



Análisis del cambio de cobertura vegetal en el Páramo Bordoncillo – franja del municipio de Santiago Putumayo, años 2017 y 2022, a través del uso de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG).

Julio Andrés Martínez Calvache

Código:11792322392

Universidad Antonio Nariño
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil
Bogotá, Colombia
2023

Análisis del cambio de cobertura vegetal en el Páramo Bordoncillo – franja del municipio de Santiago Putumayo, años 2017 y 2022, a través del uso de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG).

Julio Andrés Martínez Calvache

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica.

Director (a):

M.Sc Mauricio Fernando Rocha Salamanca

Geólogo

Máster en Ciencias de la Información con Énfasis en Geomática

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

Contenido

	<u>Pág.</u>
Preliminares	7
Resumen	9
Introducción.....	11
1. Antecedentes	13
2. Objetivos	18
2.1. Objetivo General	18
2.2. Objetivos Específicos.....	18
3. Justificación	19
4. Marco Teórico	21
4.1. Páramo.....	21
4.2. Teledetección	23
4.3. Sensores Remotos	24
4.4. Sistemas de información geográfica	25
4.5. Imágenes de satélite	26
4.6. Imágenes Sentinel	27
5. Diseño metodológico	29
6. Resultados y discusión	47
7. Conclusiones	56
8. Recomendaciones	58
Referencias Bibliográficas	60

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Code Editor Google Earth Engine, JavaScript, selección de Franja de Estudio	31
Figura 2. Code Editor GEE, JavaScript - Función para filtrar imágenes por año y nubosidad	32
Figura 3. Code Editor GEE, JavaScript - Lista mejores imágenes de cada año 2015 a 2023	33
Figura 4. Corte de la zona de trabajo imágenes Sentinel-2 año 2017	37
Figura 5. Corte de la zona de trabajo imágenes Sentinel-2 año 2022	37
Figura 6. Code Editor GEE, JavaScript – Selección de clases de cobertura vegetal	38
Figura 7. Code Editor GEE, JavaScript – Algoritmo de muestras y entrenamiento	38
Figura 8. Bandas que componen la imagen Sentinel-2	39
Figura 9. Metodología para clasificación de coberturas	40
Figura 10. Combinación de imágenes Sentinel-2 Bandas 8A,11,2	40
Figura 11. Combinación de imágenes Sentinel-2 Bandas 5,4,3	42
Figura 12. Combinación de imágenes Sentinel-2 Bandas 8,4,3	43
Figura 13. Code Editor GEE, JavaScript – Clasificación y nombre de las coberturas	43
Figura 14. Clasificación de imágenes Sentinel- 2 franja de trabajo Páramo Bordoncillo	44
Figura 15. Code Editor GEE, JavaScript – Calcular áreas de las coberturas	45
Figura 16. Code Editor GEE, JavaScript – Áreas por definición de Class	46
Figura 17. Imágenes Sentinel-2 Páramo Bordoncillo Bandas 4,3,2 color natural	47
Figura 18. Cambio de cobertura páramo año 2017 vs 2022	54

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1- Coordenadas Geográficas franja de estudio	30
Tabla 2- Porcentaje de cobertura Vegetal	50
Tabla 3- Hectáreas de Cobertura Vegetal	51
Tabla 4- Porcentajes de aumento y disminución de coberturas	55

Lista de salidas gráficas

	Pág.
Salida Gráfica 1- Mapa Franja del Páramo Bordoncillo	29
Salida Gráfica 2- Mapa de Coberturas Páramo Bordoncillo 2017	48
Salida Gráfica 3- Mapa de Coberturas Páramo Bordoncillo 2022	49

Preliminares

(Dedicatoria)

Este logro no solo representa la culminación de un capítulo de mi vida, sino también el comienzo de nuevas posibilidades y responsabilidades profesionales.

Se lo dedico a Dios, fuente infinita de sabiduría y guía, en medio de los desafíos y las alegrías, he sentido su presencia inspiradora, recordándome la importancia de la fe y la perseverancia.

Al amor, motor incansable que impulsa nuestras acciones y da significado a nuestro existir, cuya paciencia y aliento han sido mi refugio en momentos difíciles, en su abrazo cálido he encontrado la fuerza para superar obstáculos y celebrar triunfos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Antonio Nariño que ha sido el escenario de mi crecimiento intelectual y personal. Los docentes han sido faros de conocimiento, guiándome con su experiencia y sabiduría. Agradezco especialmente al docente Mg. Efraín Andrés Laverde Mera, a mi docente y director del proyecto de grado M.Sc Mauricio Fernando Rocha Salamanca, y al Dr. Andrés Felipe Carvajal Vanegas, Coordinador Académico de Posgrados de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil, quienes se convirtieron en aliados en esta búsqueda del saber, compartiendo desafíos y triunfos. Cada recurso, cada clase y cada oportunidad proporcionada han contribuido significativamente a mi desarrollo.

Éste no solo es el resultado del esfuerzo individual, sino también el fruto de las bendiciones de Dios, el poder del amor, el apoyo incondicional de la familia y la educación recibida en esta querida institución académica. Con humildad y agradecimiento, ofrezco este trabajo como un testimonio de mi compromiso con el conocimiento y los valores que han guiado mi trayectoria.

Con gratitud en mi corazón, espero continuar honrando estos valores en mi vida y en mi carrera profesional.

Resumen

Los páramos son una cobertura vegetal muy frágil, reservorio de flora y fauna silvestre y presentan un extenso sistema de quebradas conductoras de grandes cantidades de agua, de allí la importancia en su mantenimiento, protección y conservación.

La intervención humana y el cambio climático han impactado el Páramo Bordoncillo, específicamente en la franja del municipio de Santiago Putumayo, en donde actividades como la construcción de infraestructura vial y la extracción de carbón han ocasionado consecuencias negativas para este ecosistema.

Sentinel-2 L2 permitió el acercamiento al área de estudio, gracias a su corrección atmosférica ya que es una zona muy compleja por la alta nubosidad.

El uso de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) como Google Earth Engine para llevar a cabo la clasificación supervisada de imágenes satelitales permitió evaluar los cambios significativos en la cobertura vegetal en un periodo de 6 años, con una disminución de 2 hectáreas de Páramo y 4 hectáreas de Bosque Primario y con un incremento de 2 y 5 hectáreas para el Bosque Secundario y la infraestructura vial, respectivamente.

Palabras clave: Clasificación supervisada, imágenes satelitales, intervención humana, áreas degradadas.

Abstract

The moors are a very fragile vegetation cover, a reservoir of wild flora and fauna and have an extensive system of streams that conduct large amounts of water, hence the importance of their maintenance, protection and conservation.

Human intervention and climate change have impacted the Páramo Bordoncillo, specifically in the fringes of the municipality of Santiago Putumayo, where activities such as the construction of road infrastructure and coal extraction have caused negative consequences for this ecosystem.

Sentinel-2 L2 allowed the approach to the study area, thanks to its atmospheric correction since it is a very complex area due to high cloud cover.

The use of geographic information systems (GIS) tools such as Google Earth Engine to carry out the supervised classification of satellite images allowed the evaluation of significant changes in vegetation cover over a period of 6 years, with a decrease of 2 hectares of Páramo and 4 hectares of Primary Forest and with an increase of 2 and 5 hectares for the Secondary Forest and road infrastructure, respectively.

Keywords: Supervised classification, satellite images, human intervention, degraded areas.

Introducción

Colombia, según datos del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, es considerado un país megadiverso por contar con diferentes tipos de ecosistemas que van desde bosques tropicales hasta bosques secos y desiertos, desde páramos y humedales, hasta manglares y arrecifes coralinos, pasando por grandes extensiones de sabana y selva. (Instituto Humboldt, 2020). De acuerdo con el Ministerio de Ambiente, es el país en donde se encuentra más del 50% de los páramos existentes en el mundo. (Ministerio de Ambiente, 2021).

La importancia de estos ecosistemas es que actúan como reservorios y fuentes de agua dulce, influyen directamente en la calidad y cantidad del agua disponible para el consumo humano y para mantener los afluentes y ríos, desempeñando un papel vital en la regulación del ciclo del agua y la disponibilidad de recursos hídricos, y su capacidad para capturar y almacenar carbono en grandes cantidades, ayuda a reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y contribuye a mitigar los efectos del cambio climático.

Los páramos son ecosistemas únicos y estratégicos que desempeñan un papel crucial en la conservación ambiental y el equilibrio ecológico, funcionan como esponjas naturales que absorben, almacenan y liberan agua gradualmente, lo cual es esencial para mantener caudales estables en ríos y arroyos, así como para mitigar inundaciones y sequías. Albergan una biodiversidad única, con muchas especies adaptadas a las condiciones específicas de estos ecosistemas de alta montaña; muchas de estas especies son endémicas, lo que significa que solo se encuentran en regiones de páramo específicas. Desempeñan un papel importante como sumideros de carbono, forma efectiva de almacenamiento de carbono, contribuyendo a mitigar el cambio climático.

Pese a su importancia para la vida, los páramos vienen siendo afectados por la intervención humana, mediante la introducción de ganadería, la tala o incendios voluntarios, la construcción de infraestructuras dentro y en sus periferias, lo cual ha ocasionado su degradación, cambio y pérdida de coberturas vegetales y la transformación geofísica de estos ecosistemas.

El Páramo Bordoncillo es un complejo hídrico y un repositorio de especies diversas y endémicas de flora y fauna, que viene presentando cambios en su cobertura vegetal originados por diferentes factores, pero primordialmente por la acción del ser humano, lo cual es cada vez más evidente en la parte alta del páramo donde es atravesado por una infraestructura vial primaria que conecta a los departamentos de Nariño y Putumayo.

Debido a la importancia estratégica del Páramo Bordoncillo se hace necesario determinar si esos fenómenos antrópicos han ocasionado cambios en las coberturas vegetales que conforman este ecosistema, específicamente en la franja del páramo ubicada en el municipio de Santiago Putumayo, mediante la aplicación de Google Earth Engine GEE, a fin de comparar imágenes satelitales obtenidas de Sentinel-2 que permitan establecer la transformación del paisaje debido a la alteración de las coberturas clasificadas.

Mediante la aplicación de estas herramientas tecnológicas se obtuvo como resultado la verificación de la depreciación de cobertura vegetal de páramo y de bosque primario y la progresión de coberturas vegetales como bosque secundario e infraestructura vial.

Este documento comienza con la presentación general del problema, los objetivos generales a conseguir tras su desarrollo, continúa con la descripción de la metodología utilizada; luego; se pasa a los resultados y la discusión de resultados, para finalmente, establecer las conclusiones y recomendaciones según los resultados obtenidos.

1. Antecedentes

La relevancia de los páramos radica en su extraordinaria biodiversidad y los valiosos servicios ambientales que proporcionan. Estos ecosistemas, frágiles y singulares, constituyen hogar de numerosas especies endémicas y en riesgo de extinción, consolidando su papel como reservorios vitales de la diversidad biológica. Además, actúan como reguladores hídricos, asegurando el abastecimiento de agua para distintos usos, como consumo humano, agricultura y generación de energía. También contribuyen a la mitigación del cambio climático al almacenar grandes cantidades de carbono en sus suelos. Finalmente, los páramos son parte de la identidad cultural y patrimonio natural de muchos países, especialmente el nuestro, ya que Colombia posee el 50% de la totalidad de los páramos que existen en el mundo, y su conservación contribuye al desarrollo sostenible y al bienestar de las comunidades, no solo locales, sino que redundan en la preservación de la vida verde en el planeta. (Ministerio de Ambiente, 2021).

Sobre los páramos existen estudios relevantes que sirven de fundamento general para este trabajo de investigación, como *Los Páramos del Mundo* que es un libro resultado del Proyecto Atlas Mundial de los Páramos, editado por Robert Hofstede, Pool Segarra y Patricio Mena Vásconez; el cual nos sumerge en los páramos de países de América como Costa Rica, Perú, Ecuador, Venezuela, dedicando un capítulo a Colombia, páginas 39 a la 83, y de los continentes de África, Asia y Oceanía, presentando datos sobre el estado de conservación de los páramos, su diversidad, la situación histórica y actual de la población que vive en estos ecosistemas, con fotos y mapas ilustrativos de su extensión y posición en cada país o área estudiada, que contextualizan al investigador y se convierte en una gran herramienta de este estudio. (Hofstede, Segarra, & Mena, 2003).

Otro estudio importante compilado en el libro *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado.*, que hace parte de la selección de textos de la Serie Páramo, órgano de difusión del Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador (GTP), texto científico – académico que concluye que los páramos se destacan como ecosistemas estratégicos gracias a una visión integral que abarca sus singulares características desde las perspectivas ecológica, cultural y económica. Desde el punto de vista ecológico, estos espacios albergan una biodiversidad única y desempeñan un papel crucial en la regulación hídrica y climática. Culturalmente, los páramos están impregnados de significado para comunidades locales, sirviendo como fuente de tradiciones y patrimonio. Económicamente, estos ecosistemas proveen recursos esenciales como agua y pastizales. Grandes ciudades como Bogotá y Quito, ubicadas en el norte de los Andes dependen del páramo para suministro de agua. (Mena Vásconez, y otros, 2011)

Específicamente en nuestro país también se han realizado estudios de esfuerzo mancomunado entre diferentes entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt que buscan la formulación y aplicación de políticas de conservación, la ejecución de proyectos de investigación, educación y gestión de áreas protegidas y el monitoreo para comprender mejor los ecosistemas y proporcionar datos valiosos para la toma de decisiones.

Todos estos aportes han sido plasmados en libros como *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición HotSpot y Global Climatic Tensor* en el cual el IDEAM y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial concluyen que los páramos se encuentran amenazados por el cambio climático global como producto de los gases efecto invernadero y los asentamientos humanos debido a la inclusión de sistemas de producción extensiva de tipo agrícola,

ganadero o minero. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2002).

La Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia Documento preparado por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, determina que los ecosistemas de páramo en Colombia presentan una extensión aproximada de 1.925.410 hectáreas de las cuales 746.644 se encuentran en áreas de Parques Nacionales Naturales. A pesar de que esta área corresponde solo al 2% del territorio nacional, nos destacamos a nivel mundial como el país con la mayor área de estos ecosistemas. Este aspecto resalta la responsabilidad que tenemos en cuanto a la conservación de estos ecosistemas exclusivos del norte de la Cordillera de los Andes, hábitat de un importante número de especies de plantas y animales entre las cuales sobresalen especies endémicas o en alguna categoría de amenaza de extinción. Puede destacarse que el 90% de la flora de los páramos es endémica y el 8% del total de endemismos de la flora nacional se encuentra en estos ecosistemas. (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011).

Otro documento que sirve de contexto es La diversidad de los páramos andinos en el espacio y en el tiempo, elaborado por Luis Daniel Llambí del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas – ICAE, Universidad de los Andes y Francisco Cuesta del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN); artículo que nos adentra en la especificidad de este tipo de ecosistemas desde el punto de vista biológico y geográfico del páramo en los Andes, desde Venezuela hasta Perú, en donde cada región tiene sus propias características y especies particulares adaptadas a las condiciones locales, detallan su diversidad y complejidad, sus especies endémicas de flora y fauna, el origen y la historia de la transformación de los páramos debido al

impacto sobre ellos de las actividades humanas, lo cual se considera de suma importancia para nuestro caso de estudio. (Llambí & Cuesta, 2014).

En relación con los páramos de Nariño se encontró el Informe Final Proyecto Estado del Arte de la Información Biofísica y Socioeconómica de los páramos de Nariño, Tomo 1, 2, 3, 4 y 5, investigación que se llevó a cabo mediante un enfoque multidisciplinario, integrando fuentes bibliográficas, estudios de campo y entrevistas con expertos locales. Se emplearon herramientas geoespaciales para el análisis biofísico, mientras que se realizaron encuestas y entrevistas para comprender la dinámica socioeconómica de las comunidades circundantes, revelando la complejidad y la interconexión entre los aspectos biofísicos y socioeconómicos de los páramos de Nariño. Se destaca la urgencia de implementar medidas de conservación que consideren tanto la biodiversidad única como las necesidades de las comunidades locales. (Corporación Autónoma Regional de Nariño - Corponariño, 2007).

También se encontró en el documento, Plan de Manejo del Corredor Andino Amazónico Páramo de Bordoncillo – Cerro de Patascoy, La Cocha, como Ecorregión Estratégica para los departamentos de Nariño y Putumayo, que logra realizar un inventario detallado de la biodiversidad presente en el área, identificando especies endémicas y en peligro de extinción; evalúa la calidad del agua y las características del suelo para comprender su papel en la regulación hídrica y el mantenimiento de servicios ecosistémicos; y estudia las comunidades locales, sus prácticas tradicionales y sus necesidades económicas, considerando la relación entre conservación y desarrollo sostenible. Este documento menciona que uno de los ecosistemas más importantes del corredor andino – amazónico es el páramo de Bordoncillo, estrella fluvial, cuna de aguas de las Subcuencas del río Putumayo, del río Guamués y la subcuenca del Juanambú. La cobertura para este ecosistema está dada por 3 tipos de formaciones vegetales: Fraylejonal –

Pajonal, Matorral, Pantanos y Turberas. (Corponariño - MinAmbiente - Corpoamazonía, 2002, pág. 80).

Por otra parte, en el Plan de Manejo 2006-2010 Santuario de Flora Isla Corota, se menciona al Páramo Bordoncillo, como una oportunidad de conservación del área en la formulación del plan de manejo para la zona Bordoncillo – Patascoy. Se basa en la caracterización de la región donde se encuentra el parque, sus condiciones actuales y la prospectiva para la identificar áreas degradadas, definición de las acciones y llevar a cabo proyectos de restauración de hábitat. Es una hoja de ruta integral que busca equilibrar la conservación del ecosistema con el involucramiento activo de la comunidad y la promoción de la investigación científica para garantizar un futuro sostenible para este santuario único. (Parques Nacionales Naturales - PNN, 2009).

A su vez, se encontró un estudio realizado por Yuli Erazo y Leidy Guerrero, no solo a este páramo si no a otros que están cerca, plasmado en la tesis de pregrado denominada “Estado actual de los ecosistemas de “páramo y selva Altoandina Morasurco Municipio de Pasto”. Con esta investigación se obtuvo una comprensión integral del estado actual de los ecosistemas de páramo y selva altoandina Morasurco, ya que describe detalladamente esta área, caracteriza las unidades biofísicas y socioeconómicas y los conflictos de uso del suelo. Dentro de este marco, se formularon múltiples proyectos con enfoque en la protección, conservación y uso sostenible de los bienes y servicios ambientales. Estas iniciativas se alinean con los principios establecidos por la Resolución 0769 del 2002 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Erazo & Guerrero, 2013).

2. Objetivos

2.1.Objetivo General

Determinar el cambio de la cobertura vegetal en la franja del Páramo Bordoncillo ubicado en el municipio de Santiago, departamento de Putumayo, mediante la comparación entre imágenes satelitales de los años 2017 y 2022.

2.2.Objetivos Específicos

- Identificar las imágenes satelitales Sentinel-2 L2 para realizar el análisis de cambio de cobertura vegetal durante los años 2017 y 2022.
- Aplicar la herramienta Google Earth Engine para realizar el entrenamiento del código para la clasificación de las imágenes seleccionadas para el análisis de cambio de cobertura vegetal.
- Evaluar el cambio de la cobertura vegetal que se ha generado en la franja del Páramo Bordoncillo.

3. Justificación

El desarrollo de este trabajo tiene como propósito determinar el cambio de cobertura vegetal en la zona de estudio del Páramo Bordoncillo que hace parte del Complejo la Cocha Patascoy, con el fin de prestar atención en la alteración en la cobertura vegetal característica de este ecosistema, mediante la clasificación digital de imágenes de satélite Sentinel-2, de los años 2017 y 2022.

Se tiene que este tipo de estudios es muy escaso, por lo tanto, se hace necesaria y prioritaria su aplicabilidad, además porque esta información será de gran importancia para la gestión, planificación y manejo de este ecosistema estratégico para los departamentos.

El presente estudio pretende determinar el cambio de coberturas en el Páramo Bordoncillo, ubicado en la región suroeste de Colombia, en la convergencia de las zonas andina y amazónica, abarcando los departamentos de Nariño y Putumayo, con el fin de determinar los cambios de cobertura vegetal, que ha experimentado esta área en los últimos 6 años. El área que determina la zona de estudio es de 1.455 hectáreas, correspondiente a una franja del Páramo Bordoncillo, ubicada en el municipio de Santiago, departamento de Putumayo.

La importancia vital de los páramos y la necesidad de generar estrategias de preservación y conservación son fundamentos suficientes para desarrollar trabajos similares a este, ya que su objetivo principal es establecer si la cobertura vegetal de la franja del Páramo Bordoncillo ubicada en el municipio de Santiago Putumayo ha sufrido alteraciones o cambios en los años 2017 y 2022 a través de la comparación de imágenes satelitales y su clasificación supervisada.

Realizar el análisis en un páramo es importante porque permite comprender y monitorear los cambios que ocurren en el tiempo en este ecosistema utilizando herramientas de sistemas de

información geográfica SIG, como Gogle Earth Engine. Estos análisis nos proporcionan datos fundamentales acerca de los impactos de las actividades humanas y los fenómenos naturales en el páramo, destacando aspectos como la deforestación, la degradación de los suelos y el cambio climático. Además, nos ayudan a identificar patrones, tendencias y áreas prioritarias de conservación, y nos sirven de base para implementar medidas de protección y manejo adecuadas. En general, nos permite tomar decisiones informadas y desarrollar estrategias efectivas para la conservación de los páramos.

De allí la importancia de desarrollar este trabajo de análisis y comparación de imágenes satelitales a fin de establecer si los fenómenos antrópicos han ocasionado efectos negativos al Páramo Bordoncillo durante los años 2017 y 2022, establecer las zonas más afectadas, que sirvan de insumo a las entidades competentes para poder formular estrategias de prevención, recuperación, revegetalización y evitar el avance en su deterioro.

4. Marco Teórico

Este trabajo se desarrolla con la ayuda de los sistemas de información geográfica SIG y con aplicación de sus herramientas sobre el hábitat de los páramos, que son ecosistemas únicos y vitales para el planeta. A través de una revisión detallada, se explora la definición de páramos, su importancia ecosistémica, sus características y componentes clave, así como las amenazas que enfrentan y las estrategias de conservación necesarias para protegerlos.

Como caso de estudio se tomó una franja del Páramo Bordoncillo, que se encuentra ubicado entre los departamentos de Nariño y Putumayo, a fin de comparar el cambio de coberturas vegetales ocurridos en los años 2017 y 2022, ya que estos son ecosistemas de relevancia y fragilidad, para fomentar una mayor conciencia y acciones de conservación.

4.1. Páramo

El páramo, el ecosistema natural de mayor altitud en el mundo, se destaca por ser el que recibe la mayor irradiación solar a nivel global. Su rica diversidad florística supera la de todos los ecosistemas de montaña en el planeta. Este entorno se caracteriza por una marcada variación térmica, con diferencias de temperatura entre el día y la noche que, en ocasiones, superan los 20 grados Celsius. A pesar de esta amplitud térmica diaria, la distinción entre "invierno" y "verano" en el páramo es prácticamente imperceptible. De manera significativa, seis de cada diez especies de plantas que habitan en el páramo no se encuentran en ningún otro bioma, lo que confiere un valor excepcional a este ecosistema continental. Este hecho resalta la singularidad y la importancia única del páramo en el contexto de la biodiversidad global. (Hofstede, Segarra, & Mena, 2003, pág. 11)

La importancia que tiene la vegetación de los páramos está caracterizada por la presencia de plantas adaptadas a condiciones extremas como el frío, la baja disponibilidad de nutrientes, la humedad y la radiación solar intensa. Entre las especies más comunes se encuentran los frailejones (género *Espeletia*), pajonales y musgos; además de la vegetación, los páramos también presentan una serie de componentes importantes, como lagunas glaciares, turberas, suelos esponjosos y cuerpos de agua. Estos elementos proporcionan hábitats únicos para muchas especies, incluyendo anfibios y aves migratorias.

Estos páramos son de gran importancia, pero por su compleja conformación biofísica se constituyen como un ecosistema muy vulnerable a las diferentes acciones antrópicas. “Por su especificidad geológica, geomorfológica, ubicación y condiciones bióticas, configuran un ecosistema único, delimitado altitudinalmente entre la vegetación arbórea o bosque de niebla y la parte inferior de las nieves perpetuas” (Cuatrecasas, 1979, pág. 37)

Los límites altitudinales de estos ecosistemas varían entre las cordilleras, influenciados por factores orográficos y climáticos locales. La intervención humana ha sido un elemento adicional que altera la distribución altitudinal del páramo. Por esta razón, en esta definición se incorporan los páramos que han experimentado modificaciones a causa de la actividad humana. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá -Corpoboyacá, 2021)

Los páramos son considerados "fábricas de agua" debido a su importante papel en la regulación de los recursos hídricos. Estos ecosistemas actúan como esponjas gigantes, capturando la humedad atmosférica y liberándola gradualmente en forma de agua dulce a través de ríos y arroyos. Esta función desempeña un papel crucial en el suministro de agua, tanto para el consumo humano como para la agricultura.

Además, los páramos albergan una gran diversidad de especies endémicas y son refugio para la vida silvestre, incluyendo especies en peligro de extinción. Su mantenimiento y conservación son esenciales para asegurar la integridad de los ecosistemas circundantes y la biodiversidad global.

4.2. Teledetección

En los últimos años, hemos sido testigos de un rápido avance en la observación de la Tierra desde el espacio, convirtiéndose en un aliado cada vez más indispensable para monitorear procesos ambientales de gran impacto en nuestro planeta. Este desarrollo ha enriquecido significativamente nuestro conocimiento.

La teledetección, también conocida como percepción remota, se centra en la observación remota de la superficie terrestre. Esta técnica implica la adquisición de imágenes de la Tierra desde sensores instalados en plataformas espaciales, seguida de su tratamiento en función de aplicaciones específicas o finalidades determinadas. Este enfoque proporciona una valiosa herramienta para comprender y gestionar cambios en el entorno terrestre a escala global. (Chuvienco, 1995, págs. 25 - 27)

La teledetección se puede emplear en un sinnúmero de aplicaciones debido a que ofrece muchas ventajas a comparación de otros medios más convencionales como las imágenes tomadas desde el aire o los estudios de campo, pues se integran y complementan. Esta técnica encuentra diversas aplicaciones relacionadas con el medio ambiente, la gestión de recursos naturales, actividades agrícolas y forestales, desarrollo urbano, planificación territorial, así como en levantamientos de cobertura y uso de la tierra. Además, la teledetección es crucial para realizar análisis multitemporales de fenómenos específicos, entre otras utilidades. Su versatilidad la

convierte en una herramienta indispensable en la comprensión y monitoreo de procesos terrestres en escalas locales, regionales y globales.

4.3. Sensores Remotos

Los sistemas o instrumentos empleados para la obtención rápida y eficaz de información de un objeto, área o fenómeno a distancia se conocen como sensores remotos. Esta información puede ser posteriormente procesada e interpretada mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que proporciona una comprensión más completa. En los últimos años, los sensores remotos instalados en diversas plataformas son los más utilizados, ya que capturan la energía electromagnética emitida o reflejada por la superficie de un objeto en distintas bandas del espectro electromagnético. Estos registros abarcan longitudes de onda que van desde las más cortas, como las ultravioleta, hasta las más largas, como las microondas y de radiodifusión. La versatilidad de estos sensores remotos los hace prácticos y fundamentales para diversas aplicaciones. (Veneros, y otros, 2020)

Los Sensores Remotos posibilitan la adquisición de información de objetos sin requerir contacto directo, y su aplicación en el ámbito de los Recursos Naturales tiene una larga trayectoria. Proporcionan datos fiables sobre extensiones extensas con alta precisión y costos razonables. En el campo de la cartografía, la interpretación de recursos, la planificación territorial y los estudios urbanos, el uso de sensores remotos ha desempeñado un papel crucial.

Actualmente, la tendencia se inclina hacia un aumento en su utilización, impulsada por avances tecnológicos, desarrollos en informática y la accesibilidad a imágenes a un costo más reducido. Los sensores remotos pueden operar de manera conjunta o independiente, y su aplicación puede abarcar un conocimiento amplio del espectro, lo que los convierte en herramientas versátiles

y esenciales en el análisis y la comprensión de nuestro entorno. (Rodríguez & Arredondo, 2005, págs. 22 - 23)

4.4. Sistemas de información geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la actualidad, se han convertido en la herramienta más versátil para el almacenamiento y análisis de información espacial. Como instrumento de análisis, desempeñan un papel crucial en el mejoramiento de la efectividad y eficiencia de las operaciones cartográficas. Además, facilitan la manipulación y tratamiento de los datos, permiten la representación de escenarios y ofrecen alternativas de solución a problemas identificados en el territorio. Los SIG se destacan por su capacidad integral para gestionar y comprender información geoespacial, convirtiéndolos en una herramienta indispensable en la toma de decisiones y la planificación territorial.

En este sentido, los SIG permiten manejar datos geográficos complejos y voluminosos, transformándolos en información útil para los procesos de investigación y planificación del desarrollo de los territorios, pues mediante esta herramienta es posible disponer de modelos de la realidad, que nos permiten reconocer las relaciones que existen entre los objetos complejos de la tierra, o simular un fenómeno cualquiera.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representan una herramienta vital en las labores de planificación ambiental y ordenación del territorio. Permiten abordar con mayor facilidad problemas complejos relacionados con la asignación "óptima" de actividades en el territorio, teniendo en cuenta tanto la aptitud intrínseca del mismo como el posible impacto ambiental de ubicar una actividad específica en determinada zona del territorio. Con los SIG, se logra una gestión más eficiente y equilibrada de los recursos, contribuyendo así a una planificación

territorial sostenible y acorde con las consideraciones ambientales. (Bosque & García, 2000, págs. 49 - 67)

Los SIG, desde su perspectiva tecnológica y social, sirven como un instrumento de apoyo para resolver problemas dentro del ordenamiento y planificación territorial, como en el uso y manejo de los recursos naturales, constituyéndose en una herramienta de soporte que permite adoptar decisiones a cualquier nivel de manejo, ya sea en entidades públicas o privadas.

En términos generales, los SIG son una herramienta valiosa en procesos de análisis y de apoyo en la toma de decisiones respecto al ordenamiento y planificación de un territorio, como también en el manejo, uso y aprovechamiento de sus recursos naturales. Su principal utilidad y ayuda para estos fines constituye la construcción de modelos o representaciones de la realidad territorial, y para utilizar dichos modelos en la simulación de las posibles consecuencias o efectos que un proceso natural o producido por la acción antrópica, produce sobre un determinado espacio o escenario en un momento específico.

4.5. Imágenes de satélite

Las imágenes de satélite son productos de sensores remotos pasivos que operan en el rango óptico del espectro electromagnético, específicamente de 0.4 a 15 μm . Este sistema de captura de información integra una óptica similar a la utilizada en la fotografía, junto con un sistema de detección electrónica. A diferencia de la fotografía aérea, la imagen de satélite se presta a una manipulación digital que permite mejorar el contraste, destacar diferentes tipos de superficies y ofrecer estimativos cuantitativos en el análisis geográfico y temático de una región particular. Estos datos se pueden almacenar de manera organizada en bases de datos relacionales, facilitando así su posterior análisis e interpretación. (Chuvieco, 1995, pág. 181). La mínima unidad

identificable e indivisible en una imagen satelital se conoce como píxel. Cada píxel representa un elemento discreto en la imagen y contiene información sobre el color, la intensidad y, en algunos casos, otras propiedades de la superficie representada en ese punto específico de la imagen. La combinación y disposición de estos píxeles forman la imagen completa, y la resolución de la imagen está determinada por la cantidad de píxeles en una determinada área, siendo una medida clave para evaluar la calidad y detalle de la imagen satelital.

La interpretación de productos de sensores remotos, como las imágenes de satélite, implica los siguientes pasos: Lectura de la Imagen: Esta fase abarca la detección, reconocimiento e identificación de los objetos presentes en la imagen. Análisis de la Imagen: En esta etapa, se realiza el análisis propiamente dicho de la imagen, incluyendo la deducción de aspectos no directamente observables. Clasificación de la Imagen: Durante esta fase, se llevan a cabo operaciones de clasificación digital para representar y categorizar los diferentes fenómenos presentes en la imagen. Estos pasos proporcionan una metodología estructurada para extraer información valiosa de las imágenes satelitales y realizar análisis detallados de la superficie terrestre.

4.6. Imágenes Sentinel

Las imágenes de los satélites Sentinel, parte integral del programa Copérnicus, están disponibles al público de manera gratuita y accesible tanto a nivel nacional como europeo e internacional. Estos satélites abarcan diversas funciones y servicios, entre los cuales se encuentran:

- Sentinel-1: Proporciona imágenes radar tanto para superficies terrestres como oceánicas.

- Sentinel-2: Suministra imágenes ópticas terrestres, disponibles en productos nivel 1C (corregidos radiométrica y geoméricamente) y nivel 2A (corregido atmosféricamente).
- Sentinel-3: Ofrece servicios de vigilancia terrestre y oceánica a escala global.
- Sentinel-4: Suministra datos para la vigilancia de la composición atmosférica.
- Sentinel-5: También proporciona datos para la vigilancia de la composición atmosférica.
- Sentinel-6: Proporciona datos altimétricos de alta precisión.

La disponibilidad abierta y gratuita de estas imágenes contribuye significativamente a la investigación y monitoreo a nivel global. (Instituto Geográfico Nacional de España., pág. 2)

4.6.1 Sentinel-2. Imágenes multiespectrales de alta resolución

Se trata de una misión conformada por una constelación de dos satélites multiespectrales en órbita polar, diseñada para la monitorización de la Tierra. Esta misión ofrece imágenes que abarcan diversas aplicaciones, incluyendo la observación de vegetación, suelo y agua, así como la vigilancia de vías de navegación interior y áreas costeras. Además, Sentinel-2 puede proporcionar información valiosa para servicios de emergencia.

La constelación se compone de dos satélites idénticos, Sentinel-2A y Sentinel-2B, ambos ubicados en la misma órbita, pero separados por 180 grados para asegurar una cobertura óptima de la Tierra. El lanzamiento del primer satélite, Sentinel-2A, tuvo lugar el 23 de junio de 2015. Esta configuración permite una captura eficiente de datos, facilitando la monitorización y evaluación de cambios en la superficie terrestre con aplicaciones variadas y relevantes. (Plan Nacional de Teledetección de España (PNT)., s.f.)

5. Diseño metodológico

5.1 Área de estudio

El Páramo Bordoncillo se sitúa en la confluencia de los municipios de Buesaco y Pasto, en el departamento de Nariño, así como en el municipio de Santiago, perteneciente al departamento de Putumayo, como se indica en las Salida Gráfica 1.

Salida Gráfica 1. Mapa Franja del Páramo Bordoncillo



Nota. Fuente: Autor.

El Páramo Bordoncillo se encuentra a altitudes que oscilan entre los 3000 y 3600 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas que varían entre 3°C y 6°C. La precipitación media es de alrededor de 2300 mm, y se caracteriza por una constante presencia de neblina. Las coordenadas geográficas de esta área son 01°08'' - 01°14'' de latitud norte y 77°05'' – 77°08'' de longitud oeste. Este páramo abarca aproximadamente 6000 hectáreas y se compone de extensas turberas, lagunas permanentes y lagunetas estacionarias. (Corponariño - MinAmbiente - Corpoamazonía, 2002, pág. 55).

Debido a la gran extensión del páramo se tomó una franja ubicada en el municipio de Santiago Putumayo la cual, al ser la conectante entre dos departamentos y tener actualmente construida una vía primaria, pudiera presentar alteración en sus coberturas y haber sido impactada significativamente. La franja objeto de estudio se encuentra ubicada dentro de los vértices geográficos; tal y como se describe a continuación en la Tabla No 1:

Tabla 1: Coordenadas Geográficas franja de estudio.

Latitud	Longitud
1°09'17,035 N	77° 06'36,983 W
1°09'16,384 N	77° 04'24,795 W
1°07'20,408 N	77° 06'36, 400 W
1°07'21,015 N	77° 04'24,635 W

Nota. Fuente: Autor.

A través de la aplicación de la herramienta Google Earth Engine y su Code Editor se define un área con una geometría de 4 vértices, que permite seleccionar la franja objeto de estudio, la cual se representa mediante JavaScript, y define un polígono en donde se visualiza el

corte de las imágenes a analizar, tal como se indica a través de la Figura 1, de la siguiente manera:

Figura 1. Code Editor Google Earth Engine, JavaScript, selección de Franja de Estudio

```
// Definir las coordenadas como una lista de puntos
var coordenadas = [
  [-77.11013379105178, 1.1223601103470164],
  [-77.07348408707229, 1.1223601103470164],
  [-77.07348408707229, 1.1546260778742417],
  [-77.11013379105178, 1.1546260778742417],
  [-77.11013379105178, 1.1223601103470164]
];

// Crear una geometría de tipo polígono usando las coordenadas
var geometria = ee.Geometry.Polygon(coordenadas);
```

Nota. Fuente: Autor

Una vez definida la franja objeto de estudio con la geometría de 4 vértices nos da como resultado un área de 1455 hectáreas, para ser analizadas en este trabajo.

Se precisa seleccionar imágenes satelitales de la franja de estudio entre los diferentes repositorios disponibles a la fecha a fin de seleccionar aquellas más nítidas, detalladas y con mejor resolución. Para este trabajo se escogió Sentinel-2, ya que debido a la complejidad de la zona de estudio que permanentemente se encuentra con nubosidad se hizo necesario que las imágenes cuenten con alta calidad y corrección atmosférica, características principales de las imágenes arrojadas por este satélite y que lo diferencian de otros en el medio. Dado que el satélite Sentinel-2 fue lanzado el 23 de junio de 2015, el repositorio de imágenes satelitales de Sentinel-2 está disponible a partir de esa fecha.

Se genera un Code Editor, con la Función para filtrar imágenes por año y nubosidad. Para filtrar las mejores imágenes por año, se codifica el periodo 01 de enero – 31 de diciembre de cada anualidad desde 2015 hasta 2023, y con factor de nubosidad no superior al 40%, como aparece en la Figura 2:

Figura 2. Code Editor GEE, JavaScript - Función para filtrar imágenes por año y nubosidad.

```

// Función para filtrar imágenes por año y nubosidad y obtener la mejor imagen
function obtenerMejorImagen(year) {
  var startDate = year + "-01-01";
  var endDate = year + "-12-31";

  var imagen = ee.ImageCollection( )
    .filterBounds(geometria)
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 40)
    .sort('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE')
    .first();

  return imagen.clip(geometria).set('year', year);
}

// Crear una lista para almacenar las mejores imágenes de cada año
var mejoresImágenesPorAño = [];

// Iterar a través de los años y obtener las mejores imágenes
for (var year = 2015; year <= 2023; year++) {
  var mejorImagenPorAño = obtenerMejorImagen(year);
  mejoresImágenesPorAño.push(mejorImagenPorAño);
}

// Mostrar las mejores imágenes en el mapa
for (var i = 0; i < mejoresImágenesPorAño.length; i++) {
  var imagen = mejoresImágenesPorAño[i];
  var year = imagen.get('year');
  Map.addLayer(imagen, {
    bands: ['B4', 'B3', 'B2'], // Especifica las bandas para la imagen (RGB)
    min: 0,
    max: 3000, // Ajusta estos valores según la escala de los datos
  }, "Sentinel-2 Mejor Imagen " + year);
}

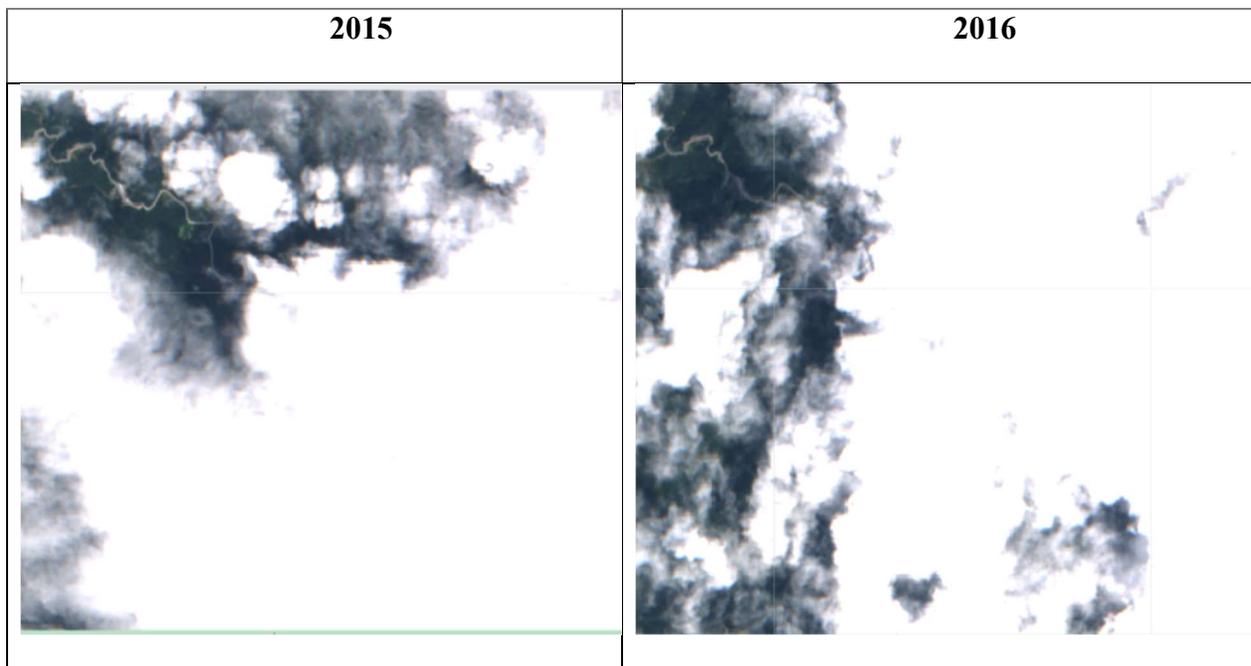
// Hacer un zoom al área de interés
Map.centerObject(geometria, 10);

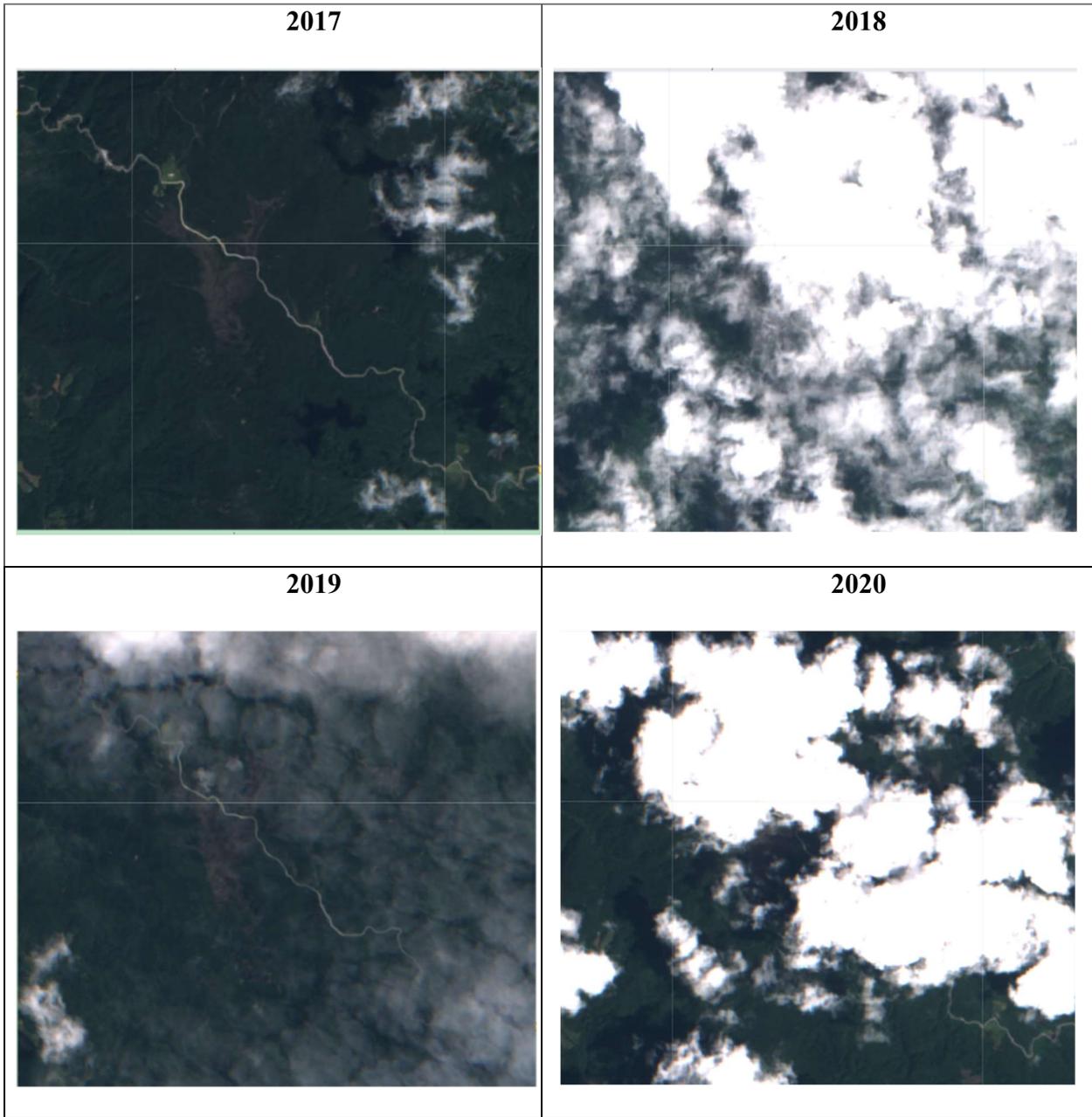
```

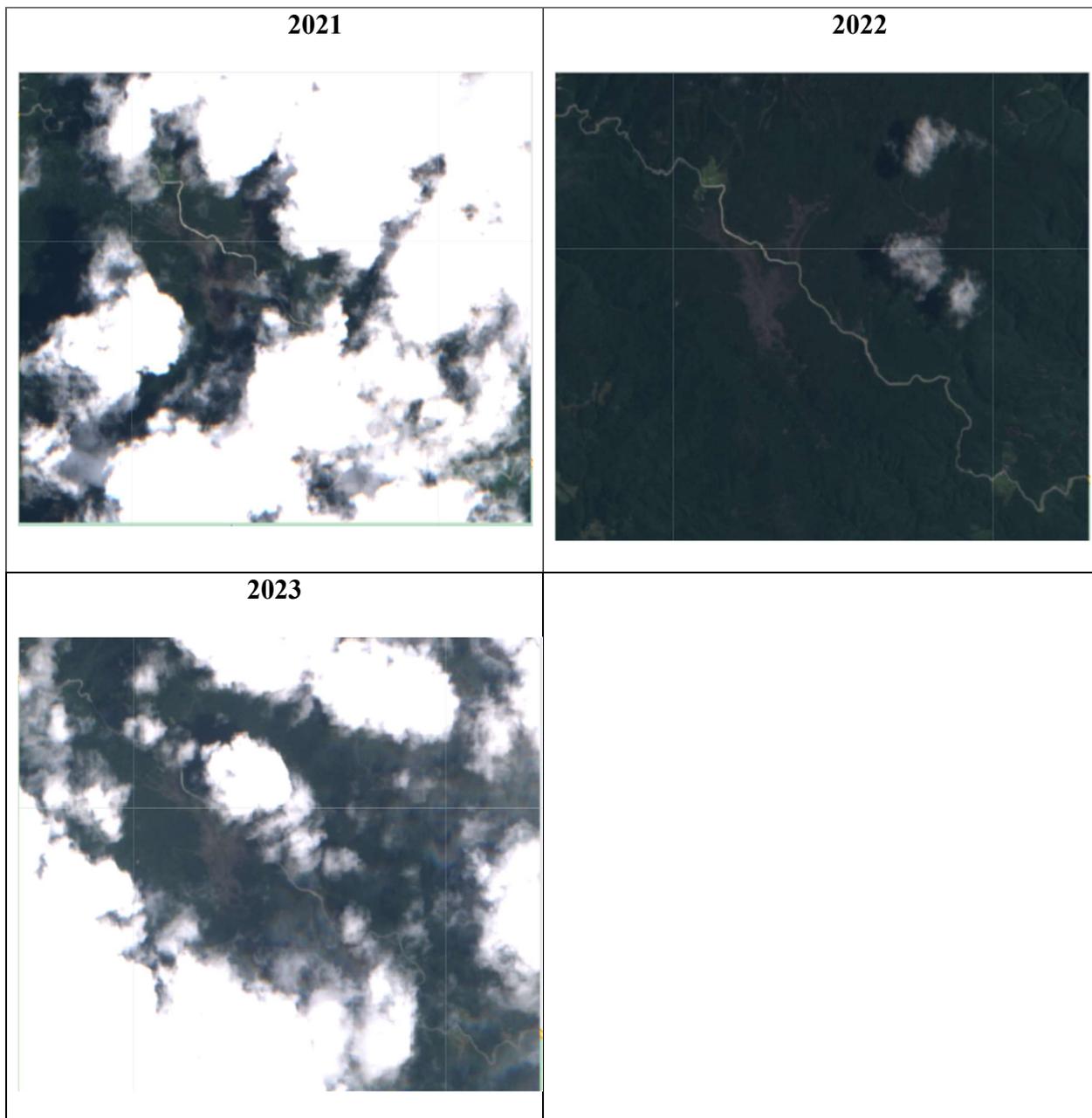
Nota. Fuente: Autor

Con el fin de crear una lista para almacenar las mejores imágenes de cada año, se especifican las bandas para la imagen (RGB) correspondientes a B4, B3 y B2 de cuya combinación se obtiene un color natural o aproximado al color real de la zona estudiada; se corre el programa para identificar la mejor imagen por cada año, desde el 2015 al 2023, como se lo indica en la Figura 3:

Figura 3. Code Editor GEE, JavaScript - Lista de las mejores imágenes de cada año 2015 a 2023







Nota. Fuente: Autor

Las imágenes satelitales de la lista anterior son Imágenes Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument. Level-2^a Los activos tienen Resolución de 10 metros.

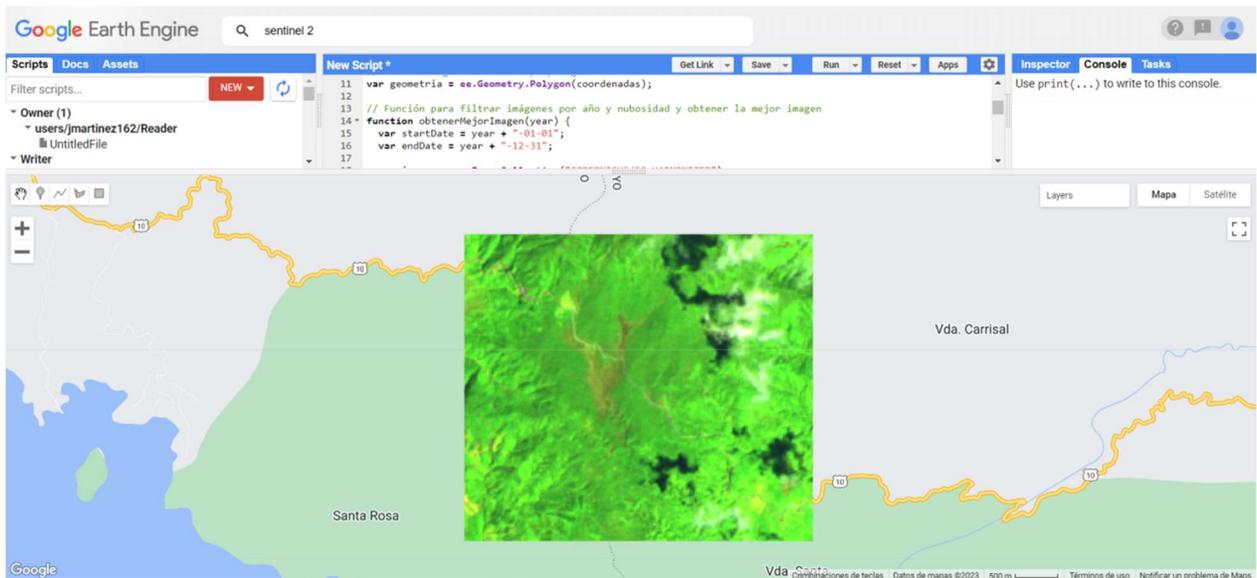
La estructura y la información contenida en los datos Sentinel-2 L2 son:

- Bandas Espectrales U16:

- Contienen 12 bandas espectrales en formato UINT16.
- Estas bandas representan Reflectancia de Superficie (SR) escaladas en 10000.
- No hay datos de B10 en estas imágenes.
- Bandas Específicas L2: Además de las bandas estándar, hay bandas específicas de nivel 2.
- Bandas de Control de Calidad:
 - Tres bandas de control de calidad están presentes.
 - La banda QA60 es una banda de máscara de bits que proporciona información de máscara de nube.
- Identificadores de Activos EE:
 - Los identificadores siguen el siguiente formato:
COPERNICUS/S2_SR/20151128T002653_20151128T102149_T56MNN.
 - La primera parte numérica indica la fecha y hora de detección.
 - La segunda parte numérica indica la fecha y hora de generación del producto.
 - La cadena final de 6 caracteres es un identificador de gránulo único que indica su referencia de cuadrícula UTM.

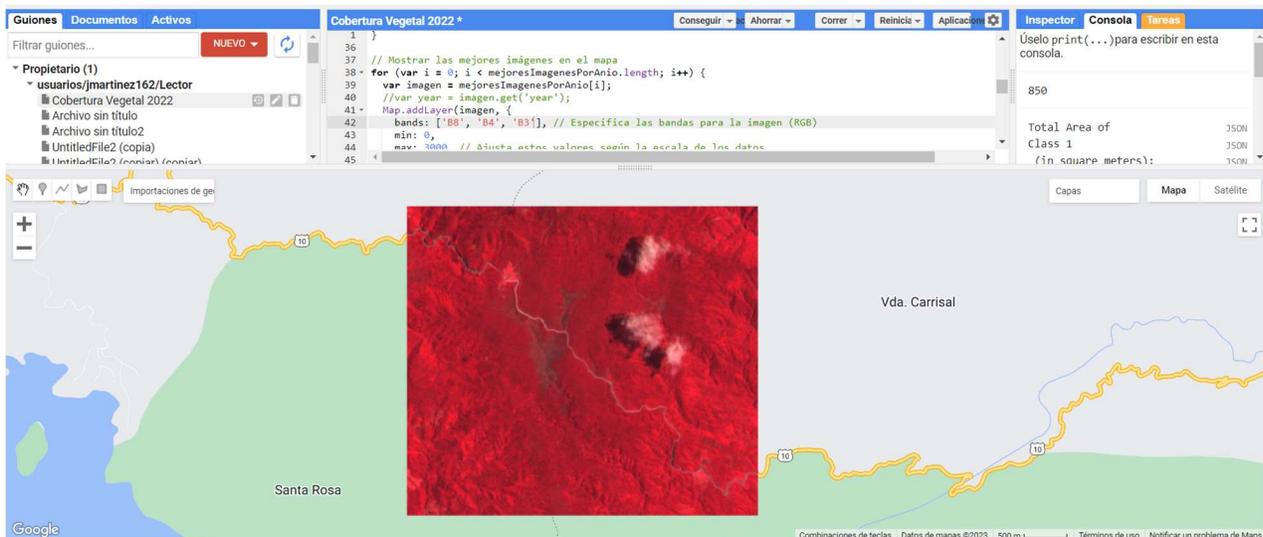
Identificada la lista de las mejores imágenes de cada uno de los 9 años, periodo 2015 a 2023, se tiene que únicamente 2 imágenes satelitales cumplen con los estándares de calidad, menor nubosidad, mayor nitidez y detalle, que corresponden a las imágenes de los años 2017 y 2022, como se muestra a continuación en las Figuras 4 y 5:

Figura 4. Corte de la zona de trabajo imágenes Sentinel-2 año 2017.



Nota Fuente Autor.

Figura 5. Corte de la zona de trabajo imágenes Sentinel-2 año 2022.

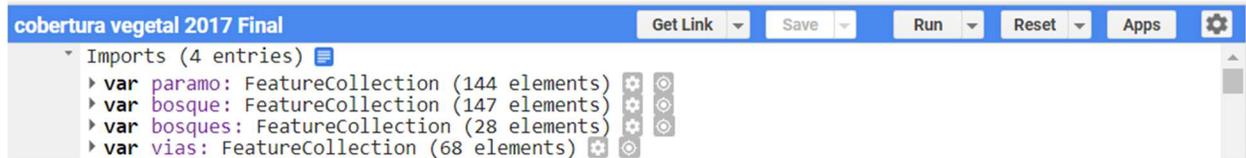


Nota Fuente Autor.

Una vez que se obtengan las imágenes Sentinel -2 de la franja de estudio, establecemos manualmente un conjunto de puntos de entrenamiento para las cuatro clases de cobertura identificadas (páramo, bosque primario, bosque secundario e infraestructura vial).

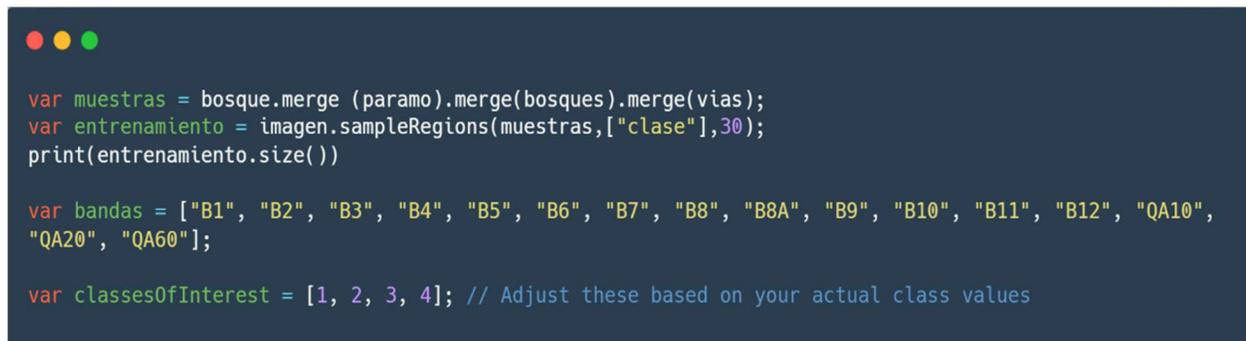
Seguidamente se usa esos puntos de entrenamiento para un clasificador y/o algoritmo que se utilizará en el resto de la imagen Sentinel-2 y finalmente se podrá evaluar la precisión de nuestra clasificación como lo observamos en las figuras 6 y 7.

Figura 6. Code Editor GEE, JavaScript – Selección de clases de cobertura vegetal.



Nota. Fuente: Autor

Figura 7. Code Editor GEE, JavaScript – Algoritmo de muestras y entrenamiento



Nota. Fuente: Autor

Las imágenes Sentinel-2 están compuestas por un total de 13 bandas espectrales que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Estas bandas proporcionan información valiosa sobre la superficie terrestre en diversas longitudes de onda, lo que permite una amplia gama de aplicaciones, como la monitorización de la vegetación, la detección de cambios en el uso del suelo y la evaluación de la calidad del agua, entre otras. Como se indica en la Figura 8:

Figura 8. Bandas que componen la imagen Sentinel-2

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m/px)
Banda 1 - Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 -Azul	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Verde	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Rojo	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Rojo	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Ultrarojo	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Rojo lejano	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Infrarojo cercano	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Infrarojo cercano 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 - Vapor de Agua	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 11 - Onda corta infrarroja	1,56 - 1,65	20
Banda 12 - Onda corta infrarroja 2	2,10 - 2,28	20

Nota. Fuente: (Grupo TYC GIS Formación., s.f.)

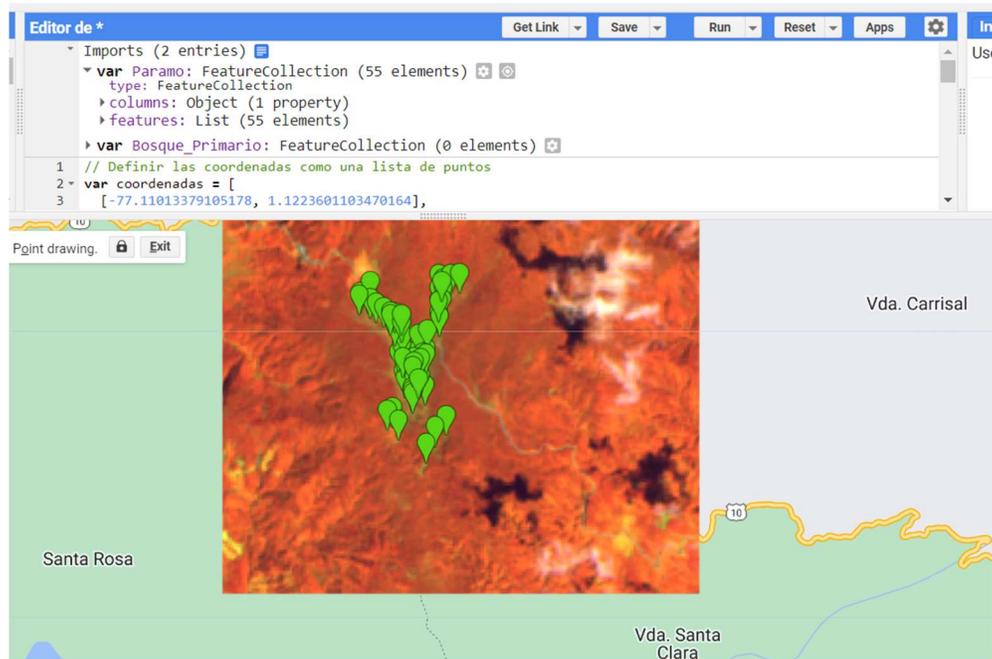
El proceso consistió en tomar diversas muestras mediante la delimitación de polígonos para cada tipo de cobertura, y posteriormente se llevó a cabo la clasificación utilizando el método de Random Forest; según Lizares (Espinosa-Zúñiga, 2020, pág. 2) es una técnica de aprendizaje supervisado que se basa en la construcción de múltiples árboles de decisión durante el entrenamiento. Cada árbol se entrena con un subconjunto aleatorio de datos y, al final, los resultados de estos árboles se combinan para obtener un modelo final más robusto y generalizable, en comparación con los resultados de cada árbol por separado. Como se indica en las Figuras 9 y 10:

Figura 9. Metodología para clasificación de coberturas



Nota. Fuente: Autor

Figura 10. Combinación de imágenes Sentinel-2 Bandas 8A,11,2.



Nota. Fuente: Autor

Se utiliza la combinación 8A,11,2, en Sentinel-2, a fin de resaltar las características distintivas de la vegetación, ya que la reflectancia en la banda 8A es sensible a la salud y la densidad de la vegetación, mientras que la banda 11 permite penetrar la atmósfera y captar información adicional sobre la vegetación. La banda 2 proporciona detalles en la parte azul del espectro, y asignándole una paleta de colores a la imagen resultante para facilitar la visualización y la interpretación de las características de la vegetación en el páramo presente en la franja de estudio.

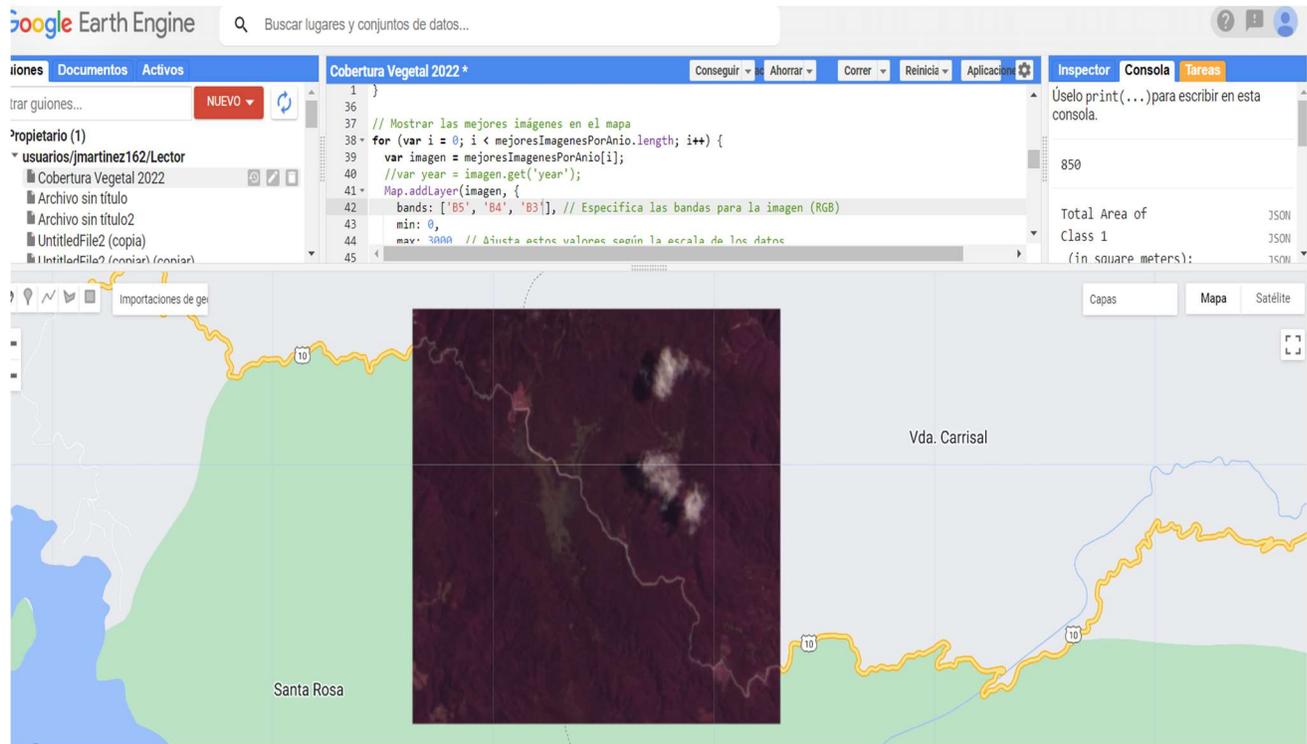
Seguidamente para determinar la cobertura de bosque Primario y Secundario se realiza la combinación de bandas 5, 4 y 3.

Esta combinación es efectiva para la clasificación de ciertos tipos de bosques y proporciona información sobre la intensidad de la vegetación.

La banda 5 en el infrarrojo cercano es sensible a la estructura y densidad del dosel forestal, mientras que las bandas 4 y 3 en el rango visible permiten captar la reflectancia de la vegetación.

La combinación de estas bandas puede resaltar las diferencias en la estructura y el tipo de vegetación presente, lo que es valioso para distinguir entre bosque primario y secundario en la franja de estudio; como se indica en la Figura 11:

Figura 11. Combinación de imágenes Sentinel-2 Bandas 5,4,3.



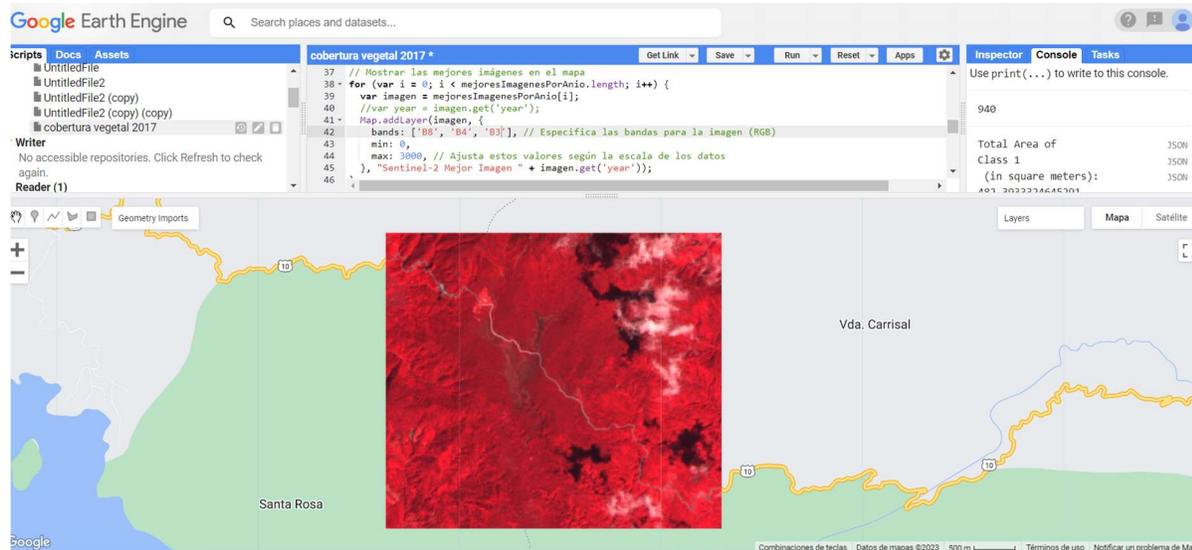
Nota. Fuente: Autor

Para determinar la cobertura vial presente en la imagen Sentinel-2 se realizó la combinación de bandas 8,4,3.

Esta combinación de bandas resalta las características específicas de la cobertura vial y los caminos, ya que la banda 8 en el infrarrojo cercano es sensible a ciertos detalles en las superficies terrestres, y las bandas 4 y 3 proporcionan información sobre la reflectancia en el rango visible.

La representación visual resultante ayuda a distinguir con mayor claridad las áreas asociadas a caminos y cobertura vial en la imagen Sentinel-2 de la franja de estudio; así como se muestra en la Figura 12:

Figura 12. Combinación de imágenes Sentinel-2 Bandas 8,4,3.



Nota. Fuente: Autor

Se hace necesario entrenar un clasificador y/o algoritmo para determinar las coberturas y clasificar en el Code Editor GEE renombrando los nombres de páramo, bosque primario, bosque secundario y vías; como se indica en la Figura 13.

Figura 13. Code Editor GEE, JavaScript – Clasificación y nombre de las coberturas.

```

var bandas = ["B1", "B2", "B3", "B4", "B5", "B6", "B7", "B8", "B8A", "B9", "B10", "B11", "B12", "QA10",
"QA20", "QA60"];
var clasificacion = ee.Classifier.smileRandomForest(10).train(entrenamiento,"clase",bandas);
var imagen = imagen.classify(clasificacion);
Map.addLayer(imagen,{min:1,max:4,palette:["green", "orange", "purple","red"]},"Clasificado");

var nombre = ["paramo", "bosque", "bosques", "vias"]
// Define the classes you are interested in
var classesOfInterest = [1, 2, 3, 4]; // Adjust these based on your actual class values

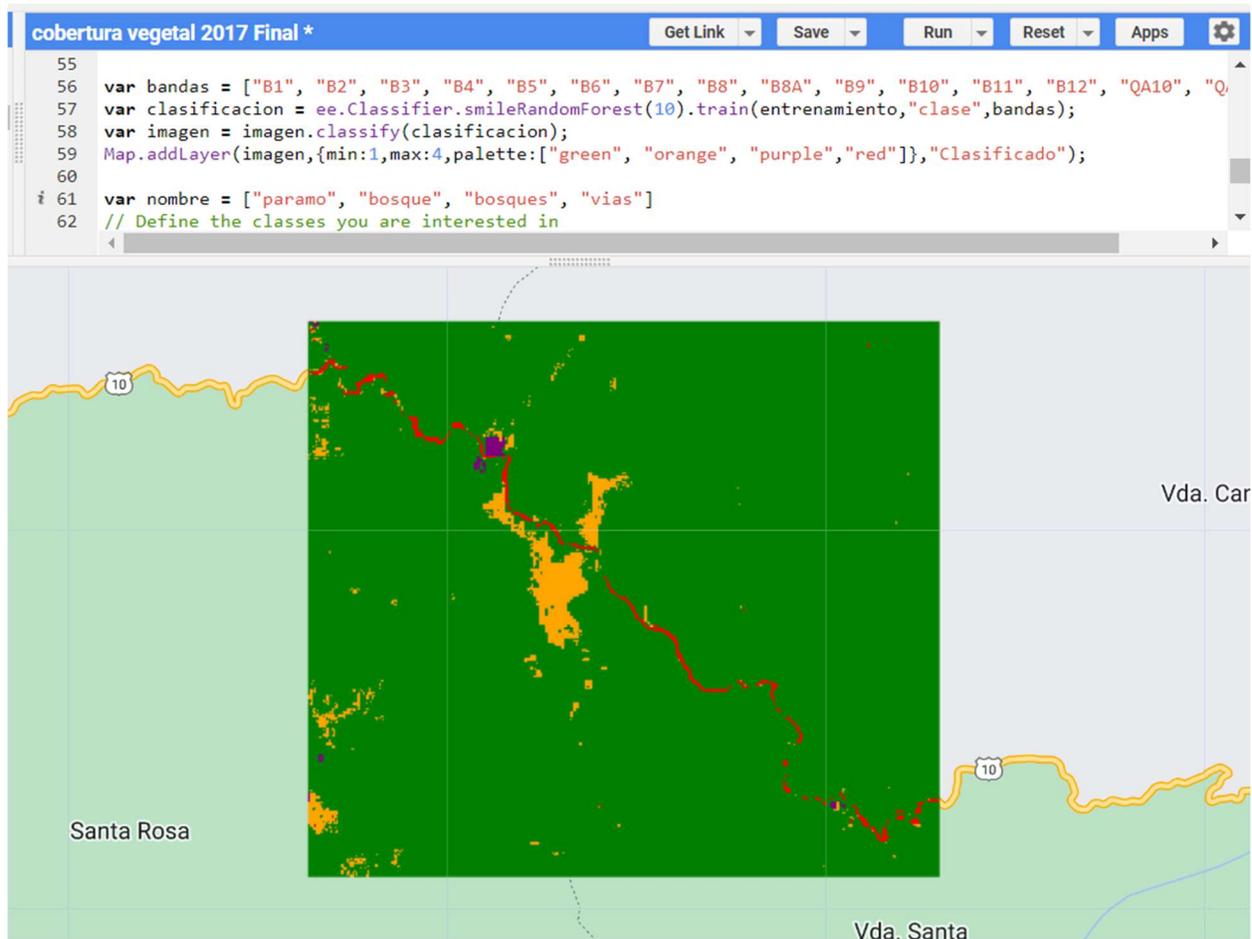
```

Nota. Fuente: Autor

Después de ejecutar los scripts generados en el programa Google Earth Engine, el resultado obtenido incluye los cálculos de áreas y los porcentajes correspondientes para

diferentes años de las imágenes analizadas. Cada imagen ha sido procesada según criterios de filtro, utilizando colores específicos para representar de manera clara y efectiva las categorías de cobertura vegetal. Estas categorías son identificadas por colores específicos, como: Páramo (Representado en color naranja), Bosque Primario (Identificado en verde), Bosque Secundario (Asignado con el color morado) y Vías (Se destaca con el color rojo). Esta codificación cromática facilita la interpretación visual de la cobertura vegetal en la franja de estudio a lo largo de diferentes años, proporcionando una representación gráfica de los cambios en la distribución de estas categorías a lo largo del tiempo; tal como lo muestra la Figura 14.

Figura 14. Clasificación de imágenes Sentinel- 2 franja de trabajo Páramo Bordoncillo



Nota. Fuente: Autor

Para la generación de áreas se hace necesario incorporar un algoritmo para su obtención por cada una de las imágenes seleccionadas 2017 y 2022. Como resultado se obtiene la superficie en ráster de cada una de las imágenes, de la matriz de píxeles organizada en filas o columnas. Para este caso el programa de Google Earth Engine, da como resultado las áreas de cada cobertura para su interpretación y análisis; como sigue en la Figura 15.

Figura 15. Code Editor GEE, JavaScript – Calcular áreas de las coberturas

```

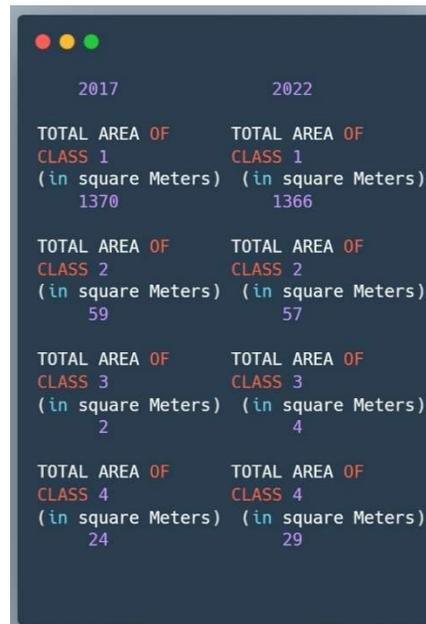
// Calculate and print the area for each class within the specified geometry
for (var i = 0; i < classesOfInterest.length; i++) {
  var classValue = classesOfInterest[i];
  var areaEstimation = imagen.eq(classValue).multiply(ee.Image.pixelArea().divide(10000));
  var classArea = areaEstimation.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: geometria,
    scale: 30
  });
  var className = "Class " + classValue; // You can specify class names if needed
  print('Total Area of', className, ' (in square meters):', classArea.get('classification'));
}

```

Nota. Fuente: Autor

La definición de área se realiza cuando se incorpora al algoritmo la clasificación para cada una de las coberturas (classArea), la cual a través de su configuración geométrica se presenta en hectáreas con un valor para cada una; tal como se muestra en la Figuras 16.

Figura 16. Code Editor GEE, JavaScript – Áreas por definición de Class



```
2017      2022
TOTAL AREA OF CLASS 1 (in square Meters) 1370 1366
TOTAL AREA OF CLASS 2 (in square Meters) 59 57
TOTAL AREA OF CLASS 3 (in square Meters) 2 4
TOTAL AREA OF CLASS 4 (in square Meters) 24 29
```

Nota. Fuente: Autor

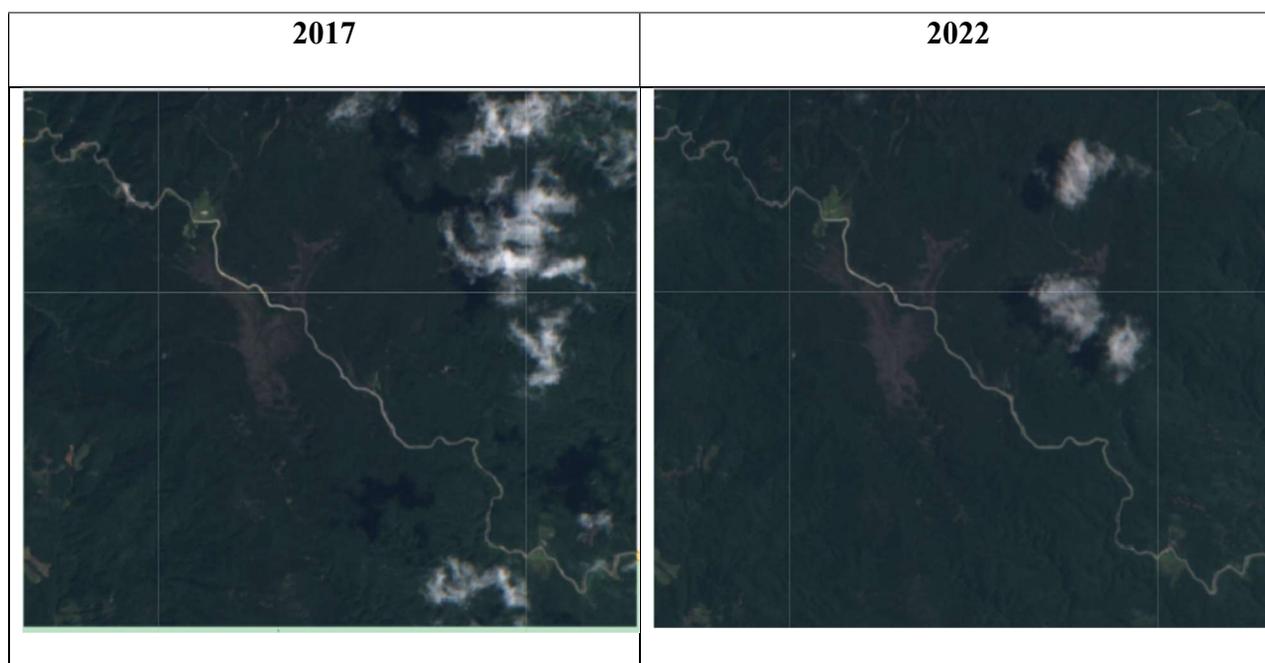
Por lo tanto y de conformidad con la figura anterior, se tiene que cada una de las áreas corresponde a las siguientes clases:

- Class 1 concierne a cobertura vegetal de Bosque Primario,
- Class 2 corresponde a cobertura vegetal de Páramo,
- Class 3 atañe a cobertura vegetal de Bosque Secundario y
- Class 4 recae sobre la cobertura de Infraestructura Vial.

6. Resultados y discusión

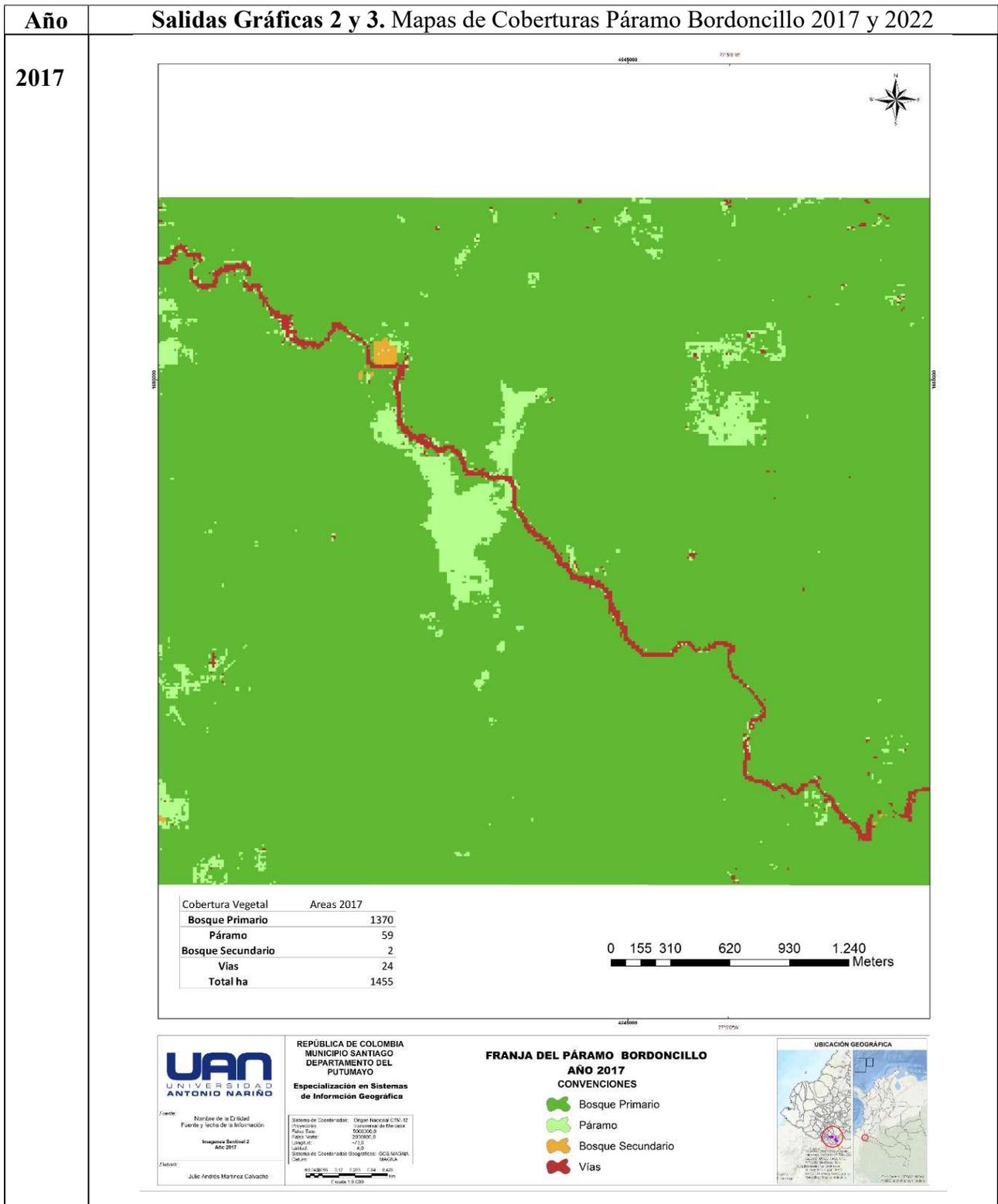
Se obtuvieron 2 imágenes de mejor calidad y nitidez correspondientes a los años 2017 y 2022, (Figura 17).

Figura 17. Imágenes Sentinel-2 Páramo Bordoncillo (Bandas 4,3,2) color natural

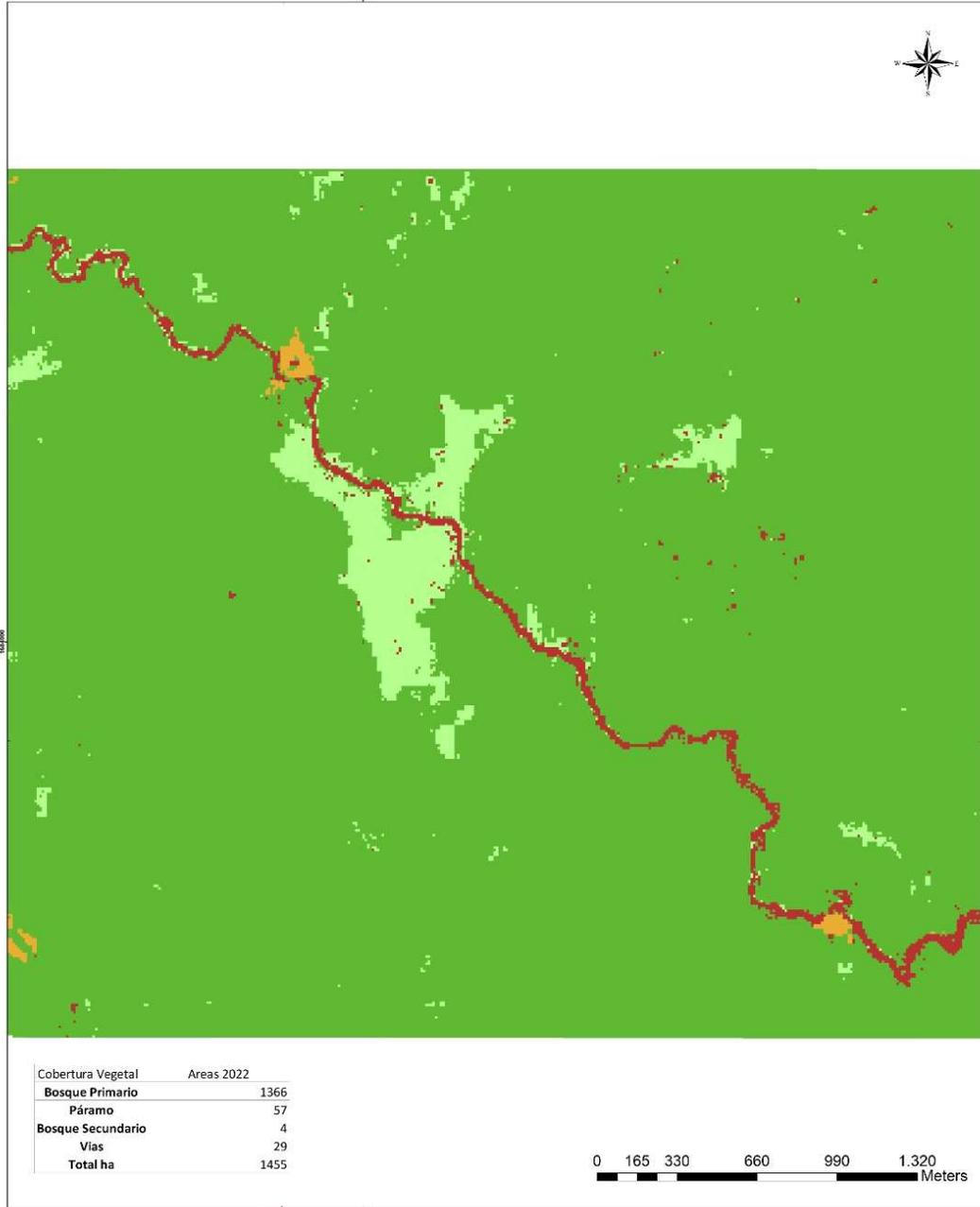


Nota. Fuente: Autor

Se realizó la clasificación supervisada de coberturas de las 2 imágenes Sentinel-2 que cumplen con los parámetros necesarios para la categorización, como se ve en las salidas gráficas 1 y 2 de los años 2017 y 2022, respectivamente, en las cuales se asignó un color a cada una de las coberturas para ser diferenciadas, así: Bosque Primario con color hoja verde (Leaf Green), Páramo con color manzana clara (light Apple), Bosque Secundario con color naranja Sevilla (Seville Orange) y las Vías con color rojo toscana (Tuscan Red); como se indica en las Salidas Gráficas 2 y 3.



2022



REPÚBLICA DE COLOMBIA
DEPARTAMENTO DE PUTUMAYO
MUNICIPIO DE SANTIAGO

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Nombre de la Ciudad: Fuente y fecha de la Información: Ingeniería Ambiental 2

Elaboró: Julio Andrés Martínez Calvacho

FRANJA DEL PÁRAMO BORDONCILLO
AÑO 2022

CONVENCIONES

- Bosque Primario
- Páramo
- Bosque Intervenido
- Vías

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Nota. Fuente Autor

Una vez se realiza los scripts que se generaron con anterioridad, se obtiene el valor de las áreas en hectáreas de las coberturas de vegetación presentes en zona objeto de estudio, y se realiza el cálculo en porcentajes con respecto a los años de las imágenes Sentinel-2, generando la Tabla 2.

Tabla 2: Porcentaje de cobertura Vegetal

Año	Páramo	Bosque Primario	Bosque Secundario	Infraestructura Vial
2017	4,07	94,13	0,14	1,66
2022	3,92	93,85	0,26	1,98

Nota Fuente: Autor.

Los resultados presentados en la Tabla 2 muestran cambios en diferentes categorías relacionadas con el área de estudio, en donde para el año 2022 el Páramo indica una disminución notoria en su área; para el Bosque Primario, aunque la disminución es evidente, aún representa una gran proporción del área y una presencia significativa; con un incremento modesto, se indica un crecimiento en el área cubierta por Bosque Secundario durante el periodo de estudio; y con un aumento relativamente pequeño, se indica un crecimiento en la presencia de infraestructura vial en la zona.

La cobertura vegetal como el Bosque Secundario y la Infraestructura Vial, incrementaron sus porcentajes con relación a su área, mientras que el Bosque Primario y el Páramo decrecieron en su porcentaje de su área; lo cual se muestra a continuación, representado en hectáreas en la Tabla 3.

Tabla 3. Hectáreas de Cobertura Vegetal

Cobertura Vegetal	Áreas 2017	Áreas 2022
Páramo	59	57
Bosque Primario	1370	1366
Bosque Secundario	2	4
Infraestructura Vial	24	29
Total en hectáreas	1455	1455

Nota Fuente: Autor

A lo largo de un periodo de 6 años (2017 a 2022) la cobertura vegetal de Páramo ha disminuido significativamente con un menoscabo notorio; el Bosque Primario ha experimentado una disminución moderada, y aunque es relativamente pequeña, es un cambio relevante en términos de área; el Bosque Secundario aumentó de tamaño y la Infraestructura Vial tuvo un crecimiento en la red vial del área.

La observación de cambios en la zona de cobertura en el área de trabajo y la asociación con factores como el calentamiento global y la intervención humana es fundamental para entender las dinámicas ambientales y sociales que impactan en el paisaje. Aquí hay una exploración más detallada de cómo estos factores podrían influir en los cambios de cobertura.

La descripción que proporciona resalta la complejidad de los factores que pueden influir en las coberturas del páramo, tanto a nivel directo como subyacente.

Los factores directos son aquellos que tienen un impacto inmediato y visible en la cobertura del suelo. En el caso del páramo, estos podrían incluir:

➤ Deforestación: La tala de árboles para obtener madera, leña o para convertir el área en tierras agrícolas puede tener un impacto directo en la cobertura del páramo.

➤ Quema de Pastizales: La práctica de quemar pastizales para renovar pastos o para otras actividades agrícolas puede tener un impacto directo en la cobertura del suelo.

Estos dos factores se encuentran descritos en el Plan de Manejo del Corredor Andino Amazónico Páramo de Bordoncillo – Cerro de Patascoy, La Cocha, como Ecorregión Estratégica para los departamentos de Nariño y Putumayo en donde se hace referencia a que en otra franja del Páramo Bordoncillo ubicada sobre el municipio de Buesaco Nariño se ha notado alteración hídrica llegando en épocas a sequía como “consecuencia” de la deforestación y quema causada por sus habitantes. (Corponariño - MinAmbiente - Corpoamazonía, 2002, pág. 138).

Otros factores directos que pueden influir en las coberturas son:

➤ Ganadería: La introducción de ganado en el páramo puede resultar en la compactación del suelo y la degradación de la vegetación, afectando directamente la cobertura natural.

➤ Actividades Agrícolas: La expansión de la agricultura hacia el páramo puede llevar a cambios significativos en la cobertura del suelo.

También se encuentran contemplados en el Plan de Manejo del Corredor Andino Amazónico Páramo de Bordoncillo – Cerro de Patascoy, La Cocha, como Ecorregión Estratégica para los departamentos de Nariño y Putumayo en el cual se manifiesta que los ecosistemas presentes en este corredor son ricos en flora y fauna, excepto el Valle de Sibundoy, al cual pertenece el municipio de Santiago Putumayo, cuyos procesos de desecación, la agricultura y la ganadería han influido en que la variedad de especies sea menor. (Corponariño - MinAmbiente - Corpoamazonía, 2002, pág. 129).

➤ **Infraestructura Vial:** La construcción de carreteras y otras infraestructuras puede fragmentar el hábitat y dar lugar a la pérdida de cobertura vegetal.

Factores Subyacentes: Los factores subyacentes son más amplios y abarcan procesos y condiciones que actúan como impulsores de los factores directos. Estos podrían incluir:

➤ **Cambio Demográfico:** El crecimiento de la población o la migración pueden aumentar la presión sobre los recursos naturales, llevando a cambios en la cobertura del suelo.

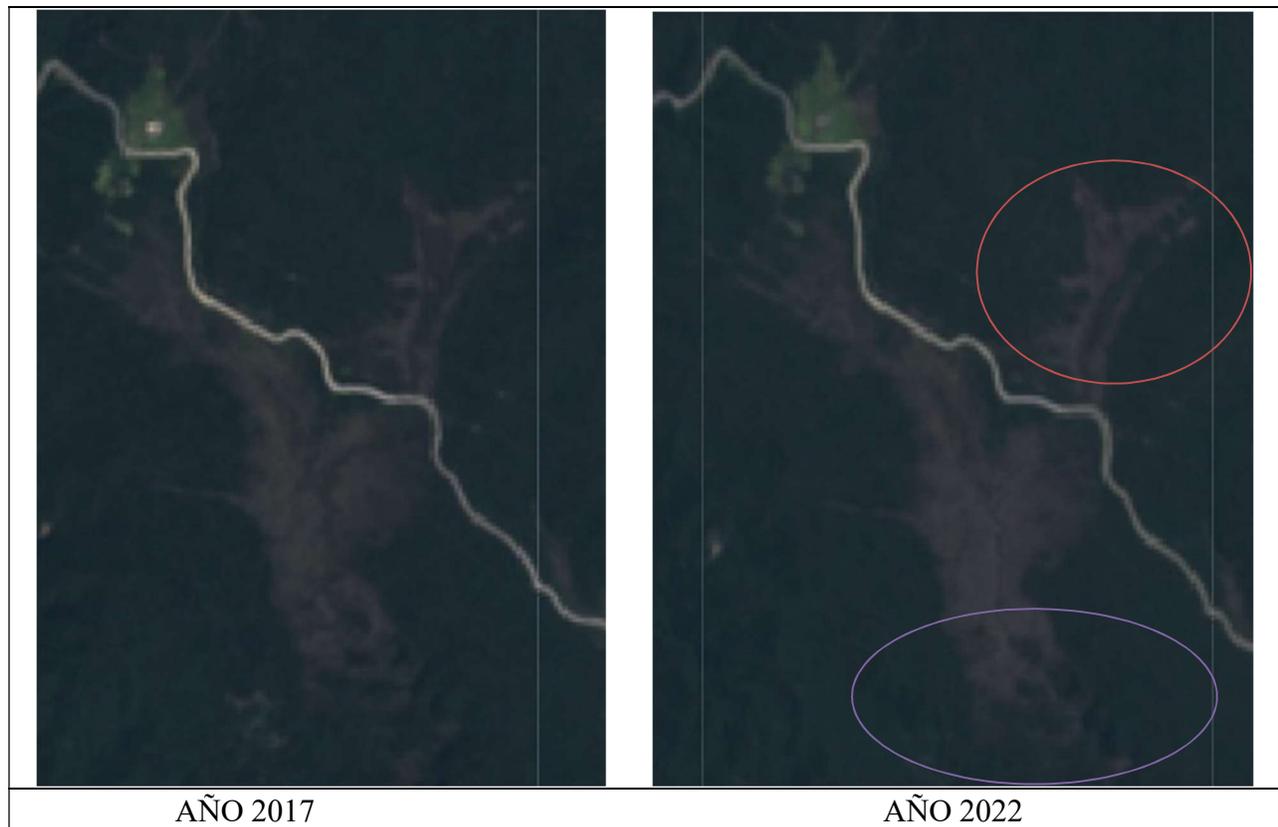
➤ **Cambio Socioeconómico:** El desarrollo económico, los cambios en la economía local o nacional, y las políticas económicas pueden influir en las decisiones sobre el uso del suelo. **Factores Institucionales:** Las políticas gubernamentales, la gobernanza y la aplicación de leyes ambientales pueden tener un impacto en la gestión del páramo y la conservación de su cobertura.

➤ **Cambios Socioculturales:** Cambios en las prácticas culturales y en las percepciones de la población local hacia el uso del suelo pueden influir en las decisiones sobre actividades como la agricultura y la ganadería.

Estos factores subyacentes se encuentran reflejados en el artículo del periódico El Tiempo “Las huellas del conflicto, la minería y el cambio climático en los páramos del suroccidente” en donde relatan como la articulación interinstitucional y con entidades gubernamentales para el trabajo con las comunidades y el desarrollo de procesos comunitarios han logrado avanzar en la solución de las problemáticas ambientales como la ampliación de las fronteras agrícolas para la inclusión de cultivos en las zonas delimitadas como protegidas dentro de los páramos y cambiar los patrones de conducta en pro de la conservación y la restauración del ecosistema. (El Tiempo, 2023).

Lo anterior puede verse reflejado en los valores de las diferentes coberturas, por ejemplo, cuando se observa la cobertura de páramo, se nota una depreciación desde su valor obtenido para el año 2017, disminuyendo de 59 hectáreas a 57 hectáreas en 2022, Figura 18.

Figura 18 Cambio de cobertura páramo año 2017 vs 2022



Nota. Fuente: Autor

Al convertir estos cambios presentados en las coberturas de la zona objeto de estudio a valores porcentuales tenemos los siguientes resultados de porcentajes de aumento y disminución, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Porcentajes de aumento y disminución de coberturas

Año	Páramo	Bosque Primario	Bosque Secundario	Infraestructura Vial
2017	4,07	94,13	0,14	1,66
2022	3,92	93,85	0,26	1,98
6 años	-3,70	-0,30	78,22	19,00

Nota. Fuente: Autor

En esta tabla 4, obtenida en un rango de 6 años, periodo comprendido entre 2017 a 2022, da como resultado valores negativos para el Páramo y el Bosque Primario, por lo cual indica una disminución porcentual en las áreas pobladas por estas coberturas vegetales; al contrario del Bosque Secundario y la Infraestructura Vial cuyos valores son positivos, indicando aumento en sus porcentajes de área.

De la misma manera se encuentra contemplado en el artículo denominado Los suelos en los páramos nariñenses: características, vocación, conflictos y su incidencia en los procesos de cambio en el uso de la tierra, en el cual aduce que, en las partes altas debido a la intervención humana y los procesos erosivos, se ha dado la pérdida de cobertura vegetal de páramo y alto andina, sobre todo en áreas circundantes al volcán Galeras, en áreas aledañas al páramo Morasurco y estribaciones del páramo Bordoncillo y el Tábano. (Rengifo, 2006, pág. 5).

7. Conclusiones

En la franja del Páramo de Bordoncillo, ubicada en el municipio de Santiago, departamento de Putumayo, se enfrentan diversos desafíos que complican el estudio detallado de la zona. Un obstáculo significativo es la presencia frecuente de nubes y sombras, elementos que generan dificultades para la identificación precisa de coberturas vegetales abiertas, como el Páramo, el Bosque Primario y el Bosque Secundario. A lo largo de la realización de este trabajo, resultó imperativo abordar de manera efectiva estos desafíos con el fin de garantizar la calidad y exhaustividad de la investigación llevada a cabo en este entorno particular.

Dada la complejidad climática que rodea el Páramo Bordoncillo, se optó por emplear imágenes del satélite Sentinel-2 en este trabajo. Este instrumento se destaca en el ámbito de los sistemas de información geográfica (SIG) gracias a su excelente resolución espacial y espectral. Esta característica lo convierte en una herramienta ideal para llevar a cabo análisis detallados sobre cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal.

Herramientas como Google Earth Engine, constituyen un sistema de información geográfica (SIG) fundamental, ya que no solo facilita la integración y análisis de datos satelitales a gran escala, sino que también ofrece una actualización constante de sus capacidades, contribuyendo a la eficiencia del trabajo y reduciendo al mínimo los costos asociados. La combinación de estas tecnologías avanzadas en la presente investigación permitió obtener un análisis de la transformación de los ecosistemas, aportando datos relevantes que se espera, sirvan de base para la formulación informada de estrategias de conservación y gestión adecuadas.

La metodología seleccionada para este estudio fue el algoritmo Random Forest, conocido por su eficacia en la clasificación de datos en imágenes satelitales. Previo a la aplicación de este método, se llevó a cabo un exhaustivo preprocesamiento de las imágenes. Esto incluyó la corrección atmosférica, la normalización radiométrica y la mejora general de la calidad de las imágenes. Estos pasos fueron fundamentales para asegurar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos en la evaluación de la zona del Páramo Bordoncillo.

Luego de llevar a cabo un análisis exhaustivo y una evaluación detallada de los datos recopilados, se llega a la conclusión de que la franja del Páramo Bordoncillo, específicamente en la zona objeto de estudio ubicada en el municipio de Santiago, Putumayo, experimenta cambios significativos en su cobertura. Durante un periodo de 6 años, comprendido entre 2017 y 2022, se ha evidenciado una marcada disminución de la cobertura vegetal de Páramo y Bosque Primario, registrando pérdidas de 2 y 4 hectáreas, respectivamente. Simultáneamente, se observa un aumento en la extensión de la cobertura vegetal de Bosque Secundario y en la presencia de Infraestructura Vial en la zona de análisis, con incrementos de 2 y 5 hectáreas, respectivamente. Estos resultados subrayan la dinámica transformadora en el paisaje de la zona intervenida, señalando la necesidad de continuar con estudios a fin de abordar y comprender las causas detrás de estos cambios que sirvan de fundamento para que las entidades competentes puedan implementar estrategias efectivas de conservación y manejo a fin de garantizar una gestión sostenible de este ecosistema.

8. Recomendaciones

Se recomienda la continuación de estudios de este tipo, tanto desde el ámbito académico como desde las instituciones públicas y privadas, con el objetivo de identificar el factor principal que está ocasionando la pérdida de cobertura vegetal en el Páramo de Bordoncillo, específicamente en lo que respecta a las coberturas vegetales de Páramo y Bosque Primario, haciendo uso de los sistemas de información geográfica SIG como Google Earth Engine y de las tecnologías más avanzadas, como las imágenes satelitales proporcionadas por Sentinel en sus versiones más recientes.

A pesar de su importancia, los páramos enfrentan amenazas significativas que comprometen su integridad. Entre las principales amenazas se incluyen el cambio climático, la pérdida de hábitat debido a la expansión agrícola y ganadera, la intervención humana con Infraestructura Vial, como en el caso de estudio. Es esencial abordar estos desafíos para garantizar la preservación a largo plazo de los páramos y aprovechar plenamente sus beneficios en términos de sostenibilidad ambiental, diversidad cultural y estabilidad económica.

Para garantizar la conservación de los páramos, es crucial tomar medidas urgentes. Esto implica implementar políticas de protección y gestión adecuadas, promover la participación activa de las comunidades locales, fortalecer la vigilancia y hacer cumplir las leyes ambientales. Además, la educación ambiental y la sensibilización son fundamentales para crear conciencia sobre la importancia de estos ecosistemas y fomentar una cultura de conservación.

Se necesita inversión en un sistema de inventario de áreas protegidas y su estado actual de conservación, acudiendo a las nuevas tecnologías que permitan abarcar zonas más extensas en

menor tiempo y con el menor gasto de recursos humanos y económicos como son los sistemas de información geográfica SIG y que a su vez se pueda realizar un efectivo control y monitoreo a los programas que promuevan la preservación, la revegetalización, la reforestación y todas aquellas acciones para el restablecimiento de la cobertura vegetal de páramo y de los bosques, que garantice la correcta ejecución de los recursos económicos destinados y sus efectos favorables a corto y mediano plazo.

Referencias Bibliográficas

- Bosque, J., & García, R. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*.(20), 49-67. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/39276976_El_uso_de_los_sistemas_de_Informacion_Geografica_en_la_planificacion_territorial
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Em E. Chuvieco, *Fundamentos de teledetección espacial*. (Segunda ed., pp. 25-27). Madrid, Alcalá, España: Ediciones RIALP, S.A. Obtido de <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Corponariño - MinAmbiente - Corpoamazonía. (2002). *Plan de Manejo del Corredor Andino Amazónico Páramo de Bordoncillo – Cerro de Patascoy, La Cocha, como Ecorregion Estratégica para los departamentos de Nariño y Putumayo*. Pasto - Nariño - Colombia. Obtido de https://www.corpoamazonia.gov.co/images/Publicaciones/33%202002_Plan_Manejo_Bordoncillo_Patascoy/2002_planmanejobordoncillopatascoy.pdf
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá -Corpoboyacá. (2021). *Glosario*. Obtido de <https://www.corpoboyaca.gov.co/glosario/paramo/>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño - Corponariño. (2002). *Plan de Manejo del Corredor Andino Amazónico Páramo de Bordoncillo – Cerro de Patascoy, La Cocha, como Ecorregion Estratégica para los departamentos de Nariño y Putumayo*. Pasto - Nariño - Colombia. Obtido de https://www.corpoamazonia.gov.co/images/Publicaciones/33%202002_Plan_Manejo_Bordoncillo_Patascoy/2002_planmanejobordoncillopatascoy.pdf
- Corporación Autónoma Regional de Nariño - Corponariño. (2002). *Plan de Manejo del Corredor Andino Amazónico Páramo de Bordoncillo – Cerro de Patascoy, La Cocha, como Ecorregion Estratégica para los departamentos de Nariño y Putumayo*. Pasto - Nariño - Colombia. Obtido de https://www.corpoamazonia.gov.co/images/Publicaciones/33%202002_Plan_Manejo_Bordoncillo_Patascoy/2002_planmanejobordoncillopatascoy.pdf
- Corporación Autónoma Regional de Nariño - Corponariño. (2007). *Informe Final Proyecto Estado del Arte de la Información Biofísica y Socioeconómica de los páramos de Nariño, Tomo 1, 2, 3, 4 y 5*. Obtido de <https://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/biodiversidad/tomo01introduccion.pdf>

- Cuatrecasas, J. (1979). *Comparación fitogeográfica de páramos entre varias Cordilleras. El medio ambiente paramo. Actas del seminario de Mérida, Venezuela.* (I. M. Salgado-Labouriau, Ed.) Caracas, Venezuela: Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Ediciones Centro de Estudios Avanzados.
- El Tiempo. (02 de agosto de 2023). Las huellas del conflicto, la minería y el cambio climático en los páramos del suroccidente. (D. A. Bermúdez, Ed.) Obtido de <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/paramos-efectos-del-conflicto-armado-e-incendios-en-narino-y-putumayo-792135>
- Erazo, Y., & Guerrero, L. (2013). *Estado actual de los ecosistemas de “páramo y selva Altoandina Morasurco Municipio de Pasto.* Tesis, Pasto Nariño. Obtido de <https://sired.udenar.edu.co/1984/1/85800.pdf>
- Espinosa-Zúñiga, J. (2020). Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de Crédito. *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XXI (número 3)*, 1 - 16. doi:<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.022>
- Grupo TYC GIS Formación. (s.d.). *cursosteledetección.com.* Obtido em 12 de noviembre de 2023, de <https://www.cursosteledeteccion.com/caracteristicas-de-las-diferentes-misiones-de-sentinel/>
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (Edits.). (2003). *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos.* Quito. Obtido de <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56486.pdf>
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos.* Quito: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia. Obtido de <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56486.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2002). *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición Hotspot y Global Climatic Tensor.* Bogotá D.C. Obtido de <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18927>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia.* (David Rivera Ospina y Camilo Eduardo Rodríguez Murcia ed.). (D. R. Murcia, Ed.) Bogotá D.C., Colombia. Obtido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/http://www.humboldt.org.co/images/Atlas%20de%20paramos/Guia_delimitacion_paramos.pdf

- Instituto Geográfico Nacional de España. (s.d.). *Centro Nacional de Información Geográfica. Teledetección*. Obtido em 12 de noviembre de 2023, de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>
- Instituto Humboldt. (2020). En Colombia, más de la mitad de sus ecosistemas se encuentran en riesgo. Obtido de <http://www.humboldt.org.co/es/actualidad/item/1489-en-colombia-mas-de-la-mitad-de-sus-ecosistemas-se-encuentran-en-riesgo>
- Llambí, L., & Cuesta, F. (2014). La diversidad de los páramos andinos en el espacio y en el tiempo. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas – ICAE, Universidad de los Andes. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN).*, 7 - 38. Obtido de https://www.academia.edu/45360665/La_diversidad_de_los_p%C3%A1ramos_andinos_en_el_espacio_y_en_el_tiempo
- Mena Vásconez, P., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., Lasso, S., . . . Ortiz, D. (Edits.). (2011). *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado., que hace parte de la selección de textos de la Serie Páramo*. Quito: Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador (GTP). EcoCienca/Abya-Yala/ECOBONA. Obtido de <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/144677-opac>
- Ministerio de Ambiente. (2021). “Tenemos el 50 % de los páramos del mundo”: Ministro de Ambiente en el Día de las Montañas. Obtido de <https://www.minambiente.gov.co/tenemos-el-50-de-los-paramos-del-mundo-ministro-de-ambiente-en-el-dia-de-las-montanas/>
- Parques Nacionales Naturales - PNN. (2009). *Plan de Manejo 2006-2010 Santuario de Flora Isla Corota*. Pasto. Obtido de <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2020/10/plan-de-manejo-del-sf-isla-de-la-corota.pdf>
- Parques Nacionales Naturales - PNN. (2009). *Plan de Manejo 2006-2010 Santuario de Flora Isla Corota*. Pasto. Obtido de <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2020/10/plan-de-manejo-del-sf-isla-de-la-corota.pdf>
- Plan Nacional de Teledetección de España (PNT). (s.d.). *Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). Satélites Sentinel*. Obtido em 12 de noviembre de 2023, de <https://pnt.ign.es/satelites-sentinel>
- Rengifo, J. (2006). Los suelos en los páramos nariñenses: características, vocación, conflictos y su incidencia en los procesos de cambio en el uso de la tierra. *Observatorio Geográfico de América Latina*. Obtido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal12/Procesosambientales/Edafologia/02.pdf>

- Rodríguez, O., & Arredondo, H. (2005). *MANUAL PARA EL MANEJO Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES OBTENIDAS DEL SENSOR REMOTO MODIS DE LA NASA APLICADO EN ESTUDIOS DE INGENIERIA CIVIL*. Bogotá D.C. Obtido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7050/tesis123.pdf?sequenc>
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 99-107. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>