U., Simonetti, D., Hinks, I., Oszwald, J., Berger, U., Pungkul, S., Leadprathom, K., Pravinvongvuthi, T., Maprasoap, P., & Gond, V. (2020). A history of the rehabilitation of mangroves and an assessment of their diversity and structure using Landsat annual composites (1987–2019) and transect plot inventories. *Forest Ecology and Management*, *462*, 118007. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118007

Poulenard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, *117*(3), 267-281. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9

Rodríguez, N. L. (2011). EL PÁRAMO DE GUERRERO: CONFLICTOS ENTRE CONSERVACIÓN Y REPRIMARIZACIÓN DE SU ECONOMÍA. *Revista Geográfica de América Central*, 18.

Sánchez P. (2012). La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales. Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería. Tesis para Ingeniería Civil.

Strassburg, B. B. N., Beyer, H. L., Crouzeilles, R., Iribarrem, A., Barros, F., de Siqueira, M. F., Sánchez-Tapia, A., Balmford, A., Sansevero, J. B. B., Brancalion, P. H. S., Broadbent, E. N., Chazdon, R. L., Filho, A. O., Gardner, T. A., Gordon, A., Latawiec, A., Loyola, R., Metzger, J. P., Mills, M., … Uriarte, M. (2019). Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains and halve costs. *Nature Ecology & Evolution*, *3*(1), 62-70. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0743-8

Vargas, O., & Sc, M. (2011). RESTAURACIÓN ECOLÓGICA: BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN Ecological Restoration : Biodiversity and Conservation. *Acta Biológica Colombiana*, *16*, 221-246.

Wyant, J. G., Meganck, R. A., & Ham, S. H. (1995). A planning and decision-making framework for ecological restoration. *Environmental Management*, *19*(6), 789-796. https://doi.org/10.1007/BF02471932

Yu, D., Xun, B., Shi, P., Shao, H., & Liu, Y. (2012). Ecological restoration planning based on connectivity in an urban area. *Ecological Engineering*, *46*, 24-33. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.033

Zhinin, H., & Aguirre, N. (2018). Identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica y sitios de referencia en la Región Sur de Ecuador. *CEDAMAZ*, *8*, 53-61. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36272.20482