

Análisis Multitemporal de las Coberturas del Suelo con Imágenes de Radar Años 2016, 2019 y 2021 PNN de los Nevados Villamaría Caldas - Colombia.

Eduar Alberto Ríos Guarín

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica
Manizales, 2024.

Análisis Multitemporal de las Coberturas del Suelo con Imágenes de Radar años 2016, 2019 y 2021 PNN Los Nevados. Sector Villamaría Caldas - Colombia.

Trabajo de Grado Presentado Como Requisito Para Optar al Título de Magíster en
Tecnologías de la Información Geográfica

Línea de Investigación:

Desarrollo sostenible ambiental y climático, además la utilización de técnica
De teledetección.

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones.

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica
Manizales, 2024

Agradecimientos

A Dios, gracias por tus bendiciones, por ser siempre mi guía y mi aliento

Colosenses 3:15-17

Y todo lo que hagáis, sea de palabra o de obra, hacedlo todo en el nombre del Señor Jesús,
dando gracias a Dios Padre por medio de él.

A mi esposa Carolina Giraldo Patiño

Gracias por tu amor, tu paciencia, tu entrega, tus consejos, por no dejarme caer, ser mi apoyo
en todo momento

A mi hija Catalina Ríos y a mi hijo Tomás Ríos

Gracias hijos por su tiempo.

A mis Padres y mis Suegros

Gracias por los consejos, las palabras sabias, y la paciencia que me han tenido

Mgr. William A. Martínez Díaz y Mgr. Javier A. López Betancur

Gracias por el apoyo, por su tiempo y los consejos.

Resumen.

En la realización de estudios de investigación, se diseñan diferentes técnicas y métodos, apropiados para identificar problemas que requieren de soluciones y resultados, direccionados hacia el bienestar social, ambiental, político entre otros; además la necesidad de implementar programas y proyectos aportando al mundo científico.

Los páramos colombianos son ecosistemas únicos y frágiles que albergan una gran biodiversidad y proporcionan importantes servicios ecosistémicos. Sin embargo, estas áreas están sujetas a diversas presiones antrópicas que pueden alterar su dinámica ambiental. El presente estudio analiza la dinámica de la cobertura del suelo en el páramo del Parque Nacional Natural de los Nevados, Colombia, entre los periodos 2016, 2019 y 2021, utilizando imágenes de radar Sentinel-1B e imágenes ópticas multiespectrales Sentinel-2A.

Se aplicaron técnicas de procesamiento de imágenes y clasificación supervisada para identificar y caracterizar las coberturas del suelo en el área de estudio. La precisión de la clasificación se evaluó con la matriz de confusión e índice kappa y se analizó la relación entre las clases de cobertura mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

Los resultados revelaron cambios significativos en la cobertura del suelo entre el año 2016 y 2021. La principal tendencia observada en el análisis mostró una correlación inversa significativa entre la vegetación nativa y el pastoreo, lo que podría indicar que el pastoreo es un factor importante en la pérdida de vegetación nativa en el páramo. Por otro lado, se observó un aumento en la cobertura de pastoreo y suelo desnudo; en cuanto a los bosques de enanos mantuvieron una cobertura relativamente estable durante el período estudiado.

Por otra parte, la topografía del área de estudio afecta la calidad de las imágenes de radar, generando sombras y distorsiones, por lo tanto, se recomienda considerar la topografía al seleccionar imágenes de radar, utilizar imágenes ópticas en apoyo al proceso de

interpretación combinándolas con las imágenes SAR, aplicar herramientas de procesamiento para mitigar efectos de sombreado, y validar los resultados con datos de campo. Estos hallazgos contribuyen a comprender mejor la dinámica del suelo en el páramo del municipio de Villamaría – Caldas y pueden guiar estrategias de manejo sostenible.

Palabras claves: Teledetección Radar, Clasificación Supervisada, Imágenes Sentinel-1, Páramos

Abstract

In conducting research studies, different techniques and methods are designed, appropriate for identifying problems that require solutions and results, directed towards social, environmental, political well-being, among others; In addition, the need to implement programs and projects that contribute to the scientific world.

Colombian paramos are unique and fragile ecosystems that harbor a great biodiversity and provide important ecosystem services. However, these areas are subject to various anthropogenic pressures that can alter their environmental dynamics. This study analyzes the dynamics of land cover in the páramo of the Nevado National Natural Park, Colombia, between the periods 2016, 2019 and 2021, using Sentinel-1B radar images and Sentinel-2A multispectral optical images.

Image processing and supervised classification techniques were applied to identify and characterize land covers in the study area. The classification accuracy was evaluated with the confusion matrix and kappa index, and the relationship between cover classes was analyzed using Pearson's correlation coefficient.

The results revealed significant changes in land cover between 2016 and 2021. The main trend observed in the analysis showed a significant inverse correlation between native vegetation and grazing, which could indicate that grazing is an important factor in the loss of native vegetation in the páramo. On the other hand, an increase in grazing cover and bare soil was observed; as for dwarf forests, they maintained a relatively stable cover during the study period.

On the other hand, the topography of the study area affects the quality of radar images, generating shadows and distortions. Therefore, it is recommended to consider the topography when selecting radar images, use optical images to support the interpretation process combining them with SAR images, apply processing tools to mitigate shading effects, and validate the results with field data. These findings contribute to a better understanding of soil dynamics in the páramo of the municipality of Villamaría - Caldas and can guide sustainable management strategies.

Keywords: Radar Remote Sensing, Supervised Classification, Sentinel-1 Images, Páramos

Contenido

INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.	17
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	17
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	21
2. JUSTIFICACIÓN	21
1.1 NOVEDAD	22
1.4 ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE PARA EL INVESTIGADOR Y LA CIENCIA?	23
1.5 ¿A QUIÉN LE SIRVE ESTA INVESTIGACIÓN? ¿CÓMO SIRVE?	24
2. ANTECEDENTES	25
3. OBJETIVOS	38
3.1 OBJETIVO GENERAL.	38
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	38
4. REFERENTE CONTEXTUAL	39
5. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	42
6. REFERENTE TEÓRICO	45
6.1 LA INVESTIGACIÓN AMBIENTAL.	45
6.2 ECOSISTEMA DE PÁRAMO.....	46
6.2.1 <i>La vegetación Nativa</i>	47
6.2.2 <i>Clasificación de la Vegetación Nativa</i>	48
6.2.3 <i>Deterioro de la Capa Vegetativa en Páramos</i>	52
6.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	56
6.4 TELEDETECCIÓN.....	58
6.4.1. <i>Procesamiento de Imágenes ópticas</i>	60
6.4.2 <i>Imágenes Multiespectrales</i>	62
6.4.3 <i>Imagen de Satélite Sentinel-2 – Nivel 2A</i>	63
6.4.4 <i>Aplicación Teledetección Radar</i>	64
6.4.4.1 <i>Imágenes Sentinel-1</i>	66
6.4.4.2 <i>Corrección Atmosférica</i>	67
6.4.4.3 <i>Longitudes de Onda de Radar</i>	67
6.4.4.4 <i>Bandas de Polarización</i>	69
6.4.4.5 <i>Coefficiente de Retrodispersión</i>	70
6.4.4.6 <i>Propiedades Dieléctricas</i>	71
6.4.4.7 <i>Corrección de la Órbita</i>	72
6.4.4.8 <i>Apply Orbit File</i>	72
6.4.4.9 <i>Resolución Radiométrica</i>	73
6.4.5.0 <i>Calibración Radiométrica</i>	74
6.4.5.1 <i>Corrección del Terreno</i>	74
6.4.5.2 <i>Filtro Speckle</i>	75
6.4.5.3 <i>Thermal Noise Removal (Eliminación de ruido térmico)</i>	76
6.5 CLASIFICADOR KNN CLASSIFIER (K-NEAREST NEIGHBORS CLASSIFIER).	77
6.6 MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA.	79

6.7 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON.	80
7. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.	81
8. METODOLOGÍA.	82
8.1 PROCEDIMIENTO.	82
8.1.2 <i>Definición de la Zona de Estudio.</i>	82
8.1.3 <i>Adquisición De Datos.</i>	84
8.1.3.1 Imagen de Satélite Sentinel-2 – Nivel 2A.....	84
8.1.3.2 Imágenes Sentinel-1B.	85
8.1.4 <i>Definición De Las Zonas De Entrenamiento.</i>	86
8.1.5 <i>Delimitación de Áreas de Interés mediante el Uso de Máscaras.</i>	91
8.1.6 <i>Preprocesamiento de las Imágenes de Radar Sentinel-1B.</i>	97
8.1.6.1 Clasificación Supervisada de las Imágenes SAR.....	100
8.1.7 <i>Validación de los resultados.</i>	105
8.1.7.1 Cálculo de la muestra y georreferenciación de puntos de control.....	105
8.1.7.2 Matriz de Confusión.....	106
8.1.7.3 índice Kappa.....	106
8.1.8 <i>Análisis de Correlación de Pearson para la Interpretación de Resultados.</i>	107
8.1.9 <i>Operacionalización de Variables.</i>	108
9. RESULTADOS.	110
9.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO MEDIANTE EL RESPALDO DE IMÁGENES ÓPTICAS.	110
9.1.1 <i>Definición de las Zonas de Entrenamiento.</i>	111
9.1.2 <i>Aplicación del método de clasificación supervisada KNN</i>	112
9.1.3 <i>Análisis y comparación de los resultados ante las variaciones de las coberturas en la zona de páramo.</i>	132
9.1.3.1 Interpretación del índice de Resultados de la Tabla 33.....	136
10. DISCUSIONES.	138
11. CONCLUSIONES.	142
12. RECOMENDACIONES.....	145
13. REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	147

Lista de Tablas.

Tabla 1 Bandas espectrales Sentinel-2A	63
Tabla 2 Longitud de onda Imágenes de Radar	68
Tabla 3 Frecuencia de bandas	68
Tabla 4 Expresiones lógicas.....	92
Tabla 5 Comparación Metodología de Clasificación supervisada	101
Tabla 6 Lista de Bandas de Polarización preprocesadas	102
Tabla 7 Medida Índice Kappa.....	107
Tabla 8 Operaciones de Variables	108
Tabla 9 Distribución Del % De Píxeles Por Cada Clase - Imágenes Ráster	119
Tabla 10 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.	124
Tabla 11 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.	124
Tabla 12 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.	125
Tabla 13 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.	125
Tabla 14 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2019.	125
Tabla 15 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada – año 2019.	126
Tabla 16 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2019.	126
Tabla 17 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada – año 2019.	126
Tabla 18 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.	127
Tabla 19 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada – año 2021.	127
Tabla 20 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.	127
Tabla 21 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada – año 2021.	128
Tabla 22 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.....	128
Tabla 23 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2019.....	128
Tabla 24 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.....	129

Tabla 25 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.....	129
Tabla 26 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2019.....	129
Tabla 27 Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.....	130
Tabla 28 Medida aplicada a los resultados índice Kappa de las imágenes SAR Clasificadas.	130
Tabla 29 Imágenes vectorizadas con mayor índice Kappa.	132
Tabla 30 Resultados de la información vectorizada de cada año de las imágenes SAR Sentinel-1B Clasificadas.	133
Tabla 31 Resultado de la media y la desviación estándar de cada clase:	135
Tabla 32 Resultado de la Covarianza entre cada par de Clases:	135
Tabla 33 Resultado del índice de correlación de Pearson para cada par de clases:.....	136

Lista de Figuras.

Figura 1 Mapa Localización Parque Nacional Natural Los Nevados y Zona de Estudio	39
Figura 2 Árboles de Enanos	48
Figura 3 Frailejón Espeletia	49
Figura 4 Paja Ratón	49
Figura 5 Planta Rígida - Cojín	50
Figura 6 Procesamiento de imagen	60
Figura 7 Mapeo y Monitoreo	69
Figura 8 Localización Zona de Estudio	83
Figura 9 Imagen Sentinel-2 Nivel 2A	84
Figura 10 Imagen de Radar 2016,	85
Figura 11 Imagen de Radar 2019	85
Figura 12 Imagen de Radar 2021.	86
Figura 13 Imagen óptica Sentinel-2A – Combinación de Bandas RGB - Natural Colors (Red: B4, Green: B3, Blue: B2)	88
Figura 14 Imagen de Satélite Sentinel-2A - Combinación de Bandas RGB - false colors infrared (Red: B4, Green: B3, NIR: B8).....	89
Figura 15 Puntos de coordenadas tomadas en campo.	90
Figura 16 Imágenes ópticas Sentinel-2A con recorte (Subset) al área de influencia de la zona de estudio	91
Figura 17 Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Vegetación Nativa	93
Figura 18 Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Pastoreo	93
Figura 19 Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Bosques de Enanos.....	94
Figura 20 Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Suelo Desnudo.	95
Figura 21 Mapa - Zonas de Entrenamiento dentro del Área de Estudio.	96
Figura 22 Imágenes de Radar Sentinel-1B.....	98
Figura 23 Modelo Graph Builder – preprocesamiento de imágenes Sentinel-1B	98
Figura 24 Clasificador KNN Classifier (K-Nearest Neighbors Classifier).	104
Figura 25 Mapa - Zonas de Entrenamiento dentro del Área de Estudio	111
Figura 26 Imágenes - Conversión de retrodispersión lineal a valores en retrodispersión en dB	113
Figura 27 Imágenes de Retrodispersión en Decibelios tras Conversión de las Bandas de Polarización VV, VH.....	114
Figura 28 Histogramas Imagen de Radar año 2016 - Ventana 5x5 del Procesado Speckle ...	115
Figura 29 Histogramas Imagen de Radar año 2016 - Ventana 7x7 del Procesado Speckle ...	116
Figura 30 Histogramas Imagen de Radar año 2019 - Ventana 5x5 del Procesado Speckle ...	116
Figura 31 Histogramas Imagen de Radar año 2019 - Ventana 7x7 del Procesado Speckle ...	116
Figura 32 Histogramas Imagen de Radar año 2021 - Ventana 5x5 del Procesado Speckle ...	117
Figura 33 Histogramas Imagen de Radar año 2021 - Ventana 7x7 del Procesado Speckle ...	117
Figura 34 Mapas temáticos comparativos periodos 2016, 2019, 2021 de las imágenes SAR Sentinel-1B Clasificadas.	133

Figura 35 Gráfica de la información vectorizada de cada año de las imágenes SAR Sentinel-1B Clasificadas..... 134

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Distancia Euclidiana (p. 64)	104
Ecuación 2. Fórmula para calcular tamaño de muestra para variables cuantitativas	105
Ecuación 3. Fórmula para hallar el índice Kappa	106
Ecuación 4. Fórmula Correlación de Pearson	108

Introducción

La formación y evolución de la Tierra han sido fundamentales para el desarrollo y la supervivencia de los seres vivos. Desde la teoría del Big Bang, hace aproximadamente quince mil millones de años, hasta la actualidad, la Tierra ha sido testigo de numerosos fenómenos que han moldeado su paisaje y su biodiversidad. En este contexto, Los sensores remotos se han consolidado como una herramienta fundamental para el monitoreo ambiental y la gestión de recursos naturales, especialmente en áreas de difícil acceso o con condiciones climáticas adversas. El presente estudio se enfoca en la aplicación de esta tecnología específicamente con la teledetección de radar para el análisis de cambios en la cobertura del suelo en el ecosistema del Parque Nacional Natural de los Nevados (PNNN) en Colombia.

El PNNN, ubicado en la cordillera central de los Andes colombianos, es un área de alta importancia ecológica y biodiversidad, que enfrenta presiones significativas debido a actividades humanas como el pastoreo y la deforestación, así como a fenómenos naturales como el cambio climático. La comprensión de los cambios en la cobertura del suelo en este ecosistema es crucial para su conservación y manejo sostenible.

El objetivo principal de este estudio es analizar los cambios en la cobertura del suelo en el PNNN durante los años 2016, 2019 y 2021; la elección de las imágenes de radar del sensor Sentinel -1B, tiene ventajas significativas que ofrecen sobre otros tipos de sensores como los ópticos; al ser el páramo del PNNN una zona con bastante nubosidad la mayor parte del tiempo, los sensores de radar pueden penetrar las nubes, la lluvia, capturar datos durante la noche o con coberturas de nubes persistentes, son independientes de las condiciones climáticas adversas, por lo tanto, y para este proyecto, se buscó identificar y cuantificar las áreas de suelo desnudo, vegetación nativa, bosques de enanos y áreas de pastoreo, y analizar las variaciones que se han suscitado en dicho periodo.

Se emplearán imágenes de radar Sentinel-1B preprocesadas con el software SNAP de la ESA para realizar la clasificación supervisada de la cobertura del suelo. Además, se integrarán datos ópticos multiespectrales de Sentinel-2A para mejorar la precisión de la clasificación y permitir un análisis más detallado de los cambios en la vegetación.

Se aplicará el método de correlación de Pearson para analizar la relación entre las diferentes clases de cobertura del suelo, lo que permitirá identificar posibles impactos de la actividad humana y cambio climático

Se espera que los resultados de este estudio proporcionen información valiosa sobre los cambios en la cobertura del suelo en el PNNN y sus posibles causas. Estos resultados serán de gran importancia para la toma de decisiones en la gestión ambiental y la conservación de este ecosistema único.

En conclusión, este estudio demuestra el potencial de la teledetección radar para el monitoreo de cambios en la cobertura del suelo en ecosistemas montañosos como el PNNN. Los resultados obtenidos contribuirán a mejorar nuestra comprensión de los procesos ambientales en esta región y a apoyar estrategias efectivas para su conservación y manejo sostenible.

1. Planteamiento del Problema de Investigación y su Justificación.

1.1 Descripción del Área Problemática.

Colombia es un país con una riqueza orográfica significativa, caracterizado por su topografía, clima y pisos térmicos, entre otros aspectos. “Dentro de su relieve se destacan los páramos, que abarcan aproximadamente 2.906.137 hectáreas, convirtiendo al país en uno de los que posee mayor extensión y diversidad biótica asociada a este ecosistema” (Buitrago-González, López-Guzmán, et al., 2016, p. 2). Estos ecosistemas cumplen diversas funciones relevantes para el beneficio humano, como lo afirma Díaz-Granados Ortiz et al. (2015), “al mencionar que los páramos son de gran riqueza ecológica y desempeñan un papel importante en la economía de las sociedades andinas debido a su valor agrícola e hídrico” (p. 75). Los páramos, por su riqueza ecológica, influyen positivamente en las comunidades que se encuentran por encima de los 3000 metros de altura. Además, son lugares húmedos, propicios para el nacimiento de fuentes de agua, que fluyen por las montañas formando riachuelos y cuerpos de agua.

En cuanto a otros beneficios ecosistémicos, García Bustamante et al. (2019)

Menciona que los páramos son ecosistemas de una singular riqueza cultural y biótica, con un alto grado de especies de flora y fauna endémicas de inmenso valor, que constituyen un factor indispensable para el equilibrio ecosistémico, el manejo de la biodiversidad y el patrimonio natural del país (p 201).

En los páramos se encuentran especies naturales que proporcionan beneficios ambientales, como la flora de páramo y el frailejón, cuya función principal es capturar agua, regular el suelo y controlar la erosión.

Para la Región del Eje Cafetero, el Parque Nacional Natural de los Nevados es una zona conectada por volcanes, parte del cinturón de fuego del Pacífico, que descansa sobre varias placas tectónicas con una intensa actividad sísmica y volcánica en los países suramericanos, asiáticos, centroamericanos, entre otros. Es así como en el PNNN Se localiza en el eje central de la Cordillera Central albergando el Volcán Nevado del Ruiz, con un área de aproximadamente 350 km² que abarca los departamentos de Tolima, Caldas y Risaralda. Al respecto el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, (2014) afirma que:

Es el nevado más septentrional de la cordillera Central. Históricamente lo han observado gran parte de los habitantes del país, desde Manizales por el occidente y desde el valle del Magdalena por el oriente. Se puede observar incluso desde las partes altas de Bogotá en días despejados (p.2)

El volcán está localizado alrededor de las coordenadas geográficas 4°53'N y 75°19'W y tiene una altura máxima de aproximadamente 5330 metros sobre el nivel del mar, con una típica forma de cono resultado de sucesivas capas de lava andesítica y dacítica, cenizas y otros materiales del interior de la Tierra. Por esto, es considerado un estratovolcán o volcán compuesto, cuyas rocas ígneas en su historia provienen desde el pleistoceno hasta el día de hoy, siguiendo esa transformación en su periodo geológico. Esta característica brinda información sobre el acondicionamiento del almacenamiento del magma, registros necesarios para el conocimiento epistemológico de este ecosistema, que ha sido un elemento importante para las comunidades e institucionalidad.

El Parque Nacional Natural de los Nevados, según información del Instituto de Investigación Alexander Von Humboldt (2017) “abarca un área de 133.666 hectáreas y se encuentra ubicado en los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Tolima. Se extiende

por 17 municipios y sus vertientes incluyen las zonas sur, oriental y occidental, con sus áreas naturales protegidas” (p 26).

Por lo tanto, es una zona diversa que cubre cuatro departamentos en la cordillera central, con características propias de estos territorios alimentando a sus comunidades con un recurso hídrico y flora e importancia socioecológica. Según el Instituto Alexander Von Humboldt, (2017) “el complejo de páramo Los Nevados presenta un 78% de vegetación natural; el área restante corresponde principalmente a zonas con actividades agropecuarias (22%) y un 7% está ocupado por zonas erosionadas, afloramientos rocosos y zonas quemadas carentes de vegetación” (p. 2).

Estas cifras evidencian que las zonas de páramo como ecosistema estratégico determinan los recursos biofísicos y la calidad de los servicios ambientales, los cuales presentan situaciones de deterioro que pretenden ser evidenciadas, como en el caso de la investigación, donde la capa vegetativa resulta fundamental en los procesos hidroclimatológicos y permite generar escenarios de cambio climático.

En consecuencia, las actividades productivas desarrolladas en el contexto geográfico de estudio son válidas en el análisis de los efectos sobre dichos ecosistemas; si bien la agricultura probablemente tiene el efecto más intenso sobre la vegetación y el suelo, existen otros impactos dentro de los que se destacan las quemas, la ganadería y los procesos forestales, que abarcan extensas áreas y proveen un balance económico menos positivo por unidad de superficie. Desde el punto de vista socioecológico, la agricultura es la base de las economías de subsistencia de las comunidades locales, por lo tanto, la práctica y el desarrollo de este modo productivo en zonas de páramos, cuya fragilidad ecológica resulta evidente en efectos adversos, conlleva a impactos socioambientales. Hofstede y Mena (2018) afirman que:

La agricultura deteriora la capa vegetativa con la utilización de plaguicidas. Además, la quema y la ganadería son prácticas causantes de la pérdida de dicha capa, elemento

sustancial para la retención del agua y conservación de este, generando suelos más secos e incrementando los niveles de temperatura, lo que contribuye al cambio climático (p. 7)

La población se convierte en un factor de determinante para los ecosistemas, ya que ejerce presiones relacionadas con las actividades que se llevan a cabo. El Instituto de Investigación Alexander Von Humboldt (2017) “señala que la población en este páramo se encontraba en 2404 personas para el año 2005. Sus necesidades están relacionadas con la satisfacción de dinámicas biológicas y funcionales, como el traslado en el área de estudio” (p. 20), así como con la práctica de subsistencia, donde la producción agrícola tiene efectos sobre el ecosistema de páramos. Además, el turismo que caracteriza este contexto genera dinámicas antrópicas que provocan prácticas inadecuadas, como la presencia de residuos sólidos, fogatas, afectación sobre la vegetación, contaminación de los cuerpos de agua, rutas alternativas que aumentan los riesgos físicos, como deslizamientos, caza de la fauna, entre otros.

Por lo tanto, es imprescindible generar herramientas de conocimiento, divulgación y prospectiva sobre ecosistemas estratégicos como el páramo, lo cual, desde las tecnologías de la información geográfica, permite transversalizar la situación problemática en una escala multitemporal, evidenciando las espacialidades del fenómeno de estudio y las características que destacan en cada periodo. Hacer de la investigación una herramienta para la toma de decisiones es necesario formular lo siguiente:

1.2 Formulación del problema.

¿Cuál ha sido la evolución temporal de la cobertura del suelo (pastoreo, suelo desnudo, bosques enanos y vegetación nativa) en un sector específico de la Jurisdicción de Villamaría - Caldas, dentro del Parque Nacional Natural Los Nevados, durante los años 2016, 2019 y 2021, ¿utilizando el procesamiento de imágenes de radar Sentinel-1B?

2. Justificación.

Una de las principales funciones de los páramos o ecosistemas de alta montaña afirma Garavito Rincón, (2015) “El potencial de regulación hídrica del páramo se relaciona con su alta capacidad de retención de agua debido a su vegetación, alcanzando en condiciones de saturación los 80-90%.” (p. 28). La función de abastecimiento y producción del recurso hídrico; desde luego son un fortín socio ecológico que han transformado las sociedades por esos beneficios prestadores.

Las acciones humanas, como la agricultura, la ganadería, la minería legal e ilegal, el turismo, entre otras, están ejerciendo una presión cada vez mayor sobre los ecosistemas, especialmente sobre los páramos, que son uno de los más afectados, comprometiendo la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, esencial para la supervivencia humana y la biodiversidad. Estas actividades han llevado a una deforestación alarmante, contaminación del agua, pérdida de hábitats naturales y erosión del suelo, amenazando la biodiversidad de la región y la estabilidad de los ecosistemas. Para Perea-Ardila et al., (2022) “estos ecosistemas se encuentran amenazados constantemente, la falta de planificación del territorio ha traído consigo destrucción y agotamiento de los ecosistemas naturales” (p. 2).

Por lo tanto, los ecosistemas de páramo, como el Parque Nacional Natural de los Nevados en Colombia, enfrentan presiones significativas debido a las actividades humanas dirigidas hacia la producción de bienes y servicios en las industrias, contribuyendo con el calentamiento global debido al aumento del CO₂., representando una amenaza directa para la biodiversidad de la zona y disponibilidad del recurso hídrico.

Es así como, en este contexto, la teledetección mediante imágenes de radar se presenta como una herramienta fundamental para monitorear los cambios de la superficie del suelo del Parque Nacional Natural de los Nevados, que a lo largo del tiempo impacta en la regulación hídrica natural del páramo. El uso de dichas imágenes SAR, presentan una ventaja significativa ya que la energía transmitida, se refleja en la superficie capturando datos del suelo, esto, independientemente del clima y de la nubosidad sobre la zona.

Por lo tanto, es imperativo evaluar el cambio multitemporal de la cobertura del suelo en el PNNN, para generar información crucial y detallada sobre la evolución de la cobertura del suelo del páramo, que permita a los tomadores de decisiones de las entidades territoriales, a las autoridades ambientales, desarrollar estrategias e implementar medidas efectivas de conservación y manejo sostenible del páramo.

1.1 Novedad

El uso de imágenes de radar en el análisis multitemporal de un páramo, como el Parque Nacional Natural Los Nevados, ofrece ventajas significativas debido a las características únicas de este ecosistema. La capacidad de penetración del radar a través de la vegetación densa y la capacidad de obtener datos independientemente de las condiciones climáticas lo convierten en una herramienta importante para monitorear cambios en la cobertura del suelo en áreas de difícil acceso y condiciones climáticas variables. Aunque las técnicas de análisis multitemporal

con imágenes de radar no son nuevas, su aplicación en un ecosistema frágil y de alta importancia ecológica como los páramos colombianos presenta un enfoque innovador.

Este estudio se centra en aprovechar estas ventajas para comprender mejor la dinámica de cambio en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo en el páramo de Los Nevados,

1.4 ¿Por qué es importante para el investigador y la ciencia?

La investigación es un factor de abordaje hacia la obtención de conocimientos que van a esclarecer hipótesis de un determinado fenómeno. En este caso, identificar los cambios en las coberturas del suelo, con datos de fuentes primarias y secundarias; antecedentes bibliográficos, análisis de las variables que intervienen en la investigación, y sus fenómenos.

Entonces los cambios en las coberturas del suelo en los años de 2016, 2019 y 2021, para la ciencia es importante identificar las causas y consecuencias de este fenómeno, que impacta a una despensa de agua proveniente del Parque Nacional Natural de los Nevados, específicamente en el sector de Villamaría, Caldas, cuyo recurso es esencial para la supervivencia y bienestar humano. Además, la corteza vegetal y sus beneficios siendo expresado por Pinos Morocho, Morales Matute, & Durán López (2020)

En caso del suelo del páramo contiene grandes cantidades de carbono orgánico, gracias a las bajas temperaturas que reducen la descomposición de la materia orgánica que se acumula. Estos suelos prestan un servicio ecosistémico importante a nivel global, al regular el nivel de dióxido de carbono emitido a la atmósfera, actuando como sumideros (p.157)

La necesidad de la prestancia de los servicios ecosistemas, es un gran reto para la sociedad por el valor del suelo, porque garantiza la conservación de las diferentes especies nativas y transformadas, aumentando la supervivencia de la riqueza cultural de los páramos.

1.5 ¿A quién le sirve esta investigación? ¿Cómo sirve?

En este documento se va a identificar las razones entre las mismas variables, porque ha tenido variación en la cobertura del suelo del Parque Nacional Natural de los Nevados, específicamente en el sector de Villamaría, Caldas; siendo una de las mayores áreas de conservación natural y su beneficio hacia la comunidad en recurso hídrico y biodiversidad, para García Bustamante & Leal Spear, (2018)

Que los páramos son ecosistemas de una singular riqueza cultural y biótica y con un alto grado de especies de flora y fauna endémicas de inmenso valor, que constituyen un factor indispensable para el equilibrio ecosistémico, el manejo de la biodiversidad y del patrimonio natural del país (p.19)

En cuanto a la investigación en curso, será un baluarte para las diferentes entidades competentes como: Corporaciones Autónomas, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Universidades, centros de investigación que serán beneficiados para la explicación del fenómeno, ampliar conocimiento y reformular la teoría del deterioro ambiental en ese sector.

Por consiguiente, las razones pertinentes en identificar la existencia de una afectación del suelo paramuno en los próximos años, involucrará alrededor de un millón de habitantes que circundan este ecosistema, siendo un área protegida por La Institución Parques Nacionales Naturales.

2. Antecedentes.

En el caso de los antecedentes investigativos, Guevara Patiño, (2016) sugiere Cuando se hace referencia a una investigación documental, su estudio es metódico, sistemático y ordenado, con objetivos bien definidos, de datos, documentos escritos, fuentes de información con la necesidad de hacer aportes a esta investigación, se toman referentes de otros estudios, relacionados con las técnicas de teledetección (radar), que van a aflorar en un documento que describe resultados, entre el terreno estudiado y el sensor como fuente de información de las imágenes – radar

En cuanto a Vélez Alvarado (2019) Análisis multitemporal de una serie de imágenes sentinel-1 y detección de cambios del uso de suelo para la evaluación de la reserva ecológica manglares churute y sus alrededores en guayas-ecuador se realiza este estudio, se utilizó la Reserva Ecológica Manglares Churute, área natural protegida de 50.000 ha, ubicada en el centro occidental de Ecuador, debido a la necesidad de mitigar los riesgos a su exposición a intereses de colonos con sus cultivos. Por eso se analizaron los usos de suelo a 1 km de distancia del perímetro y en un área de 70.000 ha de la llanura aluvial en la que se encuentra; en el estudio metodológico se clasifican los cultivos caña de azúcar, camaronera, banano, cacao y palma en menor cantidad y se trabaja al margen de la costa Churute Ecuador.

La teledetección es una técnica empleada con el fin de conocer las afectaciones de la agricultura en esa zona de protección, para ello se descargaron 12 imágenes Sentinel 1 A y 1B, nivel 1.5 con polarizaciones VV y VF mediante procesamiento software SNAP. De acuerdo con los resultados en los años 2015 hasta 2018 es notorio de los cambios del uso en el suelo en temporadas de cosechas, ciclos de cultivos y vegetación en el entorno de las áreas de amortiguación ambiental, con el apoyo de los SIG Y teledetección; se automatiza con la utilización del software SNAP, QGIS e imágenes de satélite de acceso a los Sentinels.

Entonces el aporte de este proyecto a la investigación en curso es el referente en la identificación de las actividades cotidianas del ser humano afectando a las áreas de protección ambiental y ecológicas; de todas maneras, el ser humano seguirá invadiendo zonas de reserva sostenible, siendo atributos indispensables para el desarrollo económico y la materialización del desarrollo.

En la investigación propuesta para el análisis de Estimación de la superficie afectada por inundaciones mediante polarimetría con imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel 1A en la cuenca hidrográfica del Río Frío (Costa Rica), se espera ser un referente en la investigación en curso, de acuerdo a Martínez Barbachano (2023) en este trabajo se pretende la utilización de la polarimetría con radar de apertura sintética y aplicar en el monitoreo de cambios de las coberturas terrestres y acuíferas. Para la selección de las imágenes, el sensor Sentinel-1 A capaz de capturar imágenes de alta resolución; con el objeto de estimar la superficie inundada a lo largo de la cuenca del río Frío durante las inundaciones ocurridas entre el 22 y el 25 de julio de 2021. Las imágenes fueron obtenidas mediante el método Interferometría Wide Swath (IW) que comprende imágenes con nivel de procesamiento en alta resolución y capturadas mediante el modo Ground Range Detected (GRD). Dentro de los resultados el potencial de la resolución y la efectividad del sensor para el monitoreo de las diferentes inundaciones, siendo una novedad en este riesgo de crecida del cuerpo de agua y sus repercusiones para la detección de la información requerida y su intromisión de la polarización VH es más débil que la polarización (HH, VV) se reciben horizontalmente.

En cuanto a estudios realizados en La Europa Mediterránea, se hace una clasificación de cultivos a partir de observaciones de teledetección radar. Por lo tanto, se aplica a zonas de secano y regadío de Navarra, Arantzazu Larrañaga (2018) su objetivo Investigar y desarrollar técnicas y herramientas para la clasificación de cultivos mediante el empleo de observaciones de teledetección radar, parte de la necesidad de trabajar por el sistema agrícola en Europa

Agenda 2000 y Red Natura 2000, En zonas (semi)áridas como las de la cuenca mediterránea donde se alternan cultivos de secano y regadío, este hecho adquiere especial relevancia. La transformación de terrenos de agricultura de secano a regadío puede generar cambios ambientales, impactos sobre los recursos hídricos o controversias sobre el uso del agua y el manejo de la tierra.

Dentro de la metodología se utilizan técnicas de supervisión clasificada de imágenes multispectrales de satélite y el empleo de imágenes de radar, además se contó un Modelo Digital de terreno (MDT) de 5 m de resolución de toda Navarra, (ii) información de las declaraciones de la PAC (Política Agraria Común) de los años estudiados, (iii) información de campo correspondiente a las inspecciones de las declaraciones de la PAC de los años estudiados.

Como resultado se utilizaron los filtros adaptativos de Lee y Gamma MAP con una ventana de 3x3. Ambos filtros resultaron efectivos para reducir el moteado sin suprimir elementos lineales presentes en las imágenes. También se corrigieron para garantizar un ajuste preciso entre observaciones de distintas fuentes y se calcularon los estadísticos de todos los parámetros (coeficientes de retro dispersión y parámetros polarimétricos) objeto de estudio, por parcela. Respecto a esta investigación, su interés de utilizar la técnica de supervisión clasificada, modelo digital de terreno 5 mts de resolución, para observar este comportamiento de los suelos y su beneficio para cultivos en una zona de diferentes climas para conocer mejorar la economía y seguridad alimentaria en estos países al margen del Mediterráneo e impactar su productividad y competitividad; de igual manera su aporte fijar la teledetección radar con la clasificación supervisada, sensor Sentinel 1 A, con la correlación de Spearman adecuado para el análisis multitemporalmente.

En el caso de La Pampa/ Argentina, se va a destacar las técnicas de clasificación supervisada para la discriminación entre ecos meteorológicos y no meteorológicos

usando Información de un radar de banda C y su importancia de investigar el beneficio, Ruiz Suarez et al (2018) analiza los ecos meteorológicos y no meteorológicos. También se hace un diagnóstico de estos fenómenos asociados a variación del clima; en cuanto al radar meteorológico, el principal problema es la presencia de ecos no meteorológicos tales como ecos biológicos (insectos, pájaros), ecos de terreno (edificios, montañas), o incluso presencia de propagación anómala. Dentro de los objetivos de esta investigación se encuentra: introducir y evaluar el desempeño de cuatro métodos de clasificación supervisada a fin de mejorar la diferenciación entre ecos meteorológicos y no meteorológicos como un primer paso en el desarrollo de un sistema de control de calidad de la información de radar a ser implementada por el Servicio Meteorológico Nacional.

Para el uso de la regla de clasificación de Bayes, un análisis de cada componente y técnica estadística, el re-muestreo; Se utilizaron datos del radar meteorológico Selex SI Gematronik Doppler de doble polarización en banda C (5.6 GHz) instalado en el predio de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Anguil (La Pampa). Como resultados obtenidos se tiene conceptos de meteorólogo, este analiza 12 imágenes en diferentes escenarios, y temporalidad. En las cuatro técnicas de clasificación supervisada entre ecos meteorológicos y no meteorológicos, se muestra una variabilidad en el Modelo lineal, Modelo Cuadrático, Modelo Logístico y Modelo de Bayes Naive. Se concluye que el modelo lineal es el que mejor se ajusta.

Posteriormente el aporte a la investigación en proceso, la utilización de ecos meteorológicos del radar, muestra la importancia del estudio de la imagen, con el conocimiento del remuestreo, cada uno de los modelos estadísticos propuestos, y también los datos provenientes del radar Doppler banda C de doble polarización instalado en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Angui, para lo cual sirve como referencia a las necesidades de la información de la investigación del análisis multitemporal de los cambios en la cobertura del suelo mediante la técnica de teledetección con el radar.

Ahora, en la investigación clasificación de cobertura vegetal con resolución espacial de 10 mts en bosques del Caribe Colombiano, misiones Sentinels 1 y 2, allí se da una topografía llana, climas secos, bosques seco tropical; sus suelos se caracterizan por el 60% ser intervenidos. De acuerdo con (Anaya, Rodríguez Burítica, & Londoño, 2023) la teledetección en este corpus estima variables esenciales de biodiversidad; de ahí el análisis de los bosques secos en este territorio y su posible restauración mediante control a la deforestación y conflagraciones de las especies naturales.

Es así como la utilización de dos sensores sentinel 1 y 2 ofrece datos de reflectividad a 10, 20 y 60 mts de resolución espacial y datos de retrodispersión espacial en resoluciones VV y VH y se propone aplicar en diferentes regiones del espectro electromagnético. Con esta tecnología se pretende mejorar las condiciones de los procesos y prescindir de los desplazamientos, la facilidad en el manejo de la información, además el objeto de estudio equivale a 12 municipios de la Costa Norte de Colombia, bajo en precipitaciones, cuerpos de agua, con grandes llanuras y pastizales; por último, En Sentinel-2, de las 13 bandas, 4 tienen resolución espacial de 10 m. Con el fin de mantener este tamaño de píxel, las bandas de 20 y 60 m se re muestrearon a 10 m. Se generaron mosaicos y compuestos temporales de Sentinel-2 para controlar la calidad de los píxeles en áreas geográficas con alta presencia de nubes y cirros. De esta manera la información adquirida se torna en un rango de precisión del 62% al 83% en los cinco modelos de coberturas vegetales en las diferentes y para tener en cuenta En zonas costeras se observa vegetación con gran tolerancia a la humedad, tanto a lo largo de ríos y ciénagas como a lo largo de la costa; para tener en cuenta la vegetación arbustiva de la Guajira está en proceso de degradación. En el caso de la investigación en El PNNN Villamaría, se perfila un ecosistema paramuno y su presencia de bosques, ganadería, suelo desnudo y vegetación endémica su diferencial se observa en la nubosidad perpetua y lluvias permanentes.

Entre tanto la necesidad de realizar estudios sobre Generación de Información Temática de la Reserva Natural de Mar Chiquita través de Geomática, y su análisis de la información geográfica, según (Cuello, Ortone Lois, Antes, & Plato, 2023.p.2) se propone desarrollar de forma conjunta políticas activas en materia de conservación de la biodiversidad y el patrimonio arqueológico del país. Este acuerdo permitió declarar áreas que poseen interés conservacionista, como Espacio de Interés para la Conservación de la Biodiversidad (ENIC) y transformarlas en Reserva Natural de la Defensa y focalizándose en 9 reservas del sistema de área de protección; dentro de sus 36 reservas, y su interés en investigar su biodiversidad.

En materia de información geográfica, la teledetección requiere sensores instalados en plataformas espaciales; en cuanto a esta Reserva Natural se extiende sobre 1.753 hectáreas linderas a la boca de la albufera Mar Chiquita, sobre la costa atlántica de Buenos Aires, que, desde 1996, forma parte de la Reserva de la Biosfera Parque Atlántico Mar Chiquito, del programa Intergubernamental e Internacional MAB de la UNESCO; dentro del estudio metodológico se emplearon imágenes ópticas correspondientes al Satélite Sentinel 2 A/MSI (Multi Spectral Instrument) e imágenes radar correspondientes al Sentinel 1B/ SAR, su polarización doble VH y VV y banda de frecuencia sin que haya interferencia y mejore la energía de transmisión del sensor; su índice en estas zonas boscosas y su dosel. mejorando la retrodispersión y su ángulo de incidencia. Los resultados obtenidos corresponden a Sentinel 1B/ SAR (Synthetic Aperture Radar). Se realiza una clasificación supervisada mediante el algoritmo de Random Forest a la imagen óptica, se logró mejor precisión en la clasificación y utilizando las bandas de la imagen con clases de pastizal salobre y forestal y en el caso de poder adquirir imágenes satelitales gratuitas, ópticas y de radar, correspondientes al Programa Copérnico, gestionado por La Comisión Europea, observación y

monitorización de la Tierra, que analiza el planeta y su medio ambiente en beneficio de los ciudadanos europeos. Con este proyecto de zonas de protección y conservación declaradas, e interés para estudios científicos, extrayendo mensajes de colaboración para las comunidades; en materia geo referenciar para monitorear la biodiversidad y todo ese insumo ambiental.

Según los sensores remotos consideran Vasquez-Dolande et al (2021) En este caso Punta del Este, Pelotas y Oriental del Plata, las cuales presentan posibilidades de contener acumulaciones de hidrocarburos. Entonces la utilización de la teledetección para la identificación de manchas de crudo u *oil seeps* en áreas marinas. Se evalúan las distintas técnicas de percepción remota para la detección de *oil seeps*. Mediante una revisión del estado del arte, se establece que los sensores activos satelitales de radar de apertura sintética (SAR), presentan mejor desempeño en la detección de crudo que los pasivos. Cuya metodología empleada comprende el preprocesamiento y procesamiento de las imágenes SAR junto a la implementación de un algoritmo de detección de crudo que ha sido ampliamente probado y de fácil implementación. En cuanto a los sensores remotos, su disposición de tiempo para estudios minuciosos en la detección de las coberturas en páramos y el uso del radar de apertura sintética, con un procesador mediante algoritmos que capturan y procesan la información, serán una gran ayuda para el desenlace en investigaciones con diferentes enfoques y así realizar análisis que contribuyen a resultados del fenómeno a recabar.

Para la discriminación de trigo y cebada empleando imágenes satelitales ópticas y radar. Estudio de caso: partido de Coronel Rosales (Argentina) y Según Fabian Marini (2021) Con este estudio, realizado en La República Argentina, el sector agropecuario es considerado uno de los principales recursos económicos, tanto como generador de divisas como abastecedor de su mercado interno. Para Marini (2021) este trabajo consiste en discriminar dos cultivos de invierno de ciclos fenológicos similares como el trigo y la cebada en el partido de Coronel Rosales mediante el uso de datos SAR, de imágenes ópticas y de la combinación

de ambos tipos de datos; también se emplea como metodología las imágenes SAR Sentinel-1^a, que fueron pre procesadas con el software SNAP 6.0, lo que incluyó la creación de una imagen multilook (*Multilooking*), filtrado de ruido speckle, geo codificación y calibración radiométrica. El filtro utilizado fue el Lee, que fue aplicado mediante una ventana de 3 x 3 píxeles para reducir el ruido speckle.

Como se observa, los valores de NDVI para trigo y cebada se incrementan paulatinamente desde julio a octubre, en donde se observan los valores más elevados (0.74 y 0.69, respectivamente) en correspondencia con su mayor grado de crecimiento. Luego dichos valores disminuyen paulatinamente hasta alcanzar sus mínimos (0.20 y 0.23, respectivamente) durante el período de cosecha y la clasificación empleando solo imágenes ópticas (ID 4) aplicando el NDVI arrojó mejores resultados que las imágenes SAR solas, a pesar de que el trigo y la cebada poseen ciclos fenológicos similares. De los tres algoritmos de clasificación empleados, RF obtuvo los mejores resultados para la discriminación de trigo y cebada. Con respecto de las imágenes de radar Sentinel-1A SLC y Sentinel-2 y su relación hacia medidas de congruencias en valores de textura e intensidad en la retrodispersión en el ciclo fenológico y su desarrollo de la planta, dependiendo de factores climáticos y ontogénicos.

En otro estudio realizado en diferentes regiones de Asia, Australia, América y otros, el uso de sensores remotos en la agricultura y su aplicación en el cultivo del banano, siendo la base de la economía, enfrenta importantes retos en cuanto al incremento de la productividad, el manejo eficiente de los recursos naturales y al combate de plagas y enfermedades; Guzmán Álvarez et al (2021) realizaron una revisión general sobre las aplicaciones del uso de sensores remotos para el cultivo del banano en tres aspectos específicos: determinación del área de cultivo, estimación de su productividad y en el diagnóstico de enfermedades. Dentro de la metodología en Costa Rica se hace una clasificación supervisada, Australia, realizaron la delimitación de fincas bananeras por medio de una imagen satélite SPOT-5 con una precisión

de un 73 % y después de una edición visual esta precisión pudo aumentar hasta un 94 %, debido a una mayor resolución y su observación del suelo, teniendo en cuenta el tipo de su tiempo que toma la fotografía y su clima, depende de fenómenos meteorológico.

También En China, con los datos ENVISAT-ASAR (HH/VV) y el análisis de componentes principales, se clasificaron áreas de banano con una precisión de un 83,5 % (Wang et al., 2009). Pero con datos polarímetros de RADARSAT-2, obtuvieron precisiones de un 67,5 a 95,3 %, mediante el uso de un nuevo método de clasificación que se basa en la integración de la descomposición polarimétrica (PolSAR), interferometría (InSAR), análisis de imágenes orientado a objetos y algoritmos de árbol de decisión. Para la identificación de enfermedades Sigatoka amarilla y mal de Panamá, el uso de imágenes SAR para la detección de enfermedades es factible debido a la alta intensidad del brillo del cultivo de banano en las imágenes, lo que tiende a decrecer cuando aumentan los valores del promedio ponderado de infección. Los índices de vegetación relacionados con la clorofila y el NDVI mostraron una mejor diferenciación entre las plantas infectadas sanas y con diferentes niveles de infestación.

Dentro de los resultados, mirando la efectividad, las investigaciones en sensores remotos en esta enfermedad se han enfocado en la identificación de áreas afectadas por Foc R4T por medio de imágenes multispectrales desde un VANT, con base en la clasificación supervisada mediante los algoritmos de Random Forest, Support Vector Machine y Artificial Neural Networks. Con estas herramientas se lograron precisiones entre el 90,0 y 91,4 % a una altura de vuelo de 120 m y una resolución espacial/tamaño de píxel de 8 cm. Se concluye en materia agrícola la aplicación de sensores remotos para identificar la cantidad de áreas, productividad y enfermedades es algo inédito por el valor en costos y mejoramiento en rendimiento del cultivo de banano en las diferentes zonas de estudio del mundo, especialmente en estos cultivos siendo limitada la información, por la retrodispersión, dieléctrica y sus características en la amplitud de las hojas.

También Persaud et al (2021) realiza en Guyana, caracterizado por ser uno de los lugares del mundo que tiene un promedio de más de 80% de cobertura de nubes anualmente y se emplean imágenes de radar y ópticas; entonces para construir las imágenes ópticas lanzad-7 tomadas por sensor ETM y Lantat 8 y programa Sentinel-1 con imágenes SAR de la banda C; además se requirieron software Nest, Quantum Gis y base de datos multiusuarios Postgres. En el tema de cambios de superficie, se comienza con la recolección de datos con imágenes de radar y ópticas; en el caso de radar, sus coberturas vectoriales resultantes de los mapas temáticos confeccionados fueron introducidas a un SIG para su correspondiente análisis espacial y temporal, cuyos resultados se analizaron estadísticamente a partir de los cambios detectados en la cobertura y uso de la tierra en el área de estudio. El cambio de uso del suelo fue cuantificado y expresado en gráficos de líneas. En el caso de imágenes ópticas no fueron efectivas por su mayor índice de nubosidad en el tiempo de su captura datos de la superficie terrestre. Con respecto a la utilización de las imágenes de satélite del RADAR Sentinel-1 se demostró que la información obtenida después de darle el tratamiento adecuado a las imágenes es más precisa, confiable y completa que la del sistema de monitoreo que se estaba aplicando hasta el momento en el país con imágenes ópticas, en el seguimiento de la deforestación en el área de estudio.

La elaboración de mapas de uso y cobertura con sistemas de radar Terrasar x, y su énfasis en zonas rurales en El Municipio de Arbeláez (Cundinamarca). Se establece que la evaluación de una imagen del sistema radar Terrasar X para la actualización o realización de mapas de uso y cobertura del suelo en zonas rurales, utilizando los niveles de clasificación definidos por el proyecto de ocupación de tierras Corine Land Cover para Colombia, siendo el mayor aporte de la imagen el grado de resolución espacial que permite distinguir elementos a un mejor nivel de detalle.

Según Cortés Herrera (2016) va a identificar la necesidad de realizar una propuesta metodológica de clasificación en zona rural del Municipio de Arbeláez/ Cundinamarca.

En cuanto al estudio metodológico se tuvo en cuenta las imágenes de diez veredas y sus cultivos e involucrando los transitorios, además el clima y uso del suelo. Se involucra los diferentes sistemas de radar, destacando los SAR (radar de apertura sintética), sus tipos de reflexión y efectos generados por el relieve, contacto y energía. Por lo tanto, se tiene en cuenta metadatos de la imagen de terrasar X y dando referencias de LandSat TM, ERS 1 y de las fotografías aéreas y en otro lado su método en el tono y la textura de la imagen monocromática inicial.

Dentro de los resultados de la investigación en lo competente con el radar, se realizó una propuesta metodológica de acuerdo con el desarrollo del proyecto, la cual se puede utilizar en imágenes de Radar con propiedades similares a las aportadas por el sensor Terrasar X y como soporte de imágenes ópticas, por lo tanto, esta propuesta no es exclusivamente para un tipo de imágenes y puede variar dependiendo de las características propias de cada una de ellas.

Para el proyecto de investigación en desarrollo, se identificó el procedimiento de la incursión del sensor Terra SAR-X (satélite de observación de la tierra) en observar el objeto de estudio, Municipio de Arbelaez- Cundinamarca y sus diez veredas, siendo este un referente. Este procedimiento involucra desde la toma de la imagen, la franja, polarización alternada, la onda y el monitoreo global en este caso 7500 hectáreas. Con este aprendizaje, se entendería la complementariedad entre imágenes de radar y ópticas, que, para este proyecto de investigación, destaca que no es exclusiva para un tipo de imágenes y puede variar dependiendo de las características propias de cada una de ellas. Esto implica que se puede utilizar tanto para imágenes de radar como para imágenes ópticas, lo que permitiría complementar el análisis de las imágenes de radar Sentinel-1B con imágenes ópticas.

En la determinación de clasificar coberturas obtenidas con imágenes satelitales de radar, ópticas y su sinergia en el periodo 2015 – 2020 e implementación de un modelo de predicción de la pérdida de bosque al año 2030 en seis municipios de la amazonia colombiana. Se observa una preocupación en el mundo por la expansión agrícola la principal causa de deforestación, Caita Castañeda (2016) propone realizar un cambio en la manera de producir y consumir alimentos buscando soluciones equilibradas, teniendo en cuenta que Colombia es el segundo país con mayor número de especies arbóreas y el décimo en especies arbóreas endémicas visto en la Región del Caquetá, Guaviare y Meta. Se tiene por objetivo Implementación de la metodología de clasificación supervisada con el objetivo de determinar la pérdida de cobertura vegetal de bosque durante el periodo 2015-2020. Determinando el sensor con el cual se obtienen mejores resultados, ya sea sensor óptico OLI de Landsat 8, sensor de radar Sentinel-1 o la sinergia óptico-radar para esta aplicación, usando clasificación supervisada y evaluando mediante el estadístico Kappa.

En la provincia de Apacheta Perú, Región de Andes, con una altura entre los 3000 mts y 5000 mts de altura; La cobertura del suelo es diversa existiendo zonas de deshielo, poblaciones vegetales, minería, pajonales, roquedales con diversos relieves y humedales. Esta investigación tiene por objetivo realizar estimaciones de los parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta; es un trabajo que propende por identificar y analizar número de área existente. En este proceso investigativo las imágenes de radar Sentinel-1 contienen datos asociados a las variables de estudio y los formatos para registrar la data producida. Con el acompañamiento de software SNAP y Sentinels 1B se analizan las imágenes, y clasificando uso del suelo entre los que se encuentra: ríos, áreas planas, cultivos, las diferentes zonas urbanas existentes. Es así como estas 9 variables identificadas Los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 ayudan en gran medida

la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta y además Los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 ayudan en gran medida la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta.

El suelo es uno de los componentes ambientales por su servicio ecosistémico según Burbano Orjuela (2016)

El suelo es un recurso natural finito y no renovable que presta diversos servicios ecosistémicos o ambientales, entre ellos y a manera de ejemplo, el relacionado con su participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, etc., que continuamente y por efecto de la energía disponible, pasan de los sistemas vivos a los componentes no vivos del planeta (p.174)

En este sentido el suelo regulador del clima, protector de fuentes hídricas, capa agrícola entre otras; según Cordoba Peraza (2023) dentro de las bondades el suelo, en actividades pecuarias, los pastizales propician forraje y pastoreo para alimento de los animales. En este documento “análisis de cambios en la cobertura de pastos de La Región Brunca de Costa Rica utilizando imágenes sentinel-1” su objetivo donde se analiza los cambios en la cobertura de pastos de la región Brunca de Costa Rica utilizando imágenes Sentinel-1 para el año 2019. Es una realidad de como el suelo agrícola sufre cambios frecuentemente por las comunidades que ejercen actividad agropecuaria; para ello los datos de imágenes GRD captado por sensor Sentinel-1 para que se determine los cambios en estas coberturas. De esa manera se La humedad del suelo y las propiedades dieléctricas de los objetos en la superficie influyen en la respuesta del radar y la retrodispersión del suelo es compleja por la retrodispersión y las imágenes en RGB en pastos se notan lisas y poco rugosas.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General.

Analizar multitemporalmente la cobertura del suelo dentro del páramo del Parque Nacional Natural de los Nevados mediante imágenes de Radar Sentinel-1B; entre los periodos 2016, 2019 y 2021, en un sector de la jurisdicción del Municipio de Villamaría- Caldas.

3.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar el suelo de la zona de estudio como (vegetación nativa, bosques de enanos, pastoreo y suelo desnudo) apoyado mediante imágenes ópticas Sentinel-2A.
- Aplicar el método de clasificación supervisada K-Nearest Neighbors Classifier a las imágenes de radar SAR- Sentinel-1B periodo 2016, 2019 y 2021 mediante software SNAP, teniendo en cuenta las coberturas identificadas en el área de estudio.
- Realizar una comparación multitemporal de los resultados obtenidos de la clasificación supervisada de las imágenes de radar Sentinel-1B para los años 2016, 2019 y 2021, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la correlación entre las clases de la clasificación en la identificación de cambios en la cobertura del suelo.

4. Referente Contextual.

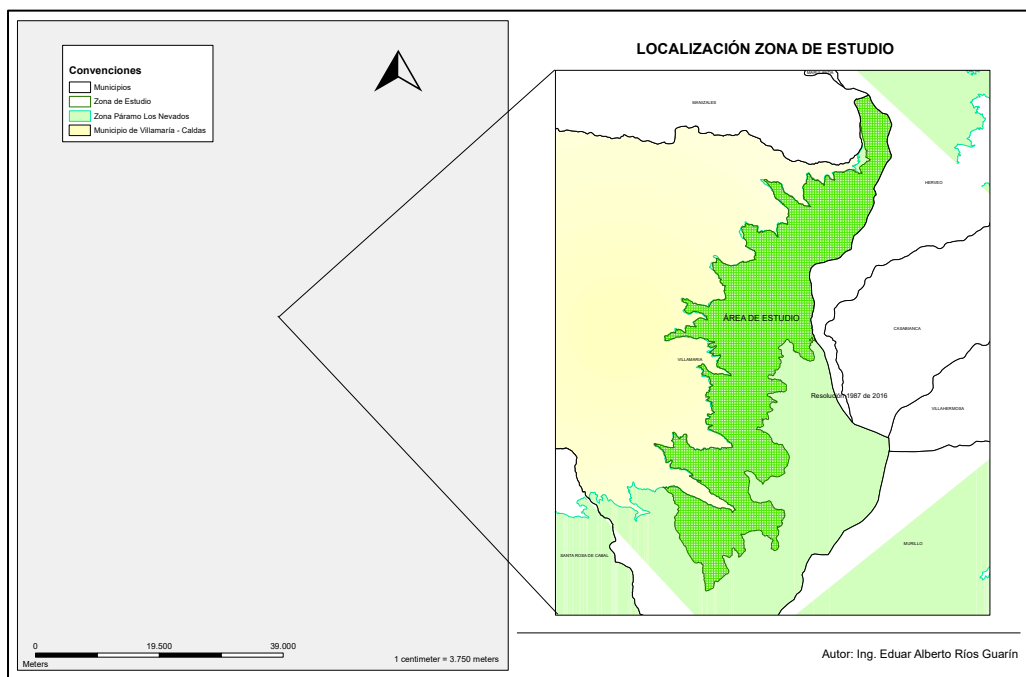
En Colombia como se ha mencionado, existen un sin número de páramos, dispensadores de agua para Díaz- Granados Ortiz, Navarrete Gonzales, & Suarez López (2015)

En los páramos colombianos, la humedad se manifiesta por el rocío, la constante neblina y las lloviznas frecuentes: características de las altas montañas tropicales de clima húmedo, razones de sus neblinas y precipitaciones que hacen un ecosistema importante montañas a bajo, para comunidades receptoras del preciado líquido (p.65)

En la Figura (1) muestra la localización del PNN y la zona de estudio.

Figura 1

Mapa Localización Parque Nacional Natural Los Nevados y Zona de Estudio



Nota: mapas PNNN año 2023

Fuente: Elaboración Propia

El Nevado del Ruiz, ubicado en La Cordillera Central de Colombia, en el eje central de la Cordillera Central alrededor del Volcán Nevado del Ruiz (VNR), con un área de 350 km² comprendida en los Departamentos de Tolima, Caldas y Risaralda, este entorno natural, con características geomorfológicas afirma Rayo Roca & Zuluaga (2011)

El basamento del VNR consiste en rocas metamórficas de edad Paleozoica correspondientes al Complejo Cajamarca (esquistos cuarzo grafitosos y esquistos verdes) y rocas plutónicas de edad Paleocena, de composición tonalítica a granodiorítica con esta descripción geomorfológica, se conoce su edad, tipo de rocas que han contribuido a la formación de este, principalmente con rocas magmáticas y metamórficas (p.62)

De acuerdo con la Resolución 1987 del 30 de noviembre de 2016, fue delimitado a escala 1:25000. La Zona de Estudio se encuentra ubicado en el Páramo Nevado del Ruiz, jurisdicción Villamaría- Caldas con un área de 8.044,86 ha. de biodiversidad y servicios ecosistémicos. Según el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Von Humboldt (2016) “Villamaría es el primer municipio a nivel departamental en número de hectáreas de ecosistemas estratégicos y representa casi el 50% del total de hectáreas en Caldas” (p. 2).

El territorio a estudiar en el Municipio de Villamaría (Caldas) hace parte del 6.05 % del Parque Nacional Natural de los Nevados; es una zona de protección y función amortiguadora; pero la intervención humana como: ganadería, cultivos de papa, turismo ha provocado el peligro en esta zona y generado afectaciones en la flora del páramo en las asteráceas o frailejones, orquidáceas y las poaceas o gramíneas; y además pastizales entre otros.

Dentro de las especificaciones del estudio de este ecosistema, se profundiza en técnica de teledetección de “datos sobre la superficie terrestre (teledetección) a través del uso de sensores remotos, posibilita identificar cambios espectrales en las coberturas vegetales, al comparar imágenes satelitales registradas en diferentes periodos de tiempo” (Anzoategui, et

al., 2023, p.170) se requieren datos para dilucidar el fenómeno de la cobertura del Páramo del Ruiz y sus efectos se consideran necesarios para dar un entendimiento a estudios en materia de teledetección, mediante sensores ópticos oh de radar, con logairtmos y mapeo de estas áreas del objeto de estudio.

En cuanto al radar se utiliza “el movimiento de la antena del radar sobre una región objetivo para proporcionar una resolución espacial más fina que los radares de exploración de haz estacionarios convencionales” (The Nature Conservancy, 2024, s.p.) con esta ondas electromagnéticas y un sensor Sentinel 1 se van a medir áreas y se determina la pérdida o no perdida de estas coberturas (suelo desnudo, pastos, vegetación nativa y bosques enanos) además mediante la polarización VV Y VH, En la temática de los datos ráster, mediante imágenes de radar de los años 2016, 2019 y 2021 que proporcionan e identifican estas coberturas.

5. Referente Normativo y Legal.

La finalidad de la política es convencer con normas y leyes al ciudadano de la importancia de actuar en pro de una carta magna que ha sido preparada y modificada en ciertos casos para mejorar la convivencia. Es así como La Constitución Política del 91 fue creada para velar por un estado social de derecho; desde este punto de vista nace la política de respeto al cuidado del entorno ambiental.

La Ley 79 de 1986 declaró área de reserva forestal protectora para la conservación y preservación de las aguas "Todos los bosques y la vegetación natural, existentes en el territorio nacional, que se encuentren sobre la cota de los tres mil (3.000) metros sobre el nivel del mar" (art. 1, literal c).

La Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones, ha establecido, en el Art. 1 los principios ambientales generales que deben guiar la gestión ambiental en el país. Entre ellos están:

4. Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial.

6. La formulación de las políticas ambientales tendrá en cuenta el resultado del proceso de investigación científica. No obstante, las autoridades ambientales y los particulares darán aplicación al principio de precaución conforme al cual, cuando exista peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces para impedir la degradación del medio ambiente."

El Art. 16 de la Ley 373 de 1997, modificado por el Art. 89 de la Ley 812 de 2003, establece que:

“...las zonas de páramo, bosques de niebla y áreas de influencia de nacimientos acuíferos y de estrellas fluviales, deberán ser adquiridos o protegidos con carácter prioritario por las autoridades ambientales, entidades territoriales y entidades administrativas de la jurisdicción correspondiente...”.

El Art. 34 de la Ley 685 de 2001 – Código de Minas, Establece las Zonas Excluibles de la Minería de la siguiente manera:

“No podrán ejecutarse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en zonas declaradas y delimitadas conforme a la normatividad vigente como de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente y que, de acuerdo con las disposiciones legales sobre la materia, expresamente excluyan dichos trabajos y obras.

Las zonas de exclusión mencionadas serán las que se constituyan conforme a las disposiciones vigentes, como áreas que integran el sistema de parques nacionales naturales, parques naturales de carácter regional y zonas de reserva forestales. Estas zonas para producir estos efectos deberán ser delimitadas geográficamente por la autoridad ambiental con base en estudios técnicos, sociales y ambientales con la colaboración de la autoridad minera, en aquellas áreas de interés minero.

Para que puedan excluirse o restringirse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en las zonas de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente, el acto que las declare deberá estar expresamente motivado en estudios que determinen la incompatibilidad o restricción en relación con las actividades mineras.

No obstante, la autoridad minera previo acto administrativo fundamentado de la autoridad ambiental que decrete la sustracción del área requerida, podrá autorizar que, en las zonas mencionadas en el presente artículo, con excepción de los parques, puedan adelantarse

actividades mineras en forma restringida o sólo por determinados métodos y sistemas de extracción que no afecten los objetivos de la zona de exclusión. Para tal efecto, el interesado en el Contrato de Concesión deberá presentar los estudios que demuestren la compatibilidad de las actividades mineras con tales objetivos.

El Plan de Desarrollo 2010–2014 (Ley 1450 de 2011), Art. 202, define que:

Los páramos deben ser delimitados a escala 1:25.000 con base en estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales, los cuales deben ser realizados por las autoridades ambientales”.

El Decreto-Ley 3570 de 2011, por el cual se modifican los objetivos y estructura del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, define en el Art. 2 las funciones de dicho ministerio entre ellas.

Para la conservación de estas áreas de protección se encuentra una política pública, con fines de ejercer control, propender por asegurar los componentes ambientales para las futuras generaciones. En esa política se atenúa el desarrollo sostenible mediante acciones que dan claridad un derecho adquirido a la vida de todos los habitantes sin afectar la economía de un país.

6. Referente Teórico.

6.1 La Investigación Ambiental.

Desde las ciencias sociales se puede afirmar con respecto a la investigación según (Puga, 2009)

Vale la pena, en todo caso, señalar que al hablar de ciencias sociales nos referimos a un conjunto de disciplinas que, a partir del interés explícito por diferentes aspectos de la vida colectiva, han formulado teorías generales y planteamientos analíticos estas disciplinas apuntan a esclarecer fenómenos sociales y ambientales, mediante aportes a la ciencia que se ha traducido en teorías, ligadas a investigaciones explicativas, con enunciados interrelacionados describiendo estos fenómenos de estudio (p.131)

Dentro de esta investigación, se aplicará diferentes métodos conducentes a fortalecer el aprendizaje, focalizados en las ciencias ideográficas (fenómenos particulares) y nomotéticas (enuncia leyes universales); conceptos dialécticos que incurren en constructos científicos, transformadores a develar esos fenómenos atípicos en la dinámica natural y social. Entonces el proyecto es un insumo investigativo adaptado a las condiciones del páramo del Parque Nacional Natural de los Nevados, a una altura entre los 3500 mts de altura hasta 4100 mts de altura.

Además, se va a identificar los diferentes hechos entre las mismas variables que han afectado de cierta manera la capa vegetativa dentro del PNNN en un sector del Municipio de Villamaría - Caldas, es por eso realizar un marco teórico sobre esta zona, referenciado con investigaciones que van a aportar a este corpus de estudio.

6.2 Ecosistema de Páramo.

Según García Bustamante & Leal Spear, (2018) La Resolución 769 de 2002:

Dentro de los ecosistemas de alta montaña, ubicado entre el límite superior del bosque andino y, si se da el caso, con el límite inferior de los glaciares o nieves perpetuas, en el cual domina una vegetación herbácea y de pajonales, frecuentemente frailejones y puede haber formaciones de bosques bajos y arbustivos y presentar humedales como los ríos, quebradas, arroyos, turberas, pantanos, lagos y lagunas (p. 2)

Una de las razones de la importancia de conservar áreas de ecosistemas paramunos, por su diversidad biológica, ecológico, genético entre otros. Por eso los ecosistemas de alta montaña son despensas de alto valor investigativo, debido a la construcción de conocimientos que alberga en su contexto cultural y biodiverso, de lo contrario no podría ser custodiada por las diferentes entidades como parques nacionales para la conservación natural y el desarrollo sostenible.

Por consiguiente, Ibáñez, (2011)

Se estima que en los páramos de Colombia hay más de 3400 especies de plantas vasculares, el 21 % (733) de estas son endémicas 10-12. Se distribuyen en 36 complejos de páramos en las 3 cordilleras y algunas plantas se han reportado únicamente en una localidad reconocida. Gramíneas, arbustos, hierbas y rosetas gigantes del grupo de los frailejones (p.3)

Para ello se considera que el Parque Nacional Natural los Nevados según visita realizada, se observa que la flora está constituida por vegetales perennes, plantas herbáceas, arbustos y árboles enanos, musgos, líquenes y ciertos pastos. Estos embellecen este entorno natural siendo un eje articulador ecológico con otros ecosistemas cordilleranos. De ahí el

páramo del Nevado del Ruiz (jurisdicción Villamaría) se destaca por su colorido endémico de la zona con una diversidad en su flora y su fauna.

6.2.1 La vegetación Nativa.

En cuanto a la vegetación nativa, según Vargas, (2017)

el páramo es un ecosistema caracterizado por diversas asociaciones vegetales, de las cuales las más conspicuas son: frailejonales, pajonales, Chuscales y bosques enanos o achaparrados en el caso de las diferentes plantas propias de estas zonas. Estas plantas pertenecientes a los géneros *Plantago*, *Paepalanthus* y *Sphagnum* forman almohadillas y rosetas en el suelo, contribuyen a la formación de turberas. estas especies nativas, han dado ese remanente a estas turbas de agua dulce apropiadas para permitir la conservación de los páramos (p. 4)

También se encuentran especies nativas de páramo, según Fiallos, Herrera, et al., (2015)

Los pastizales de Páramo húmedo de esta reserva, entre 3000 y 4500 m sobre el nivel del mar, se encuentran extensiones del género *Espeletia*, cuyos miembros se conocen comúnmente como frailejón y pastizales, que constituyen lugares de pastoreo extensivo, principalmente de ganado; por su puesto la función de pastizales y frailejones han sido un factor preponderante al servicio del ecosistema y estos pastizales son indispensable para la conservación del entorno (p. 401)

En relación con, Yaranga, Custodio, & Chanamé, (2018) “ecosistemas de pastizal de páramo y puna son los más extendidos en el mundo, y tienen gran importancia en la protección ambiental natural y el desarrollo socioeconómico de las poblaciones rurales” (p.23) Es por eso la necesidad de esta técnica de teledetección mediante clasificación supervisada de imágenes

de radar, adquiriendo datos de la superficie terrestre con un sensor activo, identificando la cobertura natural del piso térmico del páramo, entre los 3500 mts y 4100 mts del Páramo dentro del Parque Nacional Natural de los Nevados. En este sentido, se realizó un análisis multitemporal de la cobertura del suelo en los periodos 2016, 2019 y 2021.

6.2.2 Clasificación de la Vegetación Nativa.

En el Parque Nacional Natural de los Nevados en su riqueza natural y cultural se encuentra una variedad de flora como se visualiza en las siguientes Imágenes:

Figura 2

Árboles de Enanos



Nota: Foto tomada en agosto de 2021 - PNNN

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3

Frailejón Espeletia



Nota: Foto tomada en agosto de 2021 - PNNN

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4

Paja Ratón



Nota: Foto tomada en agosto de 2021 - PNNN

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5

Planta Rígida - Cojín



Nota: Foto tomada en agosto de 2021 - PNNN

Fuente: Elaboración Propia

Así pues, es habitual encontrar los frailejones *Espeletia* en el páramo dentro del Parque Nacional Natural Los Nevados, Para Eraso Puentes & Amarillo Suarez (2016) “una de las fortalezas, es el poblamiento de los ambientes y climas extremos, debido a su diversidad de arquitecturas, patrones de crecimiento y estrategias reproductivas, lo que les permite configurar una gran diversidad de interacciones ecológicas y formaciones vegetales” (p.23)

Los Frailejones son una de las especies paramunas representativas en el mundo por su presencia en ecosistemas, con bosques de clima frío y suelos volcánicos; además existen gran variedad de ellos y definen en gran parte el aspecto de los páramos colombianos según Eraso Puentes & Amarillo Suarez (2016)

presentan 42 especies endémicas para el país, se estima que en los ecosistemas paramunos se encuentra el 8% de los endemismos de la flora colombiana, siendo

captadoras de agua, reguladora hídrica entre otras y beneficiando a los habitantes del norte del Tolima, Caldas, Risaralda y Quindío (p.40)

En cuanto a las plantas rígida- cojín, viven en ambientes de alta montaña, Badano et al (2002)

crecen en ambientes de alta montaña modifican micro climáticamente su entorno, generando micro- hábitats favorables para el establecimiento de otras especies, actuando como nodrizas, para ello es de gran interés en la comunidad científica, plantas de entornos biofísicos y debido a su desarrollo y evolución. (p.757). Con respecto al número de especies según estudios hechos por Badano, et al. (2002)

A nivel mundialmente existen 1.439 especies de plantas en cojín, 487 se encuentran en Asia, seguida de América del Sur con 349 especies, Europa con 188, Australasia con 136, Asia Tropical con 122, África alberga 56 especies y la Antártica 14. En América del Norte se reportan 87. (p.758)

Por cierto, estas plantas multidiversas e intercontinentales aptas para el ser humano hacia sus necesidades básicas, son un buen espectro paisajístico, adornando las esferas de las tierras paramunas.

En el caso de otras plantas existentes en este macro-sistema páramo del Ruiz entre 3100 mts y 4100 mts, se encuentra otro arbusto en esa factoría de agua, Salamanca Grosso Reyes Méndez (2017)

El Encenillo (*Weinmannia tomentosa* Don), es una especie arbórea endémica, asociada a bosques de cliserie en los entornos de páramo y subpáramo de Colombia y Venezuela, que crece entre los 2600 a los 3700 msnm. Su inflorescencia dispuesta en espigas, de tonalidad cremosas a blanca son fuente de néctar, polen y materiales resinosos que *Apis mellifera*, colectan y benefician para las necesidades de la cría y la protección de la colonia (p.855)

Entre tanto, el encenillo es una planta exótica, transportadora de polen a sus colmenas por abejas obreras hasta producir la miel y reivindicar el apoyo a seguridad alimentaria del mundo, especialmente en el área de estudio (Parque Nacional Natural Los Nevados - Sector Villamaría- Caldas). La especie *Weinmannia Tomentosa*, es un árbol que puede citando a Montes Pulida (2011)

alcanzar 25 m de altura y 70 cm de diámetro en su tronco; corteza de color gris; copa en forma de parasol, semidensa y de color verde oscuro a excepción del período donde aparecen frutos que se torna café rojizo y su morfología floral típica de esta región se provee una riqueza patrimonial como este palacio natural (p.845)

En el ecosistema se despierta en su territorio otras especies vegetativa Chite, Vira- Vira y Guarda Rocío cumplidora de funciones amortiguadoras y conservacionistas. Por eso la flora del PNN los Nevados apto para suelos orgánicos y soportadores de bajas temperaturas resistentes y su alta radiación solar en cierta temporada del año.

6.2.3 Deterioro de la Capa Vegetativa en Páramos.

Uno de los principales ecosistemas de alta montaña, son los páramos Ibañez (2011) “espacios de nieblas, lloviznas y arremolineantes nubes adheridas a las rocas y al viento. Lugares encubiertos, sombríos, ignotos, donde los horizontes se multiplican y la totalidad se hace patente” (p.45) Así mismo, las características propias de ecosistemas aportan beneficios a un componente ambiental, considerando el suelo un fenómeno natural con otros impactos sobre la biofísica climática y su componente meteorológico. Por lo tanto, el suelo de páramo ocupa un espacio de producción de plantaciones que conservan el recurso hídrico “Los factores de formación de suelos que se consideraron en este trabajo fueron: clima, vegetación, relieve y

material parental”, de acuerdo con el Soil Survey Division Staff (1993) citado por (Figuroa Jauregui, et al., 2018)

El Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 (PECC), lo explica Zamora Martínez (2015)

identifica siete áreas catalogadas como susceptibles a los impactos adversos del cambio climático como: “recursos hídricos; agro ecosistemas; ecosistemas naturales; infraestructuras de energía, industria y servicios; infraestructuras de transportes y comunicaciones; ordenamiento territorial y desarrollo urbano; y salud pública (dentro del contexto de ecosistemas naturales, se involucran los páramos; estos ecosistema de montaña, preparados para proveer recursos a una sociedad en su satisfacción de sus necesidades básicas como: agua, biodiversidad, alimento entre otros (p.7)

Además, estos ecosistemas naturales contienen la capa vegetativa; con respecto a las características del suelo según Llambi et al., (2012) “los páramos andinos son muy variables En su mayoría presentan una combinación de materia orgánica y ceniza volcánica, por lo cual los cambios en su composición se producen lentamente (p.13)” En general son, en gran parte, de origen glaciar y volcánico; con este material orgánico se forman suelos apropiados para la producción de plantas endémicas y nativas; este material de páramo entre las que se tiene: continua Lambi , et al., (2012)

Gramíneas, arbustos, hierbas y rosetas gigantes del grupo de los frailejones. La flora está constituida por vegetales perennes, plantas herbáceas, arbustos y árboles enanos, musgos, líquenes y ciertos pastos; con este material vegetativo se ha dado una respuesta positiva a la riqueza en este entorno, con su matiz y contraste con el paisaje (p.13)

También estas captadores de recurso hídrico y riqueza orgánica para Monje- Najera (2019) “están adaptadas a condiciones fisicoquímicas y climáticas específicas como la baja presión atmosférica, los altos niveles de rayos ultravioletas y la fuerte resequedad debido a la

constancia de los vientos (p.41)” todos estos fenómenos biofísicos y químicos han contribuido al génesis y fortalecimiento de esta flora endémica en el páramo; pero ha surgido causas del deterioro de la capa vegetativa, desfavoreciendo los patrones del desarrollo celular de estas plantas existente en esos ecosistemas.

Por consiguiente el deterioro de la capa vegetativa natural del páramo afirma Morales Betancur & Estevez Varón, (2006) “La deforestación, el ascenso del límite de la agricultura, el pastoreo y las quemas son los problemas más graves que enfrentan los ecosistemas de alta montaña en Colombia” (p.41) Entonces hechos visibles en estos paisajes paramunos, siendo un factor determinante en el deterioro de estas capas naturales; es necesario recalcar que los páramos vienen haciendo una labor fundamental para los seres humanos, razón encaminada a fortalecer en la conservación de estos. De esa manera las personas involucradas que habitan en ese sector, entidades y organizaciones público- privadas se deben fortalecer para que contribuyan al mejoramiento de esos territorios ecosistémicos.

Este proyecto de investigación, mediante técnicas de teledetección, permitió analizar la cobertura del suelo de los años 2016, 2019 y 2021. Siendo el análisis multitemporal identificando cambios en las coberturas del suelo, en un sector del Municipio de Villamaría dentro del Parque Nacional Natural Los Nevados, un referente para estudios de investigación sobre la prevención en la conservación de este ecosistema.

Una de las preocupaciones actuales en las esferas sociales, está influenciada por el cambio y variabilidad climática; en este contexto Feldmann & Biderman Furriela (2001)

Por eso el siglo XX fue testigo de extraordinarios cambios, tanto en la sociedad como en el medio ambiente. Uno de los fenómenos actuales más preocupantes es la alteración del sistema climático global debido a causas del mismo hombre en la lucha por el progreso y desarrollo social (p.288)

Dentro de estas alteraciones del sistema climático según informe (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático (2021) una reducción sustancial y sostenida de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases de efecto invernadero permitiría limitar el cambio climático

Aunque las mejoras en la calidad del aire serían rápidas, podrían pasar entre 20 y 30 años hasta que las temperaturas mundiales, se estabilizasen con este informe se constata la veracidad del aumento de la temperatura del planeta, mediante los gases efecto invernadero que han ido influyendo en los diferentes sectores económicos y sociales, demeritando la calidad de vida del ser humano.

Desde las actividades de la sociedad humana, sean estas industriales, agrícolas, vehiculares o de otra índole, han incidido, en la evolución del clima de zonas densamente pobladas, las cuales, ambientalmente, se conocen como, “Isla de Calor” Muchos de los gases emitidos por las actividades mencionadas, se llaman gases de invernadero y ellos están generando el Efecto Invernadero Inducido (GEII), el que influye en el cambio climático.

Entre tanto Mendoza de Armas & Jiménez Narváez, (2017) “La opinión pública y los gobernantes aumentaron su grado de percepción y preocupación respecto a este fenómeno principalmente debido a incidentes climáticos de relevancia tales como El Niño, inundaciones y otros desastres en distintas partes del mundo” (p.290) Estos fenómenos dejan innumerables repercusiones como pobreza y pérdida de vidas humanas; estos factores son efectos de malas decisiones en el uso del suelo programados por los planes de ordenamiento territorial y cuencas; siendo políticas que no son aplicadas por las diferentes administraciones

Es así como los fenómenos climáticos, las principales variables ambientales que estudia la hidroclimatología son la precipitación, la temperatura, la humedad del suelo, la evapotranspiración y la descarga fluvial, tanto líquida como de sedimentos y requerimientos en la caracterización de variables que enriquecen estos conceptos hidrológicos.

Finalmente las determinantes del sistema climatológico en Colombia dependen de La oscilación decadal del pacifico y Oscilación del Atlántico Norte, según Poveda (2004) “Colombia está situada en el trópico Americano como una isla entre tres océanos, si se piensa que además del Caribe y del Pacífico” (p. 15); por lo tanto Colombia recibe la influencia de la circulación atmosférica de la cuenca Amazónica; con esta información se identifica la procedencia hidroclimatología en la geografía colombiana, involucrando los dos océanos, y la amazonia con sus inmensos vientos recurrentes del Atlántico; ahora este fenómeno es necesario para evaluar el nivel de lluvias presentes en el sistema hidroclimatológicos en nuestro país.

6.3 Sistemas de información Geográfica.

En el campo de la espacialidad del ser humano, incide la geografía y esta se define como: Cartaya Ríos (2014) “una ciencia que estudia el espacio organizado por la sociedad, por lo tanto, una Ciencia Social. Los principales temas abordados fueron: la pobreza, la marginalidad, la discriminación racial, el subdesarrollo” (p.110) Para la ciencia, se aborda una sociedad mediante una cartografía clasificadora en diferentes segmentos, estipulados por disciplinas económicas, políticas y ambientales.

Entre estas ciencias sociales y física, surge un compendio llamado sistema información geográfica Burnstein (2002)

es una base de datos computarizadas que contiene información espacial, es decir, un conjunto organizado de hardware y software, información geográfica y personas que permiten reunir, introducir en una computadora, almacenar, transformar, superponer, manipular, analizar y cartografiar todas las formas de datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos (p.107)

En el caso de los sistemas de información geográfica, ayuda a explorar ese conocimiento tecnológico en los diferentes programas satelitales existentes, que conllevan al análisis y descripción de información en los temas competentes y pertinentes.

Para esta investigación, los sistemas de información geográfica han sido un baluarte en técnicas apropiadas hacia el desarrollo y progreso de las comunidades. Entonces un sistema de información geográfica en la dinámica ambiental favorece a todos los componentes socio ambientales (abiótico, biótico y socio económico) con repercusiones; cuya finalidad diversa, afirma Bocco (2000)

Todo problema medioambiental implica un efecto colateral negativa de la interacción sociedad-naturaleza. Esto es válido tanto en ambientes urbanos como rurales, y el escenario pueden ser continental, marino o costero recurriendo a la necesidad de análisis y comprensión de los hechos visible (p.45)

Además, los SIG permiten la captura, almacenamiento, edición y análisis de datos geográficos, con objeto de generar información válida para la toma de decisiones y se permite la recolección de datos que van hacer analizados para tomar decisiones, conducente a solucionar problemas; en este caso ambientales una de las preocupaciones en la sociedad actual.

De ahí la necesidad de propuestas identificadoras de problemas y soluciones, siendo la comunicación e información con hipótesis que se deben dilucidar para lograr resultados esperados. Por eso este proyecto de investigación “Análisis Multitemporal de las Coberturas del Suelo con Imágenes de Radar años 2016, 2019 y 2021 PNN Los Nevados. Villamaría Caldas - Colombia.” de ahí ese desarrollo en el margen del páramo ubicada entre los 3500 mts y 4100 mts, identificado como área de estudio del cual se constata cambios en la cobertura del suelo en los periodos 2016, 2019 y 2021.

6.4 Teledetección.

Este concepto de la teledetección se configura en la identificación de las ventajas y beneficios en el campo de acción ambiental, como un tópico geográfico espacial en el entorno de las áreas de protección paramuna y para este proyecto. Inicialmente la aplicación más prometedora de la teledetección, en la actualidad, es la ecología debido a los impactos ambientales por diferentes causas a investigar. según Sánchez Díaz (2018)

se relaciona con el campo de la biodiversidad, algunas de las principales amenazas para la biodiversidad son la fragmentación y pérdida del hábitat por la deforestación provocada por actividades humanas; lo que a su vez acelera los índices de extinción en las especies (p.244)

En este tema biodiverso se relaciona las diferentes especies existentes de flora, fauna y otros en el entorno natural, hacia el beneficio humano en sus necesidades primarias. A su vez las actividades humanas han sido una de las fuentes principales del deterioro ambiental en las zonas de conservación natural, para lo cual, estos hechos se debe involucrar técnicas puntuales para corroborar la identificación del deterioro ambiental en zonas de conservación.

La teledetección desempeña un papel fundamental al proporcionar datos a través de imágenes para el mapeo de la capa vegetativa en un área específica. También esta técnica utiliza imágenes de satélite multispectrales y permite identificar píxeles desconocidos mediante clasificación supervisada.

Además, la teledetección revelará las variaciones en la cobertura del suelo en la zona de páramo, ubicada entre los 3500 y 4100 metros de altura, utilizando imágenes de radar. Este análisis multitemporal de la cobertura del suelo, especialmente en lo que respecta a la capa de vegetación nativa, será un valioso punto de referencia para futuros trabajos investigativos en esta zona y en este ecosistema.

Para tener en cuenta, la información satelital se puede considerar una de las áreas de impacto tecnológico presentes en el desarrollo socio económico del ser humano. Entonces la expresión satélite en el ámbito de la ingeniería de telecomunicaciones y aeronáutica afirma Sacristan Romero (2006) “un satélite es un artefacto muy complicado y sumamente delicado, integrado por diferentes componentes: antenas, sistema de comunicaciones, potencia eléctrica, control de temperatura, posición y orientación, propulsión, seguimiento, telemetría, telemando y armazón o estructura satelital” (p.32) se aprecia que estos elementos tecnológicos en sus componentes funcionales, describen procesos en telecomunicaciones y redes que ameritan antenas preparadas para capturar la información, con datos confiables debidamente analizados; cuya cobertura global, acceso, alta velocidad y economía; siendo ventajas o beneficios ayudan a tener un servicio óptimo para las comunidades y sus diferentes proyectos de investigación.

Entonces las imágenes ópticas o de radar, consecuentes con la captura y procesamiento de imágenes en sensores activos y pasivos según Persaud & Milián Cabrera (2021) “La resolución (tamaño del cuadrado representado por un pixel), precisión posicional (la variación entre la posición de un objeto en la imagen y su posición verdadera) y tiempo de entrega revolucionaria, aumentando la variedad de posibles aplicaciones” (p.592) Cuyas imágenes son indispensables para el análisis de suelos que han ido perdiendo material vegetativo afectando la productividad en el campo agrícola; además repercutiendo en la economía.

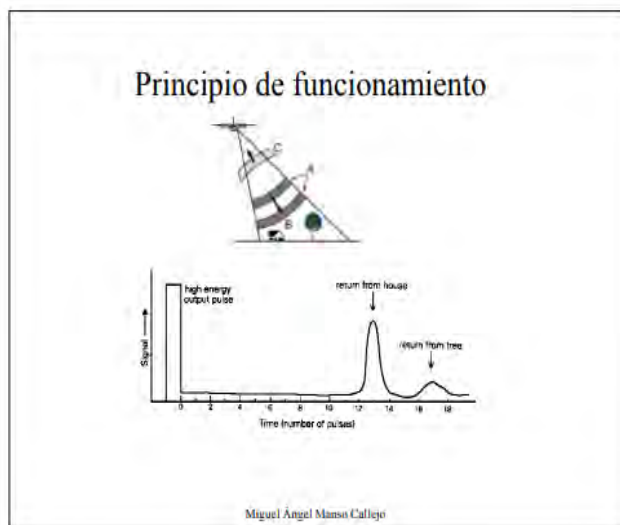
Los sistemas pasivos de sensores satelitales se basan en la captura de la luz solar reflejada por la superficie terrestre para generar información. La luz reflejada por diferentes elementos, como la vegetación, el agua o el asfalto, presenta características espectrales únicas que permiten identificarlos y clasificarlos.

Los datos recogidos por los sensores satelitales se almacenan en formato ráster, compuesto por píxeles que representan pequeñas áreas de la superficie terrestre. Cada píxel tiene un valor asociado que indica la intensidad de la luz reflejada en una banda espectral específica.

6.4.1. Procesamiento de Imágenes ópticas.

Figura 6

Procesamiento de imagen



Nota: procesamiento de imagen de Google

Fuente: Tesis Aplicación a La Cartografía y Topografía.

En la construcción de las imágenes ópticas o satelitales y de acuerdo con la Gráfica (10) para Delrieux, Ramoscelli, & Chiradia, (2001)

El procesamiento de imágenes implica la manipulación e interpretación de imágenes digitales con la ayuda de una computadora en el procesamiento de estas imágenes la

utilización de una computadora, aeroplano, satélites y con fotografías compuesta de bandas con espectros de luz visibles e infrarrojos (p.1)

Dentro de las bandas sus imágenes son escalas gris, rojo, verde o azul y con la ayuda de filtrado y realce de la imagen en estudio.

Ahora, en el procesamiento de imágenes ópticas para Jiménez Muñoz et al., (2011)

El procesamiento de imágenes digitales es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información dentro del procesamiento; este sensor mide radiación (energía) electromagnética (variable continua) (p. 2)

pero estos valores se almacenan en forma de Cuentas Digitales (variable discreta) y La imagen digital se forma mediante un sistema de conversión analógico digital en el sistema de conversión se hace con el fin de almacenar la información eficientemente, dependiendo de la cantidad requerida y para tener en cuenta las imágenes digitales se caracterizan por presentar su señal una onda cuadrada.

De esta manera se procesan imágenes satelitales para hacer aportes a investigaciones de fenómenos ambientales causantes de los principales problemas sociales y económicos en el mundo. En este caso conocer la variación de la cobertura del suelo en el PNN de los Nevados Sector de Villamaría Caldas, mediante la aplicación de técnica de teledetección con imágenes ópticas y de radar, permite realizar un monitoreo continuo y sistemático de la cobertura del suelo en el área de estudio. Esto brinda la posibilidad de detectar cambios y variaciones en la vegetación, identificar áreas afectadas por deforestación o degradación, y realizar un seguimiento a largo plazo de los cambios en el paisaje. Al conocer la variación de la cobertura del suelo, es posible evaluar el impacto de actividades humanas, como la deforestación, la construcción de caminos o carreteras, ganadería extensiva, en el ecosistema del Parque

Nacional Natural de los Nevados. Esto proporciona información valiosa para la toma de decisiones en la gestión y conservación del área protegida.

Acerca de la información obtenida a través de la teledetección permite una mejor planificación y manejo del territorio en el Parque Nacional Natural de los Nevados y conocer la variación de la cobertura del suelo ayuda a identificar áreas prioritarias para la conservación, establecer estrategias de restauración de ecosistemas degradados y optimizar el uso de los recursos naturales.

6.4.2 Imágenes Multiespectrales.

Las imágenes multiespectrales juegan un papel destacado en la teledetección citado por Kharuf Gutiérrez et al., (2018)

La teledetección es definida como la medición o adquisición de información de un objeto o fenómeno por medio de un equipo que no está en contacto con dicho objeto, siendo las imágenes multiespectrales tomadas por aviones tripulados o por los satélites las más utilizada (p. 92)

En este sistema, las imágenes multiespectrales integran información alfanumérica, que contempla la intensidad de la energía electromagnética, identificando los elementos pertinentes en el objeto de estudio; en este caso, estas imágenes también capturan información importante del Parque Nacional Natural de los Nevados, cuyas imágenes multiespectrales detectan las condiciones fenotípicas de la capa vegetativa que conllevan a la identificación del fenómeno del deterioro de estas; para ello mediante este proyecto se va analizar la variación Multitemporal de la flora de este ecosistema natural.

Se concluye que las imágenes multiespectrales, para esta investigación son un componente importante, brindando la posibilidad de hacer un análisis y procesar imágenes

ópticas que ayudarán a tomar decisiones según los resultados. Para este proyecto se analizó la imagen óptica multiespectral Sentinel-2A mediante el uso del Software SNAP, apropiado para el procesamiento y análisis de la información del área en estudio.

6.4.3 Imagen de Satélite Sentinel-2 – Nivel 2A.

SENTINEL-2 es una misión de generación de imágenes multiespectrales de alta resolución y amplia franja que respalda los estudios de monitoreo terrestre de Copernicus, incluido el monitoreo de la vegetación, el suelo y la cubierta de agua, así como la observación de vías navegables interiores y áreas costeras.

El instrumento multiespectral SENTINEL-2 (MSI) muestra 13 bandas espectrales ver Tabla (1): cuatro bandas a 10 metros, seis bandas a 20 metros y tres bandas a 60 metros de resolución espacial, (EESA, 2012. p.1).

Tabla 1

Bandas espectrales Sentinel-2A

Banda	Nombre	Longitud (nm)	Ancho (nm)	Resolución (m)
1	Coastal aerosol	443.9	27	60
2	Blue	496.6	98	10
3	Green	560	45	10
4	Red	664.5	38	10
5	Vegetation Red Edge	703.9	19	20
6	Vegetation Red Edge	740.2	18	20
7	Vegetation Red Edge	782.5	28	20
8	NIR	835.1	145	10
8a	Narrow NIR	864.8	33	20
9	Water vapour	945	26	60
10	SWIR – Cirrus	1373.5	75	60

11	SWIR	1613.7	143	20
12	SWIR	2202.4	242	20

Fuente: Elaboración Propia

6.4.4 Aplicación Teledetección Radar.

En el sistema de información geográfica, se suscitan eventos y requerimientos para generar conocimientos en el ámbito espacial. Autores como Marchionni & Cavayas (2014) “afirman, los datos adquiridos por los sistemas de radar son sustancialmente diferentes a los obtenidos por los sensores ópticos multiespectrales, de uso más frecuente, pudiendo ser considerados como una fuente de información complementaria” (p.591). Dentro de este la teledetección radar, como sensor activo, autogeneran la energía transportada por un satélite; en el caso de los sensores pasivos tienen sensibilidad multiespectral y su información es aprehendida de una variedad de bandas espectrales que inciden según el objeto estudiado dependiendo de la luz solar.

Además, Karszenbaum & Barraza (2018) “la teledetección de radar, así como la de los sistemas ópticos tienen como objetivo producir imágenes de la superficie terrestre; de esta manera ha sido una herramienta para diferentes disciplinas entre ellas la agricultura, litología y otros” (p.7) Por consiguiente, la investigación Análisis Multitemporal de las Coberturas del Suelo con Imágenes de Radar para los Periodos 2016, 2019 y 2020 en el PNN de los Nevados, Sector de Villamaría, Caldas, se utiliza esta técnica de adquisición de datos con sensores instalados en plataformas espaciales para obtener información y comprender la variación de la cobertura del suelo en el área de estudio.

Por tal razón se describe y comprende los cambios en la cobertura del suelo en el Parque Nacional Natural de los Nevados, específicamente en el sector de Villamaría, Caldas, durante los periodos 2016, 2019 y 2020. Mediante el uso de imágenes de radar obtenidas a

través del sensor activo Sentinel-1, se busca analizar y predecir los sucesos que ocurren en el interior del páramo, con el fin de proporcionar información relevante para la gestión y conservación del área protegida.

Entonces la necesidad de la aplicación de la teledetección de radar en esta investigación contribuye a obtener información precisa y actualizada sobre la variación de la cobertura del suelo en el Parque Nacional Natural de los Nevados, lo que permite describir, comprender y predecir los sucesos que intervienen en el área de estudio. Esto es especialmente relevante para la toma de decisiones y la intervención necesaria en el sector de Villamaría, Caldas, en el marco de la gestión del área protegida.

Además, para su funcionamiento es indispensable la plataforma para transportar el sensor. También conocer el resultado de la información e interpretación de los principales temas, seguimiento a prácticas agrícolas, catástrofes naturales que son preocupación para los seres humanos y, según Martínez Viveros (2018)

Un radar es un ejemplo de sensor activo, el cual mide el tiempo que tarda una emisión en ir y volver de un punto, estableciendo así la localización, altura, velocidad y dirección de un objeto determinado y estos sensores son utilizados hacia la adquisición de información del instrumento siendo procesada por un sistema de información geográfica ilustrando el espacio de estudio (p. 97)

También estos sensores radar se implementan en diferentes fenómenos existentes en entorno, especialmente componentes ambientales (suelo, agua, biodiversidad entre otros) frente al tema del radar envía señal electromagnética al vehículo y recibe señal rebote indispensable para generar cálculos determinando los resultados surgidos en el elemento a investigar.

Ahora, con esta investigación se va a implementar técnica de teledetección con sensores radar Vásquez Hollande, et al., (2021)

ALOS de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), que adquirió imágenes radar entre 2006 y 2011; además se va a emplear otro instrumento a bordo de la misión Sentinel-1 emplean antenas RADAR para el estudio de la superficie terrestre y oceánica (p. 202)

De acuerdo con lo anterior, los sensores de radar permiten obtener imágenes de alta resolución espacial y temporal, lo que brinda acceso a información precisa y actualizada sobre la cobertura del suelo en el área de estudio. Por consiguiente, valioso para el monitoreo y seguimiento de los cambios en la vegetación, la detección de prácticas agrícolas, y la evaluación de eventos naturales como catástrofes.

A diferencia de los sensores ópticos, los sensores de radar pueden penetrar a través de nubes, niebla y lluvia, lo que permite obtener datos incluso en condiciones climáticas adversas. Esto es particularmente relevante en áreas montañosas como el Parque Nacional Natural de los Nevados, donde las condiciones atmosféricas pueden ser variables.

6.4.4.1 Imágenes Sentinel-1. Los Sentinel son una flota de satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA) diseñados para adquirir mediciones de múltiples tipos de sensores que proporcionarán la información necesaria para cumplir con los objetivos del programa Copernicus de Europa.

La primera misión de la serie, la constelación Sentinel-1, incluye satélites gemelos, cada uno de los cuales lleva un radar de apertura sintética (SAR) de banda C que, en conjunto, proporcionan imágenes diurnas y nocturnas de la superficie de la Tierra para todo clima.

Sentinel-1A se lanzó el 3 de abril de 2014 y Sentinel-1B el 25 de abril de 2016. Orbitan a 180° de distancia y juntos toman imágenes de la Tierra cada seis días.

En diciembre de 2021, una anomalía en la fuente de alimentación de Sentinel-1B provocó que el sensor SAR dejara de funcionar. Los intentos de restaurar la energía del sensor fallaron y la misión finalizó oficialmente el 3 de agosto de 2022.

La pérdida de uno de los satélites Sentinel-1 significa que la frecuencia de las observaciones y la cobertura global se reducirán significativamente hasta el lanzamiento y puesta en servicio de Sentinel-1C. “Se prevé que esto se complete en el tercer trimestre de 2023. Sentinel-1B será retirado de órbita en este momento” (Facility, 2011, p.1).

6.4.4.2 Corrección Atmosférica. Dentro de la corrección atmosférica, Aguilar Arias, Mora Zamora, & Vargas Bolaños, (2014)

La corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera (p.39)

Con el proceso de corrección atmosférica se logra mejorar la calidad visual de la imagen; así como, eliminar el componente intrusivo de la atmósfera.

6.4.4.3 Longitudes de Onda de Radar. Las longitudes de Ondas del Sensor de Radar, permite penetrar las diferentes superficies como vegetación, suelos, agua, que son las coberturas más comunes en las investigaciones con imágenes SAR, sobre todo para temas de inundación, sin embargo, existen investigaciones sobre cobertura del suelo, en el que la Agencia Espacial Europea ESA ha realizado proyectos de investigación y, que, de acuerdo con Podest, E.; Pinto, N.; Fielding, E. (2017). Introducción al radar de apertura sintética. La penetración a través de la vegetación o del suelo incrementa con la longitud de onda ver Tabla (2 y 3):

- Generalmente, mientras más larga la longitud de onda, más fuerte es la penetración.
- Dependiendo de la frecuencia y la polarización, las ondas pueden penetrar el dosel forestal
- Bajo condiciones secas también puede penetrar hasta cierto punto el suelo (por ejemplo, arena o nieve seca)
- Con respecto a la polarización, adquisiciones con polos cruzados (VH/ HV) tienen significativamente menos penetración que con polos iguales

Tabla 2

Longitud de onda Imágenes de Radar

PARÁMETROS DE RADAR - LONGITUD DE ONDA		
Designación de Banda	Longitud de Onda (cms)	Frecuencia (GHz)
Ka (0,86 cm)	0.8 to 1.1	40.0 to 26.5
K	1.1 to 1.7	26.5 to 18.0
Ku	1.7 to 2.4	18.0 to 12.5
X (3.0 cm, 3.2 cm)	2.4 to 3.8	12.5 to 8.0
C (6.0)	3.8 to 7.5	8.0 to 4.0
S	7.5 to 15.0	4.0 to 2.0
L (23.5 cm, 25 cm)	15.0 to 30,0	2.0 to 1.0
P (68 cm)	30.0 to 100.0	1.0 to 0.3

Fuente: Nasa

Tabla 3

Frecuencia de bandas

BANDAS COMÚNMENTE UTILIZADAS		
BANDA	FRECUENCIA	EJEMPLO DE APLICACIONES
VHF	300 KHz - 300 MHz	Penetración del follaje o suelo, biomasa
P-Band	300 MHz - 1 GHz	Biomasa, humedad del suelo
L-Band	1 GHz - 2 GHz	Agricultura, vegetación, humedad del suelo
C-Band	4 GHz - 8 GHz	Océanos, agricultura
X-Band	8 GHz - 12 GHz	Agricultura, océanos

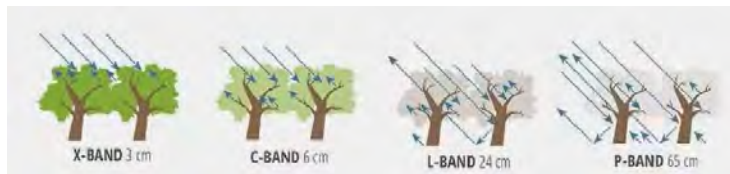
Ku-Band	14 GHz - 18 GHz	Glaciología, estudios de nieve
Ka-Band	27 GHz - 47 GHz	Radares de alta resolución

Fuente: Nasa

Por consiguiente, la longitud de onda de radar cumple un papel importante porque afecta la forma en que interactúa con las coberturas de la tierra ver Figura (07), donde el sensor de radar adquiere datos generando las imágenes de acuerdo con la intensidad de las Ondas que regresan por el Backscattering (Retrodispersión), definida como la cantidad de energía que recibe el sensor después de interactuar con un determinado objeto.

Figura 7

Mapeo y Monitoreo



Nota: La retrodispersión año 2023

Fuente de información google

Sensibilidad de las mediciones de SAR a la estructura del bosque.

6.4.4.4 Bandas de Polarización. De acuerdo con Muñoz, EA, Zozaya, A., & Lindquist, E. (2022). "El análisis de Polarimetría de Radar de Apertura Sintética permite combinar los diferentes modos de polarización capturados por las plataformas SAR, para caracterizar objetos en la superficie de la Tierra a partir de sus mecanismos de interacción electromagnética" (p. 922). En general, la polarimetría toma en consideración los modos de transmisión del pulso electromagnético emitido por el sensor satelital y la recepción del eco retro dispersado por la cobertura de la superficie. En el contexto de las plataformas satelitales SAR, las combinaciones de polarizaciones posibles son HH, HV, VH, y VV. La primera letra

indica la polarización de la onda enviada desde el sensor, y la segunda corresponde a la polarización capturada por el sensor en forma de eco retrodispersado por la cobertura. De este modo, la letra H hace mención de que la onda se transmite o recibe de forma horizontal respecto al plano proyectado de la antena del sensor, y la V hace referencia al caso vertical”

Por lo tanto, la información de polarimetría de las imágenes de Satélite Sentinel-1, escenas usadas en este proyecto, brindan información importante de la intensidad de retrodispersión reflejada hacia el sensor, de acuerdo con la textura del objeto observado, los cambios que han tenido a lo largo del tiempo tomando en cuenta como factores de los cambios estacionales en los que influyen la humedad o la sequía entre otros.

Además, los 2 canales de polarización con las que cuentan dichas imágenes se componen por Horizontal (H) y Vertical (V) (Ver tabla 2 frecuencia de imágenes), dan cuenta de la información sobre las propiedades físicas y estructurales de los objetivos observados, permiten el monitoreo y caracterización de los cambios de los diferentes elementos de la superficie.

6.4.4.5 Coeficiente de Retrodispersión. Generalmente y por obligación el procesamiento de las imágenes implica realizar una conversión de las bandas de polarización, las cuales se encuentran en niveles digitales a coeficientes de retrodispersión, que para este proyecto permite aplicar la metodología de clasificación supervisada y como lo muestra la autora Vásquez Prieto, L. P. (2019)

El coeficiente de retrodispersión depende de la interacción de la señal con los componentes de la vegetación. El pulso del radar puede transmitirse en diferentes configuraciones que varían en longitud de onda, ángulo de incidencia y polarización de emisión y recepción, lo que puede verse reflejado en diferentes respuestas de retrodispersión para una misma superficie. (p. 25)

Por lo tanto, los componentes del manglar (por ejemplo, hojas, ramas, troncos) también alteran la retrodispersión dependiendo su tamaño, orientación, densidad, y constante dieléctrica

Por consiguiente, el coeficiente de retrodispersión es una medida cuantitativa que indica de cuánta energía de radar es reflejada por una superficie, expresada está en Decibelios (dB) y, que dependiendo del tipo de cobertura en la superficie la retrodispersión puede emitir muy baja o muy alta energía de radar.

6.4.4.6 Propiedades Dieléctricas. Según lo señalado por Vásquez Prieto, L. P. (2019) “la constante dieléctrica mide el grado de permeabilidad del material al campo eléctrico en el cual se encuentra sumergido. De cierto modo, es la capacidad del material para absorber, reflejar y transmitir la energía de las microondas” (p.24) El contenido de agua afecta considerablemente el valor de la constante dieléctrica la cual aumenta de manera casi lineal. Dicho valor también depende de la frecuencia de la onda y para microondas incidentes en elementos comunes de la cubierta terrestre, la constante dieléctrica varía de 3 a 8 en superficies secas y puede ser de 80 para el agua.

Si bien podemos tener el mismo objetivo pero con una captura de la retrodispersión en diferentes tiempos, la variación en los datos puede verse afectada por las constantes dieléctricas, cuya característica de dicha constante es describir como interactúa la superficie con las ondas electromagnéticas, la cual afecta la cantidad de energía de radar que se refleja de una superficie, por lo tanto, estas propiedades influyen en la retrodispersión de radar y desempeñan un papel importante en la interpretación de las imágenes de radar y el procesamiento de datos.

Dicho proyecto da pautas importantes para entender la constante dieléctrica, donde el agua tiene una constante dieléctrica diferente a la de otros materiales, lo que puede afectar la forma en que las señales de radar interactúan por ejemplo con la vegetación. La presencia de

mayor humedad en la vegetación puede resultar en una mayor atenuación de la señal de radar y una mayor absorción de energía ya que este afecta la retrodispersión de las ondas de la cobertura, porque no es lo mismo tener una respuesta de rebote cuando el mismo objeto está húmedo a cuando está seco; esto se puede interpretar entonces, que en el ejemplo de la vegetación puede aparecer más oscura en las imágenes de radar SAR, ya que menos energía es reflejada de vuelta al sensor.

Por otro lado, cuando la vegetación está más seca, durante períodos de sequía, puede haber menos contenido de agua en las hojas y los tallos de las plantas, esto puede resultar en una menor atenuación de la señal de radar y una mayor retrodispersión de energía. En consecuencia, la vegetación puede aparecer más brillante en las imágenes de radar SAR.

6.4.4.7 Corrección de la Órbita. Según Arias Cuenca, M. (2017)

Dentro de los metadatos se encuentran los vectores que proporcionan las órbitas de los productos radar. Generalmente, estos datos son sólo aproximados y pueden ser sustituidos por los ficheros que contienen las órbitas precisas reprocesadas, que están disponibles días o semanas tras la generación del producto. Esta opción es importante para garantizar una corrección geométrica precisa. Mediante la opción Radar Apply Orbit File, se descargan de forma automática los ficheros de las órbitas (p.27)

Dicho proyecto, destaca la importancia de utilizar órbitas precisas reprocesadas en el análisis de imágenes de radar para lograr una corrección geométrica precisa, que, para este proyecto facilita el proceso de la corrección de la órbita de las diferentes escenas a través del Software SNAP, mediante la herramienta "Radar Apply Orbit File"

6.4.4.8 Apply Orbit File. Los vectores de estado de la órbita, contenidos en la información de metadatos de los productos SAR, generalmente no son precisos. Las órbitas precisas de los

satélites se determinan después de varios días y están disponibles días o semanas después de la generación del producto. De acuerdo Filipponi, F. (2019)

La operación de aplicación de una órbita precisa disponible en SNAP permite la descarga y actualización automática de los vectores de estado de la órbita para cada escena SAR en los metadatos de su producto, proporcionando información precisa sobre la posición y la velocidad del satélite (p. 29).

A lo anterior, destaca la importancia de actualizar los vectores de estado de la órbita de las imágenes SAR de Sentinel-1 para garantizar la precisión espacial de los datos, que, para el presente proyecto, se logró mediante la aplicación de órbitas precisas disponibles en el Software SNAP, lo que proporciona información confiable sobre la posición y la velocidad del satélite y, en última instancia, mejora la calidad y la utilidad de las imágenes procesadas.

6.4.4.9 Resolución Radiométrica. En el campo de la teledetección por radar, su funcionamiento técnico, recibir información mediante retrodispersión (haz de luz coincide con la reflectancia hacia un objeto en especial el suelo, agua, flora y elementos no naturales. La resolución o corrección radiométricas es un término según Montes Chaura (2019)

está definida como: la proporción mínima de energía necesaria para aumentar el valor de un píxel en un nivel digital (ND). La amplitud radiométrica, también puede interpretarse como el número máximo de niveles digitales que pueden ser convertidos por un sensor específico (p.38)

Esta corrección radiométrica permite expresar los valores de los píxeles en unidades de reflectividad, así como reducir artefactos indeseados debidos a los efectos de la atmósfera o a la iluminación diferencial causada por la hora del día, el lugar de la Tierra o el relieve (zonas más o menos iluminadas, sombras, etc).

Un sistema de teledetección por RADAR (Radio Detection And Ranging) transmite pulsos de microondas que van barriendo la superficie terrestre y recibe la porción de energía que es reflejada (retrodispersada) de vuelta hacia el sensor.

6.4.5.0 Calibración Radiométrica. Para este tema de la calibración radiométrica afirma Revol, A. S. B., & Pascual, M. I. G. (2021)

El objetivo de la calibración es crear una imagen donde el valor de cada píxel esté relacionado directamente con la retrodispersión de la escena. La calibración radiométrica permite la comparación de imágenes SAR adquiridas con diferentes sensores, o adquiridas con el mismo sensor, pero en diferentes momentos, en diferentes modos, o procesadas por diferentes procesadores (p.49)

Por consiguiente, la retrodispersión es una medida de la cantidad de energía que es reflejada por los objetos en la escena hacia el sensor; entonces calibrar una imagen de radar es buscar establecer una relación cuantitativa entre los valores de los píxeles y la retrodispersión, que, para este proyecto es necesario ya que se tienen varias imágenes de diferentes periodos de tiempo.

6.4.5.1 Corrección del Terreno. Según lo expresado por Revol, A. S. B., & Pascual, M. I. G. (2021)

“El proceso de corrección de terreno, georreferenciación o Terrain Correction (en inglés) se realiza cuando se necesita llevar una imagen SAR a un sistema de coordenadas en un mapa como por ejemplo un sistema de referencias cartográficas” (p.24) Puede hacerse sin el uso de un modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) o se pueden llevar todos los píxeles al terreno con un DEM preciso. Vale aclarar que mientras mejor sea el DEM mejor

va a ser la calidad del trabajo. Se puede contar con algunos que se descargan automáticamente en SNAP o se puede trabajar con un DEM propio y cargarlo al programa.

Durante el procesamiento llevado a cabo en este proyecto para las imágenes SAR, mediante el Software SNAP, para la corrección del terreno, se ubicaron las imágenes SAR en el Sistema de referencia UTM/WGS84 y un Modelo Digital de Elevación (Copernicus 30m Global DEM) con el fin de aumentar la calidad y la precisión de las imágenes SAR.

6.4.5.2 Filtro Speckle. En este tema Urien, A. L. (2016)

El moteado o speckle, es una distorsión radiométrica inherente a cualquier sistema de adquisición de imágenes radar y hace que las imágenes tengan una apariencia granulosa. La presencia del moteado causa una reducción en la calidad de las imágenes debido a que se disminuye su interpretabilidad y su capacidad de detectar objetos o identificar cubiertas. (s.p.)

Existen básicamente dos técnicas para reducir el moteado: el ya comentado procesado multi-look y el filtrado de las imágenes. Se han usado filtros de distinto tipo como filtros de paso bajo, filtros adaptativos, filtros polarimétricos o filtros multitemporales. Los dos últimos son aplicables únicamente cuando se cuenta con observaciones polarimétricas y cuando se cuenta con una serie multitemporal de imágenes, respectivamente.

A lo anterior, la presencia del moteado puede afectar la calidad de las imágenes al disminuir su interpretabilidad y su capacidad para detectar y/o identificar las diferentes coberturas del suelo, como también lo afirma Vélez Alvarado, D. (2019) “Las imágenes radar se ven afectadas por una distorsión radiométrica denominada moteado (efecto sal y pimienta), que introduce variabilidad en los valores individuales de cada píxel lo que dificulta su interpretación y posterior análisis” (p.11) Para reducirlo se han desarrollado distintos filtros que tratan de reducir la varianza en zonas homogéneas a la vez que mantienen la retro dispersión de

reflectores discretos (Filtro de Lee y de Frost), bordes, elementos lineales (Refined Lee, Lee Sigma e IDAN) y texturas (GammaMAP)

La aplicación del filtro Speckle como técnica para reducir la distorsión de moteado en las imágenes de radar, mejora la calidad de la imagen, permitiendo una mejor interpretación de la información contenida en la Escena, resaltando características importantes donde los píxeles tiene valores homogéneos para las diferentes clases de la cobertura del suelo.

6.4.5.3 Thermal Noise Removal (Eliminación de ruido térmico). La intensidad de la imagen Sentinel-1 se ve perturbada por el ruido térmico aditivo, particularmente en el canal de polarización cruzada; de esta forma Filipponi, F. (2019)

la eliminación del ruido térmico reduce los efectos del ruido en la textura entre sub-franjas, en particular, normaliza la señal de retrodispersión dentro de toda la escena Sentinel-1 y da como resultado discontinuidades reducidas entre sub-franjas para escenas en modos de adquisición de múltiples franjas (p.11)

El operador de eliminación de ruido térmico disponible en SNAP para los datos de Sentinel-1 también puede reintroducir la señal de ruido que podría haberse eliminado durante la generación del producto de nivel 1 y actualizar las anotaciones del producto para permitir la replicación de la corrección. Los productos Sentinel-1 nivel 1 proporcionan una tabla de búsqueda de ruido (LUT), proporcionada en potencia lineal, para cada conjunto de datos de medición y utilizada para derivar perfiles de ruido calibrados que coincidan con los datos GRD calibrados GRD preprocessing workflow. In International Electronic Conference on Remote Sensing MDPI

De acuerdo con lo anterior, es crucial comprender que las imágenes usadas en el presente proyecto pueden estar afectadas por el ruido térmico aditivo, lo que significa que dicho

ruido proviene de las fluctuaciones naturales de la temperatura en el entorno del satélite. Este tipo de ruido puede afectar la calidad de la imagen.

Para abordar este problema, es necesario realizar un proceso de eliminación de ruido térmico en las imágenes Sentinel-1. Este proceso tiene varios beneficios para el presente proyecto:

1. La eliminación del ruido térmico ayuda a reducir los efectos negativos del ruido en la textura de las imágenes. Esto significa que los análisis y comparaciones entre imágenes de diferentes períodos de tiempo serán más precisos

2. El proceso de eliminación del ruido térmico normaliza la señal de retrodispersión en toda la escena Sentinel-1. Esto es importante porque garantiza que los datos sean comparables a lo largo del tiempo

6.5 Clasificador KNN Classifier (K-Nearest Neighbors Classifier).

En este contexto considera Gil Alonso, N. (2022)

El algoritmo de k- vecinos próximos (k-NN) es un método de clasificación no paramétrico que clasifica los objetos basándose en los ejemplos de entrenamiento más cercanos en el espacio de características. Las ideas iniciales en torno a este modelo se atribuyen a Evelyn Fix y Joseph Hodges, mientras que Thomas Cover amplió y profundizó estos conceptos. (p. 38)

Así K-NN es un tipo de aprendizaje basado en instancias, o aprendizaje perezoso, en el que la función sólo se aproxima localmente y todo el cálculo se aplaza hasta la clasificación. Es uno de los algoritmos de clasificación más sencillos que existen: un píxel se clasifica por el voto mayoritario de sus vecinos, asignándose el píxel a la clase más común entre sus k vecinos más

próximos, que forman parte del conjunto de entrenamiento (k es un número entero positivo, normalmente pequeño).

También la fase de entrenamiento del algoritmo consiste únicamente en almacenar los datos de la imagen y las etiquetas de clase de las muestras de entrenamiento. En la fase de clasificación, un píxel no etiquetado se clasifica asignando la etiqueta más frecuente (mayoría) entre las k muestras de entrenamiento más cercanas al píxel.

Lo anterior, describe el algoritmo de K -vecinos más cercanos como un método para clasificar objetos basándose en clases de entrenamiento; un algoritmo no paramétrico, significa que no hace suposiciones específicas sobre la forma de los datos o la distribución de las clases, lo que hace el proceso es utilizar la idea donde los píxeles que son similares entre sí en un espacio de características también deberían tener etiquetas de clase similares o idénticas. La "similitud" entre dos objetos se mide mediante una métrica de distancia. Comúnmente se utiliza la distancia euclidiana, que calcula la distancia en el espacio de características entre dos puntos. Cuanto más cercanos estén dos objetos en este espacio, menor será su distancia euclidiana, lo que indica una mayor similitud.

En cuanto al valor de " K " significa que el modelo se basará principalmente en los píxeles vecinos más cercanos para tomar una decisión de clasificación, cuando se debe clasificar un nuevo píxel o dato, KNN busca los ejemplos de entrenamiento más cercanos a este nuevo objeto utilizando la métrica de distancia euclidiana la cual mide la longitud del camino más corto entre dos puntos en un espacio, cuanto más pequeña es la distancia euclidiana, más cercanos están los puntos en el espacio de características, lo que indica una mayor similitud, y cuanto mayor es la distancia euclidiana, más separados están los puntos y, por lo tanto, son menos similares.

6.6 Matriz de Confusión e índice Kappa.

La importancia del papel de conocer la matriz de confusión, según Espinosa Herrera, J. M. (2014)

Se la denomina también matriz de error o tabla de contingencia. La matriz de confusión se construye a partir de una imagen de satélite con N celdillas clasificadas en M clases. Sobre las columnas se ordenan las clases reales (verdad-terreno), y sobre las filas las unidades cartográficas (unidades -o clases- del mapa). Los elementos que aparecen en la diagonal nos indican el número de clasificaciones realizadas correctamente, y aquellos que aparecen fuera suponen migraciones o fugas (p. 38)

Desde el punto de vista de la interpretación de la matriz de confusión, existen dos tipos de errores:

Errores de omisión (riesgos del usuario): son los elementos que perteneciendo a esa clase no aparecen en ella por estar erróneamente incluidos en otra (datos por debajo de la diagonal principal de la matriz de confusión).

Errores de comisión (riesgos del productor): son los elementos que no perteneciendo a una clase aparecen en ella (datos por encima de la diagonal principal de la matriz de confusión).

La matriz de confusión facilita la detección de errores y además:

- Permite el análisis descriptivo.
- Visión general de las asignaciones correctas y de las equivocaciones.
- Permite el análisis analítico.
- Distintos niveles de análisis: global, por tipo de entidad, por casos concretos.

respecto al Índice Kappa "Su uso está muy extendido. Considera las distribuciones marginales de la matriz de confusión, es decir, las probabilidades a posteriori de pertenencia a

una clase. Muestra cuánto ha mejorado la clasificación respecto a una asignación aleatoria de N elementos en M grupos. Da idea del % de acuerdo, una vez se ha eliminado la parte debida al azar. Sobrestima la aportación del acuerdo al azar y de esta forma subestima la bondad de la clasificación total. Cuando N es grande puede considerarse que se distribuye según una normal”

La matriz de confusión e índice Kappa es una herramienta metodológica importante para medir la exactitud de un modelo de clasificación supervisada, cuyo resultado de K se toma como indicador para definir cuan precisa es la metodología de clasificación aplicada a las imágenes, en este caso imágenes de radar Sentinel-1, ya sea Excelente, Muy Bueno, Bueno, Regular o Mala, este proyecto, una vez evaluado las 3 imágenes SAR Sentinel-1, la métrica final, que es la clave de evaluación como la precisión, refleja el rendimiento del modelo cuyo resultado cualitativo en términos generales del proceso de clasificación fue buena.

6.7 Coeficiente de correlación de Pearson.

En cuanto los índices de relacionar variables y su magnitud en procesos investigativos, el coeficiente de correlación de Pearson asevera Roy García, et al, (2020) “es un indicador usado para describir cuantitativamente la fuerza y dirección de la relación entre dos variables cuantitativas de distribución normal y ayuda a determinar la tendencia de dos variables a ir juntas, a lo que también se denomina covarianza” (p. 360)

De ahí, el presente proyecto, se tuvieron resultados cercanos a -1 y $+1$, lo que significa que, cuando el coeficiente de correlación de Pearson es menor que cero (es decir, negativo), significa que las variables se relacionan de manera inversa o negativa. Esto implica que cuando una variable aumenta, la otra tiende a disminuir, y viceversa, de manera lineal. Cuanto más cercano esté el coeficiente a -1 , más fuerte será la relación inversa entre las variables

7. Hipótesis de Investigación.

En el caso de la hipótesis, “Su función consiste en delimitar el problema que se va a investigar según algunos elementos, tales como: el tiempo, el lugar, las características de los sujetos” citado por (Espinoza Freire, 2018.p.139) para esta investigación Análisis multitemporal de las coberturas vegetales con imágenes de radar para los años 2016 hasta 2021 P.N.N Sector de Villamaría Colombia, se determina los años 2016, 2019 y 2021, imágenes de satélite Sentinel-1B y procesado con el software SNAP y su método de clasificación supervisada de los elementos en el objeto de estudio; suelo desnudo, bosques enanos, vegetación nativa y pastoreo.

Será posible que mediante el análisis multitemporal de las coberturas del suelo con imágenes de radar Sentinel-1B, permita identificar y caracterizar los cambios en la cobertura del suelo en un sector específico del Parque Nacional Natural Los Nevados, en Colombia, durante los años 2016, 2019 y 2021. Se espera que este análisis revele patrones de cambio significativos en las diferentes clases de cobertura del suelo (pastoreo, suelo desnudo, bosques enanos y vegetación nativa) en respuesta a las actividades humanas y a las condiciones ambientales en el área de estudio.

8. Metodología.

Esta investigación representa un estudio con aplicaciones significativas en el ámbito ambiental, destacando su importancia tanto a nivel regional como en el contexto nacional. Se basa en el procesamiento de imágenes de satélite, abarcando los sensores de radar y óptica. Es decir, este enfoque metodológico permite llevar a cabo un análisis detallado de la superficie en un sector de la zona del páramo.

8.1 Procedimiento.

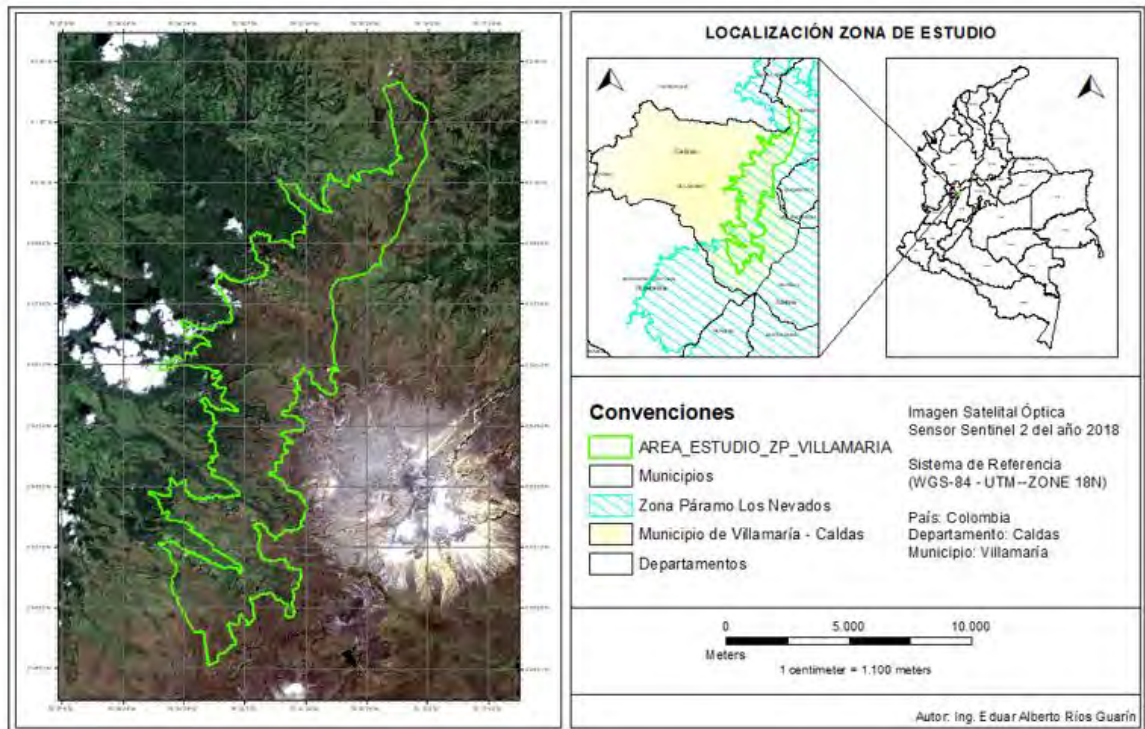
Para el cumplimiento de los objetivos planteados en la presente investigación, se llevó a cabo los siguientes procesos metodológicos y en el que se identifican cada una de las fases para el cumplimiento de este.

8.1.2 Definición de la Zona de Estudio.

Se define la zona de estudio; de acuerdo con la (Figura 08), la cual se ubica en el Parque Nacional Natural de los nevados específicamente en la zona de páramo del Municipio de Villamaría del departamento de caldas, entre los 3600 y 4300 mt de altura sobre el nivel del mar.

Figura 8

Localización Zona de Estudio



Nota: Diseñada por investigador año 2023

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la zona de estudio, alberga ecosistemas estratégicos de gran relevancia para el municipio de Villamaría y el departamento de Caldas, siendo parte integral del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP).

La presente investigación se enfoca en el Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados, ubicado en el municipio de Villamaría, Caldas, entre los 3,600 y 4,100 metros sobre el nivel del mar, abarcando una extensión de 8,044.87 hectáreas, representando el 6.04% del PNN.

Este sector se destaca por su relevancia científica, ambiental, ecológica, turística y social. Su accesibilidad permite la apreciación de diversos paisajes, la riqueza de flora y fauna, y sirve como fuente abastecedora de agua.


8.1.3 Adquisición De Datos.

8.1.3.1 Imagen de Satélite Sentinel-2 – Nivel 2A. Mediante el Sensor Pasivo Sentinel-2, de la plataforma Copernicus Open Access Hub, la imagen de satélite adquirida del año 2020, presenta un porcentaje entre 6% y el 10% de nubes, siendo esta la única con poca nubosidad en la zona de estudio para el periodo comprendido entre el año 2016 y 2021.

La (Figura 09), describe las características de la imagen Sentinel-2 Nivel 2A, la cual se visualiza en el Rango Visible RGB – Bandas (2,3,4).

Figura 9

Imagen Sentinel-2 Nivel 2A

<u>Parámetros Imagen de Satélite Óptica Sentinel-2 – Nivel 2A:</u>	
Fecha: 2020-01-04T15:26:39.024Z Nombre de Archivo: S2B_MSIL2A_20200104T152639_N0213_R025_T18NVL_20200104T192813 Satélite: Sentinel-2 Número de órbita (inicio): 14780 Sentido de paso: DESCENDENTE Nivel de procesamiento: Nivel-2A Tipo de producto: S2MSI2A Nombre del satélite: Sentinel-2 Número de satélite: B Porcentaje de nubes de alta probabilidad: 10.992254 Porcentaje de nubes probabilidad media: 6.262644	

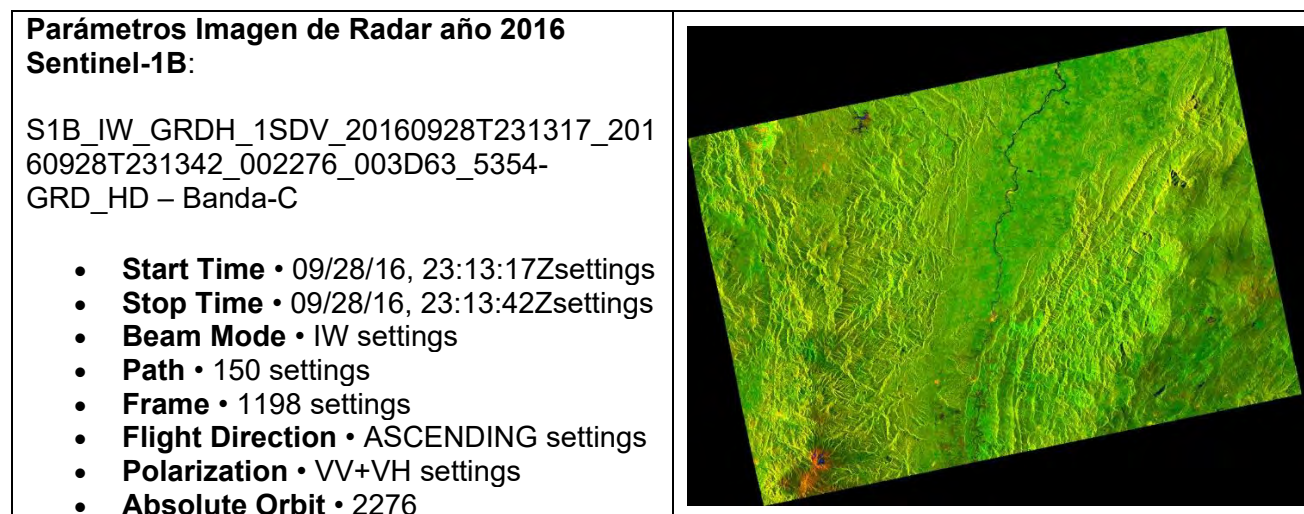
Nota trabajo parámetros imagen satélite

Fuente de información: Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea – ESA – Año 2020

8.1.3.2 Imágenes Sentinel-1B. A través de la plataforma de la ASF –(Alaska Satellite Facility) – DAAC (Centro de Archivo Activo Distribuido) de la NASA, se obtuvieron las siguientes imágenes (Figuras 10, 11 y 12) de Radar del sensor Sentinel-1B:

Figura 10

Imagen de Radar 2016,

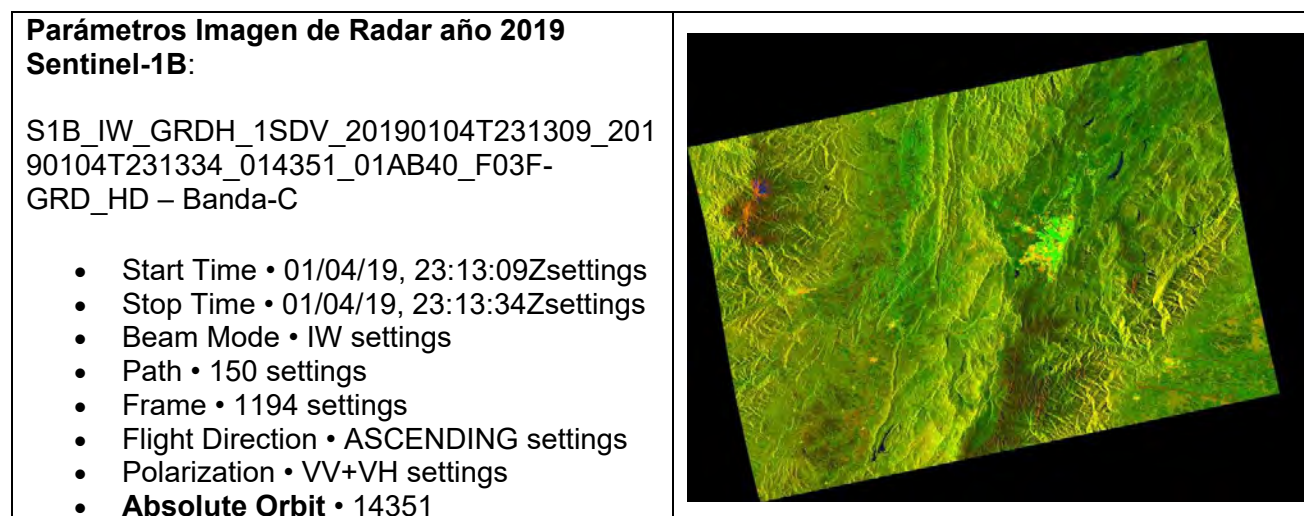


Nota: trabajo imagen de radar 2016

Fuente elaboración propia.

Figura 11

Imagen de Radar 2019

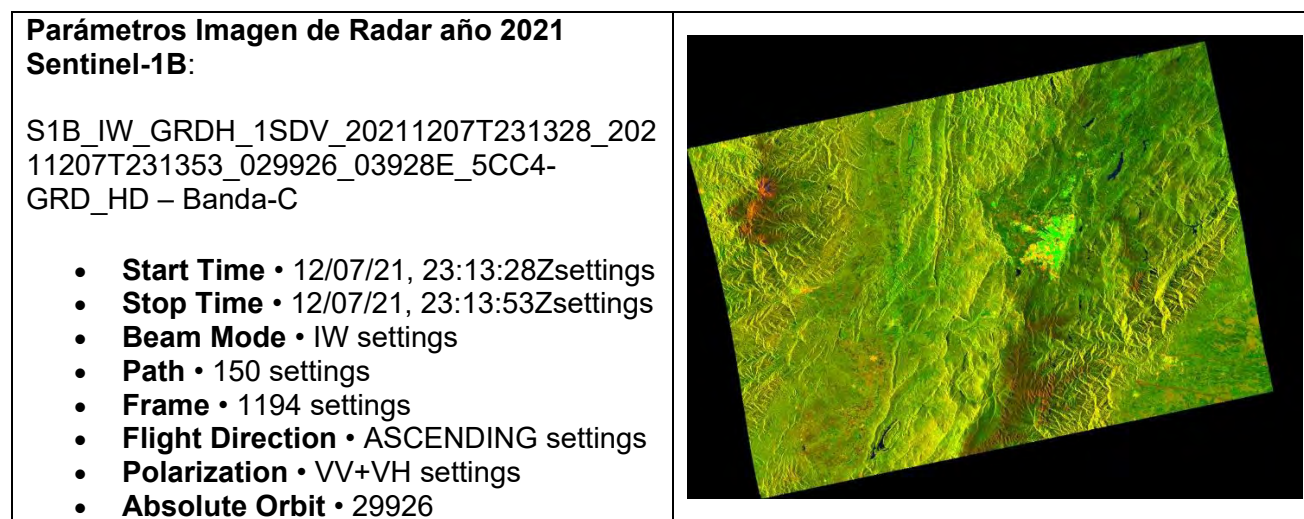


Nota: diseño parámetros imagen radar año 2019.

Fuente elaboración propia.

Figura 12

Imagen de Radar 2021.



Nota: Preparación imágenes de radar año 2021

Fuente: ASF –(Alaska Satellite Facility) – DAAC (Centro de Archivo Activo Distribuido) de la NASA – Año 2020 y 2022

8.1.4 Definición De Las Zonas De Entrenamiento.

En esta etapa crucial, se aborda la definición de las zonas de entrenamiento mediante el aprovechamiento de la imagen satelital del sensor Sentinel-2A, descargada de la plataforma Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA). Un criterio determinante para la elección de esta imagen fue el porcentaje de nubosidad presente en la escena, buscando así garantizar una mayor claridad y precisión en la información capturada.

La escena en cuestión, adquirida de la plataforma Copernicus Open Access Hub, corresponde al 04 de octubre del año 2020, identificándose de manera única como: S2B_MSIL2A_20200104T152639_N0213_R025_T18NVL_20200104T192813.

Posteriormente, empleando la herramienta del Software SNAP, se lleva a cabo un análisis detallado de la escena a través de la aplicación de combinaciones de bandas RGB preestablecidas. Estas combinaciones, detalladas a continuación, sirven como base fundamental para el análisis exhaustivo de la imagen satelital, marcando así el inicio del proceso de definición de zonas de entrenamiento:

Sentinel-2A MSI Natural Colors (Rojo: B4, Verde: B3, Azul: B2)

Sentinel-2A MSI False-color Infrared (Rojo: B8, Verde: B4, Azul: B3)

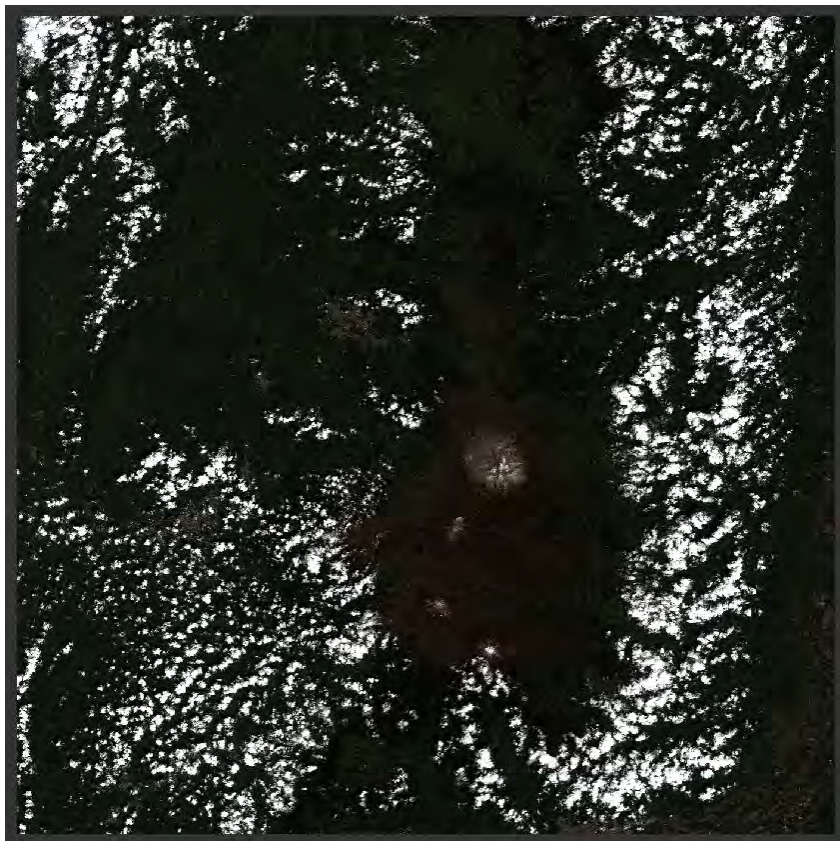
Sentinel-2A MSI Atmospheric Penetration (Rojo: B12, Verde: B11, Azul: B8A)

Estas visualizaciones específicas proporcionarán la información esencial necesaria para la identificación precisa de las zonas de interés, sentando las bases para la posterior ejecución de la clasificación supervisada en el marco del proyecto.

Una vez implementadas estas configuraciones de bandas en la imagen de satélite Sentinel 2A, combinando las bandas: Red: B4, Green: B3, Blue: B2, se obtiene la Figura (13), una escena en color natural. Este procedimiento tiene como objetivo primordial la posterior identificación de áreas específicas, tales como pastoreo, suelo desnudo, vegetación nativa y bosques de enanos. Dichas áreas se consideran cruciales para la generación de zonas de entrenamiento, facilitando así más adelante la clasificación supervisada de las imágenes provenientes del sensor de radar Sentinel-1B. Este sensor especializado en teledetección y procesamiento de imágenes de radar contribuye de manera significativa al análisis detallado de la cobertura terrestre y la evaluación de cambios ambientales.

Figura 13

Imagen óptica Sentinel-2A – Combinación de Bandas RGB - Natural Colors (Red: B4, Green: B3, Blue: B2)



Nota: esta figura fue diseñada 2023

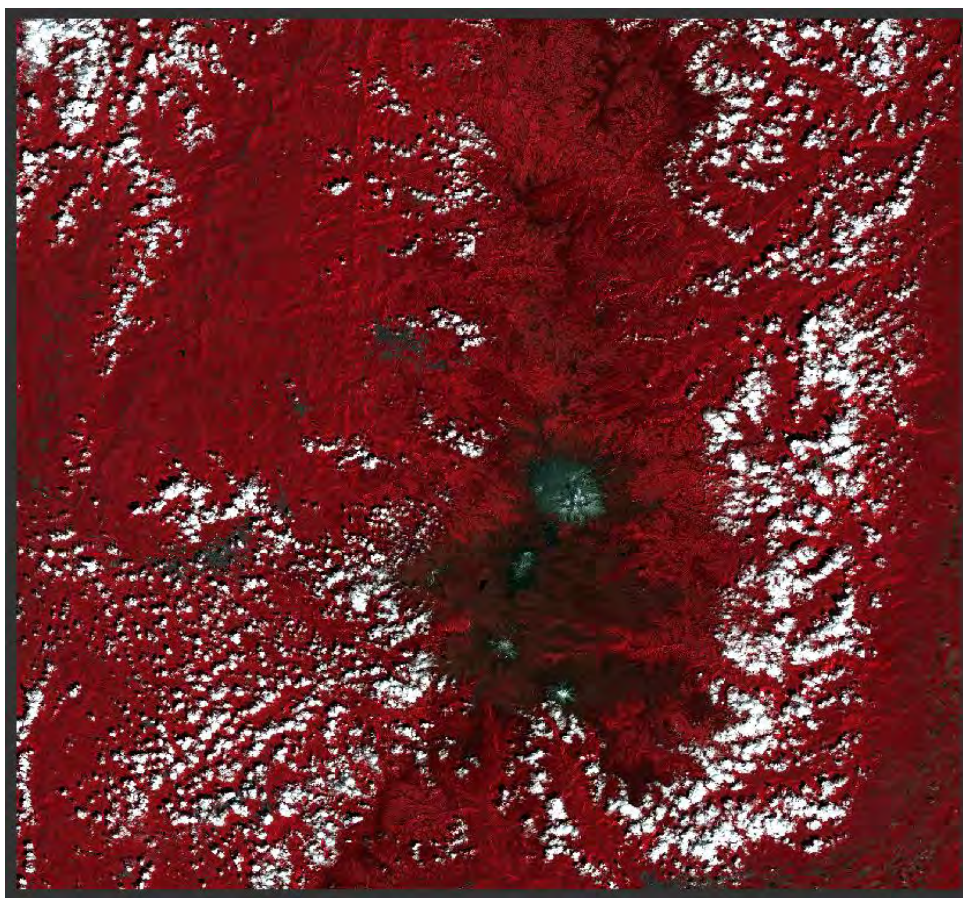
Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, se llevó a cabo la generación de una imagen en falso color infrarrojo mediante la combinación de las bandas Red: B4, Green: B3 y NIR: B8, tal como se ilustra en la (Figura 14). Esta estrategia se implementó con el propósito de respaldar la identificación precisa de variables tales como: pastos, suelo desnudo, vegetación nativa y bosques de enanos en la superficie. La elección de esta combinación específica resalta de manera efectiva la información dentro del rango del infrarrojo cercano, permitiendo así discernir de manera más clara entre el suelo desnudo y la vegetación. Este enfoque en falso color infrarrojo constituye

una herramienta valiosa para el análisis detallado de la cobertura terrestre, proporcionando una visión mejorada de las características del terreno y facilitando la interpretación de las distintas clases de la superficie.

Figura 14

Imagen de Satélite Sentinel-2A - Combinación de Bandas RGB - false colors infrared (Red: B4, Green: B3, NIR: B8)



Nota: imagen construida en el año 2023.

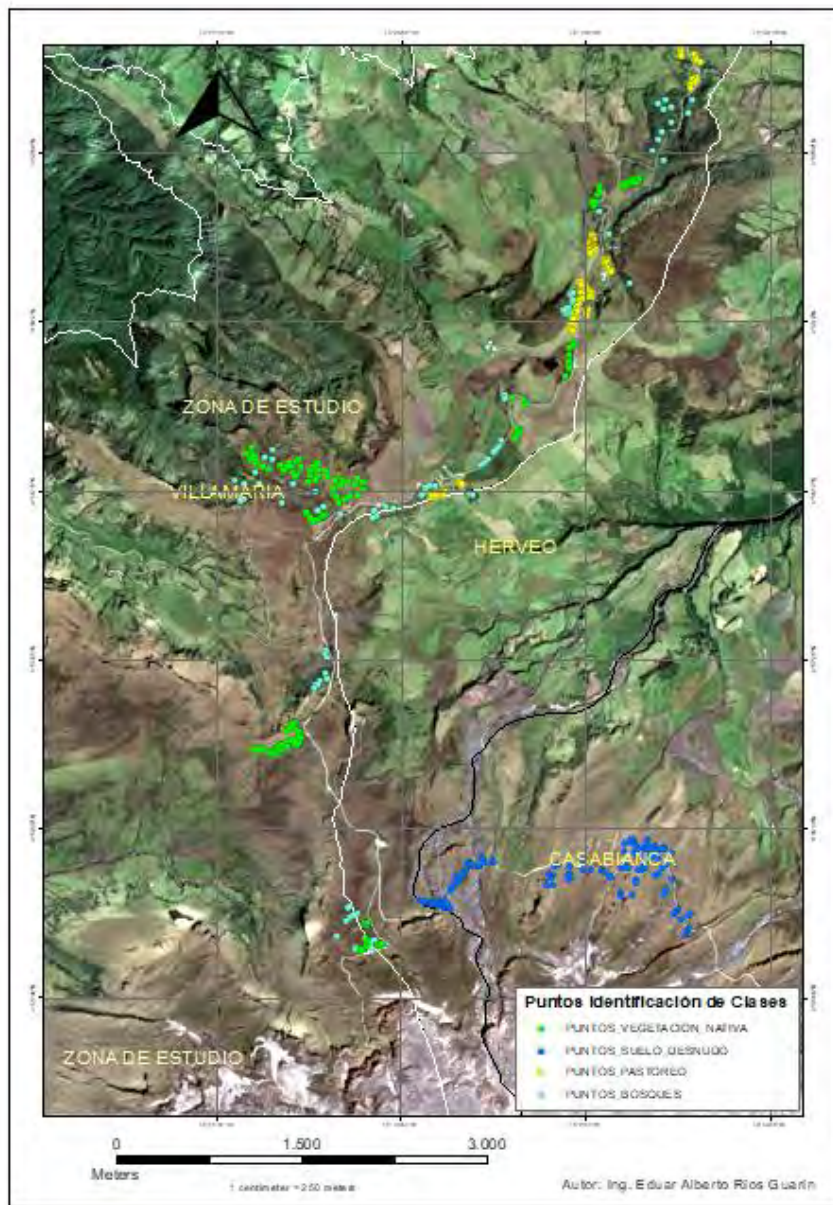
Fuente: Elaboración Propia

Para la delimitación de las zonas de entrenamiento, se contó con el respaldo de aproximadamente 240 puntos de coordenadas obtenidos durante el estudio de campo en el

PNN de Los Nevados (Figura 15) en el año 2021, con el propósito de optimizar la precisión y la clasificación de la zona de estudio.

Figura 15

Puntos de coordenadas tomadas en campo.



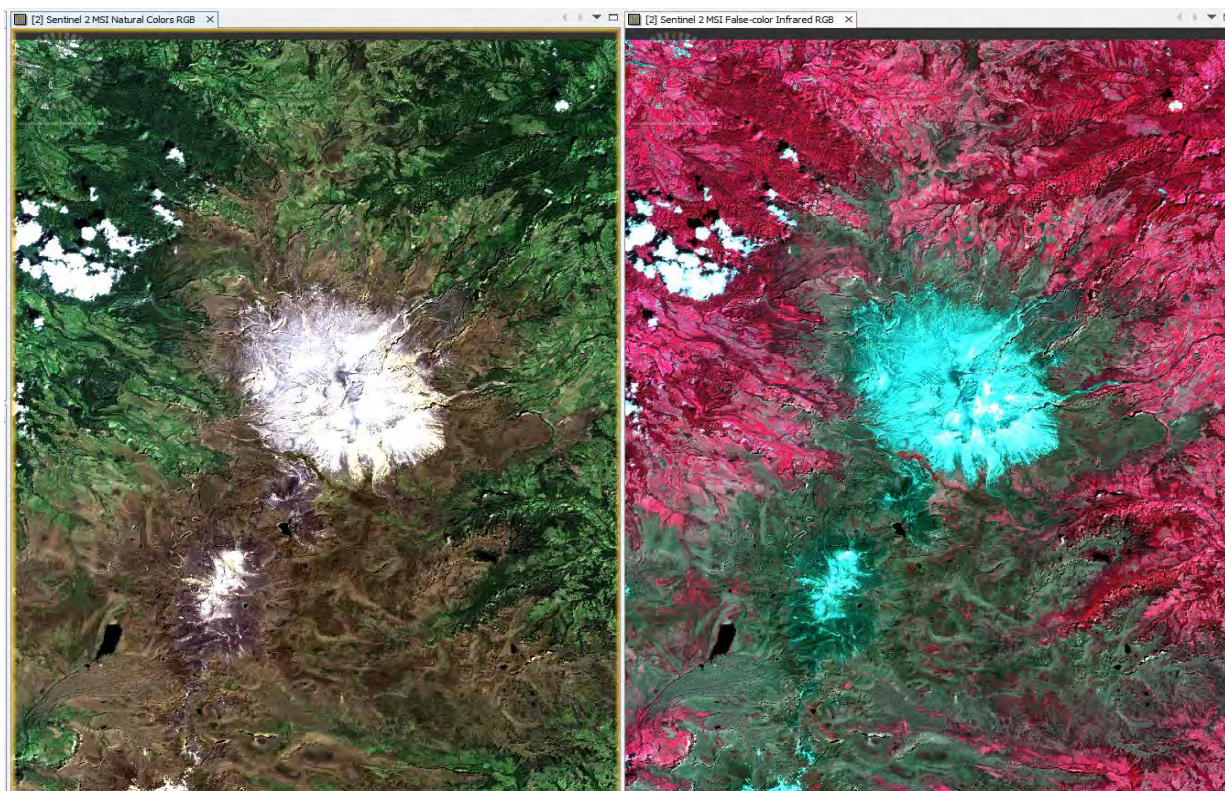
Nota: diseñada en año 2023.

Fuente: Elaboración Propia

En consecuencia, se procedió a aplicar un recorte (subset) a la imagen de satélite Sentinel-2A mediante el software SNAP, el cual se puede apreciar en la (Figura 16). Este recorte se ejecutó para analizar exclusivamente el área de influencia de la zona de estudio.

Figura 16

Imágenes ópticas Sentinel-2A con recorte (Subset) al área de influencia de la zona de estudio



Nota: imagen diseñada año 2024

Fuente: Elaboración Propia

8.1.5 Delimitación de Áreas de Interés mediante el Uso de Máscaras.

Para evaluar la coherencia entre los píxeles de distintas clases y mejorar la caracterización del suelo en una misma escena, la utilización de máscaras emerge como una estrategia clave en este proceso integral dentro de la imagen de satélite Sentinel-2A.

Seguidamente, en esta etapa del proyecto, se implementaron expresiones Lógicas, como se evidencia en la (Tabla 4), utilizando las bandas 8 y 4 de las escenas previamente descritas específicamente (*false colors infrared*), lo que conlleva a una interpretación más precisa de la imagen de satélite. Estas expresiones se ejecutaron con el propósito de realizar un análisis detallado y cuantitativo de las características del terreno en la zona de estudio y con la finalidad de generar máscaras de cada clase.

Tabla 4

Expresiones lógicas.

COBERTURA	EXPRESION LÓGICA PARA LA BANDA 4 (red)	EXPRESIÓN LÓGICA PARA LA BANDA 8 (NIR)	EXPRESIÓN LÓGICA PARA EXTRAER LOS PÍXELES DE LA CLASE
Vegetación Nativa (Frailejón, Pajonales) (VNT)	if (B4 >= 0.05 and B4<=0.09) then 1 else 0	if (B8 >= 0.155 and B8<=0.239) then 1 else 0	if (VN_B4 == 1 and VN_B8 == 1) then 1 else 0
Pastoreo (PST)	if (B4 >= 0.05 and B4<=0.09) then 1 else 0	if (B8 >= 0.35 and B8<=0.48) then 1 else 0	if (PST_B4 == 1 and PST_B8 == 1) then 1 else 0
Bosques (BQE)	if (B4 >= 0.02 and B4<=0.049) then 1 else 0	if (B8 >= 0.15 and B8<=0.30) then 1 else 0	if (BQE_B4 == 1 and BQE_B8 == 1) then 1 else 0
Suelo Desnudo (SLD)	if (B4 >= 0.091 and B4<=0.16) then 1 else 0	if (B8 >= 0.07 and B8<=0.27) then 1 else 0	if (SLD_B4 == 1 and SLD_B8 == 1) then 1 else 0

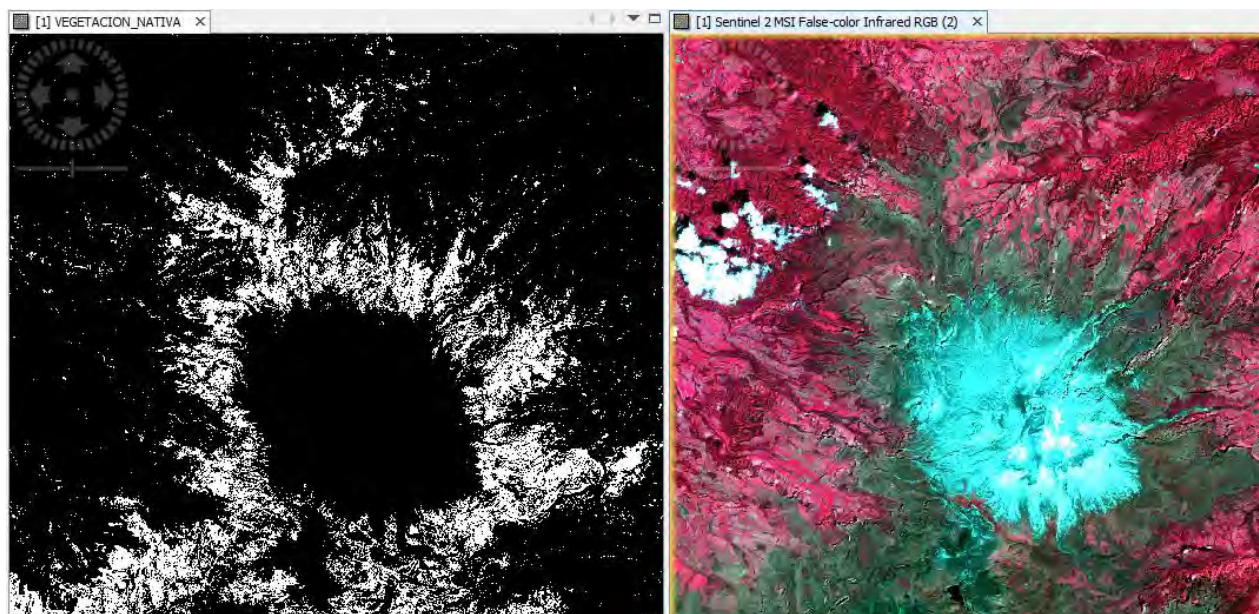
Nota: estas expresiones se diseñaron en año 2023

Fuente: Elaboración Propia

En consecuencia, las expresiones lógicas aplicadas en el software SNAP generan las siguientes máscaras, ver Figuras (17 al 20), cada una destinada a una clase específica: VNT, PST, BQE, SLD. Estas máscaras resultan fundamentales para la posterior clasificación de las imágenes de radar, una vez se hayan convertido en valores vectoriales los ráster generados. En este contexto, se asigna el valor uno (1) para el color blanco y cero (0) para el negro, estableciendo que el valor cero (0) no representa ninguna clase identificada.

Figura 17

Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Vegetación Nativa



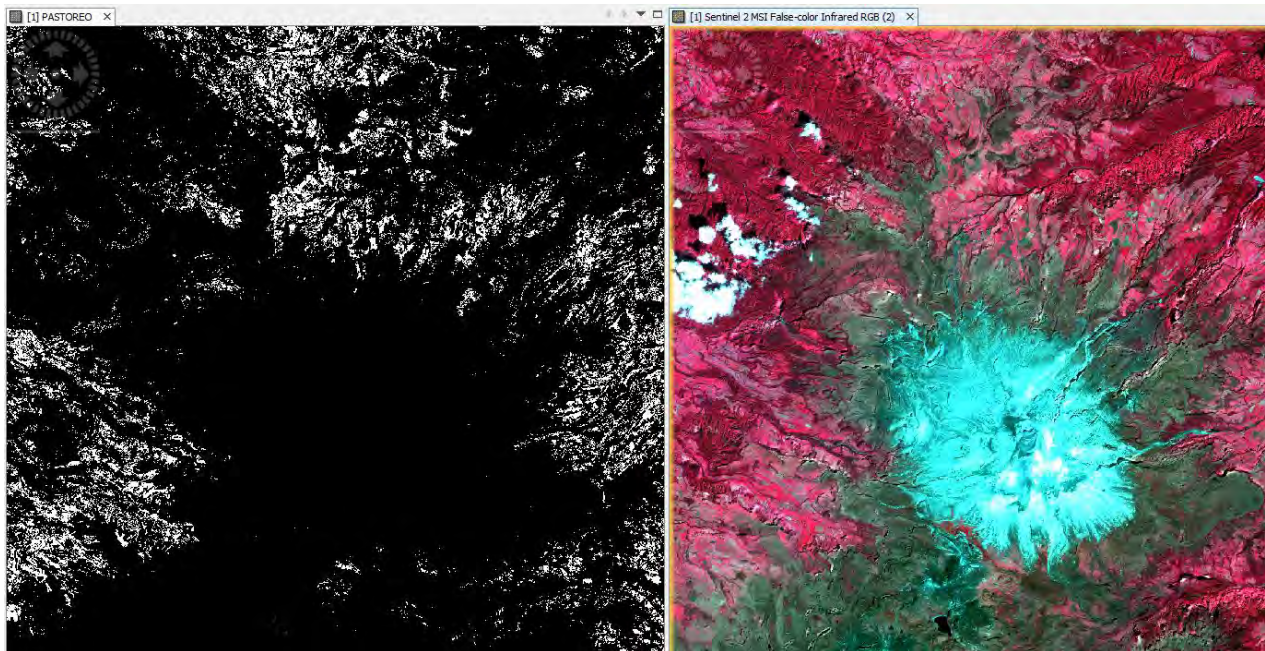
Mascara Vegetación Nativa

Imagen Sentinel-2A (Color Infrared)

Fuente: Elaboración Propia

Figura 18

Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Pastoreo



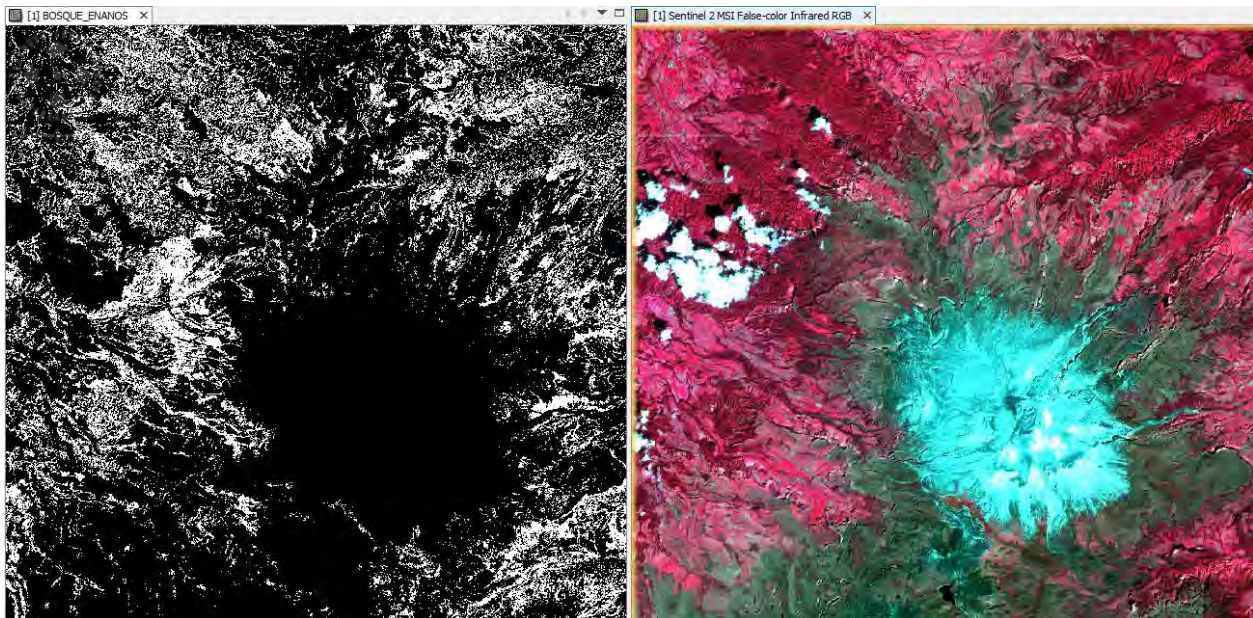
Mascara Pastoreo

Imagen Sentinel-2A (Color Infrared)

Fuente: Elaboración Propia

Figura 19

Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Bosques de Enanos.



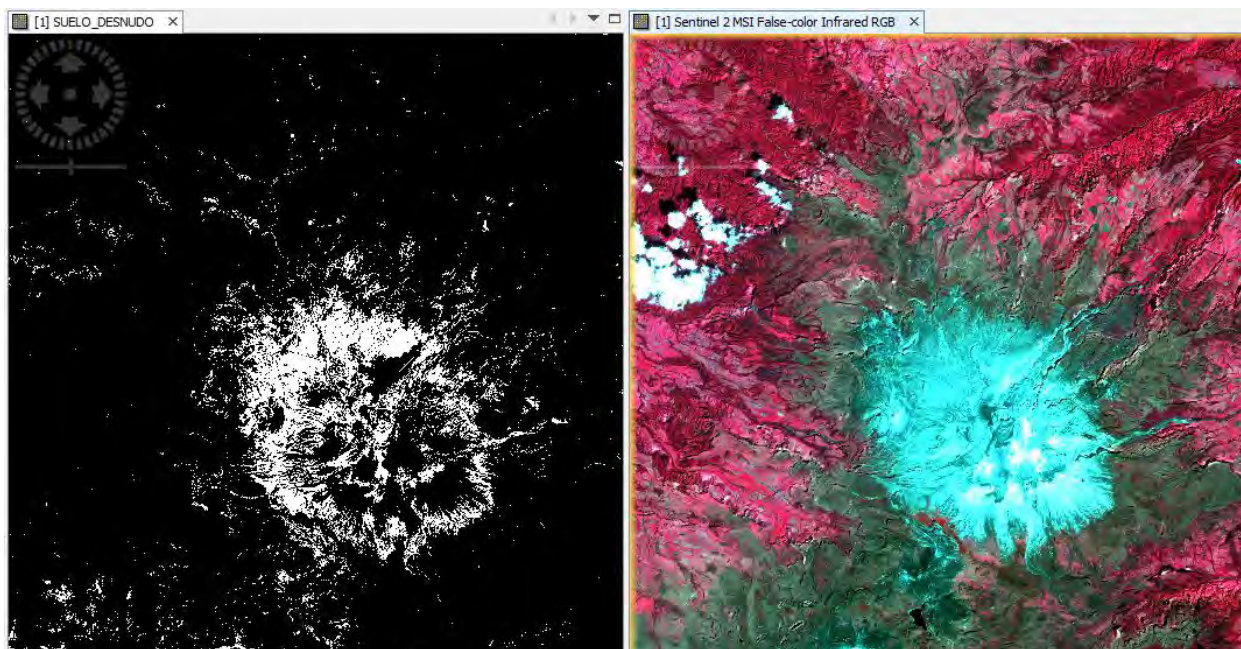
Mascara Bosques Enanos

Imagen Sentinel-2A (Color Infrared)

Fuente: Elaboración Propia

Figura 20

Imagen óptica Sentinel-2A - Máscara de Suelo Desnudo.



Mascara Suelo Desnudo

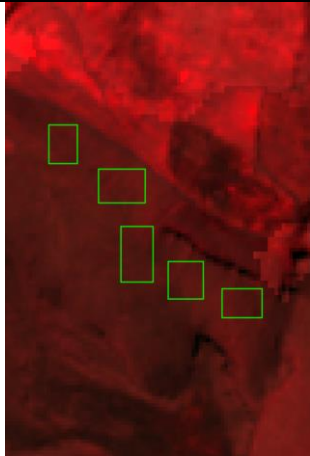
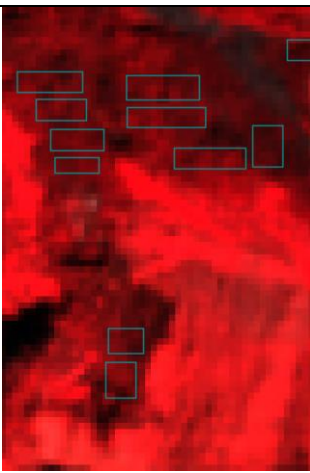
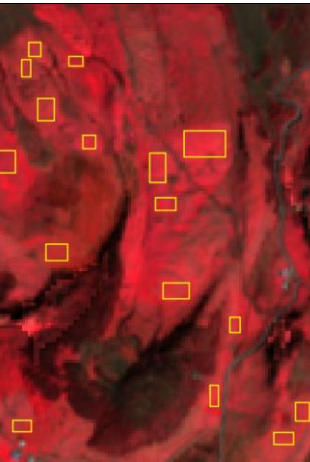
Imagen Sentinel-2A (Color Infrared)

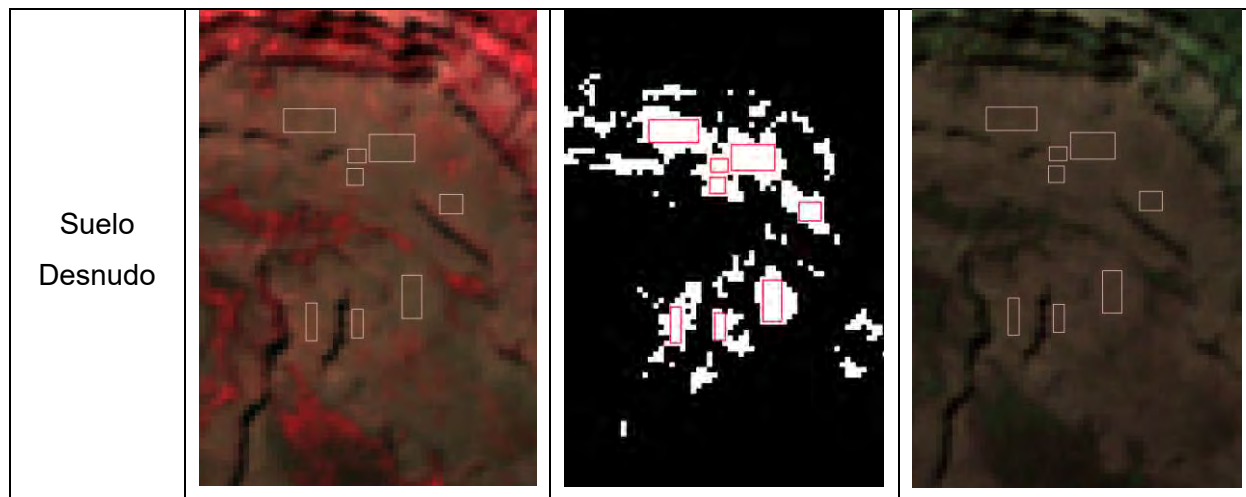
Fuente: Elaboración Propia

Simultáneamente, se extraen polígonos representativos exportados a formato Shapefile para cada clase, los cuales se distribuyen en la zona de estudio y se definen como zonas de entrenamiento, tal como se aprecia en la Figura (21). Estas zonas de entrenamiento se utilizarán de manera crucial en la fase de clasificación supervisada de cada una de las imágenes de radar provenientes del Sentinel-1B. Este enfoque garantiza una base robusta y precisa para el proceso de clasificación, optimizando así la interpretación de las características de interés en la región de estudio.

Figura 21

Mapa - Zonas de Entrenamiento dentro del Área de Estudio.

Cobertura	Falso Color (8,4,3)	Máscaras	Color Natural (4,3,2)
Vegetación Nativa	 False color satellite image showing native vegetation training zones. The image is dominated by red and dark red tones. Several rectangular training zones are outlined in green.		
Bosques	 False color satellite image showing forest training zones. The image is dominated by red and dark red tones. Several rectangular training zones are outlined in cyan.		
Pastoreo	 False color satellite image showing pasture training zones. The image is dominated by red and dark red tones. Several rectangular training zones are outlined in yellow.		



Fuente: Elaboración Propia

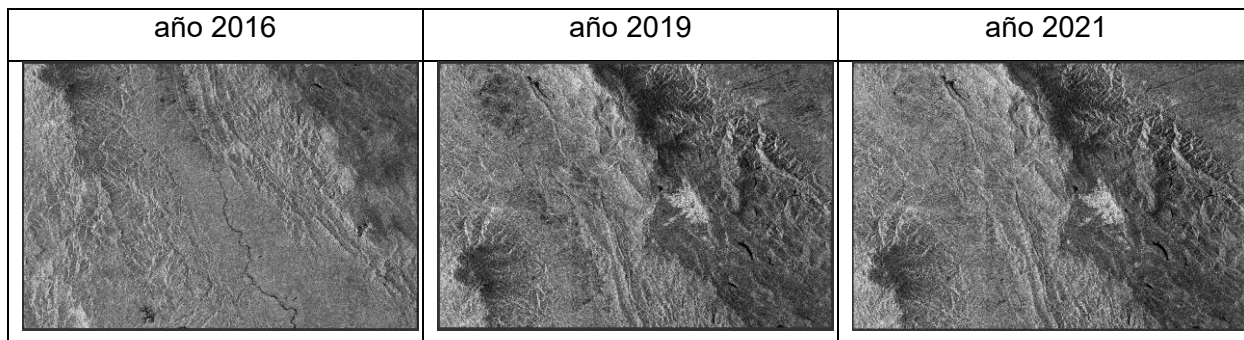
8.1.6 Preprocesamiento de las Imágenes de Radar Sentinel-1B

La interpretación de las imágenes del radar Sentinel-1B presenta una complejidad superior en comparación con las imágenes satelitales ópticas. Esto se debe, en gran medida, a la presencia de ruido, también conocido como el Efecto de Moteado, que añade una capa adicional de complejidad. A diferencia de las imágenes ópticas, la interpretación de las imágenes de radar no es tan directa, ya que lo que se presenta en la imagen de radar no es fácilmente interpretable a primera vista, requiriendo correcciones específicas según el tipo de imagen a procesar.

Es esencial tener en cuenta las diferencias fundamentales entre las imágenes ópticas y las de radar en términos de longitud de onda. Mientras que la imagen óptica utiliza diferentes longitudes de onda que permiten la combinación de bandas para visualizar la escena, el radar presenta las imágenes en blanco, negro y escala de grises, ver Figura (22), utilizando una sola longitud de onda electromagnética.

Figura 22

Imágenes de Radar Sentinel-1B

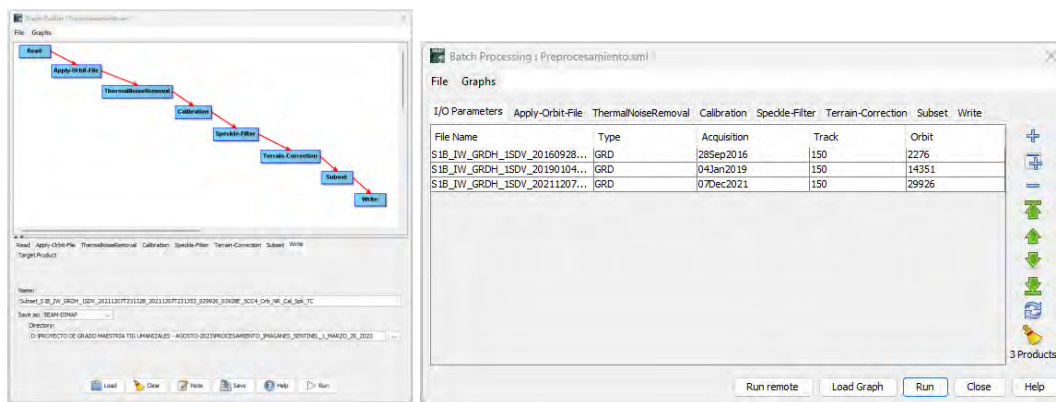


Fuente: Elaboración Propia

El siguiente paso tras la adquisición de las imágenes de radar de los años 2016, 2019 y 2021, es someterlas a un preprocesamiento de corrección y mejora para contribuir así a una interpretación más precisa y detallada de la cobertura terrestre. En este sentido, el Software SNAP desempeña un papel crucial al proporcionar herramientas avanzadas para el procesamiento de imágenes de radar. Este software, a través de la herramienta Graph Builder, ver Figura (23), se automatizaron los procesos de corrección de las imágenes de radar.

Figura 23

Modelo Graph Builder – preprocesamiento de imágenes Sentinel-1B



Fuente: Elaboración Propia

Como se aprecia en la figura anterior, el preprocesamiento inicia con la aplicación del archivo de órbita (Apply-Orbit-File), el cual descarga automáticamente las órbitas desde el portal de la Agencia Espacial Europea y las integra en cada imagen de Sentinel-1B. A continuación, el Thermal Noise Removal (TNR) entra en acción, eliminando el ruido térmico no deseado originado por la electrónica del sistema de radar, lo que contribuye significativamente a mejorar la calidad de la imagen. Posteriormente, el siguiente paso es la calibración (Calibration), que transforma los Niveles Digitales (DN) de cada imagen en valores radiométricamente calibrados, expresados en unidades de retrodispersión Sigma Nought (σ_0).

En cuanto a la aplicación de la herramienta Speckle Filter en este modelo, de acuerdo con lo mencionado por Abarca, et al., (2023) “Uno de los mejores filtros de calibración para reducción del ruido Speckle es el filtro Lee Sigma”.

Por otro lado, Jara Santillán (2022) ilustra lo siguiente:

Las imágenes SAR tienen un efecto inherente de sal y pimienta llamado “speckle”, el cual degrada la calidad de la imagen, dificultando su interpretación. Para reducir este efecto y suavizar la imagen, se aplica un filtro Lee Sigma de speckle con el operador “Speckle-Filter” (p. 49).

Por consiguiente, en este proyecto, como primer parámetro para el Speckle se aplicó el filtro Lee Sigma, reduciendo el efecto de moteado o ruido granular de cada una de las imágenes. Adicionalmente, se introduce un segundo parámetro dentro del mismo proceso, aplicando diferentes tamaños de ventana (5x5 y 7x7 píxeles) para cada una de las 3 imágenes de radar de este proyecto. Este enfoque genera un suavizado de cada imagen, preservando los detalles y la estructura de cada una de estas, aunque se pierde resolución de la imagen. El manejo de este equilibrio entre detalles y eliminación del ruido de la imagen SAR es crucial. Cabe precisar que el filtrado Speckle no es una ciencia exacta, ya que depende de la imagen y del objetivo.

Por consiguiente, se procesa la imagen de radar con la herramienta Terrain Correction, permitiendo realizar la corrección geométrica de las imágenes debido a la distorsión presentada en el momento de la captura de la señal de la superficie. La topografía afecta la trayectoria de las ondas que captura el satélite. Para dicha corrección, el Software SNAP utiliza un modelo de elevación digital (Copernicus 30M Global DEM).

El último paso consiste en el recorte (Subset) de cada imagen, definiendo el área de influencia correspondiente a la zona de estudio mediante las siguientes coordenadas:

(MULTIPOLYGON (-75.4504636778304 5.05354615589492, -75.2402953341081 5.05365806496634, -75.2402099666651 4.81630191319003, -75.4501565111625 4.81619538199698, -75.4504636778304 5.05354615589492)).

8.1.6.1 Clasificación Supervisada de las Imágenes SAR. Una vez completada la fase anterior, se procede a convertir las bandas $\text{Sigma}\sigma_{\text{VH}}$ y $\text{Sigma}\sigma_{\text{VV}}$ de valores de retrodispersión lineal a valores de retrodispersión en decibelios, generando las bandas virtuales $\text{Sigma}\sigma_{\text{VH_db}}$ y $\text{Sigma}\sigma_{\text{VV_dB}}$, respectivamente.

Por lo tanto, la conversión a escala logarítmica en decibelios facilita la visualización y el análisis de los datos, destacando las diferencias sutiles en los valores de retrodispersión para identificar cambios en la cobertura del suelo y otros elementos en la escena, además de contribuir a la reducción del ruido en los datos de retrodispersión.

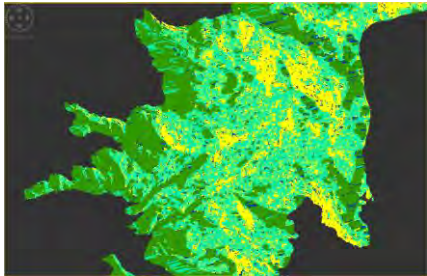

Durante esta fase, se realizaron ajustes específicos, tales como la selección de bandas de polarización (VV, VH) con tamaños de ventana de 5X5 y 7X7. Seguidamente, se analizaron los histogramas de cada una de las bandas de polarización generadas para cada una de las 3 imágenes de radar del año 2016, 2019 y 2021, evaluando la distribución de los valores de retrodispersión.

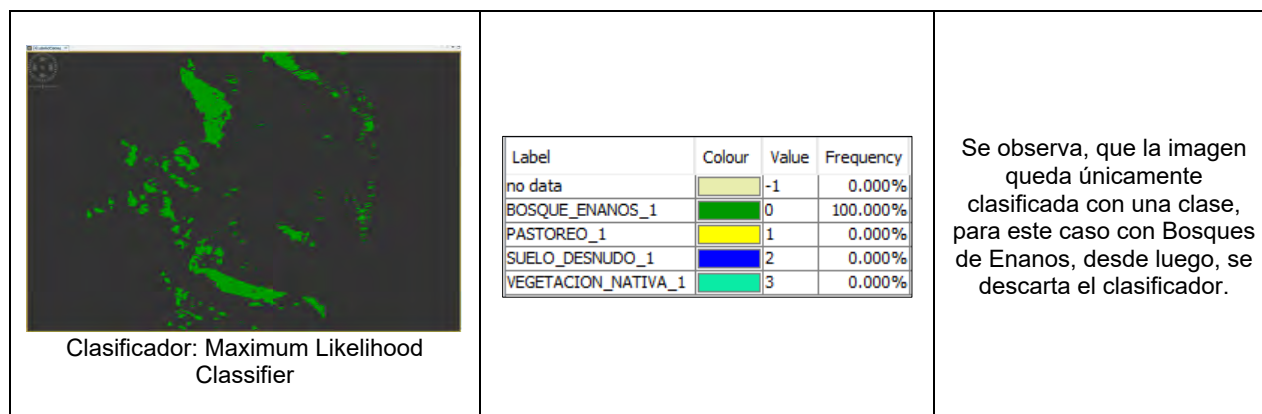
Por consiguiente, Se realizó la clasificación supervisada de las imágenes preprocesadas utilizando la metodología KNN (K Nearest Neighbor). El cual permitió llevar a cabo 18 procesos de clasificación supervisada.

Esta metodología se priorizó, debido a que previamente se realizó un ejercicio de comparación con 3 clasificadores, tomando una muestra de una de las imágenes de radar como se describe en la siguiente Tabla No. (5)

Tabla 5

Comparación Metodología de Clasificación supervisada

Imagen clasificada	Frecuencia de Distribución de Pixeles	Observaciones																								
 <p data-bbox="277 1186 573 1213">Clasificador: KNN Classifier</p>	<table border="1" data-bbox="678 982 1089 1142"> <thead> <tr> <th>Label</th> <th>Colour</th> <th>Value</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>no data</td> <td></td> <td>-1</td> <td>0.000%</td> </tr> <tr> <td>BOSQUE_ENANOS_1</td> <td>Green</td> <td>0</td> <td>33.131%</td> </tr> <tr> <td>PASTOREO_1</td> <td>Yellow</td> <td>1</td> <td>25.510%</td> </tr> <tr> <td>SUELO_DESNUDO_1</td> <td>Blue</td> <td>2</td> <td>4.369%</td> </tr> <tr> <td>VEGETACION_NATIVA_1</td> <td>Cyan</td> <td>3</td> <td>36.990%</td> </tr> </tbody> </table>	Label	Colour	Value	Frequency	no data		-1	0.000%	BOSQUE_ENANOS_1	Green	0	33.131%	PASTOREO_1	Yellow	1	25.510%	SUELO_DESNUDO_1	Blue	2	4.369%	VEGETACION_NATIVA_1	Cyan	3	36.990%	<p data-bbox="1128 953 1432 1171">Se observa entonces, que la dispersión de las clases en la imagen ráster clasificada es más coherente comparado con la imagen óptica Sentinel 2, para lo cual, este clasificador cumple con el propósito.</p>
Label	Colour	Value	Frequency																							
no data		-1	0.000%																							
BOSQUE_ENANOS_1	Green	0	33.131%																							
PASTOREO_1	Yellow	1	25.510%																							
SUELO_DESNUDO_1	Blue	2	4.369%																							
VEGETACION_NATIVA_1	Cyan	3	36.990%																							
 <p data-bbox="220 1528 628 1556">Clasificador: Random Forest Classifier</p>	<table border="1" data-bbox="678 1325 1089 1484"> <thead> <tr> <th>Label</th> <th>Colour</th> <th>Value</th> <th>Frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>no data</td> <td></td> <td>-1</td> <td>0.000%</td> </tr> <tr> <td>BOSQUE_ENANOS_1</td> <td>Green</td> <td>0</td> <td>32.120%</td> </tr> <tr> <td>PASTOREO_1</td> <td>Yellow</td> <td>1</td> <td>22.082%</td> </tr> <tr> <td>SUELO_DESNUDO_1</td> <td>Blue</td> <td>2</td> <td>13.848%</td> </tr> <tr> <td>VEGETACION_NATIVA_1</td> <td>Cyan</td> <td>3</td> <td>31.950%</td> </tr> </tbody> </table>	Label	Colour	Value	Frequency	no data		-1	0.000%	BOSQUE_ENANOS_1	Green	0	32.120%	PASTOREO_1	Yellow	1	22.082%	SUELO_DESNUDO_1	Blue	2	13.848%	VEGETACION_NATIVA_1	Cyan	3	31.950%	<p data-bbox="1128 1247 1432 1570">Se observa, que la imagen clasificada genera una mayor dispersión de los píxeles no siendo coherente, una vez comparado con la imagen óptica Sentinel 2. Muestra de ello, es la clase de suelo desnudo, se encuentra disperso de manera granular en toda la imagen. Por lo tanto, se descarta el clasificador.</p>
Label	Colour	Value	Frequency																							
no data		-1	0.000%																							
BOSQUE_ENANOS_1	Green	0	32.120%																							
PASTOREO_1	Yellow	1	22.082%																							
SUELO_DESNUDO_1	Blue	2	13.848%																							
VEGETACION_NATIVA_1	Cyan	3	31.950%																							



Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la técnica de aprendizaje supervisado, este busca clasificar los píxeles de una imagen SAR en diferentes clases, basándose en la premisa de que los píxeles cercanos en el espacio y que cumplan con las condiciones del algoritmo, tendrán etiquetas similares. Por lo tanto, en este proyecto, se aplicó el algoritmo KNN a través del software SNAP para clasificar los píxeles de las bandas de polarización preprocesadas. Estas bandas se describen en la Tabla (6) correspondiente a las imágenes de radar de los años 2016, 2019 y 2021.

Tabla 6

Lista de Bandas de Polarización preprocesadas

BANDAS DE POLARIZACIÓN PREPROCESADAS
S1B_2016_VH_7X7_Stack_dB
S1B_2016_VH_5X5_Stack_dB
S1B_2016_VV_5X5_Stack_dB
S1B_2016_VV_7X7_Stack_dB
S1B_2019_VH_5X5_Stack_dB
S1B_2019_VH_7X7_Stack_dB
S1B_2019_VV_7X7_Stack_dB
S1B_2019_VV_5X5_Stack_dB
S1B_2021_VH_5X5_Stack_dB
S1B_2021_VV_7X7_Stack_dB
S1B_2021_VH_7X7_Stack_dB

BANDAS DE POLARIZACIÓN PREPROCESADAS
S1B_2021_VV_5X5_Stack_dB
S1B_2016_VH_VV_5X5_Stack_dB
S1B_2016_VH_VV_7X7_Stack_dB
S1B_2019_VH_VV_5X5_Stack_dB
S1B_2019_VH_VV_7X7_Stack_dB
S1B_2021_VH_VV_5X5_Stack_dB
S1B_2021_VH_VV_7X7_Stack_dB

Fuente: Elaboración Propia

En consonancia con lo expuesto, Para llevar a cabo la clasificación, se siguieron los siguientes pasos:

Definición del conjunto de datos de entrenamiento que contiene patrones con etiquetas de clases conocidas.

Se seleccionaron bandas de polarización en decibelios VV y VH para cada imagen, así como la combinación de ambas (VV+VH) en una sola banda.

Elección del valor K (número de vecinos más cercanos) para la clasificación supervisada, es fundamental para determinar el número de vecinos más cercanos que el modelo utilizará en la toma de decisiones de clasificación. En este caso, se estableció el valor de 25 para cada imagen de radar correspondiente a los periodos 2016, 2019 y 2021. Es necesario resaltar que el valor de K debe ser impar y su selección puede influir en la efectividad de la clasificación. La elección específica de K dependerá de las características de la zona, ya sea homogénea o heterogénea. En este proyecto, la visita de campo reveló que las clases en las fronteras, como la vegetación nativa (pajonales, frailejones, entre otros), bosque de enanos, suelo desnudo y pastoreo, presentan heterogeneidad. Por ende, se sugiere el uso de valores pequeños para K. Sin embargo, las clases en la zona de estudio exhiben una gran extensión de área, por lo que se consideran homogéneas, recomendando un valor de K mayor a 13 para suavizar la clasificación supervisada y evitar la dispersión de valores.

La herramienta KNN Classifier ver Figura (24) del software SNAP (Sentinel Application Platform) ejecuta la siguiente Ecuación (1) para calcular la distancia euclidiana entre dos puntos en un espacio n-dimensional.

Dicha ecuación es descrita de una mejor manera por Torres, D. F. M. et al., (2022).

$$D(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}$$

Ecuación 1. Distancia Euclidiana (p. 64)

Donde:

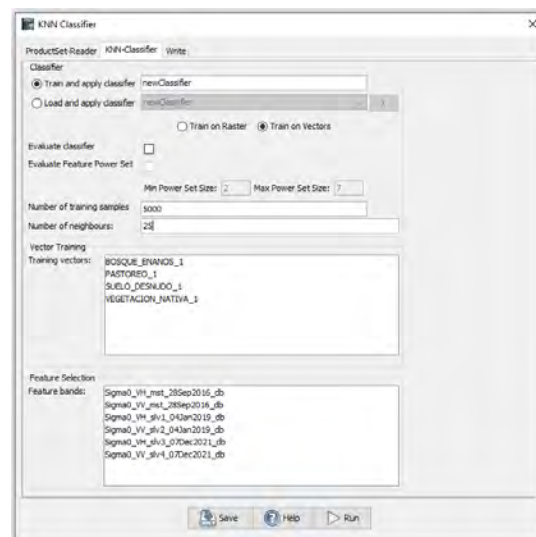
p y q son puntos en el espacio n-dimensional.

p_n y q_n son las coordenadas del punto p y q en la dimensión n

n es la cantidad de dimensiones en el espacio

Figura 24

Clasificador KNN Classifier (K-Nearest Neighbors Classifier).



Fuente: Elaboración Propia

8.1.7 Validación de los resultados

Para el proceso de la Validación de los Resultados se procede con los siguientes pasos:

8.1.7.1 Cálculo de la muestra y georreferenciación de puntos de control. De los resultados obtenidos a través de la clasificación supervisada, se procede a verificar la fiabilidad de las 18 ráster procesados y clasificados, por el cual se llevó a cabo un procedimiento de verificación aleatoria de los píxeles clasificados, donde cada ráster resultante, cuenta con alrededor de 6 millones de píxeles, y, mediante el uso de la siguiente Ecuación (2),

$$n = \frac{N\sigma^2Z^2}{(N-1)e^2 + \sigma^2Z^2}$$

Ecuación 2. Fórmula para calcular tamaño de muestra para variables cuantitativas

Donde:

n es el tamaño de la muestra requerida. El valor por buscar.

N es el tamaño de la Población. En este caso del proyecto, seis (6) millones de píxeles.

σ es la varianza de la población. Generalmente cuando no se tiene su valor, se utiliza un valor constante de 0,5.

Z es el valor crítico de la distribución normal estándar para un nivel de confianza. En este caso del proyecto, el 95% (1.96)

e es el límite aceptable de error muestral. En este caso el 5%

Por ende, se determinó un tamaño de muestra de 384, lo que llevó a establecer un número redondeado de 400 puntos muestreables para la georreferenciación en la imagen óptica Sentinel-2A (Color Verdadero), clasificados como pastoreo, sueldo desnudo, vegetación nativa de acuerdo con el conocimiento previo que se tiene de la zona.

Este etiquetado se realizó utilizando la herramienta Pin Placing Tool del software SNAP, el cual permite asignar manualmente puntos de control en la imagen óptica representativos de

las diversas categorías de interés el cual sirven para señalar aleatoriamente las muestras de forma manual en la imagen óptica, asignando para cada clase un número determinado de puntos de control así: Pastoreo (113), Bosque Enanos (139), Suelo desnudo (20) y Vegetación Nativa (128), facilitando así la comparación visual con la imagen ráster clasificada. Este método garantiza una selección aleatoria y representativa de las muestras, contribuyendo a una evaluación robusta de la precisión del modelo de clasificación.

8.1.7.2 Matriz de Confusión. La Matriz de Confusión será utilizada como herramienta principal para la evaluación cuantitativa de la clasificación. Esta matriz proporciona una comparación detallada entre las clases asignadas y las clases reales, permitiendo la identificación de los aciertos y errores de la clasificación a través de los 400 puntos de muestreo.

8.1.7.3 índice Kappa. El Índice Kappa (κ) se empleará como una métrica estadística para evaluar la concordancia entre las clasificaciones reales y las asignadas, considerando la posibilidad de aciertos aleatorios de los 400 puntos de muestreo. La fórmula del Índice Kappa se expresa en la siguiente manera, ver Ecuación (3):

$$K = \frac{P(a) - P(e)}{1 - P(e)}$$

Ecuación 3. Fórmula para hallar el índice Kappa

Donde:

K El índice Kappa

P(a) se calcula como la suma de las diagonales de la matriz de confusión dividida por el total de observaciones.

P(e) se calcula como la suma de los productos marginales de las filas y las columnas, dividida por el cuadrado del total de observaciones.

Este índice será calculado para cada clase temática, brindando así una evaluación detallada de la precisión de la clasificación, el cual busca la concordancia entre los valores del mapa y la realidad del terreno, en la siguiente Tabla (7), se puede interpretar el resultado de dicha medida.

Tabla 7

Medida Índice Kappa

CALIDAD	MEDIDA Kappa
<i>Pésima</i>	≤ 0.00
<i>Mala</i>	0.00 – 0.20
<i>Razonable</i>	0.20 – 0.40
<i>Buena</i>	0.40 – 0.60
<i>Muy buena</i>	0.60 – 0.80
<i>Excelente</i>	0.80 – 1.00

Fuente: Landis & Koch, 1977.

8.1.8 Análisis de Correlación de Pearson para la Interpretación de Resultados.

La Correlación de Pearson (r) se utilizará para evaluar la fuerza y dirección de la relación lineal entre las áreas ha. de las clases de la superficie resultantes del procesamiento de clasificación supervisada. Este proceso se realiza una vez se hayan escogido de las 18 imágenes ráster procesadas, 3 imágenes ráster cuya índice kappa tiene un mayor valor para cada año.

El coeficiente de correlación de Pearson cuya fórmula se presenta en la Ecuación (4), es una medida estadística que cuantifica la relación lineal entre dos variables y varía entre -1 y 1. Un valor de 1 indica una correlación positiva perfecta, -1 indica una correlación negativa perfecta, y 0 indica una falta de correlación.

$$r = \frac{(\sum((X - \bar{X})(Y - \bar{Y})))}{\sqrt{(\sum(X - \bar{X})^2)}\sqrt{\sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

Ecuación 4. Fórmula Correlación de Pearson

Donde:

r Representa el coeficiente de correlación de Pearson, cuyo valor oscila entre -1 y 1.

Σ Representa la sumatoria, que indica la suma de todos los valores para un determinado cálculo.

X Representa un valor individual de la variable X para cada dato.

Y Representa un valor individual de la variable Y para cada dato.

\bar{X} Representa la media (promedio) de todos los valores de la variable X.

\bar{Y} Representa la media (promedio) de todos los valores de la variable Y

8.1.9 Operacionalización de Variables.

En este punto, se retoma los objetivos y sus variables ver Tabla (8). Denotando el comportamiento de los objetivos planteados.

Tabla 8

Operaciones de Variables

Objetivo General: Analizar multitemporalmente la cobertura de la vegetación del páramo del Parque Natural de los Nevados mediante imágenes de Radar Sentinel-1B; en los periodos 2016, 2019 y 2021, jurisdicción del municipio de Villamaría- Caldas.					
Objetivos Específicos	Variable	Dimensión	Indicadores	Tipo de Variable	Definición
Caracterizar el suelo de la zona de estudio apoyado mediante imágenes ópticas Sentinel 2A.	<ul style="list-style-type: none"> Imagen óptica Sentinel 2A 	Ambiental	Número de coberturas Caracterizadas	Independiente	Se va a generar zonas de entrenamiento de cada una de las coberturas del suelo dentro de la

					imagen Sentinel 2A.
Aplicar el método de clasificación supervisada KD K-Nearest Neighbors Classifier a las imágenes de radar SAR- Sentinel 1B periodo 2016, 2019 y 2021 mediante software SNAP, teniendo en cuenta las coberturas identificadas en el área de estudio	<ul style="list-style-type: none"> • Imágenes de Radar Sentinel 1B, de los años 2016, 2019 y 2021. 	Ambiental	Número de coberturas clasificadas	Independiente	Se va a clasificar de manera supervisada cada una de las coberturas del suelo dentro de las imágenes de radar Sentinel 1B.
Realizar comparación de los resultados obtenidos para cada imagen de radar Sentinel 1B. Mediante el método de correlación de Pearson	<ul style="list-style-type: none"> • Pastoreo • Vegetación Nativa • Suelo Desnudo • Bosques Enanos 	Ambiental	Correlacionar las áreas de cada clase de los años 2016, 2019 y 2021 mediante el coeficiente de correlación de Pearson	Dependiente	Con el análisis multitemporal de las áreas de las tres imágenes se determina la variación de las clases, y con el método de Pearson el grado de correlación entre las mismas.

Fuente: Elaboración Propia

9. Resultados.

Los resultados del análisis multitemporal de la cobertura del suelo en el Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados ofrecen una visión esclarecedora de las transformaciones en este ecosistema crucial. A través de la evaluación de imágenes de radar Sentinel-1B, capturadas en los años 2016, 2019 y 2021 con polarización VV, VH, se han identificado cambios significativos en las distintas clases de cobertura del suelo. Estos hallazgos son fundamentales para comprender la dinámica de la cobertura en áreas específicas del PNN Los Nevados y para evaluar si ha habido incrementos o decrementos en dicha cobertura.

9.1 Caracterización del Suelo de la Zona de Estudio Mediante el Respaldo de Imágenes Ópticas.

Con el propósito de cumplir con este objetivo, se destacó la identificación de las diferentes clases de vegetación autóctona. A través del análisis de la imagen óptica, el cual se llevó a cabo una detallada clasificación que incluyó suelos desnudos, vegetación nativa como: frailejones y pajonales; bosques de enanos; así como vastas zonas de pastoreo que afectan la vegetación del páramo. Ahora, estos resultados no solo brindan una comprensión más profunda del entorno ambiental, sino que también permiten contextualizar de manera precisa los cambios observados en la cobertura del suelo, proporcionando información valiosa para la interpretación de los resultados obtenidos.

Por consiguiente, se definió con precisión la Zona de Estudio, ubicada en el PNN Los Nevados, específicamente en el sector Municipio de Villamaría del Departamento de Caldas, con altitudes que oscilan entre los 3.600 y 4.100 metros sobre el nivel del mar. Esta área abarca una extensión de 8.044,87 hectáreas, lo que corresponde al 6,04% del total del PNN.

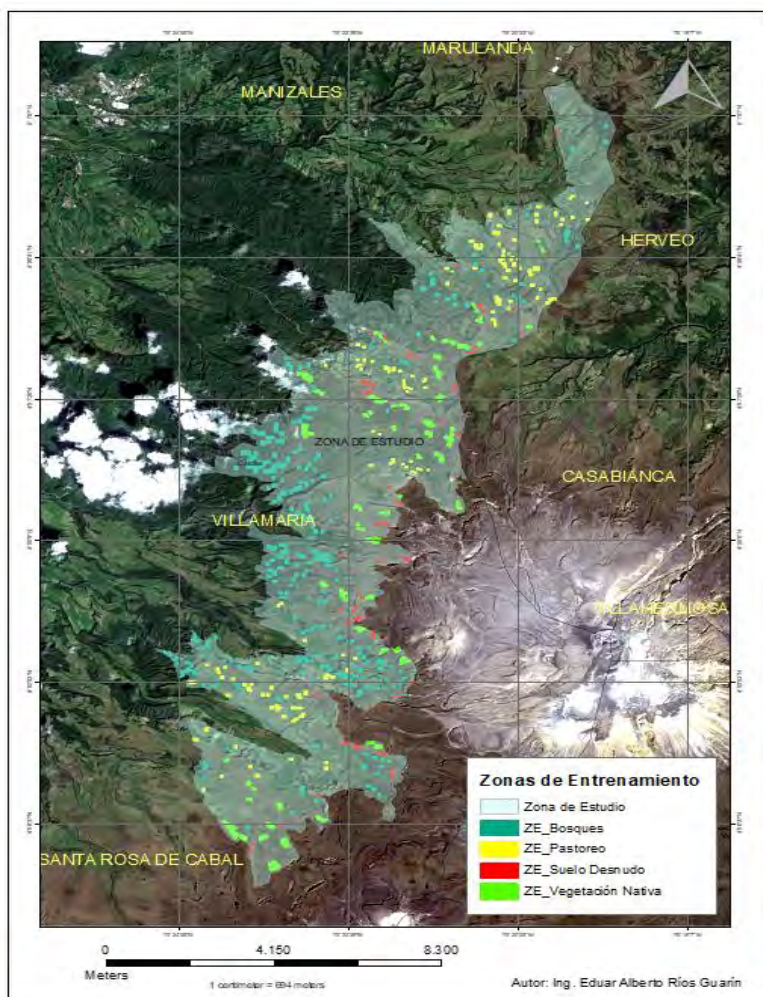
Esta delimitación proporciona un marco espacial claro para la interpretación y análisis de los resultados.

9.1.1 Definición de las Zonas de Entrenamiento.

Adicionalmente, se logró una precisa identificación de las características del terreno y la delimitación de áreas de interés en el PNN Los Nevados a través del análisis de la imagen satelital del sensor Sentinel Sentinel-2A del año 2020. En cuanto a esta imagen óptica es seleccionada cuidadosamente por su importancia como apoyo para la clasificación de las coberturas con las imágenes de radar. Por lo tanto, se tomó en cuenta para su uso, el bajo porcentaje de nubosidad, el cual garantizó la claridad y precisión de la información capturada. Seguidamente, la aplicación de expresiones lógicas permitió generar máscaras que representan distintas clases de cobertura del suelo, tales como: vegetación nativa, bosques de enanos, áreas de pastoreo y suelo desnudo. Además, estas geometrías vectoriales fueron cruciales para la posterior evaluación y análisis de los datos obtenidos en este estudio. La Figura (25) muestra el mapa resultante con las zonas de entrenamiento dentro del área de estudio.

Figura 25

Mapa - Zonas de Entrenamiento dentro del Área de Estudio



Fuente: Elaboración Propia

9.1.2 Aplicación del método de clasificación supervisada KNN

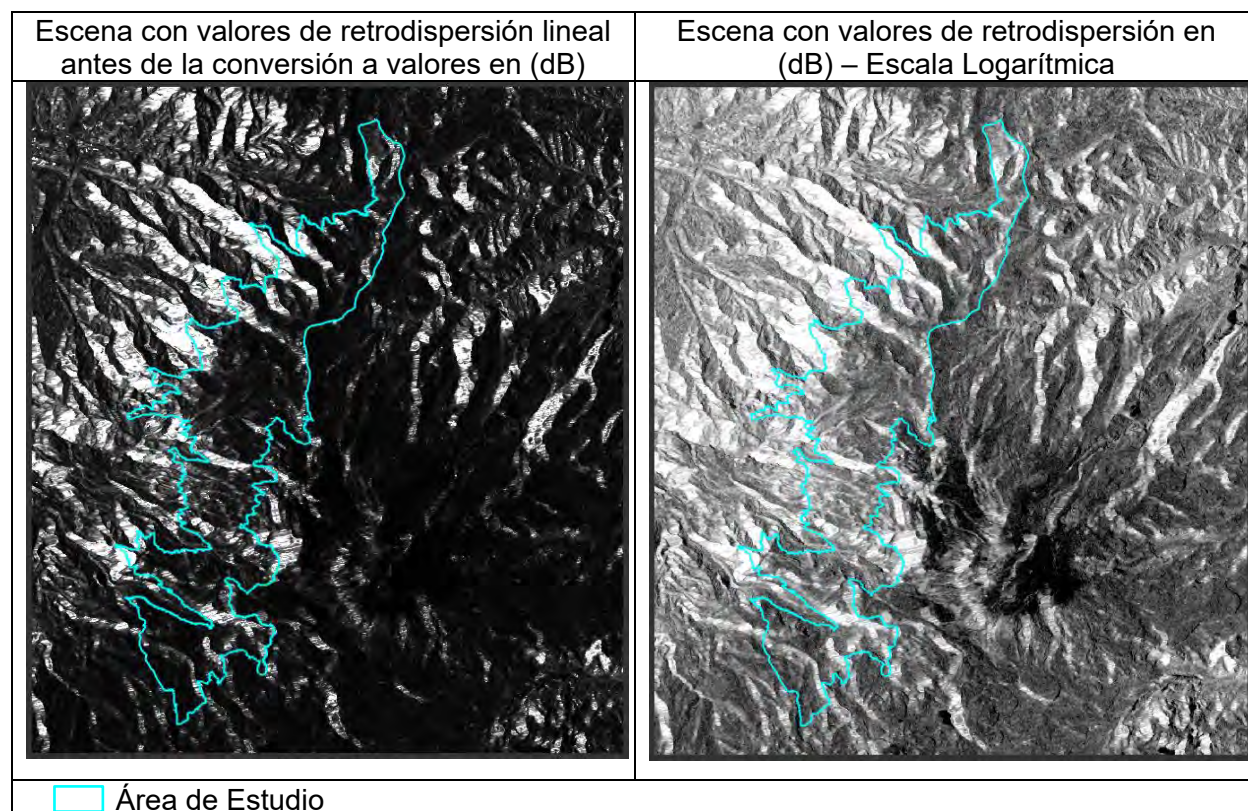
El preprocesamiento de las imágenes de radar Sentinel-1B de los años 2016, 2019 y 2021 fue esencial para mejorar la calidad de los datos y aumentar su utilidad en el análisis de la cobertura del suelo.

En efecto, la conversión de las bandas de polarización VV y VH de retrodispersión lineal a valores en decibelios (dB) a una escala logarítmica, realizada como parte del

preprocesamiento, fue un paso fundamental que mejoró significativamente la calidad de los datos, lo cual se evidencia claramente en la Figura (26).

Figura 26

Imágenes - Conversión de retrodispersión lineal a valores en retrodispersión en dB



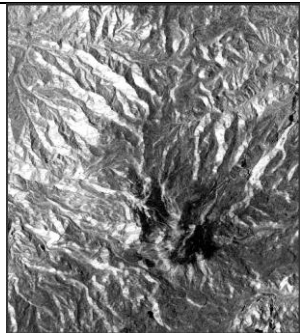
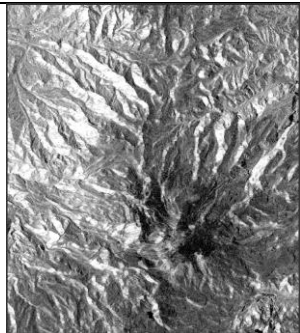

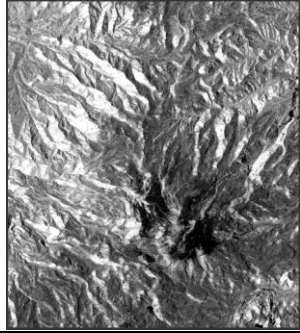
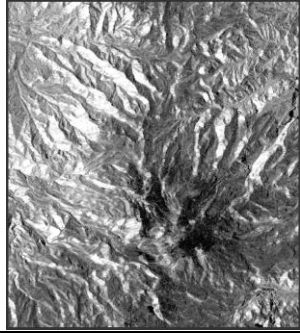
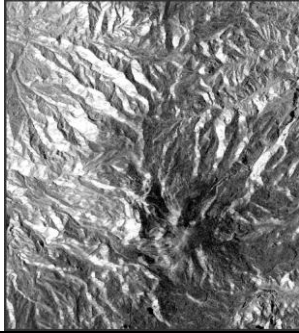
Fuente: Elaboración Propia

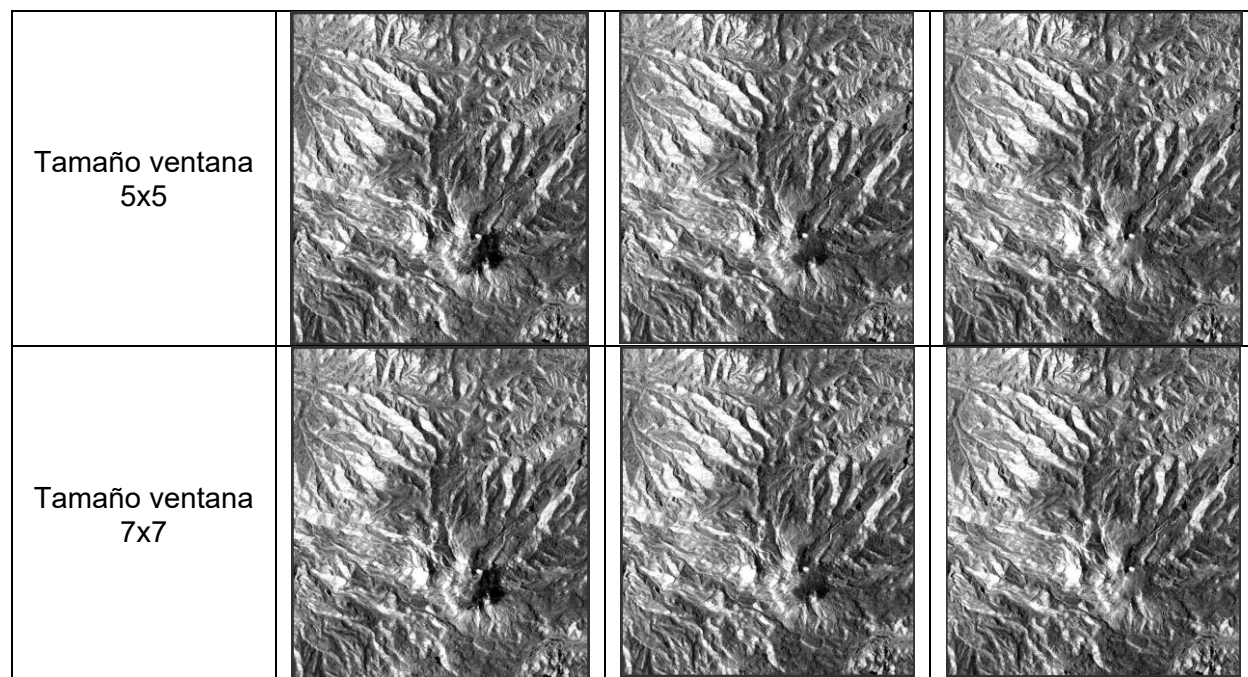
En consecuencia, en los resultados de la conversión de las bandas de polarización a valores de retrodispersión en dB, se observan cambios significativos en la calidad de las imágenes resultantes. La aplicación de los tamaños de ventana 5x5 y 7x7 en el proceso de reducción del ruido Speckle ha contribuido notablemente a la mejora de los detalles y la precisión de los datos; o sea, esto refleja claramente que en las escenas obtenidas para los

años 2016, 2019 y 2021 ver Figura (27), se aprecia una reducción significativa del ruido y una mayor nitidez en las características del terreno.

Figura 27

Imágenes de Retrodispersión en Decibelios tras Conversión de las Bandas de Polarización VV, VH.

Imágenes de Radar – Polarización VH			
Característica Reducción Speckle	Año 2016	Año 2019	Año 2021
Tamaño ventana 5x5			
Tamaño ventana 7x7			
Imágenes de Radar – Polarización VV			
Característica Reducción Speckle	Año 2016	Año 2019	Año 2021

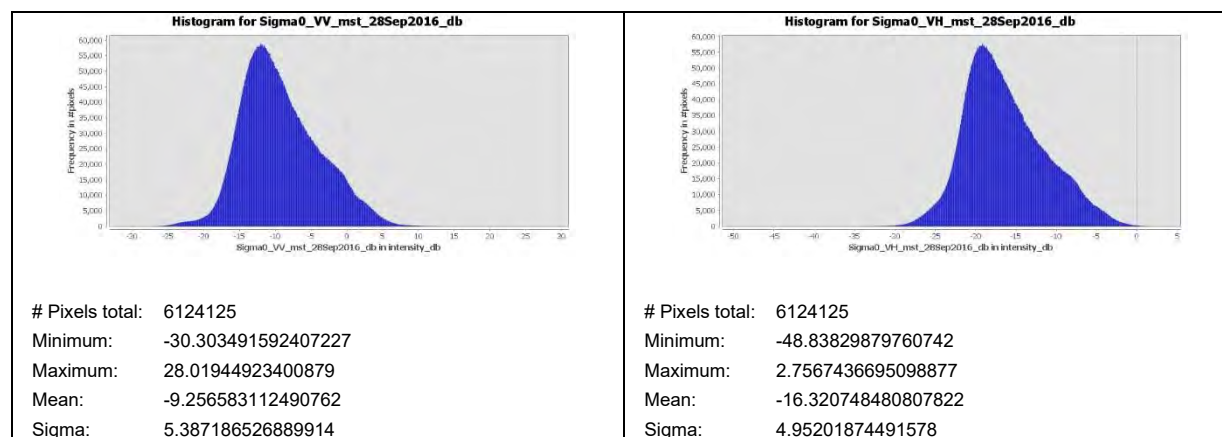


Fuente: Elaboración Propia

Por consiguiente, en el proceso comparativo con relación a la polarización VV y VH ventanas 5x5 y 7x7 valores en (dB), de cada imagen del mismo año ver Figuras (28 al 33), se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 28

Histogramas Imagen de Radar año 2016 - Ventana 5x5 del Procesado Speckle



Median: -10.053447216171772	Median: -17.07151496001001
Coef Variation: -0.5819843047476954	Coef Variation: -0.30341858073819183

Figura 29

Histogramas Imagen de Radar año 2016 - Ventana 7x7 del Procesado Speckle

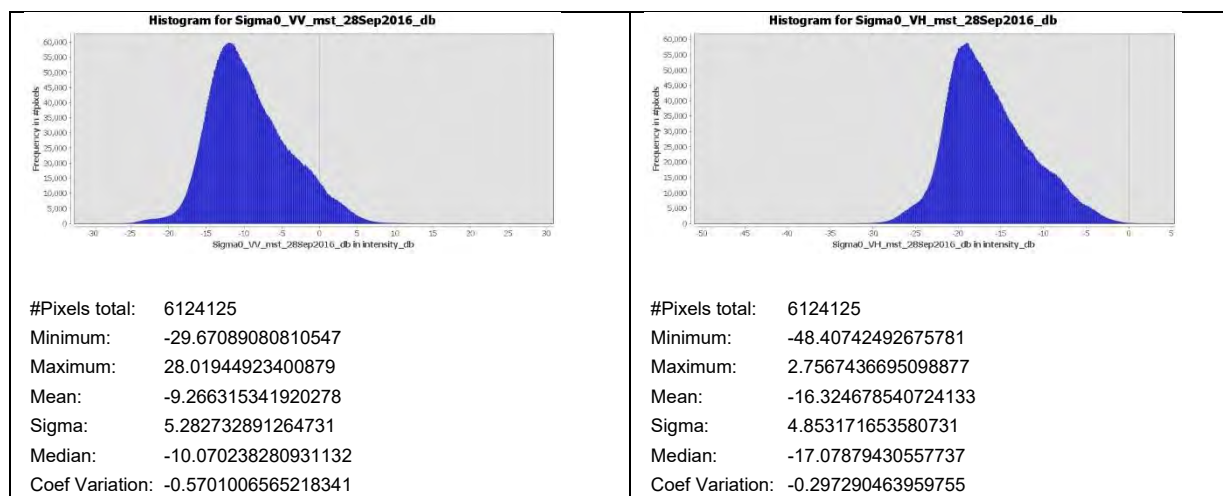


Figura 30

Histogramas Imagen de Radar año 2019 - Ventana 5x5 del Procesado Speckle

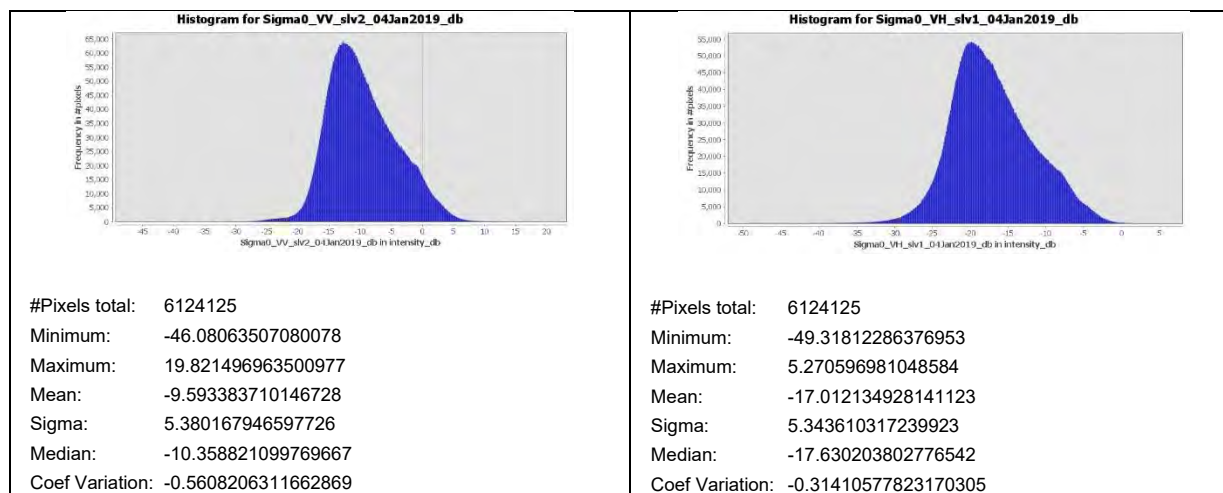


Figura 31

Histogramas Imagen de Radar año 2019 - Ventana 7x7 del Procesado Speckle

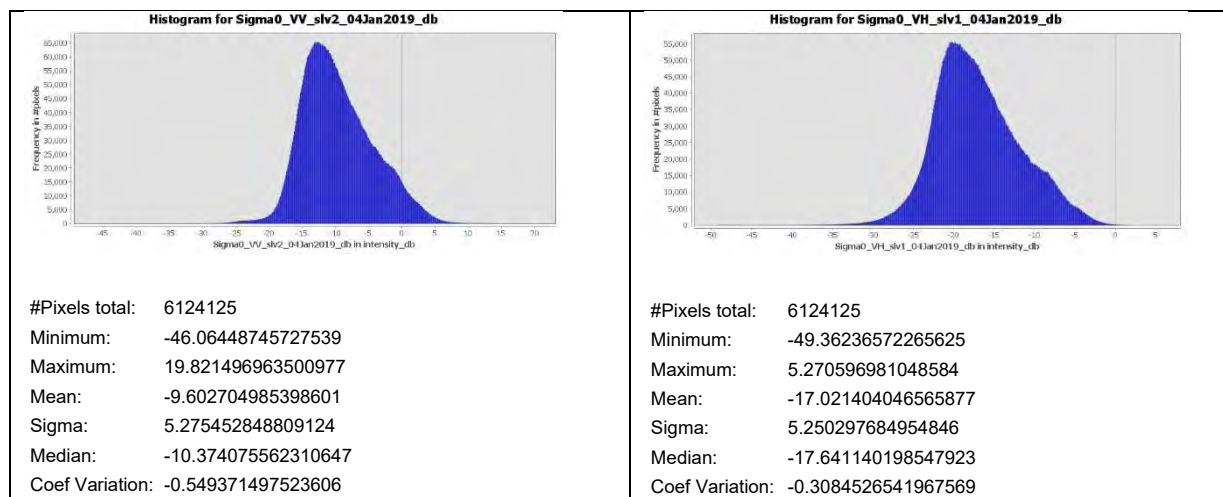


Figura 32

Histogramas Imagen de Radar año 2021 - Ventana 5x5 del Procesado Speckle

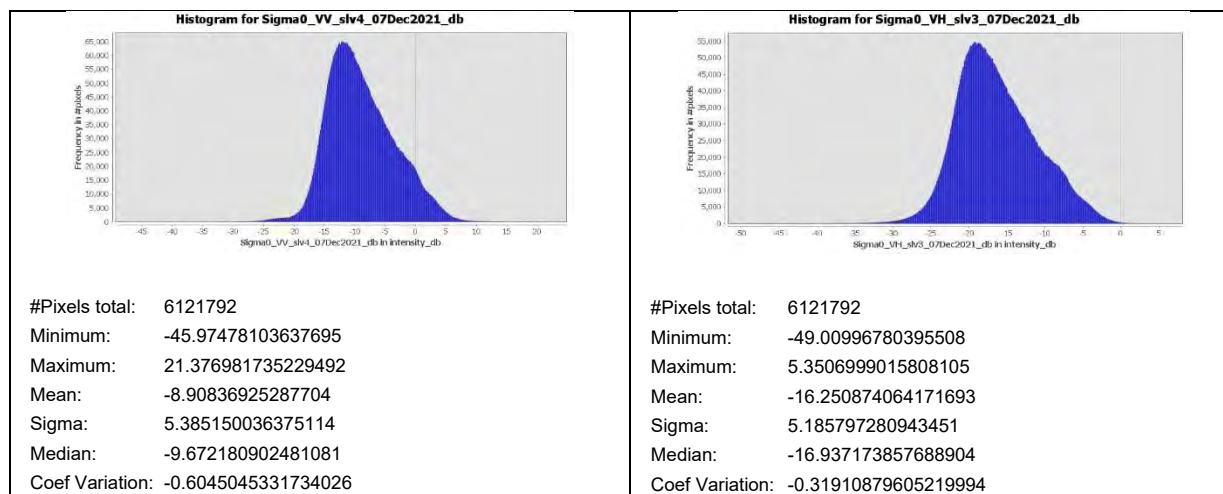
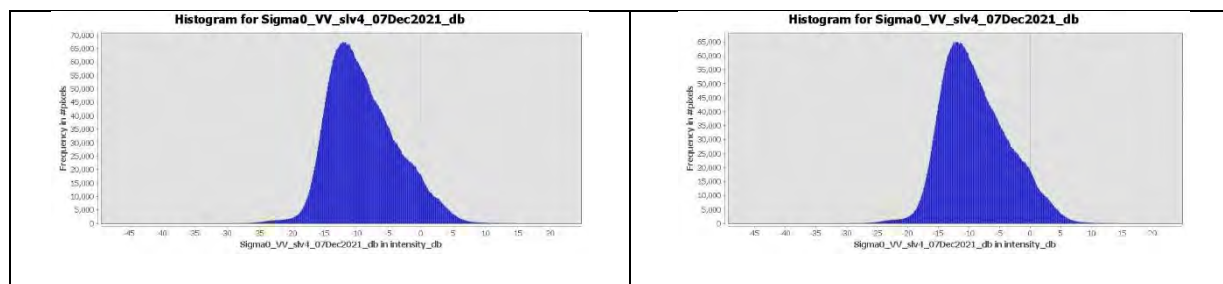


Figura 33

Histogramas Imagen de Radar año 2021 - Ventana 7x7 del Procesado Speckle



#Pixels total:	6121792	#Pixels total:	6121792
Minimum:	-46.107452392578125	Minimum:	-49.04764175415039
Maximum:	21.376981735229492	Maximum:	5.3506999015808105
Mean:	-8.918311628162364	Mean:	-16.258691820312908
Sigma:	5.28095789058091	Sigma:	5.090977000846991
Median:	-9.733342397689817	Median:	-16.952620177268983
Coef Variation:	-0.5921476709321206	Coef Variation:	-0.3131233829465994

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de los resultados de los histogramas, se observa una variabilidad significativa en los valores de retrodispersión entre los diferentes años y ventanas de procesamiento. Si bien hay valores altos de retrodispersión en la banda VV y bajos valores en la banda VH, se observa una distribución relativamente uniforme de valores de retrodispersión en ambas bandas. Esto podría explicarse por la complementariedad de las polarizaciones VV y VH en la detección de diferentes características de la superficie. Aunque individualmente puedan tener valores altos y bajos, la combinación de ambas polarizaciones puede proporcionar una visión más completa y equilibrada de las características de la superficie, lo que contribuye a una distribución más uniforme de los valores de retrodispersión en la imagen.

El resultado de los años estudiados (2016, 2019 y 2021), la polarización VH tiende a presentar valores más bajos que la polarización VV. Esto sugiere que la polarización VV es mayormente sensible a la vegetación en el páramo que la polarización VH. Además, la ventana de procesamiento 5x5 tiende a capturar mejor las características de la vegetación que la ventana 7x7, ya que muestra una mayor variabilidad en los valores de retrodispersión.

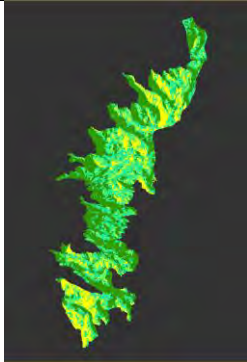
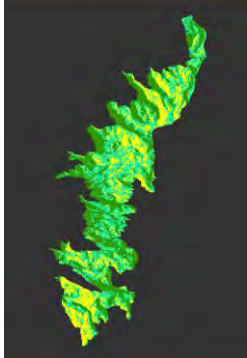
Estos resultados indican que la combinación de la polarización VV con la ventana de procesamiento 5x5 puede ser una elección adecuada para la clasificación supervisada de imágenes de radar en el páramo del PNN Los Nevados. Sin embargo, se contempla la uniformidad en la distribución de los valores de retrodispersión, la cual respalda la elección de combinar las bandas de polarización VH+VV - ventana 5x5 para la clasificación supervisada, ya

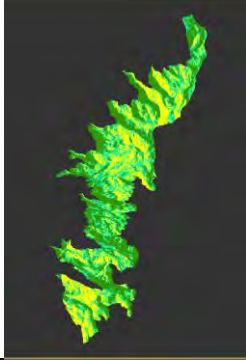
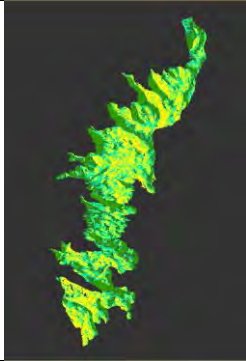

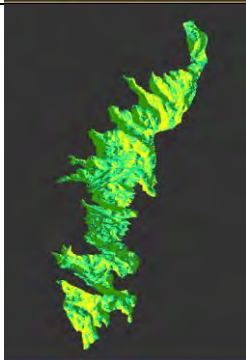
que esta combinación permite capturar una mayor variedad de características superficiales y, por lo tanto, mejorar la capacidad de distinguir entre las clases definidas en el páramo.

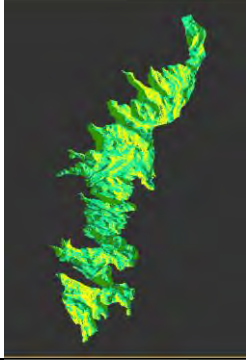
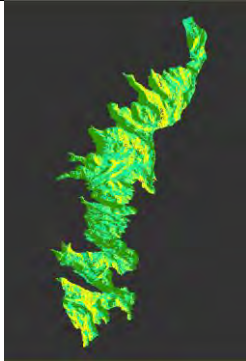
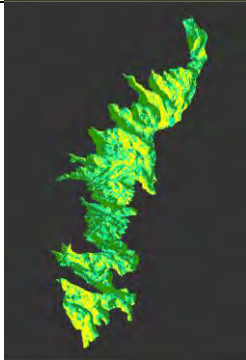
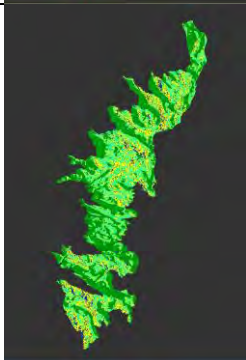
Seguidamente, en función del clasificador KNN Classifier; generó como resultado 18 imágenes ráster clasificadas de manera supervisada, ver Tabla (9) en las que se visualiza las clases como: Bosque, Pastoreo, Suelo Desnudo, Vegetación Nativa; por lo tanto, se evidencia el % de distribución de los píxeles para cada clase dentro de las imágenes ráster:

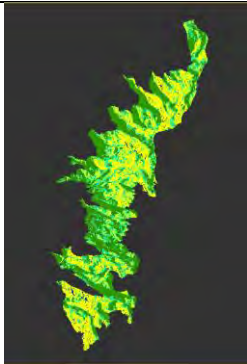
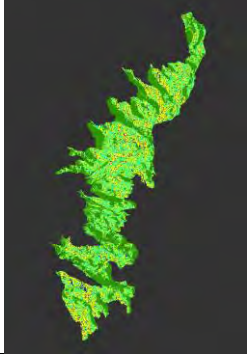
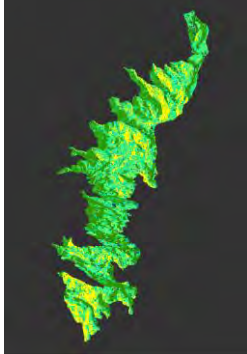
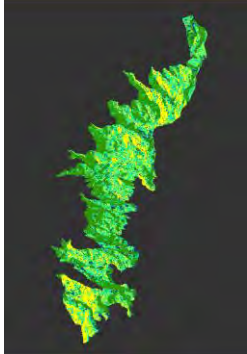
Tabla 9

Distribución Del % De Píxeles Por Cada Clase - Imágenes Ráster

Bandas de Polarización Clasificadas	Ráster clasificado	% De Píxeles Para Bosques de Enanos	% De Píxeles Para Pastoreo	% De Píxeles Para Suelo Desnudo	% De Píxeles Para Vegetación Nativa
S1B_2016_VH_7X7		38,648	24,458	1,626	35,268
S1B_2016_VH_5X5		35,906	25,797	0,670	37,628

Bandas de Polarización Clasificadas	Ráster clasificado	% De Pixeles Para Bosques de Enanos	% De Pixeles Para Pastoreo	% De Pixeles Para Suelo Desnudo	% De Pixeles Para Vegetación Nativa
S1B_2016_VV_5X5		38,074	29,943	0,287	31,696
S1B_2016_VV_7X7		28,667	33,705	6,983	30,644
S1B_2019_VH_5X5		36,671	37,596	4,464	21,269
S1B_2019_VH_7X7		34,981	28,093	6,059	30,867

Bandas de Polarización Clasificadas	Ráster clasificado	% De Pixeles Para Bosques de Enanos	% De Pixeles Para Pastoreo	% De Pixeles Para Suelo Desnudo	% De Pixeles Para Vegetación Nativa
S1B_2019_VV_7X7		28,253	25,191	7,685	38,871
S1B_2019_VV_5X5		34,279	26,881	3,316	35,523
S1B_2021_VH_5X5		35,300	27,136	5,612	31,952
S1B_2021_VV_7X7		37,149	27,455	6,665	28,731

Bandas de Polarización Clasificadas	Ráster clasificado	% De Pixeles Para Bosques de Enanos	% De Pixeles Para Pastoreo	% De Pixeles Para Suelo Desnudo	% De Pixeles Para Vegetación Nativa
S1B_2021_VH_7X7		35,874	38,393	3,890	21,843
S1B_2021_VV_5X5		33,036	34,247	6,633	26,084
S1B_2016_VH_VV_5X5		33,131	25,510	4,369	36,900
S1B_2016_VH_VV_7X7 (Combinada)		34,088	26,594	7,302	32,015

Bandas de Polarización Clasificadas	Ráster clasificado	% De Pixeles Para Bosques de Enanos	% De Pixeles Para Pastoreo	% De Pixeles Para Suelo Desnudo	% De Pixeles Para Vegetación Nativa
S1B_2019_VH_VV_5X5 (Combinada)		34,598	21,684	4,145	39,573
S1B_2019_VH_VV_7X7 (Combinada)		37,085	22,577	6,601	33,737
S1B_2021_VH_VV_5X5 (Combinada)		38,648	25,287	4,369	31,696
S1B_2021_VH_VV_7X7 (Combinada)		30,453	29,528	8,099	31,920

Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente, se realizó la validación de las clasificaciones supervisadas de cada una de las bandas VV, VH y la combinación de ambas bandas en las diferentes ventanas 5x5 y 7x7, de las 3 imágenes de radar años 2016, 2019 y 2021, los cuales se presentan las siguientes matrices de confusión e índice kappa, ver Tabla (10 al 27) con el fin de evaluar la precisión del resultado de cada banda preprocesada, validando de esta manera los 400 puntos de muestreo por cada clase temática.

Tabla 10

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	118	8	0	13	139	21
Pastoreo	8	78	2	25	113	35
Suelo Denudo	7	7	1	5	20	19
Vegetación Nativa	8	32	1	87	128	41
Total Usuario	141	125	4	130	400	
Error de Omisión	23	47	3	43		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	15,1%	16,31%	71,00%	57,7%
Pastoreo	31,0%	37,60%		
Suelo Denudo	95,0%	75,00%		
Vegetación Nativa	32,0%	33,08%		

Tabla 11

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	108	9	0	22	139	31
Pastoreo	9	83	0	21	113	30
Suelo Denudo	8	11	0	1	20	20
Vegetación Nativa	24	48	0	56	128	72
Total Usuario	149	151	0	100	400	
Error de Omisión	41	68	0	44		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	22,3%	27,52%	61,75%	44,1%
Pastoreo	26,5%	45,03%		
Suelo Denudo	100,0%	100%		
Vegetación Nativa	56,3%	44,00%		

Tabla 12

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	114	9	1	15	139	25
Pastoreo	9	75	0	29	113	38
Suelo Denudo	7	8	0	5	20	20
Vegetación Nativa	12	27	2	87	128	41
Total Usuario	142	119	3	136	400	
Error de Omisión	28	44	3	49		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	18,0%	19,72%	69,00%	54,7%
Pastoreo	33,6%	36,97%		
Suelo Denudo	100,0%	100,00%		
Vegetación Nativa	32,0%	36,03%		

Tabla 13

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	94	14	12	19	139	45
Pastoreo	8	86	3	16	113	27
Suelo Denudo	7	10	3	0	20	17
Vegetación Nativa	14	58	3	53	128	75
Total Usuario	123	168	21	88	400	
Error de Omisión	29	82	18	35		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	32,4%	23,58%	59,00%	41,7%
Pastoreo	23,9%	48,81%		
Suelo Denudo	85,0%	85,71%		
Vegetación Nativa	58,6%	39,77%		

Tabla 14

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2019.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	110	14	2	13	139	29
Pastoreo	8	74	10	21	113	39
Suelo Denudo	7	9	2	2	20	18
Vegetación Nativa	12	73	5	38	128	90
Total Usuario	137	170	19	74	400	
Error de Omisión	27	96	17	36		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	20,9%	19,71%	56,00%	37,3%
Pastoreo	34,5%	56,47%		
Suelo Denudo	90,0%	89,47%		
Vegetación Nativa	70,3%	48,65%		

Tabla 15

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 5x5 - Imagen SAR

Sentinel-1B clasificada – año 2019.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	95	11	8	25	139	44
Pastoreo	9	72	3	29	113	41
Suelo Denudo	6	11	1	2	20	19
Vegetación Nativa	17	34	2	75	128	53
Total Usuario	127	128	14	131	400	
Error de Omisión	32	56	13	56		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	31,7%	25,20%	60,75%	43,5%
Pastoreo	36,3%	43,75%		
Suelo Denudo	95,0%	92,86%		
Vegetación Nativa	41,4%	42,75%		

Tabla 16

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR

Sentinel-1B clasificada - año 2019.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	104	11	10	14	139	35
Pastoreo	10	75	0	28	113	38
Suelo Denudo	6	10	1	3	20	19
Vegetación Nativa	15	43	0	70	128	58
Total Usuario	135	139	11	115	400	
Error de Omisión	31	64	10	45		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	25,2%	22,96%	62,50%	45,8%
Pastoreo	33,6%	46,04%		
Suelo Denudo	95,0%	90,91%		
Vegetación Nativa	45,3%	39,13%		

Tabla 17

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 7x7 - Imagen SAR

Sentinel-1B clasificada – año 2019.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	86	8	15	30	139	53
Pastoreo	13	69	2	29	113	44
Suelo Denudo	6	11	2	1	20	18
Vegetación Nativa	16	34	2	76	128	52
Total Usuario	121	122	21	136	400	
Error de Omisión	35	53	19	60		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	38,1%	28,93%	58,25%	40,3%

Pastoreo	38,9%	43,44%		
Suelo Denudo	90,0%	90,48%		
Vegetación Nativa	40,6%	44,12%		

Tabla 18

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	98	11	18	12	139	41
Pastoreo	7	79	4	23	113	34
Suelo Denudo	8	11	0	1	20	20
Vegetación Nativa	9	47	2	70	128	58
Total Usuario	122	148	24	106	400	
Error de Omisión	24	69	24	36		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	29,5%	19,67%	61,75%	45,7%
Pastoreo	30,1%	46,62%		
Suelo Denudo	100,0%	100,00%		
Vegetación Nativa	45,3%	33,96%		

Tabla 19

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada – año 2021.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	100	15	9	15	139	39
Pastoreo	10	62	17	24	113	51
Suelo Denudo	7	7	3	3	20	17
Vegetación Nativa	11	56	8	53	128	75
Total Usuario	128	140	37	95	400	
Error de Omisión	28	78	34	42		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	28,1%	21,88%	54,50%	36,2%
Pastoreo	45,1%	55,71%		
Suelo Denudo	85,0%	91,89%		
Vegetación Nativa	58,6%	44,21%		

Tabla 20

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	108	18	5	8	139	31
Pastoreo	11	88	2	12	113	25
Suelo Denudo	6	8	3	3	20	17
Vegetación Nativa	7	72	3	46	128	82
Total Usuario	132	186	13	69	400	
Error de Omisión	24	98	10	23		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	22,3%	18,18%	61,25%	44,5%
Pastoreo	22,1%	52,69%		
Suelo Denudo	85,0%	76,92%		
Vegetación Nativa	64,1%	33,33%		

Tabla 21

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización VV, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada – año 2021.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	106	11	6	16	139	33
Pastoreo	12	62	11	28	113	51
Suelo Denudo	8	7	5	0	20	15
Vegetación Nativa	12	48	6	62	128	66
Total Usuario	138	128	28	106	400	
Error de Omisión	32	66	23	44		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	23,7%	23,19%	58,75%	41,5%
Pastoreo	45,1%	51,56%		
Suelo Denudo	75,0%	82,14%		
Vegetación Nativa	51,6%	41,51%		

Tabla 22

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	102	8	6	23	139	37
Pastoreo	6	82	1	24	113	31
Suelo Denudo	2	5	12	1	20	8
Vegetación Nativa	9	32	8	79	128	49
Total Usuario	119	127	27	127	400	
Error de Omisión	17	45	15	48		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	26,6%	14,29%	68,75%	55,7%
Pastoreo	27,4%	35,43%		
Suelo Denudo	40,0%	55,56%		
Vegetación Nativa	38,3%	37,80%		

Tabla 23

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2019.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	105	4	5	25	139	34
Pastoreo	11	68	5	29	113	45
Suelo Denudo	6	11	1	2	20	19
Vegetación Nativa	13	27	3	85	128	43

Total Usuario	135	110	14	141	400	
Error de Omisión	30	42	13	56		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	24,5%	22,22%	64,75%	49,1%
Pastoreo	39,8%	38,18%		
Suelo Denudo	95,0%	92,86%		
Vegetación Nativa	33,6%	39,72%		

Tabla 24

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 5x5 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	108	8	9	14	139	31
Pastoreo	10	65	5	33	113	48
Suelo Denudo	8	8	1	3	20	19
Vegetación Nativa	12	35	4	77	128	51
Total Usuario	138	116	19	127	400	
Error de Omisión	30	51	18	50		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	22,3%	21,74%	62,75%	46,5%
Pastoreo	42,5%	43,97%		
Suelo Denudo	95,0%	94,74%		
Vegetación Nativa	39,8%	39,37%		

Tabla 25

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2016.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	107	12	3	17	139	32
Pastoreo	6	75	3	29	113	38
Suelo Denudo	0	5	12	3	20	8
Vegetación Nativa	11	37	9	71	128	57
Total Usuario	124	129	27	120	400	
Error de Omisión	17	54	15	49		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	23,0%	13,71%	66,25%	52,1%
Pastoreo	33,6%	41,86%		
Suelo Denudo	40,0%	55,56%		
Vegetación Nativa	44,5%	40,83%		

Tabla 26

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2019.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	100	9	9	21	139	39

Pastoreo	11	64	4	34	113	49
Suelo Denudo	5	10	2	3	20	18
Vegetación Nativa	21	25	4	78	128	50
Total Usuario	137	108	19	136	400	
Error de Omisión	37	44	17	58		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	28,1%	27,01%	61,00%	43,9%
Pastoreo	43,4%	40,74%		
Suelo Denudo	90,0%	89,47%		
Vegetación Nativa	39,1%	42,65%		

Tabla 27

Matriz de Confusión e índice kappa - Banda de polarización combinada VV_VH, Ventana 7x7 - Imagen SAR Sentinel-1B clasificada - año 2021.

Clases	Bosque de Enanos	Pastoreo	Suelo Denudo	Vegetación Nativa	Total Productor	Error Comisión
Bosque de Enanos	73	28	24	14	139	66
Pastoreo	6	69	9	29	113	44
Suelo Denudo	6	7	4	3	20	16
Vegetación Nativa	10	32	3	83	128	45
Total Usuario	95	136	40	129	400	
Error de Omisión	22	67	36	46		

Clases	Error Comisión (%)	Error Omisión (%)	Precisión Global (po %)	Índice K (%)
Bosque de Enanos	47,5%	23,16%	57,25%	40,4%
Pastoreo	38,9%	49,26%		
Suelo Denudo	80,0%	90,00%		
Vegetación Nativa	35,2%	35,66%		

Fuente: Elaboración Propia

De ahí que se aplica la medida de calidad al índice Kappa de los valores resultantes de las clasificaciones supervisadas en el presente proyecto, ver Tabla (28)

Tabla 28

Medida aplicada a los resultados índice Kappa de las imágenes SAR Clasificadas.

	IMAGEN CLASIFICADA	AÑO IMAGEN CAPTURA	RESULTADO % INDICE KAPPA	CALIDAD DE LA CLASIFICACIÓN
1	S1B_2016_VH_5X5	2016	57,7	BUENA
2	S1B_2016_VH_7X7	2016	54,7	BUENA
3	S1B_2016_VV_5X5	2016	44,1	BUENA
4	S1B_2016_VV_7X7	2016	41,7	BUENA
5	S1B_2019_VV_5X5	2019	43,5	BUENA
6	S1B_2019_VH_5X5	2019	37,3	RAZONABLE
7	S1B_2019_VV_7X7	2019	40,3	BUENA
8	S1B_2019_VH_7X7	2019	45,8	BUENA
9	S1B_2021_VH_5X5	2021	45,7	BUENA
10	S1B_2021_VV_5X5	2021	36,2	RAZONABLE

11	S1B_2021_VH_7X7	2021	44,5	BUENA
12	S1B_2021_VV_7X7	2021	41,5	BUENA
13	S1B_2016_VH_VV_5X5	2016	56,3	BUENA
14	S1B_2016_VH_VV_7X7	2016	52,1	BUENA
15	S1B_2019_VH_VV_5X5	2019	49,1	BUENA
16	S1B_2019_VH_VV_7X7	2019	43,9	BUENA
17	S1B_2021_VH_VV_5X5	2021	46,5	BUENA
18	S1B_2021_VH_VV_7X7	2021	40,4	BUENA

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del índice kappa muestran que, las combinaciones de polarización VV y VH tienden a tener índices Kappa más altos en comparación con las clasificaciones individuales, lo que sugiere que la combinación de ambas polarizaciones mejoró la precisión de la clasificación.

En general, las clasificaciones con ventanas de procesamiento de 5x5 muestran índices Kappa más altos que las de 7x7, lo que indica que la ventana de 5x5 fue más efectiva en la clasificación supervisada para estas imágenes de radar. De acuerdo con Abarca, A. V. J. et al, (2023) afirma que:

Los filtros con tamaño de ventana 5x5 tuvieron mejor rendimiento en la eliminación del ruido granular, con valores de diferencia promedio; la relación señal-ruido pico y el error cuadrático medio más confiables que los filtros con tamaño de ventana 7x7. Este comportamiento se cumplió tanto para las imágenes procesadas con calibración Sigma 0 como con Gamma 0, así como con ambas polarizaciones utilizadas (VV y VH).

De igual manera, Mancera Florez, J. R. (2019), en el procesamiento de la imagen de radar menciona lo siguiente:

La imagen Sentinel-1A fue calibrada en el ángulo de incidencia Sigma, fue aplicado el proceso de "multilooking" a dos rangos con el fin de obtener pixeles cuadrados, se corrigió el "Speckle" o ruido con el filtro Lee Sigma en una ventana de 5x5 y fue corregida sobre terreno con el modelo digital de elevación SRTM.

Finalmente, los estudios revisados muestran consistencia en el uso de ventanas de procesamiento 5x5 por sus ventajas sobre las ventanas 7x7, en términos de eliminación de ruido y mejora de la calidad de las imágenes radar, respaldando los resultados obtenidos en este proyecto.

Ahora bien, el modelo de clasificación supervisada KNN tuvo un nivel bueno de precisión con mayor índice Kappa para las siguientes 3 imágenes ver Tabla (29) de los años 2016, 2019 y 2021:

Tabla 29

Imágenes vectorizadas con mayor índice Kappa.

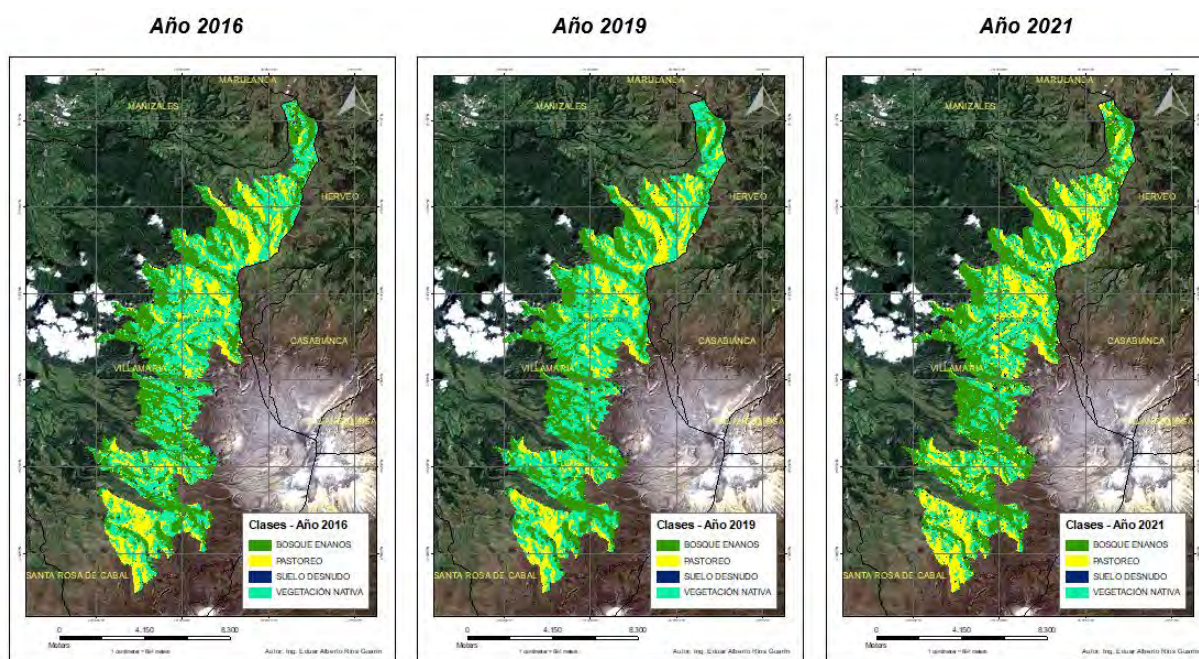
	IMAGEN CLASIFICADA	AÑO IMAGEN CAPTURA	RESULTADO % INDICE KAPPA	CALIDAD DE LA CLASIFICACIÓN
1	S1B_2016_VH_VV_5X5	2016	56,3	BUENA
2	S1B_2019_VH_VV_5X5	2019	49,1	BUENA
3	S1B_2021_VH_VV_5X5	2021	46,5	BUENA

9.1.3 Análisis y comparación de los resultados ante las variaciones de las coberturas en la zona de páramo.

Una vez tomadas las 3 bandas (imágenes ráster) mencionadas anteriormente con mayor índice kappa, convertidas estas a datos vectoriales y procesados posteriormente con la herramienta de ArcGis Pro, se generaron los siguientes mapas temáticos comparativos ver Figura (34):

Figura 34

Mapas temáticos comparativos periodos 2016, 2019, 2021 de las imágenes SAR Sentinel-1B Clasificadas.



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la ilustración anterior, estos mapas temáticos representan las diferentes coberturas clasificadas como: Bosques de Enanos, Pastoreo, Suelo Desnudo y Vegetación Nativa de los años 2016, 2019 y 2021, cuya información vectorizada se representa mediante valores en hectáreas en la siguiente Tabla (30)

Tabla 30

Resultados de la información vectorizada de cada año de las imágenes SAR Sentinel-1B Clasificadas.

RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS - IMAGANES DE RADAR SENTINEL 1B						
CLASE	AREA (ha) 2016	AREA (ha) 2019	AREA (ha) 2021	DIFERENCIA (ha) 2016-2019	DIFERENCIA (ha) 2016-2021	DIFERENCIA (ha) 2019-2021
SUELO DESNUDO	91,50	56,84	105,35	34,66	-13,84	-48,50

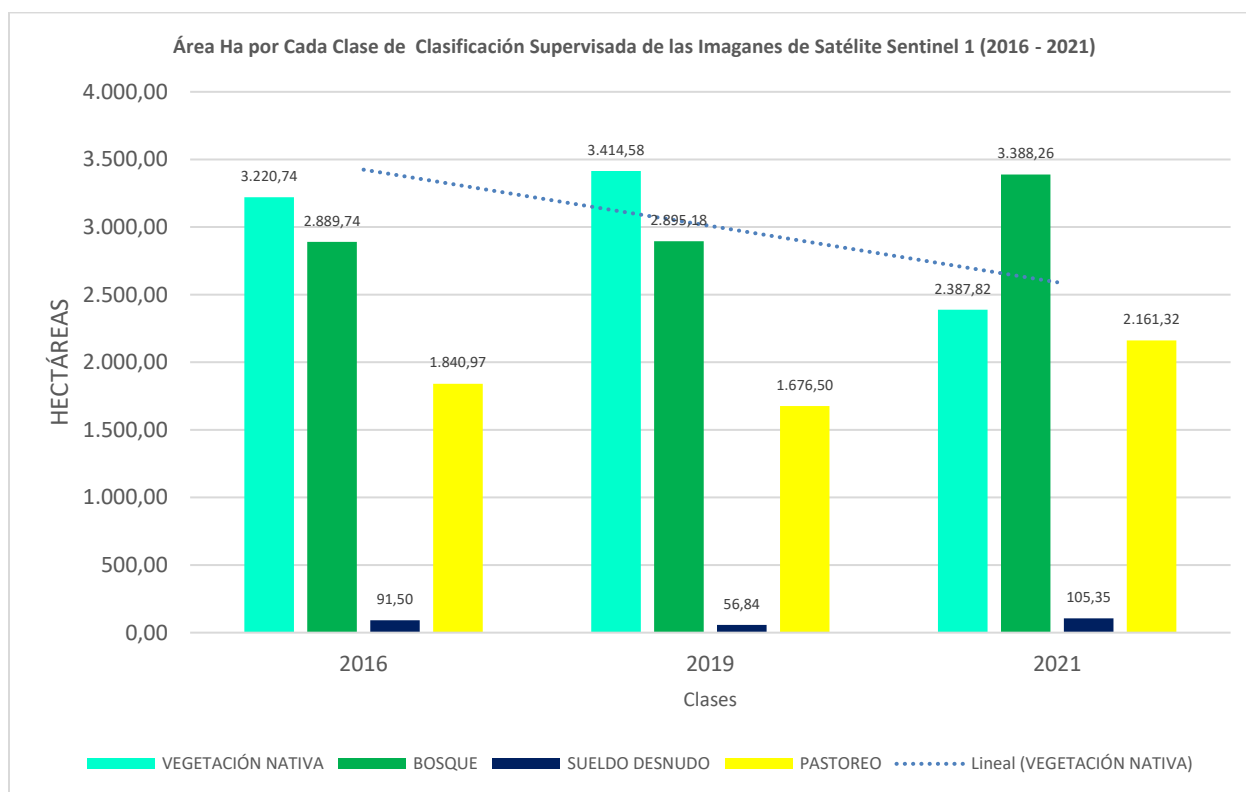
VEGETACIÓN NATIVA	3.220,74	3.414,58	2.387,82	-193,84	832,92	1.026,76
BOSQUE ENANOS	2.889,74	2.895,18	3.388,26	-5,44	-498,53	-493,09
PASTOREO	1.840,97	1.676,50	2.161,32	164,47	-320,35	-484,82

Fuente: Elaboración Propia

Desde otra óptica se presentan los resultados de la información vectorizada en la siguiente Figura (35)

Figura 35

Gráfica de la información vectorizada de cada año de las imágenes SAR Sentinel-1B Clasificadas.



Fuente: Elaboración Propia

Por consiguiente, en los resultados de la clasificación de la cobertura se observa que:

Para el suelo desnudo, existe una variación porcentual significativa en la disminución del área entre el año 2016 y 2019 en un (38%), pero registra un aumento del área en 2021 (84% con respecto a 2019).

De igual manera, la cobertura de vegetación nativa en la imagen refleja una variación en el aumento del área entre 2016 y 2019 del (6%) y una disminución considerable del área en 2021 (30% con respecto a 2019).

Así mismo, para la cobertura de Bosque de enanos presentó una variación de un aumento del área entre 2016 y 2019 del (0,2%) y un aumento considerable del área en 2021 (17% con respecto a 2019).

Por último, la cobertura de Pastoreo presentó una disminución del área entre 2016 y 2019 en (9%) y un aumento del área en 2021 (29% con respecto a 2019).

Para mayor claridad en el análisis de los resultados, se implementó el método del índice de correlación de Pearson ver Tablas (31 al 33), por lo tanto:

Tabla 31

Resultado de la media y la desviación estándar de cada clase:

Clase	Media	Desviación estándar
Suelo desnudo	84,6	25,0
Vegetación nativa	3007,7	545,5
Bosque enanos	3057,7	286,3
Pastoreo	1892,9	246,6

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 32

Resultado de la Covarianza entre cada par de Clases:

Clases	Covarianza
Suelo desnudo - Vegetación nativa	-11.343,76

Suelo desnudo - Bosque enanos	5.105,88
Suelo desnudo - Pastoreo	5.609,33
Vegetación nativa - Bosque enanos	-153.407,93
Vegetación nativa - Pastoreo	-132.750,10
Bosque enanos - Pastoreo	66.310,20

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33

Resultado del índice de correlación de Pearson para cada par de clases:

Clases	Índice (r) de correlación de Pearson	Grado de Correlación
Suelo desnudo - Vegetación nativa	-0,83	Correlación Negativa Considerable
Suelo desnudo - Bosque enanos	0,71	Correlación Positiva Media
Suelo desnudo - Pastoreo	0,91	Correlación Positiva Muy Fuerte
Vegetación nativa - Bosque enanos	-0,98	Correlación Negativa Muy Fuerte
Vegetación nativa - Pastoreo	-0,99	Correlación Negativa Muy Fuerte
Bosque enanos - Pastoreo	0,94	Correlación Positiva muy Fuerte

Fuente: Elaboración Propia

9.1.3.1 Interpretación del índice de Resultados de la Tabla 33.

1. Suelo desnudo - Vegetación nativa – Índice r (-0,83): El índice muestra una correlación negativa considerable, el cual indica que, a medida que aumenta la presencia de suelo desnudo, la vegetación nativa tiende a disminuir. Esto sugiere una posible conversión de áreas de vegetación nativa a suelo desnudo, posiblemente debido a actividades humanas agropecuaria o de ganadería o procesos naturales que han afectado negativamente la vegetación.

2. Suelo desnudo - Bosque enanos - Índice r (0,71): La correlación positiva media, muestra que el suelo desnudo y el bosque de enanos tienden a aumentar juntos. Esto podría indicar que el bosque de enanos está expandiéndose hacia áreas previamente cubiertas por vegetación diferente o que ciertas condiciones ambientales favorecen la presencia de ambos tipos de cobertura.

3. Suelo desnudo – Pastoreo - Índice r (0,91): Este índice, representa una correlación positiva muy fuerte entre el suelo desnudo y pastoreo, lo cual indica que a medida que aumenta el pastoreo, también lo hace el suelo desnudo. Es probable que el pastoreo excesivo puede estar contribuyendo a la pérdida de vegetación y la exposición del suelo.

4. Vegetación nativa - Bosque enanos - Índice r (-0,98): El índice indica una correlación negativa muy fuerte entre la vegetación nativa y el bosque de enanos, donde, a medida que aumenta el bosque de enanos, la vegetación nativa tiende a disminuir de manera significativa. Esto sugiere una dinámica compleja entre estas dos coberturas, donde el crecimiento del bosque de enanos podría estar relacionado con cambios en las condiciones ambientales que favorecen su expansión, posiblemente influyendo en la distribución de la vegetación nativa.

5. Vegetación nativa - Pastoreo - Índice r (-0,99): De acuerdo con el índice (r), esta es una correlación negativa muy fuerte entre la vegetación nativa y el pastoreo ya que a medida que aumenta la presencia de pastoreo, la vegetación nativa disminuye de manera significativa. Este patrón podría indicar un impacto importante del pastoreo en la vegetación nativa, lo que podría tener implicaciones para la biodiversidad y la estabilidad del ecosistema.

6. Bosque enanos - Pastoreo - Índice r (0,94): Muestra una correlación positiva muy fuerte entre el bosque de enanos y el pastoreo, lo que indica que a medida que aumenta el pastoreo, también lo hace el bosque de enanos. Esto podría sugerir que el pastoreo está favoreciendo el crecimiento o la expansión del bosque de enanos, posiblemente a través de la alteración del suelo o la eliminación de competidores vegetales por parte del ganado.

10. Discusiones.

En el campo de la teledetección se involucran fenómenos propios de adquisición de datos de las coberturas del suelo y su respuesta mediante imágenes, en este caso, de radar. Por lo tanto, se llevó a cabo una investigación enfocada en el análisis de la variación de la superficie en un sector del Parque Nacional Natural los Nevados, Sector Villamaría - Caldas y se demostró la importancia de identificar dicha variación entre los años 2016, 2019 y 2021, a través del procesamiento de las imágenes de radar Sentinel-1B.

De acuerdo con lo anterior, se identifican los principales hallazgos relevantes:

Los resultados de la clasificación de las coberturas del suelo de cada una de las imágenes de radar presentan una distribución espacial donde varían significativamente a lo largo del área de estudio.

Utilidad de las imágenes ópticas y Sentinel-1:

El análisis de imágenes ópticas y Sentinel-1 ha demostrado ser una herramienta útil para la caracterización del suelo y la cobertura vegetal en el páramo. La combinación de ambos sensores óptico y de radar, permite obtener una visión más completa y precisa del ecosistema, según lo asevera Hoyos Zuleta, (2021)

“Dadas las características de las imágenes de radar obtenidas del satélite Sentinel 1 y en composición con las imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8, fue posible determinar el impacto antrópico y no antrópico presente en la zona paramuna” (p. 103)

Sin embargo, las imágenes ópticas presentan algunas limitaciones ante las condiciones climáticas, ya que la atmósfera terrestre dispersa y absorbe la luz solar, lo que puede afectar la calidad de las imágenes ópticas, de igual manera, la presencia de nubes, polvo, humo o vapor de agua puede distorsionar la información sobre la superficie terrestre.

Influencia de la dieléctrica:

Los valores de retrodispersión en (dB) – Escala Logarítmica varían significativamente entre un año y otro para cada una de las imágenes de radar entre los años 2016, 2019 y 2021 usadas en este proyecto; la constante dieléctrica del suelo y la cobertura vegetal, se ven afectadas significativamente por la humedad; esto lo afirma Córdoba Peraza, (2023)

También es importante tener en cuenta que la señal del radar es sensible a las propiedades dieléctricas de los objetos en la superficie, las cuales a su vez responden a los cambios en el contenido de humedad (Cloude, 2002; Hinostroza Farfán, 2022). La constante dieléctrica es una medida de las propiedades eléctricas de los objetos y está relacionada con su reflectividad y conductividad. Un objeto con una menor constante dieléctrica tendrá una menor reflectancia. Además, se destaca que esta constante tiene un impacto significativo en la interacción de la radiación electromagnética con la superficie del terreno. (p. 107)

Por lo tanto, es preciso tener un conocimiento previo de las condiciones climáticas que existieron o existen en el momento de la captura de la imagen por el sensor activo de radar, ya que la composición del suelo puede dar un registro diferente dependiendo de dicho fenómeno.

Ahora bien, según el IDEAM (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales, (2016), “entre el mes de noviembre del año 2015 y el mes de marzo de 2016, se presentó un fenómeno climático extremo “El Niño”, donde disminuyó en ese periodo el 57% de las precipitaciones” (p.8). Este es una clara evidencia de como el cambio climático afecta directamente la cobertura del suelo cuya variación se vio reflejada en el comparativo de las imágenes del año 2016 vs año 2019.

Dichas variaciones, se pueden presentar por otros tipos de fenómenos que incidieron directamente al momento de realizar la clasificación supervisada de las imágenes, cuyo resultado al verificar una muestra de una pequeña zona, evidenció que los valores en

decibelios cambiaron significativamente entre los periodos analizados, mostrando valores altos y bajos, y que, contrastado con la imagen óptica evidenció cultivos en dicha zona verificada.

Impacto de la Topografía en el procesamiento de las imágenes de Radar:

La precisión de los resultados de procesamiento se vio afectada por el relieve montañoso y accidentado de la zona de estudio. En cada una de las imágenes de radar del proyecto, se observaron sombras importantes que dificultaron la interpretación de la información. Esto se debe a que las pendientes presentes en las escenas de la superficie alteraron el ángulo de incidencia del radar, lo que pudo haber modificado su respuesta a diferentes tipos de superficie, continuando con Córdoba Peraza, (2023) “La distorsión geométrica es un fenómeno común en áreas montañosas debido a la presencia de sombras, pendientes pronunciadas, esta distorsión puede generar una falta de retrodispersión en áreas sombreadas, generando pérdida de datos en la imagen de radar” (p. 85)

Aunque es posible realizar correcciones topográficas en las imágenes de radar para mitigar el efecto del relieve, estas correcciones no eliminan completamente este fenómeno.

Los análisis de los histogramas de las imágenes de radar en decibelios cobran una relevancia importante, ya que indican el comportamiento de las bandas de polarización VV, VH, antes de la clasificación supervisada. Cuando ambas polarizaciones tienen un comportamiento relativamente uniforme en la distribución de los píxeles, estas se pueden combinar para obtener mejores resultados al momento de realizar la clasificación supervisada de las escenas. Esto también lo indica Marini, F. (2021) al afirmar que:

La precisión de la clasificación de los cultivos de invierno utilizando la combinación ID 5, es decir VV y VH de datos SAR junto a la información de los datos ópticos (apilado de

NDVI) mejoró con respecto a la de estos últimos por sí solos, con valores de F1 de 86.48% para el trigo y de 86.57% para la cebada empleando el método RF (p. 13)

Es así como, se corrobora que las combinaciones de bandas de polarización, mejora los procesos de clasificación de las imágenes SAR, y a su vez confirma que la combinación de dichas imágenes con datos ópticos mejora la precisión de la clasificación.

11. Conclusiones.

El presente estudio se enfocó en analizar la dinámica de la cobertura del suelo en el páramo del Parque Nacional Natural de los Nevados durante el período 2016-2021, utilizando imágenes de radar Sentinel-1B e imágenes ópticas Sentinel-2A, y herramientas de análisis espacial. Los resultados obtenidos permiten comprender mejor los cambios en las coberturas del suelo y sus implicaciones ambientales en esta área protegida.

El análisis de las imágenes de radar Sentinel-1 en el Parque Nacional Natural Los Nevados reveló que la topografía accidentada y el relieve pronunciado de la zona de estudio afectaron significativamente la precisión de las imágenes para la clasificación supervisada de las coberturas como (vegetación nativa, bosques de enanos, pastoreo y suelo desnudo). La presencia de sombras, distorsiones e interferencias generadas por la topografía dificultó la interpretación de las características del terreno y la identificación de cambios en el uso del suelo.

A pesar de los desafíos planteados por la topografía, la aplicación de técnicas de pre-procesamiento como la corrección geométrica y el filtrado espacial, ayudaron a reducir la distorsión y el ruido en las imágenes, permitiendo una mejor visualización y análisis de la información, mitigando en cierta medida los efectos negativos y mejorar la clasificación supervisada de las imágenes mediante el método K-Nearest Neighbors, el cual resultó la mejor opción para dicha clasificación.

Adicionalmente, la integración de imágenes de radar con imágenes ópticas de alta resolución resultó ser una estrategia efectiva para mejorar la interpretación del uso del suelo en áreas montañosas. La información complementaria proporcionada por las imágenes ópticas ayudó a definir con mayor precisión las zonas de entrenamiento para la clasificación supervisada y facilitar la identificación de características del terreno que son difíciles de distinguir en las imágenes de radar.

El estudio evidenció una correlación inversa entre el pastoreo y la vegetación nativa en el área de estudio. Los resultados del análisis estadístico, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, sugieren que el aumento del pastoreo está asociado con una disminución de la cobertura de vegetación nativa. Esta relación puede explicarse por el consumo directo de vegetación por parte del ganado y la degradación del suelo causada por actividades humanas como la agricultura, el turismo, lo que puede afectar negativamente la salud y el crecimiento de las plantas.

Por lo tanto, El análisis multitemporal de las imágenes de radar Sentinel-1B evidenció cambios significativos en la cobertura del suelo entre el año 2016 y 2021. La principal tendencia observada fue una reducción de la cobertura de vegetación nativa. Por otro lado, se observó un aumento en la cobertura de pastoreo y suelo desnudo; los bosques de enanos mantuvieron una cobertura relativamente estable durante el período estudiado.

Finalmente, los cambios observados en la cobertura del suelo en el páramo del Parque Nacional Natural de los Nevados tienen importantes implicaciones ambientales. La reducción de la cobertura de vegetación nativa, especialmente en zonas de alta pendiente, puede aumentar el riesgo de erosión y deslizamientos de tierra, afectar el ciclo hidrológico y la regulación del clima local, y reducir la biodiversidad. El aumento del pastoreo y el suelo

desnudo, por otro lado, pueden indicar una degradación del ecosistema y una pérdida de la fertilidad del suelo.

Estos resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias de prevención y mitigación para conservar el páramo del Parque Nacional Natural de los Nevados. Estas estrategias podrían incluir el control del pastoreo, la restauración de la vegetación nativa, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y el fortalecimiento de la gestión ambiental en el área. La comprensión de la dinámica de la cobertura del suelo, como la realizada en este estudio, es fundamental para orientar la toma de decisiones y la acción efectiva para la conservación de este ecosistema único y frágil.

12. Recomendaciones.

Considerar la topografía del área de estudio: Al seleccionar imágenes de radar SAR, es crucial priorizar terrenos planos para evitar o disminuir el efecto de sombra y distorsiones en la imagen. Esto garantiza una interpretación más precisa de los datos.

Utilizar imágenes de radar SAR en combinación con imágenes ópticas: La integración de datos de radar y ópticos proporciona información complementaria y mejora la interpretación de las características del terreno, especialmente en áreas montañosas.

Aplicar herramientas de procesamiento de imágenes: Siempre es recomendable utilizar herramientas de procesamiento de imágenes para mitigar los efectos de sombreado, distorsión e interferencia causados por la topografía pronunciada. Esto mejora la calidad de las imágenes y la precisión de los resultados.

Validar la caracterización de la superficie: Es fundamental validar la caracterización de la superficie utilizando imágenes ópticas y trabajos de campo, como el levantamiento de puntos de coordenadas que identifiquen diferentes coberturas de la tierra. Esto garantiza la precisión de la interpretación de las imágenes SAR.

Combina datos de radar con imágenes ópticas multiespectrales: Para definir zonas de entrenamiento en la clasificación supervisada de imágenes de radar, es recomendable combinar datos de radar con imágenes ópticas multiespectrales. Esto mejora la precisión en la interpretación de la vegetación y otros elementos en áreas montañosas.

Utiliza el coeficiente de correlación de Pearson para el análisis final: Para analizar la relación entre variables después del procesamiento de las distintas clases mediante el uso de imágenes de radar, se recomienda utilizar el coeficiente de correlación de Pearson. Esto ayuda a eliminar la subjetividad de un análisis netamente visual sobre la interpretación de los cambios de la vegetación.

Incorporación de datos meteorológicos: Integrar datos meteorológicos históricos y actuales para evaluar cómo las variaciones climáticas afectan la cobertura del suelo y la vegetación en el páramo. Esto ayudará a contextualizar los cambios observados en las imágenes de radar y comprender los cambios dieléctricos de los objetos observados para una mejor interpretación.

Colaboración interdisciplinaria: Fomentar la colaboración con expertos en diversas disciplinas, como ecología, climatología y manejo de recursos naturales, para enriquecer el análisis e interpretación de los datos y mejorar la relevancia de los resultados para la toma de decisiones.

13. Referentes Bibliográficos.

- Persaud, H., & Milián Cabrera, I. d. (2021). Eficiencia de las imágenes de radar para el monitoreo a tiempo casi real de bosques tropicales en Guyana. *Arnaldoa- Guyana: Arnaldoa vol.28 No.3.*
- 2023, A. M. (2020). Plan de Desarrollo Villamaría- Caldas. 2020-2023. Villamaria- Caldas: S.E.
- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2014). METODOLOGÍA PARA LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE IMÁGENES ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 Y LANDSAT 8 CON EL MÓDULO FLAASH DEL SOFTWARE ENVI. San José de Costa Rica.: *Revista Geográfica de América Central. N° 53.*
- Alonso, D. (2019). Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel. Valencia- España: MappingGis.
- Anaya, J., Rodríguez Burítica, S., & Londoño, M. (2023). Clasificación de cobertura vegetal con resolución espacial de 10 metros en bosques del Caribe colombiano basado en misiones Sentinel 1 y 2. Medellín-, Antioquia, Colombia: *Revista de Teledetección.*
- Anzoategui, L. V., Gil Leguizamon, P. A., & Sanabria Marín, R. (2023). Frontera agrícola y multitemporalidad de cobertura vegetal en Páramo del Parque Regional Natural Cortadera (Boyacá, Colombia). *Boyaca- Colombia: Bosque (Valdivia) vol.44 no.1.*
- Aparicio, L., Plazas- Nossa, L., & Rodriguez, N. (2020). Consideraciones para el diseño del modulador y demodulador de la estación terrena CUBESAT-UD. Bogotá- Colombia: *Inf. tecnol. vol.31 no.1 La Serena feb. 2020. [http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100245.](http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100245)*
- Badano, E., Molina Montenegro, M., Quiroz, C., & Caviezz, L. (2002). Efectos de la planta en cojín *Oreopolus glacialis* (Rubiaceae) sobre la riqueza y diversidad de especies en una comunidad alto-andina de Chile- Central. Santiago de Chile: *Rev. chil. hist. nat. v.75 n.4.*
- Bocco, G. (2000). El desarrollo de sistemas de información geográfica en la frontera norte de México. México: *Invest. Geog no.42 México ago. 2000.*
- Buitrago-González, W., López-Guzmán, J. H., & Vargas-Salinas, F. (2016). Anuros en los complejos paramunos Los Nevados, Chilibarragán y Las Hermosas, Andes centrales de Colombia. Bogotá- Colombia: *Biota Colombiana, vol. 17, núm. 2, julio, 2016.*
- Burbano Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. Pasto- Colombia: *Rev. Cienc. Agr. vol.33 no.2 .*
- Burnstein, T. (2002). Sistemas de información geográfica y su aplicación en la salud pública. Lima- Perú: *Rev. perú. med. exp. salud publica v.19 n.3.*

- Camacho Velazco, A., Vargas García, C. A., Rojas Morales, F. A., Castillo Castelblanco, S. F., & Arguello Fuentes, H. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. Tunja- Colombia: Rev. Fac. ing. vol.24 no.40.
- Cárdenas, M. F., & Tobón, C. (2017). RECUPERACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE ECOSISTEMAS DE PÁRAMO EN COLOMBIA. Medellín: Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica.
- Cartaya Rios, S. (2014). ¿Las geografías o la geografía? Caracas- Venezuela: Tiempo y Espacio vol.24 no.62.
- Climático, G. I. (2021). *Comunicado de prensa del IPCC*. Ginebra- Suiza: PNUMA.
- Cordoba Peraza, J. A. (2023). ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LA Cobertura de Pastos de La Región Brunca de Costa Rica Utilizando Imágenes Sentinel-1. San José de Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Cortina Ramos, D. J., & Medina Parra, M. (25 de 11 de 2023). *Análisis Multitemporal del Cultivo de Banano Durante EL Periodo 2020-2023 en El Municipio de Zona Bananera Magdalena*. Obtenido de <https://repositorio.uan.edu.co/items/b8797706-4150-4e37-8c97-c7065de61b61>.
- Cuello, A., Ortone Lois, A., Antes, M., & Plato, G. (15 de 06 de 2013). Generación de Información Temática de la Reserva Natural de Mar Chiquitaa través deGeomática. Lujan, Rosario, Argentina: Instituto de Investigación Geográfica Universidad Nacional de Lujan.
- D'Antoni, H. L. (2005). Astrobiología, el origen de la vida y el cambio global. La Plata- Argentina: Acta bioquím. clín. latinoam. v.39 n.3.
- Delrieux, C., Ramoscelli, G., & Chiradia, D. (2001). Visualización y procesamiento de imágenes satelitales. Bahia Blanca- Argentina: Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253.
- Diaz- Granados Ortiz, M., Navarrete Gonzales, J. D., & Suarez López , T. (2015). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. Bogotá- Colombia: rev.ing. no.22 Bogotá July/Dec. 2005.
- Eraso Puentes, L., & Amarillo Suarez, A. (2016). Artropofauna en necromasa de dos especies de frailejones en diferentes estados sucesionales de Páramo Andino. Bogota- Colombia: Revista Colombiana de Entomología 42 (1).
- Espinoza Freire, E. E. (2018). La hipótesis en la investigación. Máchala- Ecuador: Rev. Mendive vol.16 no.1.
- Feldmann, F. J., & Biderman Furriela, R. (2001). *LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS GLOBALES Y EL DESAFÍO DE LA CIUDADANÍA PLANETARIA*. Santiago de Chile: Acta bioeth. v.7 n.2 Santiago 2001. <http://dx.doi.org/10.4067/S1726-569X2001000200010>.

- Fiallos, L., Herrera, R. S., & Velásquez, R. (2015). Diversidad de la flora en el ecosistema de páramo ecuatoriano. Quito- Ecuador: Cubano J. Agric. Sci. vol.49 no.3 Mayabeque.
- Figueroa Jauregui, M. d., Martínez Menes, M. R., Ortiz Solorio, C. A., & Fernandez Reinoso, D. (2018). Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. Oaxaca- México: Terra Latinoamericana 36:.
- Garavito Rincón, L. N. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. Barranquilla- Colombia: Universidad Libre-Barranquilla.
- García Bustamante, A. E., & Leal Espear, Y. E. (2019). Análisis a la protección del Estado a los ecosistemas de páramo. Barranquilla- Colombia: <https://dx.doi.org/10.17081/just.24.3400>.
- García Bustamante, A. E., & Leal Spear, Y. E. (2018). Análisis a la Protección del Estado a los Ecosistemas de Páramo. Cucutá-Colombia: Justicia Vol No 35.
- Gonzales de Audicana, M. (2002). Fusión de imágenes multiespectrales y pancromáticas. Navarra- España: Universidad de la Rioja- España.
- Grijalba, I. R. (2022). ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN PASTIZALES MEDIANTE MÉTODOS TRADICIONALES Y USO DE DRONES EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA. Chihuahua- México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Guevara Patiño, R. (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? Bogotá- Colombia: FOLIOS • Segunda época • N.o 44 Segundo semestre de 2016.
- Hernández Sampieri, R. (2014). Los métodos mixtos. Ciudad de México- México: Universidad Autónoma de Coahuila.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. F., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación . México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Hofstede, R., & Mena, P. (2018). Los beneficios escondidos del páramo: Servicios ecológicos e impacto. Quito- Ecuador: EcoCiencia, Instituto de Montaña, Universidad de Amsterdam.
- Ibañez, J. J. (2011). Vegetación Paramuna, El Nevado del Ruiz y los Ecosistemas de Frailejón (Frailejonales). Madrid- España: Fundación Conocimiento Madrid.
- Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales. (12 de Mayo de 2016). El Fenomeno del Niño en Colombia Año 2016. *El Tiempo*, pág. 08.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (12 de Junio de 2014). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* . Obtenido de <http://ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-ruiz>.

- Instituto de Investigación Alexander Von Humbolt. (2017). Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente. Bogotá - 164: Todos Por Un Nuevo País.
- Jeon Won, P., Korosov, A., & Babiker, M. (2017). Eliminación eficiente del ruido térmico de la imagen Sentinel-1 y su impacto en las aplicaciones del hielo mari. Viena- Austria: 19th EGU General Assembly.
- Jímenez Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., & Soria, G. (2011). Introducción al PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE. Valencia- España: Universidad de Verano de Teruel.
- Karszenbaum, H., & Barraza, V. (2018). Teledetección Cuantitativa. Buenos Aires- Argentina: CONICET Digital.
- Kharuf Gutiérrez, S., Hernández Santana, L., Orozco Morales, R., Aday Diaz, O., & Delgado Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. La Habana- Cuba: EAC vol.39 no.2 La Habana may.-ago. 2018.
- Lam Diaz , R. M. (2005). Metodología para la confección de un proyecto de investigación. La Habana- Cuba: Rev Cubana Hematol Inmunol Hemoter v.21 n.2.
- Liria, J. (2008). Sistemas de información geográfica y análisis espaciales: un método combinado para realizar estudios panbiogeográficos. México: Rev. Mex. Biodiv. vol.79 no.1 México.
- Llambi , L. D., Soto , A., Celleri, R., De Brieve, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos. S.C: Monsalve Moreno.
- López, P. L. (2004). POBLACIÓN MUESTRA Y MUESTREO. Cochabamba- Ecuador: Punto Cero v.09 n.08.
- Lozano Picón, R. J. (2012). Glaciares de Colombia mas que Montañas con Hielo. Bogotá- Colombia: Instituto de Hidrologia Meteorologia y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Marchionni, D., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural. Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. Ciudadada Autonoma de Buenos Aires- Argentina: Geoacta vol.39 no.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires jun. 2014.
- Martínez Barbachano, R. (Junio de 2023). *Rev. Geog. Amer. Central n.70*. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-25632023000100273&script=sci_arttext
- Martínez Viveros, E. (2018). Inteligencia geoespacial para desastres sísmicos: investigaciones en CentroGeo. Ciudad de México: Rev. Mex. Sociol vol.80 spe Ciudad de México.

- Mendoza de Armas, C., & Jimenez Narvaez, G. (2017). *Relación entre el efecto invernadero y el cambio climático desde la perspectiva del sector agrario*. Medellín- Colombia: Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, vol. 70, núm. 2, 2017.
- Monje- Najera, J. (2019). Humedad relativa, temperatura, tipo de sustrato y altura de los líquenes del suelo en un paramo tropical. San José de Costa Rica: Revista de Biología Tropical, vol. 67, no. 1, 2019.
- Montes Chaura, C. C. (2019). METODOLOGÍA DE CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA BASADA EN MODELOS MIXTOS PARA CÁMARAS. Manizales- Colombia: S.E.
- Montes Pulida, C. R. (2011). Estado del conocimiento en *Weinmannia tomentosa* L.f. (encenillo) y algunas propuestas de estudio sobre su. Bogotá- Colombia: RIAA 2 (1) 2011: 45-53.
- Morales Betancur, J. A., & Estevez Varón, J. V. (2006). EL PÁRAMO: ¿ECOSISTEMA EN VÍA DE EXTINCIÓN? Manizales- Colombia: Revista Luna Azul.
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. Arica- Chile: Int. J. Morphol.
- Pabón Caicedo, J. D. (2012). CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA: TENDENCIAS EN LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XX Y ESCENARIOS POSIBLES PARA EL SIGLO XXI . Bogotá- Colombia: REV. ACAD. COLOMB. CIENC.: VOLUMEN XXXVI, NÚMERO 139 - JUNIO 2012.
- Perilla, G. A., & Mais, J. F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. México: Invest. Geog no.101 México abr. 2020. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>.
- Pinos Morocho, D., Morales Matute, O., & Durán López, M. E. (2020). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. Cuenca- Ecuador: Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci) (Julio-Diciembre, 2021) . Vol 55(2): 157-179.
- Poveda, G. (2004). Medellín- Colombia.: Revista Académica Colombiana Ciencia: volumen xxviii, Número 107 Junio de 2004 .
- Puga, C. (2009). Ciencias sociales. Un nuevo momento. México: Rev. Mex. Sociol vol.71 spe México dic.
- Ramos Mallea, J. (2011). SATÉLITES DE COMUNICACIÓN. La Paz- Bolivia: RITS n.6 La Paz jun. 2011.
- Rayo Roca, L., & Zuluaga, C. (2011). PROCESOS MAGMÁTICOS EN EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ: UN ANÁLISIS CUANTITATIVO TEXTURAL. Bogotá- Colombia: Boletín de Geología.

- Reuter, F. (S.F). Transformaciones de la Imagen: Clasificaciones Supervisadas y No Supervisadas. Santiago del Estero- Argentina: Facultad de Ciencias Forestales.
- Roy García, I., Rivas Ruiz, R., Pérez Rodríguez, M., & Palacios Cruz, L. (2020). Correlación: no toda correlación implica causalidad. Ciudad de México: Rev. alerg. Méx. vol.66 no.3.
- Sacristan Romero, F. (2006). RETROSPECTIVA HISTÓRICA DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIÓN. México: Ra Ximhai, vol. 2, núm. 1, enero-abril, 2006.
- Salamanca Grosso, G., Osorio Tangarife, M. P., & Reyes Méndez, L. M. (2017). PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE MIELES MONOFLORES DE ENCENILLO DE LA ZONA ALTOANDINA EN BOYACÁ, COLOMBIA. Ibaguè- Colombia: Artico • Quím. Nova 40 (8) • Set 2017.
- Sanchez Diaz, B. (2018). La teledetección en investigaciones ecológicas como apoyo a la conservación de la biodiversidad: una revisión. Revista Científica, 33(3), 243-253. <https://doi.14483/23448350.13370>.
- Sánchez Zábaleta, C. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú. Lima- Perú: 10.17843/rpmesp.2016.331.2014.
- Santovenia Diaz, J., Tarrago Montalvo, C., & Cañedo Andalia, R. (2009). Sistemas de información geográfica para la gestión de la información. La Habana- Cuba: ACIMED v.20 n.5 Ciudad de La Habana.
- Seyfried, H., Worrier, G., Uhlig, D., Kohler, I., & Calvo, C. (1998). INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA Y MORFOLOGÍA DE LOS ANDES EN EL NORTE DE CHILE. Arica- Chile: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-73561998000100002>.
- Smith, J., Sarmiento, L., Acevedo, D., Rodriguez, M., & Romero, R. (2009). Un método participativo para mapeo de fincas y recolección de información agrícola aplicable a diferentes escalas espaciales. Caracas- Venezuelas: INCI, Caracas , v. 34, n. 7, p.
- The Nature Conservancy. (2024). Obtenido de <https://reefresilience.org/es/management-strategies/remote-sensing-and-mapping/introduction-to-remote-sensing/optical-and-radar-remote-sensing/>
- Valencia Hernández, G. M., & Anaya Acevedo, J. A. (2009). IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA CORINE LAND COVER CON IMÁGENES IKONOS. Medellín- Colombia: volumen 8, No. 15, pp. 39-52 ISSN 1692-3324.
- Vargas, S. (2017). PÁRAMOS: FÁBRICAS DE AGUA, VIDA Y CULTURA. Bogotá- Colombia: La Cola de Rata.
- Vasquez Dollande , E., Morales, E., & Achkar, M. (2021). Evaluación del uso de sensores remotos para identificar manchas de crudo en áreas costa afuera del Uruguay. Montevideo- Uruguay: Bol. geol. vol.43 no.2 Bucaramanga May/Aug. 2021.

Yaranga, R., Custodio, M., & Chanamé, F. (2018). Diversidad florística de pastizales según formación vegetal en la subcuenca del río Shullcas, Junín, Perú. Trujillo- Perú: Departamento de Botánica. Facultad de Biología. León .

Zamora Martínez , M. C. (2015). Cambio Climático. México: Rev. mex. de cienc. forestales vol.6 no.31.