



**Análisis multitemporal de las coberturas de la tierra en el municipio de Paz de
Río, Boyacá durante el periodo 1986-2023.**

Luisa Fernanda Herrera Martínez

Código: 11792313022

Jonathan Rey Díaz

Código: 11792319430

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

**Análisis multitemporal de las coberturas de la tierra en el municipio de Paz de
Rio Boyacá durante el periodo 1986-2023.**

Luisa Fernanda Herrera Martínez

Jonathan Rey Díaz

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

Director:

Andrés Felipe Carvajal Vanegas, Dr.

Universidad Antonio Nariño

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

Contenido

	Pág.
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3. MARCO TEÓRICO	18
3.1 Marco conceptual	18
3.1.1 Imágenes Landsat	18
3.1.2 Procesamiento digital de imágenes satelitales.....	20
3.1.3 Clasificación supervisada	21
3.1.4 Coberturas terrestres	21
3.1.5 Análisis del cambio de coberturas de la tierra.....	23
4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	24
4.1 Contexto Internacional	24
4.2 Contexto Nacional.....	26
5. METODOLOGÍA.....	28
5.1 Área de estudio.....	28
5.2 Procedimiento.....	29
5.2.1 Descarga de imágenes	29
5.2.2 Corrección atmosférica.....	30
5.2.3 Apilamiento de bandas	31
5.2.4 Reproyección espacial	32
5.2.5 Reescalamiento.....	33
5.2.6 Recorte de las imágenes	34
5.2.7 Cálculo del índice del factor optimo (OIF)	35
5.2.8 PanSharpen	37
5.2.9 Clasificación supervisada	39
5.2.10 Reclasificación de píxeles	40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
6.1 Coberturas de la tierra para el municipio Paz de Río.....	42

6.2	Cambio de coberturas en el municipio Paz de Río.....	47
6.2.1	Cambio de coberturas del año 1986 al año 2000.....	47
6.2.2	Cambio de coberturas del año 2016 al año 2023.....	49
6.2.3	Cambio de coberturas en los últimos 37 años	51
7.	CONCLUSIONES.....	55
8.	RECOMENDACIONES	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización geográfica del municipio Paz de Río, Boyacá.	28
Figura 2. Metodología propuesta.	29
Figura 3. Corrección atmosférica para la imagen Landsat 9 en QGIS	31
Figura 4. Apilamiento de bandas para la imagen Landsat 9 en ArcGIS PRO.....	32
Figura 5. Reproyección espacial para imagen de Landsat 9 en ERDAS.	33
Figura 6. Reescalamiento de la imagen de Landsat 9 y los metadatos después del proceso.	34
Figura 7. Recorte de la imagen al área de estudio.	34
Figura 8. Reescalamiento de la imagen pancromática (banda 8)	37
Figura 9. Fusión de la imagen pancromática y la imagen multiespectral.....	37
Figura 10. Imágenes multiespectrales e imagen resultantes del proceso de pansharpen... 38	
Figura 11. Identificación de las 6 clases de coberturas en las imágenes	39
Figura 12. Proceso para la creación de las firmas de las clases y la clasificación supervisada en ArcGIS PRO.....	40
Figura 13. Mapa de coberturas para el año 1986 (Landsat 5). Índice Kappa: 0,86	45
Figura 14. Mapa de coberturas para el año 2000 (Landsat 7). Índice Kappa: 0,88	45
Figura 15. Mapa de coberturas para el año 2016 (Landsat 8). Índice Kappa: 0,86	46
Figura 16. Mapa de coberturas para el año 2023 (Landsat 9). Índice Kappa: 0,88	46
Figura 17. Mapa de cambio de coberturas de tierra para los años 1986-2000	48
Figura 18. Mapa de cambio de coberturas de tierra para los años 2016-2023	50
Figura 19. Mapa de cambio de coberturas de tierra para los últimos 37 años 2016-2023 53	
Figura 20. Variación de las coberturas de la tierra en las 4 imágenes analizadas	54

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Características de las bandas para los satélites de Landsat.....	19
Tabla 2. Catálogo de coberturas de la tierra escala 1:100.000, adaptada para Colombia..	22
Tabla 3. Imágenes Landsat descargadas.	30
Tabla 4. Cálculo del OIF para las imágenes Landsat 5 y 7.....	36
Tabla 5. Cálculo del OIF para las imágenes de Landsat 8 y 9.....	36
Tabla 6. Relación de áreas de cobertura para los años 1986 y 2000.....	48
Tabla 7. Matriz de transición para las coberturas de los años 1986 y 2000. Vd: Vegetación densa, Vhya: vegetación herbácea, Tu: Tejido urbano, Pl: Pastos limpios, Ta: Territorios agrícolas y Td: Tierra desnuda.....	49
Tabla 8. Relación de áreas de cobertura para los años 2016 y 2023.....	51
Tabla 9. Matriz de transición para las coberturas de los años 2016 y 2023. Vd: Vegetación densa, Vhya: vegetación herbácea, Tu: Tejido urbano, Pl: Pastos limpios, Ta: Territorios agrícolas y Td: Tierra desnuda.....	51
Tabla 10. Relación de áreas de cobertura para los años 1986 y 2023.....	52
Tabla 11. Matriz de transición para las coberturas de los años 1986 y 2023. Vd: Vegetación densa, Vhya: vegetación herbácea, Tu: Tejido urbano, Pl: Pastos limpios, Ta: Territorios agrícolas y Td: Tierra desnuda.....	53

RESUMEN

En este estudio se realizó el análisis multitemporal del cambio de coberturas en el municipio de Paz de Río, Boyacá, durante un período que abarca desde 1986 hasta 2023, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Se emplearon imágenes satelitales capturadas por el sensor Landsat en los años 1986, 2000, 2016 y 2023. Estas imágenes fueron sometidas a procesamiento digital en el software Erdas Imagine para mejorar su calidad y resolución, lo que a su vez facilitó la clasificación supervisada en el software ArcGIS Pro mediante el algoritmo de Máxima Verosimilitud.

Como resultado de esta clasificación se identificaron para el municipio seis clases de cobertura de la tierra: vegetación densa, vegetación herbácea y/o arbustiva, tejido urbano, pastos limpios, territorios agrícolas y tierra desnuda. Además, se generaron mapas de cobertura para los cuatro años analizados, junto con mapas de cambio y matrices de transición. Estos recursos permitieron comprender las modificaciones y persistencia de las coberturas en hectáreas.

En un período de 37 años, se observó una disminución en las extensiones de vegetación densa de 333.67 hectáreas y de vegetación herbácea y/o arbustiva de 148.53 hectáreas. Por otro lado, se evidenció un aumento notable en las áreas destinadas a la agricultura, con un incremento de 846.44 hectáreas, pasando de 4640,07 ha en 1986 a 5486,51 ha en 2023. Asimismo, se registró un aumento, aunque de menor magnitud, en las zonas de tierras desnudas, con un aumento de 381.19 hectáreas, pasando de 379,77 ha en 1986 a 760,99 ha en 2023. Estos cambios indican una transformación significativa en el uso del suelo en la región, que refleja una tendencia hacia la conversión de áreas naturales en zonas principalmente destinadas a actividades agrícolas y urbanas. Esto indica un cambio sustancial en el uso de la tierra en la región, con una tendencia hacia la conversión de áreas naturales en zonas destinadas principalmente a actividades agrícolas y urbanas.

Palabras clave: Máxima Verosimilitud, imágenes Landsat, clasificación supervisada

ABSTRACT

In this study, a multi-temporal analysis of land cover change was conducted in the municipality of Paz de Río, Boyacá, spanning the period from 1986 to 2023, using geographic information system (GIS) tools. Satellite images captured by the Landsat sensor in the years 1986, 2000, 2016, and 2023 were employed. These images underwent digital processing in Erdas Imagine software to enhance their quality and resolution, thereby facilitating supervised classification in ArcGIS Pro software using the Maximum Likelihood algorithm.

As a result of this classification, six land cover classes were identified for the municipality: dense vegetation, herbaceous and/or shrub vegetation, urban areas, clean pastures, agricultural territories, and bare land. Additionally, land cover maps were generated for the four years analyzed, along with change maps and transition matrices. These resources allowed for a comprehensive understanding of modifications and the persistence of land cover in hectares.

Over a 37-year period, a decrease in the extent of dense vegetation by 333.67 hectares and herbaceous and/or shrub vegetation by 148.53 hectares was observed. Conversely, a significant increase in areas designated for agriculture was evident, with an increment of 846.44 hectares, increasing from 4,640.07 ha in 1986 to 5,486.51 ha in 2023. Additionally, there was a smaller increase in bare land areas, with an increment of 381.19 hectares, rising from 379.77 ha in 1986 to 760.99 ha in 2023. These changes signify a substantial transformation in land use in the region, reflecting a trend towards the conversion of natural areas into zones primarily dedicated to agricultural and urban activities.

Keywords: Maximum Likelihood, Landsat images, supervised classification.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio de coberturas del suelo indica la transformación del paisaje y las características naturales de una región a lo largo del tiempo. Estas transformaciones pueden ser el resultado de fenómenos naturales, como variaciones en la temperatura y la precipitación, o bien estar impulsadas por la actividad humana en el desarrollo de sus rutinas diarias. El análisis de tales cambios es fundamental para comprender cómo evoluciona el paisaje, el uso de la tierra, la dinámica económica de la región y cómo estos cambios afectan al medio ambiente y la sociedad. Para realizar este análisis, se utilizan sistemas de información geográfica que permiten medir los cambios en las coberturas del suelo a lo largo del espacio y el tiempo, así como las intervenciones humanas en el suelo a lo largo de los años.

El área de estudio corresponde al municipio de Paz de Río, localizado al nororiente del Departamento de Boyacá, localizado aproximadamente a 213 km de Bogotá. Este municipio alberga tres sectores económicos distintos. El primero abarca actividades productivas como la apicultura, la silvicultura, la ganadería y la agricultura. El sector secundario realiza la transformación de materias primas obtenidas en el sector primario. Por su parte, el sector terciario se enfoca en la extracción, acopio y aprovechamiento de carbón, hierro y materiales de construcción.

Con el objetivo de analizar el comportamiento de las coberturas del suelo y entender cómo esta dinámica impacta en el desarrollo económico y ambiental del municipio de Paz de Río, se descargaron fotografías satelitales capturadas por el sensor Landsat en los años 1986, 2000, 2016 y 2023, a las cuales se les aplicó procesamiento digital para mejorar su resolución. Una vez mejorada la calidad de las imágenes, se procedió a realizar la clasificación supervisada mediante el algoritmo de Máxima Verosimilitud.

Como resultado se identificaron seis categorías de cobertura en las cuatro imágenes satelitales. Se observó un alto porcentaje de cobertura de vegetación densa y vegetación herbácea y/o arbustiva, las cuales mostraron una tendencia a la disminución en sus áreas. En

contraste, se observó un aumento en las áreas cubiertas por tierra desnuda, territorios agrícolas y tejido urbano. El estudio del cambio de las coberturas de la tierra a lo largo del tiempo permitió identificar las zonas que han sufrido procesos de transformación y cambio de uso del suelo, y cuantificar las áreas de transición de estas coberturas a procesos de agricultura y de minería, las cuales como se mencionó anteriormente, corresponden a las actividades económicas principales del municipio.

A partir de los resultados anteriores, se considera que el presente documento puede ser tomado como una herramienta base para el municipio de Paz de Río en la toma de decisiones, así como, un instrumento de apoyo en el Esquema de Ordenamiento Territorial, que permita a futuro delimitar y proyectar la dinámica de las coberturas de la tierra, además de validar estos proyectos propuestos para el municipio en años anteriores.

En términos académicos, este informe manifiesta los conocimientos adquiridos, evidenciando la aplicación de competencias en sistemas de información geográfica y percepción remota, contribuyendo al enriquecimiento del repositorio institucional.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Analizar el cambio de coberturas de la tierra en el municipio de Paz de Río, Boyacá, durante el periodo 1986-2023.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las coberturas de la tierra existentes mediante clasificación supervisada en el municipio de Paz de Río, Boyacá para los años 1986, 2000, 2016 y 2023.
- Determinar el cambio de las coberturas de la tierra durante los últimos 37 años en el municipio de Paz de Río, Boyacá.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Marco conceptual

3.1.1 Imágenes Landsat

El proyecto Landsat proporciona datos calibrados de alta calidad y resolución espacial moderada de la superficie de la Tierra desde su creación en 1972. Las misiones Landsat se componen actualmente de ocho satélites, diseñados para recolectar datos e imágenes de la superficie de la Tierra como parte del programa nacional de Imágenes Terrestres (NLI), que se utilizan para una variedad de aplicaciones (U.S.G.S, 2019).

De manera general, los satélites Landsat orbitan la tierra en una órbita casi polar y sincrónica al sol, en alturas de alrededor de 900 km para los tres primeros satélites y de alrededor de 700 km para los siguientes. En lo que respecta a la resolución temporal, para Landsat 1,2 y 3 fue de 18 días mientras que para Landsat 4, 5, 7, 8 y 9 es de 16 días (USGS, n.d.)

El primer satélite Landsat (Landsat 1, originalmente conocido como ERTS-1) fue lanzado en 1972, orbitó la tierra hasta enero 6 de 1978, adquiriendo imágenes que cubrían aproximadamente el 75% de la superficie de la tierra. Landsat 2 y 3, lanzados en 1975 y 1978 respectivamente; Landsat 3 mejoró la resolución espacial alcanzando una resolución de 40 m en comparación con los dos primeros Landsat que tenían una resolución de 80 m. Landsat 4 lanzado en 1984 con un escáner multiespectral (MSS) y un nuevo sensor llamado *Thematic Mapper* (TM), tuvo una mejora de la resolución espacial de 30m y una banda infrarroja térmica. Landsat 5 fue lanzado en 1984 y orbitó la tierra durante casi 29 años hasta 2013, siendo un duplicado de Landsat 4. En 1993 fue lanzado Landsat 6 y no alcanzó la órbita. Landsat 7 se lanzó en 1999, incluía mejoras respecto a los satélites previos, como una pancromática de 15 m y la adición de un canal infrarrojo térmico con mayor resolución espacial (cuatro veces) que la del *Thematic Mapper* (TM). Landsat 8 fue lanzado en 2013, los instrumentos *Operational Land Imager* (OLI) y *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), presenta una resolución espacial multiespectral de 30 m y pancromática de 15 m. Finalmente, Landsat 9 fue lanzado en 2021, incluyendo algunas mejoras respecto a su

antecesor, presentando un aumento de la resolución radiométrica de 12 bits en Landsat 8 a 14 bits en Landsat 9, permitiendo detectar diferencias más sutiles principalmente en áreas más oscuras, como cuerpos de agua o bosques densos (US.G.S, n.d.).

Tabla 1. Características de las bandas para los satélites de Landsat.

Landsat							
Landsat 8 y 9				Landsat 7			
Bandas		Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)	Bandas		Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)
1	Coastal/aerosol	0.43 - 0.45	30	1	Blue	0.45 - 0.52	30
2	Blue	0.450 - 0.51	30	2	Green	0.52 - 0.60	30
3	Green	0.53 - 0.59	30	3	Red	0.63 - 0.69	30
4	Red	0.64 - 0.67	30	4	NIR	0.77 - 0.90	30
5	NIR	0.85 - 0.88	30	5	SWIR-1	1.55 - 1.75	30
6	SWIR-1	1.57 - 1.65	30	6	TIR	10.40 - 12.50	60
7	SWIR-2	2.11 - 2.29	30	7	SWIR-2	2.08 - 2.35	30
8	Pan	0.50 - 0.68	15	8	Pan	0.52 - 0.90	15
9	Cirrus	1.36 - 1.38	30				
10	TIR-1	10.6 - 11.19	100				
11	TIR-2	11.5 - 12.51	100				
Landsat 4 y 5				Landsat 3			
Bandas		Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)	Bandas		Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)
1	Blue	0.45 - 0.52	30	1	Green-NIR	0.50 - 0.75	40
2	Green	0.52 - 0.60	30	4	Green	0.5 - 0.6	80
3	Red	0.63 - 0.69	30	5	Red	0.6 - 0.7	80
4	NIR	0.76 - 0.90	30	6	NIR	0.7 - 0.8	80
5	SWIR-1	1.55 - 1.75	30	7	NIR	0.8 - 1.1	80
6	TIR	10.40 - 12.50	120	8	TIR	10.4 - 12.6	240
7	SWIR-2	2.08 - 2.35	30				
Landsat 1 y 2							
Bandas		Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)				
1	Blue-Green	0.47 - 0.57	80				
2	Orange-Red	0.58 - 0.68	80				
3	Red-NIR	0.69 - 0.83	80				
4	Green	0.5 - 0.6	79				
5	Red	0.6 - 0.7	79				
6	NIR	0.7 - 0.8	79				
7	NIR	0.8 - 1.1	79				

Fuente: Autores, con información de U.S.G.S, n.d.

3.1.2 Procesamiento digital de imágenes satelitales

El procesamiento digital de imágenes satelitales es un conjunto de técnicas con el objetivo de aumentar la calidad y simplificar la extracción de información contenida en las imágenes (Catalán Urzúa, 2019). Así mismo, como lo indica Chávez (2010) el objetivo del análisis de las imágenes satelitales es la cuantificación de las propiedades de los objetos capturados, por lo que es necesario comprender los elementos contenidos en las imágenes. Para la correcta interpretación de los objetos contenidos en las imágenes es necesario realizar algunos ajustes los cuales pueden variar de acuerdo con el sensor con el que se capture la imagen, algunos de estos ajustes son:

- ***Corrección Radiométrica***

Son técnicas que alteran los niveles digitales de una imagen con el objetivo de acercarlos a los niveles digitales de una imagen con captura ideal. (Chuvieco, 1991). Esta corrección abarca los ajustes de las distorsiones provocadas por la atmosfera y los problemas radiométricos generados por en el sensor. Durante este proceso se realiza restauración de líneas, pixeles, corrección atmosférica, corrección de bandas y niveles digitales de la imagen, llevándola a parámetros físicos.

- ***Corrección geométrica***

En este proceso no se realiza modificación alguna en los niveles digitales de los pixeles, solo se realiza el cambio en su posición modificando así la geometría de la imagen, alterando las coordenadas X y Y de la imagen corregida con respecto a las coordenadas de columna y línea de la imagen de entrada (Chuvieco, 1991). Esta corrección puede emplearse para transformar las coordenadas UTM y proyecciones cartográficas de una imagen y para ajustar dos o más imágenes con la finalidad de hacer análisis multitemporales. El objetivo principal de la corrección geométrica es garantizar que la imagen represente con precisión la ubicación y la forma de los objetos en la superficie de la Tierra. En este proceso, se destaca la reproyección de la imagen de trabajo con el propósito de modificar el sistema de referencia y el datum, asignando así coordenadas que se ajusten a la zona de estudio.

3.1.3 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada permite segmentar el dominio espectral en regiones que pueden ser asociadas con clases de coberturas de interés. Para llevar a cabo este proceso es necesario tener conocimiento previo de las clases más representativas de la zona de estudio, las cuales serán insumo para el entrenamiento del algoritmo (Richards, 2022).

Existen diferentes algoritmos de clasificación supervisada con aplicaciones de tipo medioambiental, social, político, entre otras (Poveda-Sotelo *et al.*, 2022), sin embargo, independientemente del algoritmo usado se siguen unos pasos generales o fases: I) designar el conjunto de clases de coberturas presentes en la zona de estudio; II) seleccionar los píxeles representativos para cada categoría, teniendo en cuenta que la cantidad de píxeles necesarios dependerá del número de bandas, complejidad del área y de la cantidad de clases, siendo el valor mínimo $25 \times n$ píxeles por categoría, donde n es el número de bandas (Chuvieco, 1991); III) a partir del algoritmo asignar cada píxel de la imagen a una categoría ya especificada; y IV) evaluar la precisión del producto final (Chuvieco, 1991; Richards, 2022)

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes algoritmos o herramientas predictivas entre las más comunes están el de clasificación de máxima probabilidad, el cual consiste en asignar píxeles a la clase con la que presente mayor probabilidad de pertenencia. Otro método es la clasificación de mínima distancia, el cual incluye el píxel a la clase de cobertura más cercana, comparando cada píxel con los del centro de cada clase. Finalmente, el método de paralelepípedos para el cual se asigna un área de dominio para cada clase teniendo en cuenta el valor de dispersión para cada una de estas, posteriormente el píxel se compara con el área de cada clase y es asignado si sus niveles digitales (ND) caen dentro del área de dominio.

3.1.4 Coberturas terrestres

La Cobertura terrestre es la cobertura biofísica que se observa sobre la superficie de la tierra, no obstante, las áreas donde la superficie está compuesta de roca o suelo desnudo son solo tierra y no se considera cobertura terrestre. Sin embargo, en la práctica, se suele

incluir estas características dentro del término cobertura terrestre. (Gregorio & Jansen, 2005). En 1997, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) definió la cobertura de la tierra como el resultado de un análisis de las respuestas espectrales, que están determinadas por las características fisonómicas y ambientales que las hacen distinguibles entre sí. El siguiente catálogo presenta cuarenta y ocho (48) coberturas de la tierra específicas para Colombia, de las zonas en donde IDEAM realizó visitas de campo. Este catálogo se encuentra en conformidad con la Leyenda Nacional de Coberturas de la tierra a escala 1:100.000, que se ha adoptado para el país siguiendo la metodología CORINE Land Cover (IDEAM, 2012) (**Tabla 2**).

Tabla 2. Catálogo de coberturas de la tierra escala 1:100.000, adaptada para Colombia.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo 1.1.2. Tejido urbano discontinuo		
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales 1.2.4. Aeropuertos		
	1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	1.3.1. Zonas de extracción minera 1.3.2. Zonas de disposición de residuos		
	1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	1.4.1. Zonas verdes urbanas 1.4.2. Instalaciones recreativas		
	2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	2.1. Cultivos transitorios	2.1.2. Cereales 2.1.4. Hortalizas 2.1.5. Tubérculos	
		2.2 Cultivos permanentes	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos 2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos 2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	
		2.3 Pastos	2.3.1. Pastos limpios 2.3.2. Pastos arbolados 2.3.3. Pastos enmalezados	
		2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Mosaico de cultivos 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales 2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	
		3. BOSQUES Y ÁREAS SEMI-NATURALES	3.1. Bosque	3.1.1. Bosque denso 3.1.2. Bosque abierto 3.1.3. Bosque fragmentado 3.1.4. Bosque de galería y ripario 3.1.5. Plantación forestal
			3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal 3.2.2. Arbustal 3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación			3.3.1. Zonas arenosas naturales 3.3.2. Afloramientos rocosos 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas 3.3.4. Zonas quemadas	
4. ÁREAS HÚMEDAS			4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Zonas Pantanosas 4.1.2. Turberas 4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
			4.2. Áreas húmedas costeras	4.2.1. Pantanos costeros 4.2.2. Salitral 4.2.3. Playones de bajamar
			5. SUPERFICIES DE AGUA	5.1. Aguas continentales
	5.2. Aguas marítimas			5.2.2. Mares y océanos 5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Fuente: IDEAM, 2012

3.1.5 Análisis del cambio de coberturas de la tierra

El cambio en el uso y la cobertura de la tierra es un proceso dinámico y complejo que vinculan los sistemas naturales y los sistemas antrópicos de un territorio. (Molo & Cardozo, 2021). El análisis de dichos cambios implica examinar y comparar diferentes tipos de coberturas de usos del suelo en un área determinada en cierto periodo de tiempo. Este análisis es fundamental para comprender cómo está cambiando el paisaje, y determinar los impactos que puede tener en el medio ambiente y en la sociedad de tal forma que se puedan abordar dichos cambios de forma sostenible. De acuerdo con lo mencionado por (Molo & Cardozo, 2021) para realizar la planificación de un territorio, se requiere medir temporal y espacialmente el paisaje. Es por esto que la cartografía de la cobertura de la tierra generada a partir de técnicas de procesamiento digital de imágenes satelitales, genera resultados estadísticos que facilitan la comprensión de las modificaciones en las coberturas de tierra y, en consecuencia, una mayor comprensión de su impacto en el entorno ambiental.

En este sentido la European Space Agency (ESA) incluye un componente específico en el programa que realiza la observación terrestre, que genera mapas de las coberturas de la tierra mediante el procesamiento de imágenes satelitales y sistema clasificatorios (Running, 2008). Los mapas de las coberturas de la tierra ofrecen información geográfica detallada sobre diversos tipos de coberturas en la superficie terrestre, tales como lagos, cultivos, pastizales, áreas urbanas, zonas húmedas, entre otros. Por su parte, los mapas del uso de la tierra reflejan las actividades económicas que se desarrollan en una determinada zona para producir, cambiar o mantener la cobertura de la tierra (Molo & Cardozo, 2021).

4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Actualmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) están siendo utilizados como herramienta de apoyo para el análisis del medio ambiente, principalmente en la identificación de los problemas e impactos ambientales causados a lo largo del tiempo por el desarrollo de actividades humanas que aumentan la deforestación y alteran el uso del suelo y la cobertura terrestre. La realización de análisis multitemporales contribuye en los procesos de evaluación del territorio permitiendo mejorar la planificación y toma de decisiones en la mitigación de las problemáticas ambientales. Por lo anterior, resulta fundamental efectuar una revisión de estudios previos vinculados al análisis multitemporal de cambios de cobertura, incluyendo artículos a nivel internacional y nacional, así como la identificación de las variables intervinientes, las cuales pueden estar ligadas tanto al entorno natural como a las actividades humanas.

4.1 Contexto Internacional

En primera instancia Quezada *et al.*, (2022) llevaron a cabo un análisis multitemporal con imágenes Landsat 7 y 8 en las provincias de Pastaza y Orellana en Ecuador, por medio del tratamiento de las imágenes satelitales y posterior clasificación supervisada mediante el algoritmo de máxima probabilidad y los métodos de Coeficiente kappa y matriz de confusión para la valoración de cada píxel clasificado. Para cuantificar la deforestación, utilizaron la fórmula propuesta por la FAO, lo que les permitió determinar las tasas de deforestación en los periodos; 2000-2005, 2005-2010, 2010-2015 y 2015-2020. Los resultados mostraron luz sobre cambios significativos en la cobertura del suelo, evidenciando la expansión de la frontera agrícola, la aparición de pastizales, áreas descubiertas, el aumento de las zonas urbanizadas, así como la aparición de actividades mineras y petroleras.

En el estudio de cambio de uso del suelo en el Departamento de Alto Paraguay, Paraguay realizado por García-Calabrese *et al.*, (2017) mediante la clasificación supervisada con el algoritmo de clasificación por vecindad, con imágenes Landsat 5 TM y ResourceSat-1 para los años 1992, 1997, 2002 y 2012, concluyeron que la principal causa del cambio de uso de la tierra es la ganadería debido a la aptitud del suelo, prediciendo para periodo 2012

- 2032 una disminución de la cobertura boscosa respecto a la superficie con uso pecuario. Igualmente, Nené-Preciado *et al.*, (2017) analizaron los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo mediante una técnica mixta de clasificación supervisada y fotointerpretación en dos cuencas costeras del Pacífico central mexicano, considerando dos periodos, 1971-1996 y 1996-2014. A partir de la superposición espacial de las bases de datos construyeron matrices de transición determinando en general una pérdida importante de los bosques tropicales y un aumento de los usos agropecuarios, con dos factores detonantes de cambio, como lo son la construcción del distrito de riego 093 y el desarrollo turístico.

En el año 2018, Vargas-Sanabria & Campos-Vargas llevaron a cabo un estudio que se enfocó en la clasificación supervisada de las coberturas vegetales en el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. Utilizando una imagen Landsat 8 del año 2015, se abordaron categorías como bosque temprano, bosque intermedio, bosque tardío, bosque de galería, pastos y manglar. La metodología empleada incluyó diversos algoritmos de clasificación, como Minimum Distance, Mahalanobis, Maximum Likelihood, Neural Network, Support Vector Machine y Parallelepiped. Los resultados revelaron una matriz de error, destacando que el algoritmo Maximum Likelihood logró una precisión del 81.11% y un índice kappa de 0.77 en la clasificación de coberturas, respaldando la idoneidad de dicho algoritmo para aplicaciones frecuentes en teledetección.

Por otro lado, Yuan *et al.*, (2005) a partir de imágenes Landsat Thematic Mapper (TM) para los años 1986, 1991, 1998 y 2002 analizaron el cambio de cobertura del suelo utilizando datos multitemporales para el área metropolitana de las Ciudades Gemelas de Minnesota. Mostrando que la cantidad de suelo urbano aumentó de 24% a 33% mientras que la cobertura rural disminuyó de 70% a 60% e indicando, además, el potencial de los datos Landsat en estudios multitemporales para proporcionar un medio preciso y económico para mapear y analizar cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo, que pueden utilizarse como insumos para la gestión de la tierra y las decisiones políticas.

4.2 Contexto Nacional

La investigación llevada a cabo por Flórez-Yepes *et al.*, (2017) se centró en el análisis multitemporal de las coberturas vegetales de las minas de oro en la parte alta de la vereda Maltería en Manizales, utilizando fotografías aéreas e imágenes satelitales de Google Earth. Los resultados obtenidos permitieron determinar que los mayores impactos ambientales son el aumento de la producción agrícola y pecuaria ocasionando la pérdida de bosque, la erosión del suelo y la contaminación del agua con cianuro causada por el proceso de minería y transformación del oro. Además, el impacto ambiental causado por el cambio del uso del suelo y por la erosión contribuye en la desestabilización del terreno, presentándose deslizamientos frecuentes y avalanchas en la rivera de la quebrada Manizales.

Estudios como el de Castañeda & Dávila (2018) para el análisis de la deforestación de la Amazonia Colombiana realizó la comparación de resultados de la clasificación supervisada sobre una imagen satelital Landsat 8 OLI con Máquinas de soporte vectorial (MSV). Como resultado de la comparación de la clasificación con MSV mediante el aplicativo desarrollado con Python PostgreSQL y PostGIS, la clasificación supervisada con MSV- ENVI (Environment for Visualizing Images), y la clasificación supervisada con el software libre Monteverdi y su extensión ORFEO Toolbox; se concluyó que en los tres casos las clases fueron bien definidas y permitieron reflejar el avance de la deforestación en la zona, sin embargo las clases pertenecientes a cuerpos de agua y centros poblados presentan menor grado de confusión de píxeles en la imagen obtenida a partir del algoritmo desarrollado con Python PostgreSQL y PostGIS, debido a su excelente capacidad en el almacenamiento y manejo de bases de datos, así mismo la clasificación realizada con este algoritmo arrojó un mayor índice Kappa lo cual representa una mayor exactitud.

En el estudio realizado por Poveda-Sotelo *et al.*, (2022) se evalúa el método de Algoritmo máquinas de soporte (SVM), el método Redes neuronales artificiales (ANN), el método de Bosques aleatorios (RF), método de Árboles de decisión (DT), y método de clasificación de Bayes (BC), para analizar la distribución de la superficie de los páramos de Telecom y Merchán en Saboyá, Boyacá. Para determinar cuál método proporciona mayor confiabilidad, se calculó el índice de Kappa para cada método mediante la elaboración de

matriz de confusión, obteniendo como resultado que el método con mayor confiabilidad en la clasificación supervisada fue el método de Bosques aleatorios (RF) con porcentaje de índice Kappa del 92.53%. Estos resultados indican que el algoritmo generó varios árboles de decisión que contienen variables de entrenamiento y varias muestras al azar (Belgiu & Drăgu, 2016).

Así mismo, en el estudio realizado por Pimiento (2019) se abordó el análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el páramo de Pisba bajo la jurisdicción del municipio de Tasco, para un periodo de 25 años desde 1990 hasta el 2015. En dicho estudio se empleó la metodología Corine Land Cover y se realizó una clasificación supervisada con verificación en campo de los tipos de uso de suelo suministrados por el esquema de ordenamiento territorial de Tasco, Boyacá. Las imágenes obtenidas del proceso de clasificación fueron sobrepuestas en el software Arcgis para determinar los cambios o continuidades en el uso del suelo. Como resultado obtuvo un índice de Kappa de 0.86%, concluyendo que la cobertura vegetal del páramo del Pisba tuvo una reducción de 408.71 hectareas en un periodo de 25 años, debido al aumento de las actividades agropecuarias, la minería de Carbón y el conflicto de tenencia de tierras presente en toda la región.

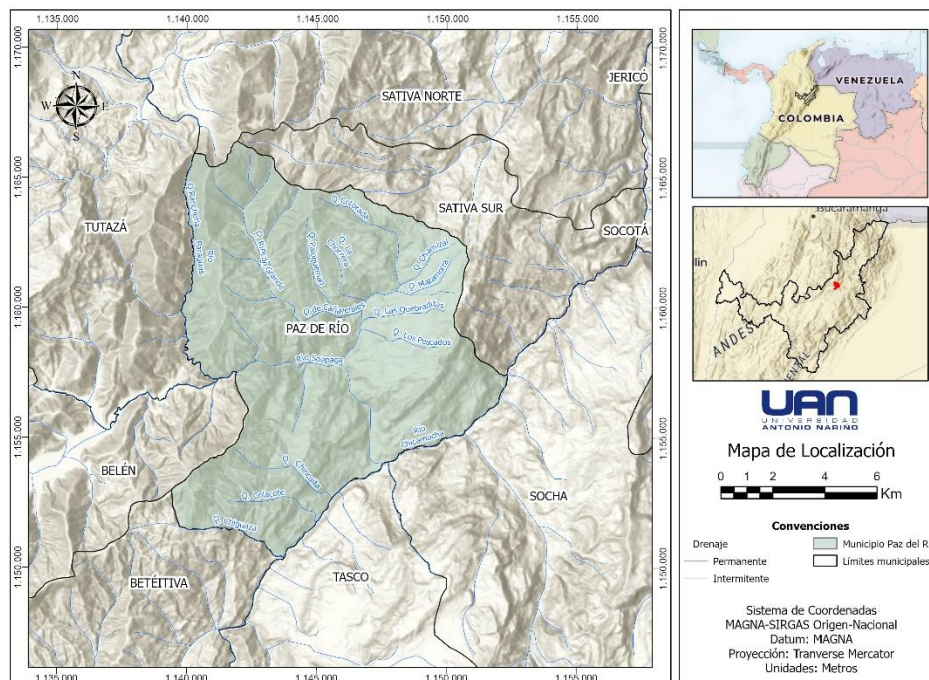
Por otra parte, enmarcado en el área de influencia del municipio se encuentra el estudio realizado por León & Quintero (2013), en el cual por medio de los sistemas de información geográfica y la teledetección se estimaron los predios y el área afectada por la inundación ocurrida en Paz de Río, Boyacá en el año 2012, generada por el desbordamiento de los ríos Soapaga y Chicamocha y del arrastre de material rocoso y de la sedimentación y producida por el deslizamiento de Coloradales-Salitre.

5. METODOLOGÍA

5.1 Área de estudio

El municipio de Paz de Río pertenece a la provincia de Valderrama, ubicada al norte del Departamento de Boyacá, a una altura de 2.200 m.s.n.m. Limita con los municipios de con Betétiva y Tasco al Sur; Sativa Sur y Sativa Norte al norte; también limita con Belén y Tutazá al Occidente y con Socha al Oriente (**Figura 1**). Los principales cauces que drenan el área corresponden con el río Chicamocha y el río Soapaga. En lo que respecta a las actividades económicas se destaca la industria minera con producción mineral de hierro y carbón, así como la agricultura de maíz, trigo, papa, fríjol y cebada. Teniendo en cuenta el uso de la tierra, se destacan cuatro grupos de coberturas: I) cobertura vegetal, dividida a su vez en vegetación de páramo, bosque y cultivos; II) cobertura de tierra desnuda o afloramientos rocosos, asociados a las zonas mineras o con erosión moderada o severa; III) tejido urbano relacionado a la zona urbana y caseríos, y IV) cuerpos de agua como los pantanos, los nacimientos, cauces de quebradas y ríos, ya sean naturales o artificiales (Corpoboyacá, 2007).

Figura 1. Localización geográfica del municipio Paz de Río, Boyacá.

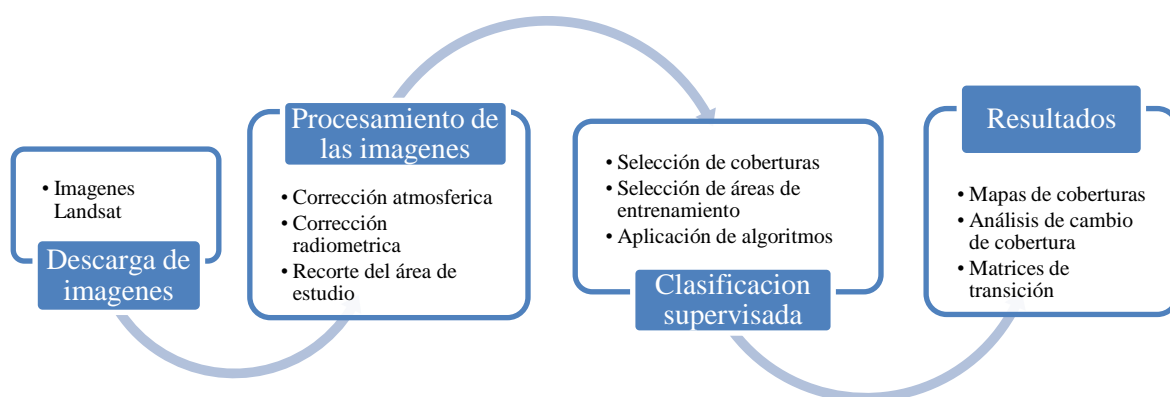


Fuente: Autores, 2023.

5.2 Procedimiento

La metodología desarrollada en el presente proyecto de grado se encuentra enmarcada en cuatro fases principales, iniciando por la descarga de imágenes, seguida por el procesamiento de estas, la clasificación supervisada y finalmente los resultados en los que se incluye la elaboración y análisis de los mapas de cobertura, mapas de cambio, y matrices de transición con el propósito de identificar las áreas que tuvieron cambios significativos y las que se mantuvieron estables. Además, se cuantifican la reducción y el aumento de las diferentes clases de coberturas, y determinar la proporción en la que una categoría se transformó en otra (**Figura 2**).

Figura 2. Metodología propuesta.



Fuente: Autores, 2023.

5.2.1 Descarga de imágenes

Para la descarga de las imágenes Landsat se usó la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS): <http://earthexplorer.usgs.gov/>, en la cual se realizó previamente un registro con el correo.

La página consta de cuatro pestañas, en la primera *Search Criteria* se selecciona la zona de interés, para este caso el municipio de paz de Rio, posteriormente se especificó un rango bajo de nubosidad (menos del 30%). En la segunda pestaña *Data Sets*, se indica el satélite en este caso *Landsat* y a su vez se selecciona la opción *Landsat Collection 2 Level*

1, donde se escogen las opciones *Landsat 8-9 OLI/TIRS*, *Landsat 7 ETM+* y *Landsat 4-5 TM*. Finalmente, en la cuarta pestaña *Results* aparecen las imágenes disponibles para descargar.

En la **Tabla 3** se muestran las cuatro imágenes Landsat descargadas, con el satélite y fecha correspondiente.

Tabla 3. Imágenes Landsat descargadas.

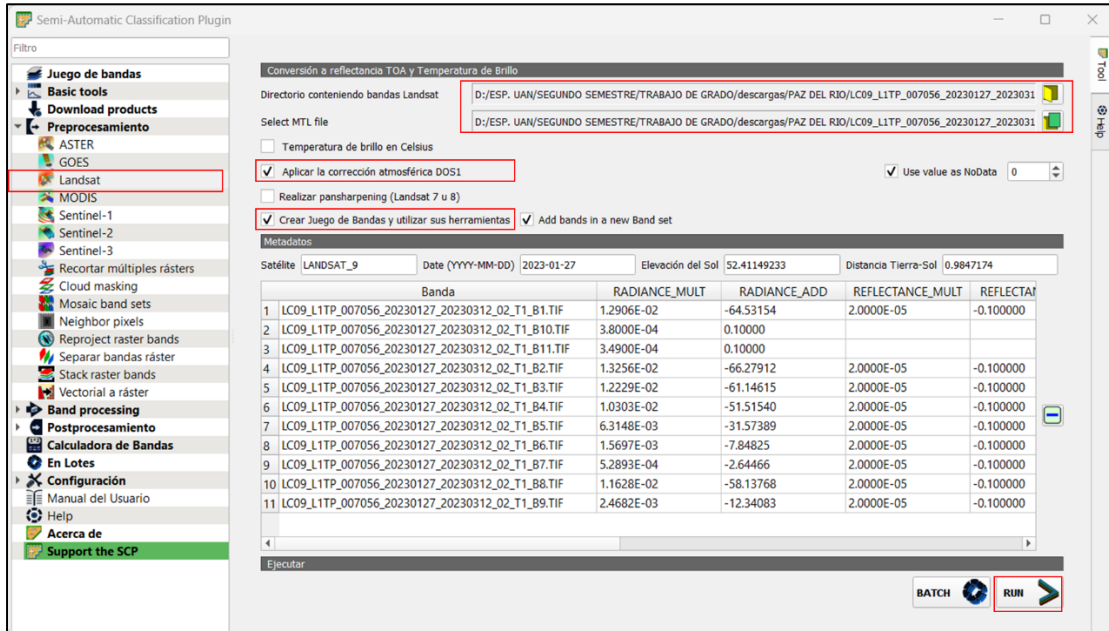
Satélite	Fecha
Landsat 9	2023/03/12
Landsat 8	2016/01/16
Landsat 7	2000/12/13
Landsat 5	1986/01/13

Fuente: Autores, 2023.

5.2.2 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica en percepción remota se conoce como el método para contrarrestar el efecto de la atmósfera para tener mediciones de radiancia a nivel de superficie. Este proceso se basa en el supuesto de que algunos píxeles se encuentran en la sombra absoluta y sus radiancias influenciadas por la dispersión atmosférica. Este modelo está incluido en el plugin SCP de QGIS, en la ventana que se abrió mediante la opción <<Show plugin>>, se seleccionó <<preprocesamiento>> y el satélite <<Landsat>>. Posteriormente se seleccionó la carpeta donde está la imagen y el archivo MTL, por último, se activó la opción de aplicación de corrección atmosférica y se ejecutó (**Figura 3**). Este paso realiza la corrección atmosférica para cada banda de la imagen.

Figura 3. Corrección atmosférica para la imagen Landsat 9 en QGIS

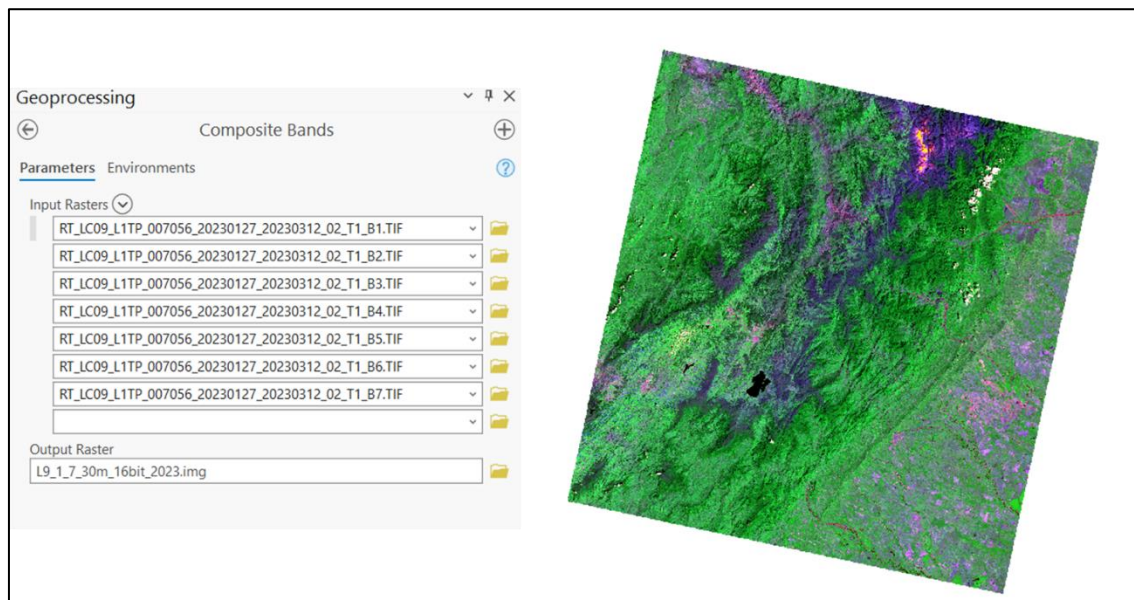


Fuente: Autores, 2023.

5.2.3 Apilamiento de bandas

El apilamiento de bandas se realizó mediante el software ArcGIS PRO. Para preparar la información se tomaron las bandas con corrección atmosférica, resultantes del paso anterior. Aplicando el geo proceso <<Composite bands>> se apilaron solo las bandas espectrales. Para Landsat 8 y 9 se usan las bandas de la 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, mientras que para Landsat 5 y 7 las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, ya que mantienen la misma resolución espacial de 30 m (Figura 4).

Figura 4. Apilamiento de bandas para la imagen Landsat 9 en ArcGIS PRO



Fuente: Autores, 2023.

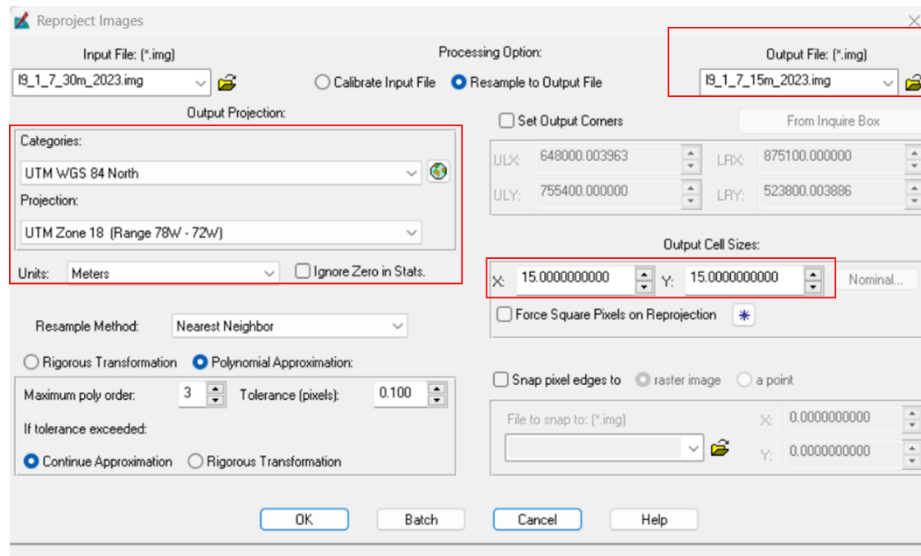
5.2.4 Reproyección espacial

Se definió la proyección de las imágenes espectrales para la zona de estudio, mediante el software Erdas, en la opción Raster> Spatial> Reproyectar, en donde se ingresó el sistema de proyección comprobado. Para este caso es UTM zona 18 WGS 84 CODE 32618.

Adicional a lo anterior, para las imágenes de Landsat 7, 8 y 9 se definió un tamaño de píxel de 15m para que corresponda con la resolución espacial de la imagen pancromática (**Figura 5**).

Una vez reproyectada la imagen de 30 m a 15 m por píxel y antes de reescalar la imagen, se procedió a verificar en los metadatos que la imagen estuviera reproyectada exitosamente.

Figura 5. Reproyección espacial para imagen de Landsat 9 en ERDAS.

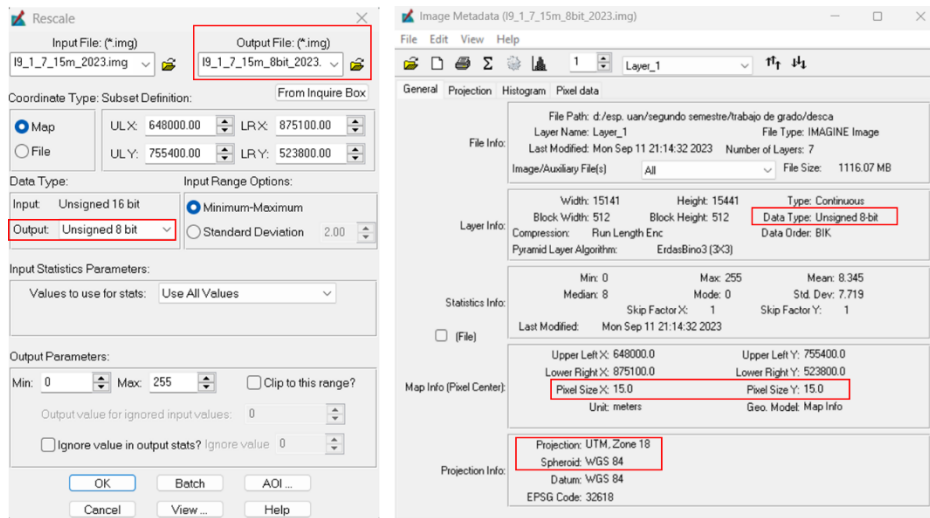


Fuente: Autores, 2023.

5.2.5 Reescalamiento

Una vez confirmado el proceso de reproyección se procedió a reescalar las imágenes de Landsat 8 y 9 de 16 a 8 bits. Esto con el fin de que la imagen de trabajo ocupara menos espacio en disco antes de realizar el análisis estadístico. Esto se realizó con el software Erdas mediante la opción <<Rescale>>, disponible en el menú <<Raster >>. Es de tener en cuenta que para las imágenes correspondientes a Landsat 5 y 7 no es necesario realizar este proceso, ya que las imágenes tienen una resolución radiométrica de 8 bits (**Figura 6**).

Figura 6. Reescalamiento de la imagen de Landsat 9 y los metadatos después del proceso.

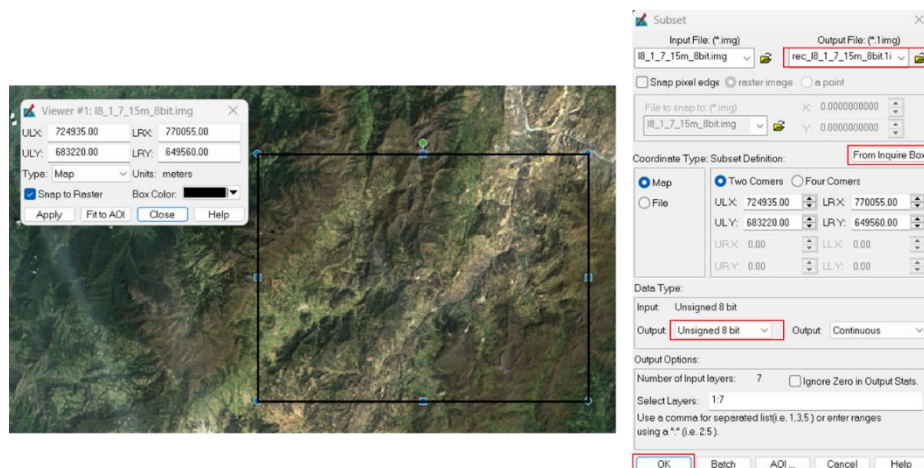


Fuente: Autores, 2023.

5.2.6 Recorte de las imágenes

Se recortó el conjunto las imágenes al área de estudio, en este caso al municipio de Paz de Rio, mediante el software Erdas. Se seleccionó la opción <<Inquire>> y <<Inquire box>>, y se procedió a realizar un rectángulo para indicar el área de interés. Posteriormente, en la pestaña << Ráster>>, se seleccionó la opción << Subset & chip>> y <<create subset image>>, en la ventana emergente se activó la opción << From Inquire Box>> y se ejecutó (Figura 7).

Figura 7. Recorte de la imagen al área de estudio.



Fuente: Autores, 2023.

5.2.7 Cálculo del índice del factor óptimo (OIF)

Para calcular el índice óptimo (OIF) se deben conocer las posibles combinaciones de tres bandas teniendo en cuenta el número de bandas totales. Teniendo en cuenta que para Landsat 8 y 9 hay 7 bandas multiespectrales se aplica la fórmula de coeficiente binomial atribuida a Blaise Pascal de la cual se obtuvo un total de 35 combinaciones posibles, mientras que para Landsat 5 y 7 al tener 6 bandas multiespectrales se obtuvieron solo 20.

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \left(\frac{7!}{3!(4)!} \right) = \frac{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7}{1 \times 2 \times 3 (1 \times 2 \times 3 \times 4)} = \frac{5 \times 6 \times 7}{1 \times 2 \times 3} = \frac{210}{6} = 35$$

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \left(\frac{6!}{3!(3)!} \right) = \frac{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6}{1 \times 2 \times 3 (1 \times 2 \times 3)} = \frac{4 \times 5 \times 6}{1 \times 2 \times 3} = \frac{120}{6} = 20$$

Para calcular el OIF se usaron los valores de desviación estándar para cada banda dispuestos en los metadatos de la imagen y la matriz de correlación, siguiendo la fórmula de Jansen (2016):

$$OIF = \frac{\sum_{K=1}^3 S_K}{\sum_{j=1}^3 Abs(r_j)}$$

En la **Tabla 4** se evidencia el cálculo del OIF, para la imagen de Landsat 5 el valor más alto de OIF corresponde con la combinación de las bandas 1, 4 y 5 y la combinación 4, 5 y 6. Por su parte, para la imagen Landsat 7 el valor más alto del OIF es de 33,0 relacionado con la combinación de las bandas 4, 5 y 6.

Tabla 4. Cálculo del OIF para las imágenes Landsat 5 y 7.

COMBINACIONES PARA IMAGEN CAPTURADA CON SENSOR LANDSAT 5						
#	R	G	B	SUMA DESVIACIÓN	SUMA CORRELACIÓN	OIF
1	1	2	3	26,7	2,9	9,2
2	1	2	4	34,7	2,3	15,3
3	1	2	5	44,5	2,6	16,8
4	1	2	6	31,5	2,7	11,7
5	1	3	4	37,3	2,2	17,0
6	1	3	5	47,1	2,7	17,7
7	1	3	6	34,0	2,7	12,5
8	1	4	5	55,1	2,2	25,5
9	1	4	6	42,1	2,0	20,7
10	1	5	6	51,9	2,6	19,7
11	2	3	4	33,4	2,3	14,3
12	2	3	5	43,1	2,7	15,8
13	2	3	6	30,1	2,8	10,9
14	2	4	5	51,2	2,3	22,0
15	2	4	6	38,2	2,2	17,6
16	2	5	6	47,9	2,7	17,8
17	3	4	5	53,8	2,3	23,5
18	3	4	6	40,8	2,1	19,0
19	3	5	6	50,5	2,7	18,4
20	4	5	6	58,6	2,3	25,5

MAYOR INDICE DE FACTOR OPTIMO CALCULADO			
R	G	B	OIF
1	4	5	25,5
4	5	6	25,5

COMBINACIONES PARA IMAGEN CAPTURADA CON SENSOR LANDSAT 7						
#	R	G	B	SUMA DESVIACIÓN	SUMA CORRELACION	OIF
1	1	2	3	31,0	2,8	11,0
2	1	2	4	35,8	1,9	19,1
3	1	2	5	42,6	2,5	17,1
4	1	2	6	35,5	2,6	13,8
5	1	3	4	39,1	1,7	23,4
6	1	3	5	45,9	2,5	18,4
7	1	3	6	38,8	2,6	14,8
8	1	4	5	50,7	1,7	30,6
9	1	4	6	43,5	1,5	29,2
10	1	5	6	50,4	2,4	20,6
11	2	3	4	41,6	1,9	22,0
12	2	3	5	48,5	2,6	18,4
13	2	3	6	41,4	2,7	15,4
14	2	4	5	53,2	2,0	27,1
15	2	4	6	46,1	1,7	26,7
16	2	5	6	53,0	2,6	20,4
17	3	4	5	56,5	1,8	31,5
18	3	4	6	49,4	1,6	30,7
19	3	5	6	56,3	2,7	21,0
20	4	5	6	61,0	1,8	33,0

MAYOR INDICE DE FACTOR OPTIMO CALCULADO			
R	G	B	OIF
4	5	6	33,00

Fuente: Autores, 2023.

Igualmente, en la **Tabla 5** se muestra para la imagen de Landsat 8 y Landsat 9 que el valor más alto de OIF correspondiente con 22.9 y 23.16 respectivamente, está relacionado con la combinación de bandas 5, 6 y 7.

Tabla 5. Cálculo del OIF para las imágenes de Landsat 8 y 9.

COMBINACIONES PARA IMAGEN CAPTURADA CON SENSOR LANDSAT 8						
#	R	G	B	SUMA DESVIACION	SUMA CORRELACION	OIF
1	1	2	3	11,3	2,8	4,0
2	1	2	4	13,0	2,8	4,6
3	1	2	5	24,0	1,8	13,5
4	1	2	6	23,4	2,5	9,3
5	1	2	7	18,6	2,7	7,0
6	1	3	4	14,7	2,8	5,3
7	1	3	5	25,7	1,9	13,5
8	1	3	6	25,1	2,5	9,9
9	1	3	7	20,3	2,6	7,8
10	1	4	5	27,4	1,8	15,5
11	1	4	6	26,9	2,5	10,6
12	1	4	7	22,0	2,6	8,3
13	1	5	6	37,8	1,8	21,5
14	1	5	7	33,0	1,7	20,0
15	1	6	7	32,4	2,5	12,9
16	2	3	4	15,2	2,9	5,3
17	2	3	5	26,1	2,0	13,0
18	2	3	6	25,6	2,6	9,7
19	2	3	7	20,7	2,7	7,7
20	2	4	5	27,9	1,9	14,9
21	2	4	6	27,3	2,7	10,3
22	2	4	7	22,5	2,7	8,2
23	2	5	6	38,3	1,9	20,3
24	2	5	7	33,4	1,8	19,0
25	2	6	7	32,9	2,6	12,5
26	3	4	5	29,6	2,1	14,3
27	3	4	6	29,0	2,7	10,6
28	3	4	7	24,2	2,8	8,8
29	3	5	6	40,0	2,1	18,7
30	3	5	7	35,1	2,0	18,0
31	3	6	7	34,6	2,7	12,8
32	4	5	6	41,7	2,0	20,7
33	4	5	7	36,9	1,9	19,8
34	4	6	7	36,3	2,8	13,2
35	5	6	7	47,3	2,1	22,9

MAYOR INDICE DE FACTOR OPTIMO CALCULADO			
R	G	B	OIF
5	6	7	22,9

COMBINACIONES PARA IMAGEN CAPTURADA CON SENSOR LANDSAT 9						
#	R	G	B	SUMA DESVIACION	SUMA CORRELACION	OIF
1	1	2	3	9,4	2,8	3,4
2	1	2	4	10,5	2,8	3,8
3	1	2	5	24,6	1,7	14,1
4	1	2	6	19,5	2,4	8,2
5	1	2	7	15,2	2,5	6,0
6	1	3	4	11,9	2,7	4,4
7	1	3	5	25,9	1,9	13,8
8	1	3	6	20,9	2,4	8,7
9	1	3	7	16,5	2,5	6,7
10	1	4	5	27,0	1,6	16,7
11	1	4	6	22,0	2,4	9,2
12	1	4	7	17,6	2,5	7,1
13	1	5	6	36,0	1,6	22,4
14	1	5	7	31,7	1,5	21,8
15	1	6	7	26,6	2,3	11,4
16	2	3	4	12,1	2,8	4,3
17	2	3	5	26,1	2,0	13,4
18	2	3	6	21,1	2,6	8,3
19	2	3	7	16,7	2,6	6,5
20	2	4	5	27,2	1,7	15,9
21	2	4	6	22,2	2,6	8,7
22	2	4	7	17,8	2,7	6,7
23	2	5	6	36,2	1,7	20,8
24	2	5	7	31,9	1,6	20,3
25	2	6	7	26,8	2,5	10,6
26	3	4	5	28,6	1,9	14,8
27	3	4	6	23,5	2,6	8,9
28	3	4	7	19,2	2,7	7,2
29	3	5	6	37,6	2,0	18,5
30	3	5	7	33,2	1,8	18,6
31	3	6	7	28,2	2,6	10,7
32	4	5	6	38,7	1,8	21,3
33	4	5	7	34,3	1,6	21,0
34	4	6	7	29,3	2,7	10,8
35	5	6	7	43,3	1,9	23,2

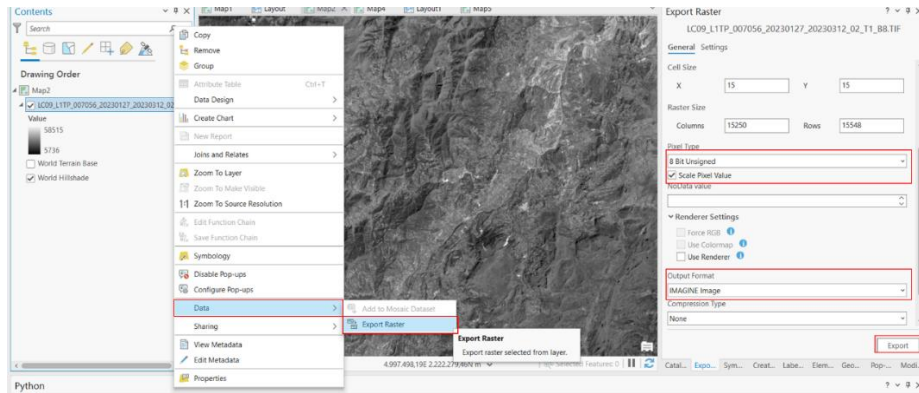
MAYOR INDICE DE FACTOR OPTIMO CALCULADO			
R	G	B	OIF
5	6	7	23,16

Fuente: Autores, 2023.

5.2.8 PanSharpen

Para este proceso se utilizaron las bandas 8, las cuales corresponden a las bandas pancromáticas para Landsat 7, 8 y 9. Inicialmente se importaron las bandas 8 a ArcGIS PRO y a partir del clic derecho se seleccionó la opción << Data >>, y << Export raster >>. En la ventana que se abrió se seleccionó la carpeta para guardar archivos, formato unsigned 8 bit y el formato de salida *IMAGINE image*.

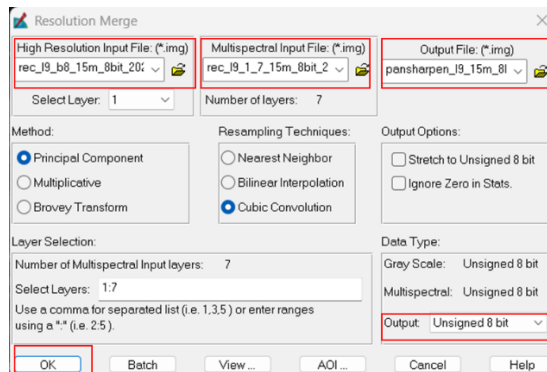
Figura 8. Reescalamiento de la imagen pancromática (banda 8)



Fuente: Autores, 2023.

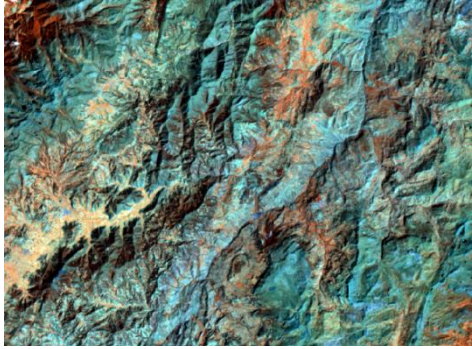
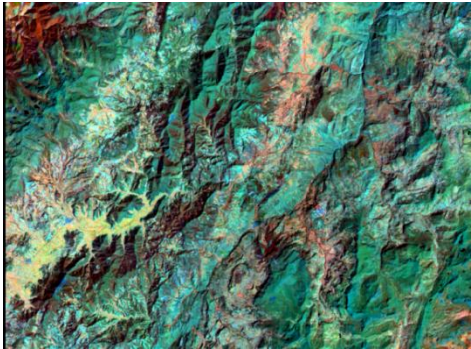
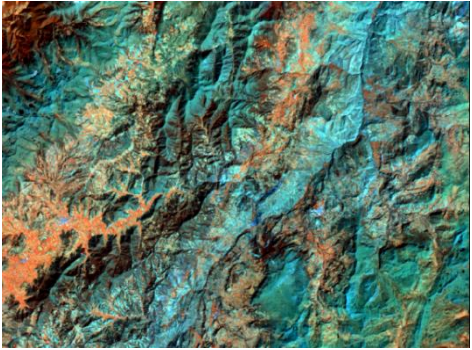
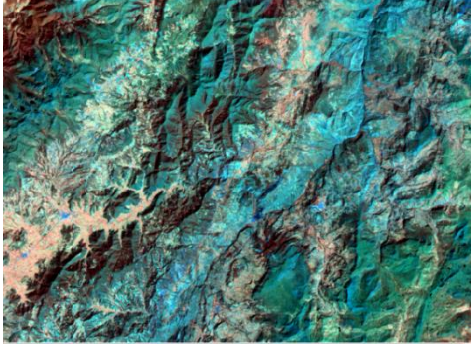

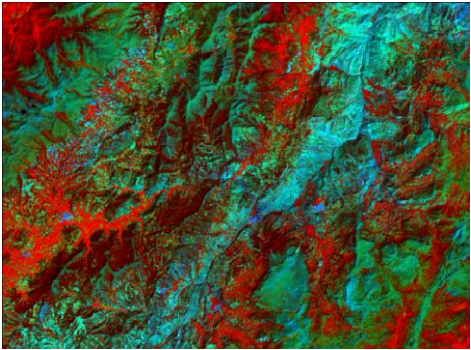
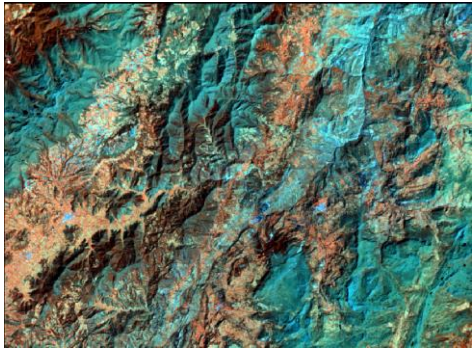
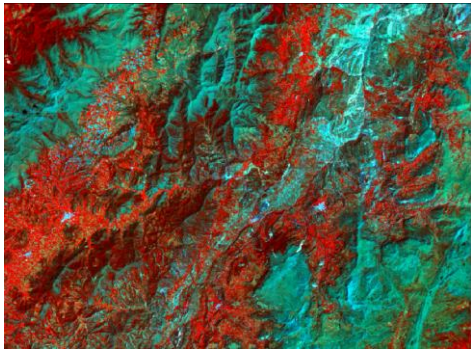
Luego en Erdas se recortaron las pancromáticas al área de estudio y se procedió a realizar la fusión de la multiespectral con la pancromática para cada sensor. Para esto se seleccionó en la pestaña << Raster >>, la opción << PanSharpen >>, y << Resolution merge >>. En la ventana emergente donde dice *High Resolution Input File* se llamó la pancromática, en *Multispectral input file* se llamó la multiespectral, se asignó una carpeta para guardar el archivo y en *Data Type* se asignó *unsigned 8 bit*.

Figura 9. Fusión de la imagen pancromática y la imagen multiespectral



Fuente: Autores, 2023.

Figura 10. Imágenes multiespectrales e imagen resultantes del proceso de pansharpen

	MULTIESPECTRAL	PANSHARPEN
LANDSAT 5 1986		
LANDSAT 7 2000		
LANDSAT 8 2016		
LANDSAT 9 2023		

Fuente: Autores, 2023.

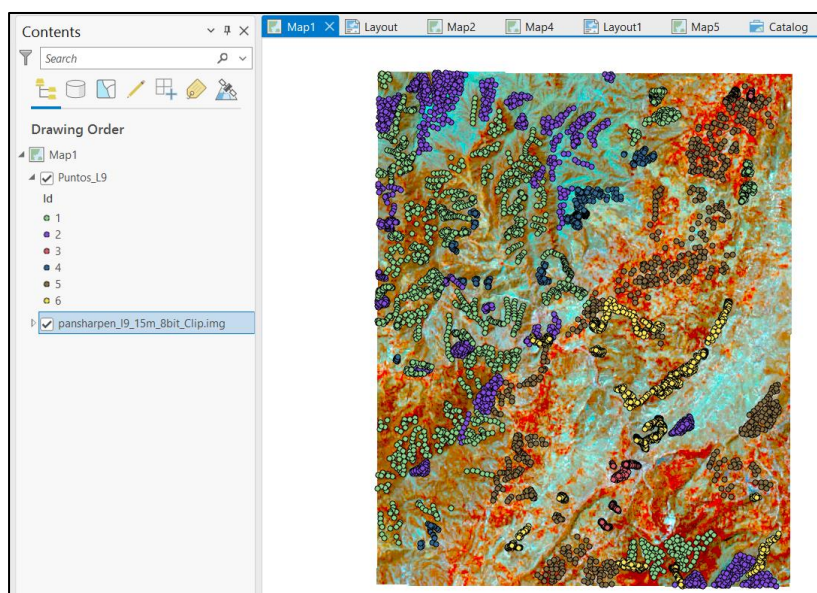
5.2.9 Clasificación supervisada

En primera medida se seleccionaron 6 clases de coberturas para el municipio de Paz de Río, teniendo en cuenta la clasificación de coberturas a escala 1:100.000 realizada por el IDEAM (2018), además de las imágenes satelitales de Google Earth. Las clases definidas fueron:

1. Vegetación densa
2. Vegetación herbaria y/o arbustiva
3. Tejido urbano
4. Pastos limpios
5. Territorios agrícolas
6. Tierra desnuda

Posteriormente se identificaron estas clases en las imágenes anteriormente procesadas de los satélites Landsat 5 (1986), Landsat 7 (2000), Landsat 8 (2016) y Landsat 9 (2023) mediante el software ArcGIS PRO y con ayuda del Basemap. Para realizar el entrenamiento del clasificador se creó un shape de puntos y se identificaron las diferentes clases en las imágenes respectivas, para esto se realizaron un total de 5.000 puntos aproximadamente y mínimo para cada clase 300 puntos.

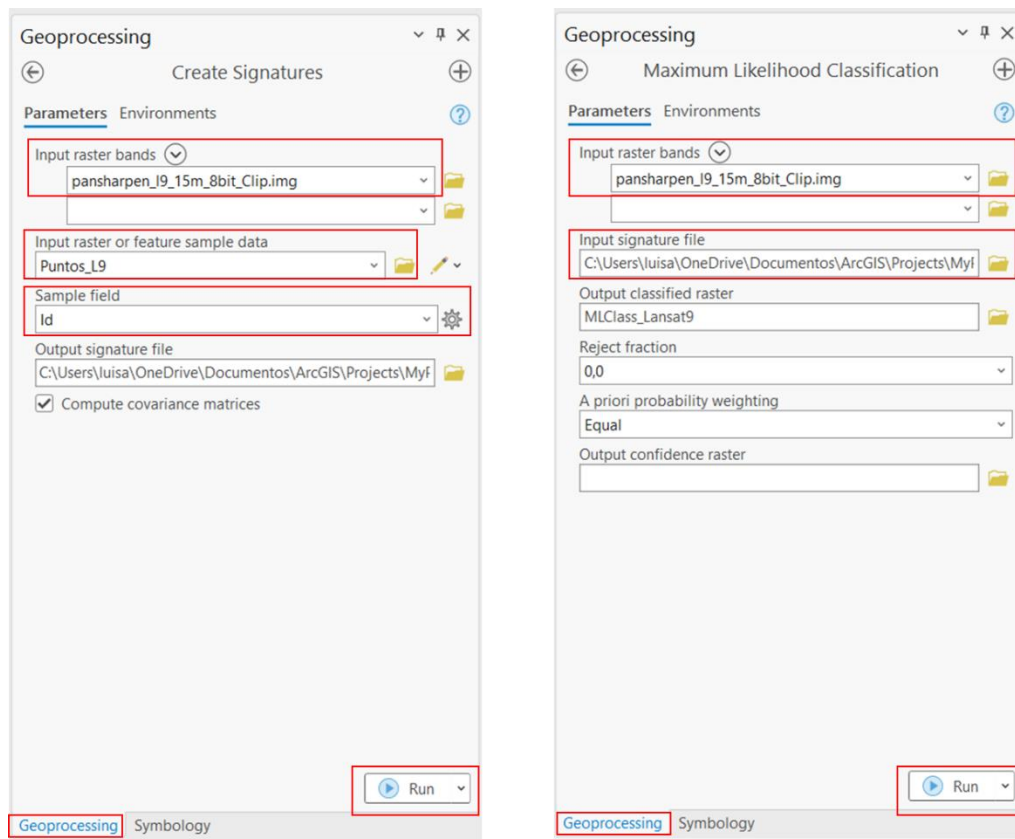
Figura 11. Identificación de las 6 clases de coberturas en las imágenes



Fuente: Autores, 2023.

Mediante la herramienta << Create Signatures>> ubicada en *Geoprocessing* se creó la firma de las 6 clases usando como datos de entrada el shape de puntos anteriormente realizado. Finalmente se ejecutó la clasificación de las imágenes, por medio de la herramienta <<Maximum Likelihood Classification>>.

Figura 12. Proceso para la creación de las firmas de las clases y la clasificación supervisada en ArcGIS PRO



Fuente: Autores, 2023.

5.2.10 Reclasificación de píxeles

Con el fin de que las clasificaciones de coberturas obtenidas para los diferentes años sean más homogéneas y acordes con la imagen, se reclasificaron píxeles mediante la herramienta <<Pixel editor>> en ArcGIS PRO, ubicada en la pestaña *Imagery*.

5.2.11 Matriz de Confusión e Índice Kappa

Para validar las coberturas generadas, se procede a construir una matriz de confusión específica para cada mapa de cobertura. En este proceso, se emplea la herramienta <<*Create Accuracy Assesment Points*>>, la cual genera puntos de validación de manera aleatoria. Estos puntos sirven para verificar la correspondencia entre la clasificación de cobertura asignada y la realidad. Se ha establecido un conjunto de 60 puntos de validación, que representa el valor mínimo recomendado para esta herramienta. Posteriormente, se realiza el cálculo de la matriz de confusión con el objetivo de determinar el índice Kappa. Este cálculo se lleva a cabo mediante la herramienta << *Compute Confusion Matrix*>> dispuesta en el panel de *Geoprocessing*.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Coberturas de la tierra para el municipio Paz de Río

La transformación del paisaje, de la vegetación y del suelo es conocido como el cambio de las coberturas de la tierra, los cuales están directamente relacionados con la localización, la geología y los aspectos biofísicos de cualquier área geográfica. El análisis de dichos cambios es una herramienta importante en el proceso de planificación y gestión de cualquier territorio, ya que permite evaluar y diagnosticar la ocupación y evolución del uso del suelo y sus posibles consecuencias ambientales, económicas y sociales. Ahora bien, para que esta herramienta cumpla adecuadamente su función es necesario llevar una representación espacial adecuada, que permita visualizar la distribución, aumento y disminución de las coberturas de la tierra en un determinado periodo.

El Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) de un municipio representa una valiosa herramienta de planificación destinada a regular el uso del suelo y preservar el medio ambiente, con el objetivo de asegurar un desarrollo sostenible, organizado y equitativo del territorio. En el contexto específico del municipio de Paz de Río, el EOT presenta un mapa de coberturas que incluye zonas cubiertas por bosques, arbustos, pastos, malezas, hierbas, cultivos, afloramientos rocosos, zona industrial, cobertura hídrica, y fenómenos de inestabilidad. Para la determinación de estas coberturas utilizaron una imagen SENTINEL II tomada el 22 de agosto de 2022, cuya resolución espectral es de 4 bandas y resolución espacial de 10 m.

Considerando la información reportada en el EOT del municipio y las coberturas resultantes de nuestro estudio, se llevó a cabo una comparación de datos. Es importante señalar que, de manera similar a lo expuesto en este documento, el análisis efectuado en el EOT municipal se sustentó en la metodología CORINE Land Cover, adaptada para Colombia por el IDEAM, determinando cinco (05) categorías de nivel primario, las cuales se subdividieron hasta alcanzar un nivel de detalle de sexto nivel.

En el mapa de coberturas del EOT el 35,34% del total de coberturas del municipio está compuesto por 10,92% de arbustal abierto, 8,37% de arbustal denso, 2,22% de bosque de galería ripario, y 13,83% de bosque fragmentado, valores similares a los obtenidos en el presente análisis multitemporal para la cobertura de vegetación densa que predomina en el municipio y que cuenta con un área de 7095,61 ha, 6615,83 ha, 8106,89 ha, y 6761,94 ha, representando el 33,91%, 31,61%, 38,74% y 32,31% para los años 1986, 2000, 2016 y 2023 respectivamente.

Para la cobertura de vegetación herbácea y arbustiva se obtuvieron áreas de 6806,05 ha, 6574,74 ha, 7462,42 ha, y 6657,52 ha, que representan el 32.52%, 31.42%, 35.66% y 31.81%. Por otro lado, el 19,27% del área de cobertura del mapa actual del EOT está compuesto por diferentes subcategorías, como un 2,26% de herbazal abierto y arenoso, un 6,11% de herbazal denso con presencia de árboles, un 6,98% de herbazal denso sin árboles, y un 3,92% de plantación forestal. Estas subcategorías se distribuyen en toda la región de Paz de Río, con un predominio marcado en los límites nororientales y suroccidentales del municipio.

La cobertura denominada tejido urbano hace referencia al casco urbano de los municipios de Paz de Río y Sativa Sur ubicados en la parte Sur oriental y Nororiental, y que en el análisis multitemporal arrojó valores de 57,84 ha, 76,08 ha, 128,20 ha y 153,23 ha, representan el 0,28%, 0,36%, 0,61%, y el 0,73% para los años 1986, 2000, 2016 y 2023 respectivamente. Por su parte, en el mapa de cobertura del EOT se presenta el 0,45% de tejido urbano continuo, 0,08% de tejido urbano discontinuo, y el 0,13% de zonas industriales, representando en total el 0,66%. A partir de lo anterior se evidencia similitud en los valores obtenidos con los valores reportados en el EOT.

La cobertura de pastos limpios hace referencia a las zonas de pradera y fincas en las que posiblemente se desarrollen actividades de ganadería con áreas de 1947,58 ha (9.31%), 917,18 ha (4,38%), 849,83 ha (4,06) y 1106,76 ha (5,29 %) y que en el mapa de coberturas del EOT cubre el 11,63% compuesto por 0,86% de Mosaico de pastos con espacios

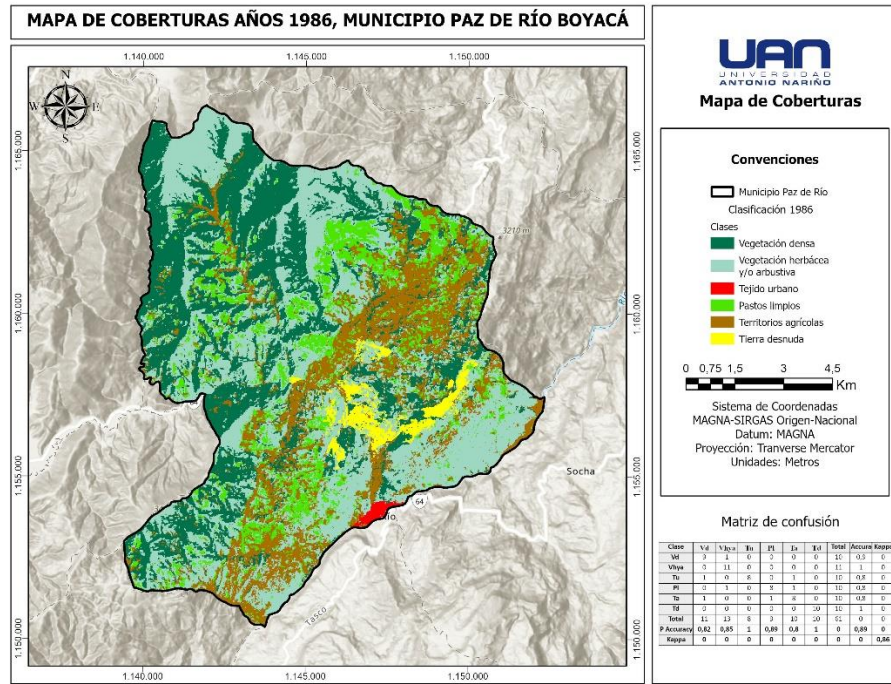
naturales, 1,07% de Mosaico de pastos y cultivos, 0,69% de Pastos arbolados, 0,15% de Pastos limpios, y 8,86% de Pastos enmalezados.

Por su parte la cobertura de Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales en el actual EOT representa el 22.38% y que en los mapas de cobertura del presente análisis se ubican principalmente en una franja central que se extiende en dirección norte hacia el oriente y sur hacia el occidente del municipio comprendiendo un área de 4640,07 ha (22,17%), 6239,38 ha (29,82%), 3957,75 ha (18,91%), y 5486,51 ha (26,22%) para los años 1986, 2000, 2016 y 2023 respectivamente.

Por último, la cobertura de Tierras desnudas y degradadas que ocupa el 4.22% en el mapa de coberturas del EOT actual y que en los mapas de análisis multitemporal de los cuatro años objeto de estudio ocupó el 1.81%, 2.41%, 2.02% y el 3.64% con áreas de cobertura de 379,77 ha, 503,72 ha, 421,84 ha y 760,96 ha. Este tipo de cobertura indica áreas descubiertas tales como canteras, terrenos destinados a la explotación minera, suelos sin vegetación y zonas propensas a fenómenos de remoción en masa. En los mapas de cobertura generados predomina en la parte central del municipio en los mapas de los años 1986, 2000 y 2016, pero se observa que para el año 2023 tanto en el mapa de análisis multitemporal como en el mapa de coberturas del EOT su ubicación tiende hacia el sureste del municipio.

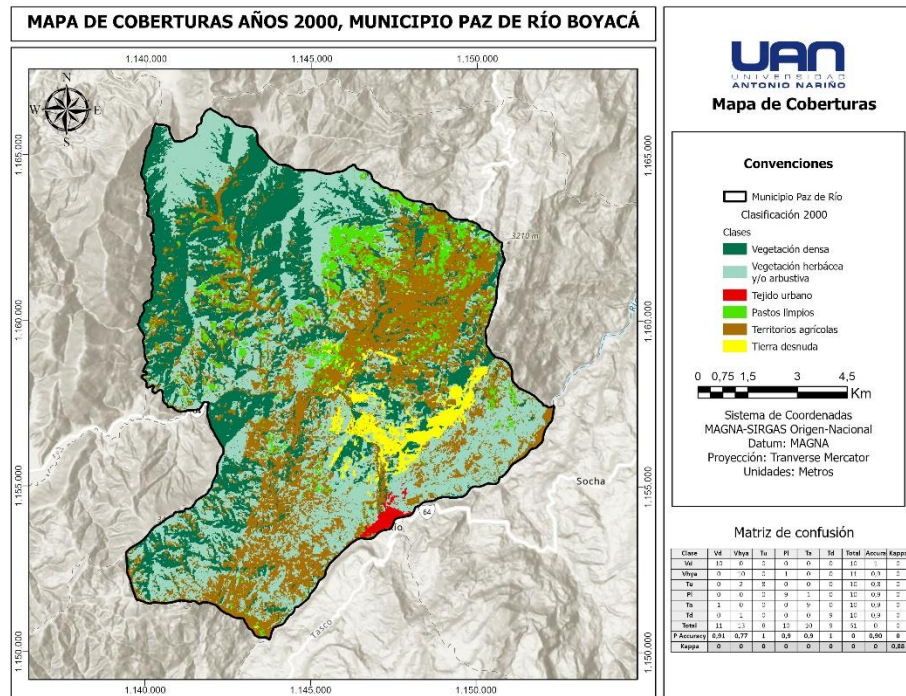
En relación con la información presentada anteriormente, se muestran los mapas de coberturas para el municipio de Paz de Río en los años 1986, 2000, 2016 y 2023 (**Figura 13**, **Figura 14**, **Figura 15** y **Figura 16**). Es importante destacar que, para todas estas clasificaciones de cobertura, el índice kappa supera el umbral de 0.85, lo que indica una buena aproximación del método con las coberturas de la zona.

Figura 13. Mapa de coberturas para el año 1986 (Landsat 5). Índice Kappa: 0,86



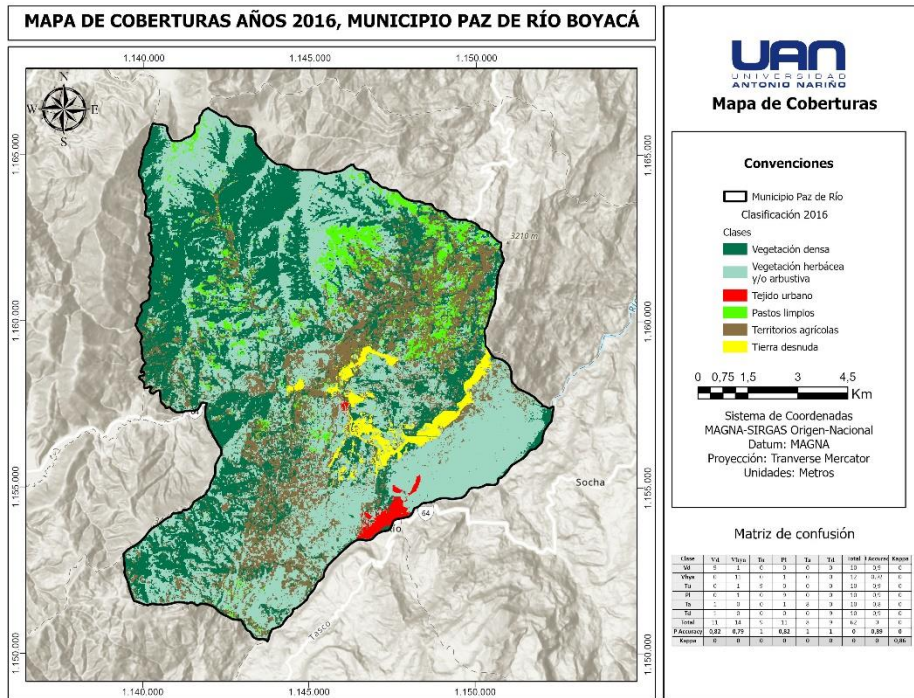
Fuente: Autores, 2023.

Figura 14. Mapa de coberturas para el año 2000 (Landsat 7). Índice Kappa: 0,88



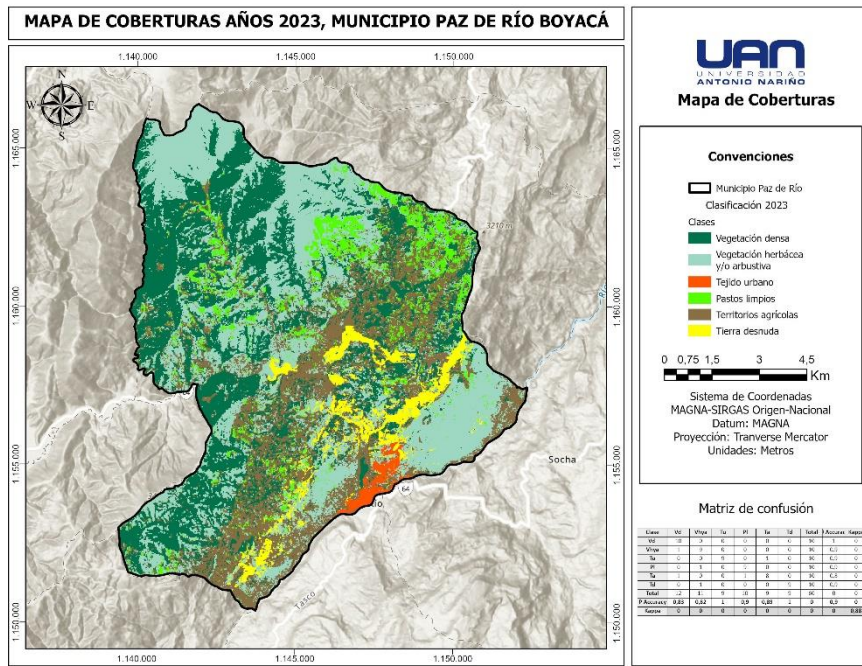
Fuente: Autores, 2023.

Figura 15. Mapa de coberturas para el año 2016 (Landsat 8). Índice Kappa: 0,86



Fuente: Autores, 2023.

Figura 16. Mapa de coberturas para el año 2023 (Landsat 9). Índice Kappa: 0,88



Fuente: Autores, 2023.

6.2 Cambio de coberturas en el municipio Paz de Río

Para evaluar los cambios en las coberturas de tierra entre 1986 y 2023 en el municipio de Paz de Río, se realizó un análisis comparativo por pares de años de las coberturas determinadas. Esto implicó la elaboración de mapas de cambio y matrices de transición.

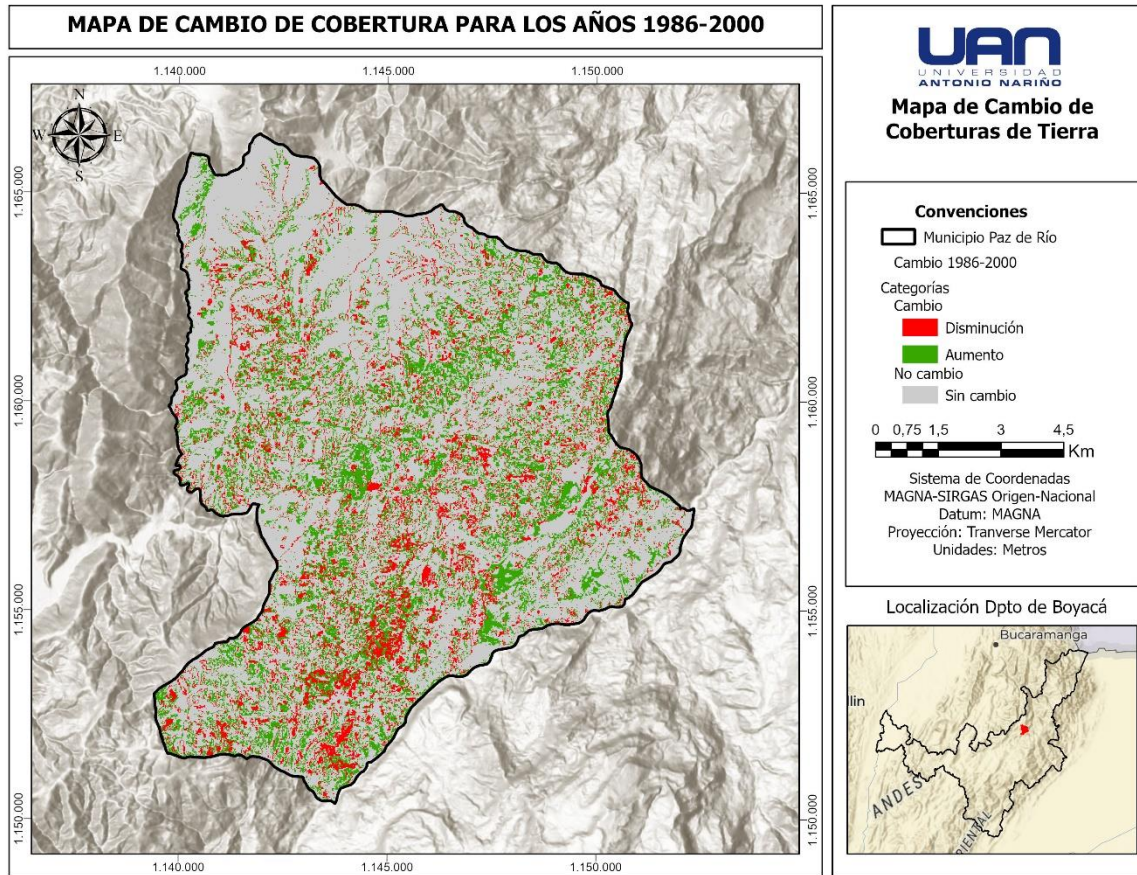
6.2.1 Cambio de coberturas del año 1986 al año 2000

Como resultado del análisis para los años entre 1986 y 2000, se registran cambios en un total de 3482,99 ha. Se observaron pérdidas de superficie en las categorías de vegetación densa, vegetación herbácea y/o arbustiva, así como pastos limpios durante este período, mientras que las categorías de territorios agrícolas, tierra desnuda y tejido urbano experimentaron ganancias en extensión (**Tabla 6**).

La **Tabla 7** muestra la proporción de coberturas que se mantuvieron constantes a lo largo de este período de tiempo, lo cual se refleja en la diagonal de la matriz. Además, proporciona información sobre la cantidad de hectáreas en las que una categoría de cobertura se transforma en otra. De este modo, la cobertura de vegetación densa tenía una extensión de 7095,61 ha en 1986 y disminuyó a 6615,83 ha en el año 2000. De éstas, 5492,38 ha se mantuvieron constantes, mientras que el resto experimentó principalmente una transición hacia las categorías de vegetación herbácea y/o arbustiva y territorios agrícolas. En el caso de la cobertura de vegetación herbácea y/o arbustiva 4757,01 ha se mantuvieron invariables, mientras que 1409,34 ha se transformaron en territorios agrícolas. En cuanto a la categoría de pastos limpios, 609,53 ha se mantuvieron sin cambios, y 875,56 ha se convirtieron en territorios agrícolas.

Estos datos muestran que, durante este período de 14 años, la cobertura de territorios agrícolas fue la que experimentó la mayor expansión alcanzando una diferencia positiva de 1599, 31 ha (**Tabla 6**).

Figura 17. Mapa de cambio de coberturas de tierra para los años 1986-2000



Fuente: Autores, 2023.

Tabla 6. Relación de áreas de cobertura para los años 1986 y 2000

	Cobertura	1986 (ha)	2000 (ha)	Diferencia (ha)	1986 (%)	2000 (%)	Diferencia (%)
1	Vegetación densa	7095,61	6615,83	-479,78	33,91	31,61	-2,30
2	Vegetación herbácea y/o arbustiva	6806,05	6574,74	-231,31	32,52	31,42	-1,10
3	Tejido urbano	57,84	76,08	18,24	0,28	0,36	0,08
4	Pastos limpios	1947,58	917,18	-1030,40	9,31	4,38	-4,93
5	Territorios agrícolas	4640,07	6239,38	1599,31	22,17	29,82	7,65
6	Tierra desnuda	379,77	503,72	123,95	1,81	2,41	0,60
	TOTAL	20926,93	20926,93		100	100	

Fuente: Autores, 2023.

Tabla 7. Matriz de transición para las coberturas de los años 1986 y 2000. Vd: Vegetación densa, Vhya: vegetación herbácea, Tu: Tejido urbano, Pl: Pastos limpios, Ta: Territorios agrícolas y Td: Tierra desnuda.

		AÑO 2000						Total 1986
		Vd	Vhya	Tu	Pl	Ta	Td	
AÑO 1986	Vd	5492,38	914,50	8,95	13,68	606,70	59,39	7095,61
	Vhya	712,06	4757,01	12,78	108,60	1115,72	99,88	6806,05
	Tu	1,74	3,03	47,49	0,62	4,66	0,30	57,84
	Pl	23,17	411,55	0,99	609,53	875,56	26,80	1947,58
	Ta	360,77	440,48	5,67	184,18	3603,51	45,47	4640,07
	Td	25,70	48,18	0,20	0,58	33,23	271,88	379,77
Total 2000		6615,83	6574,74	76,08	917,18	6239,38	503,72	20926,93

Fuente: Autores, 2023.

6.2.2 Cambio de coberturas del año 2016 al año 2023

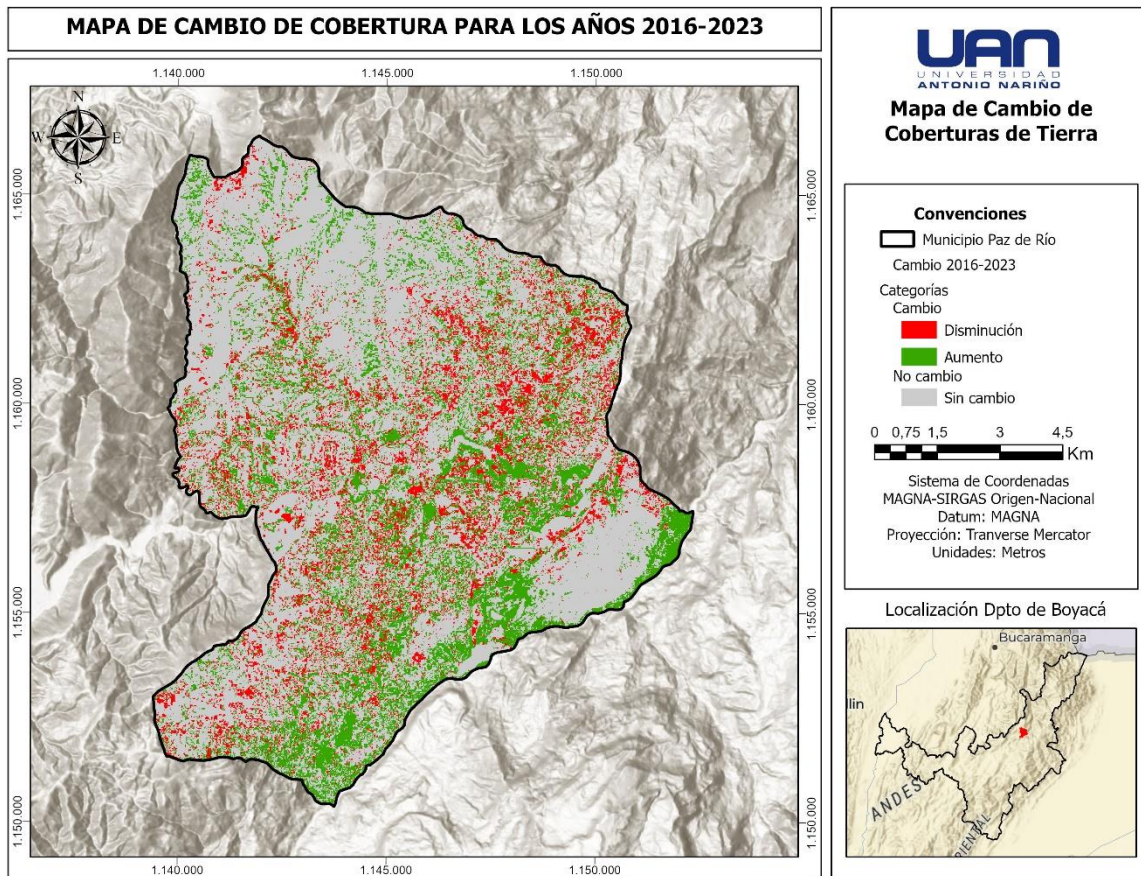
Para el periodo comprendido entre 2016 y 2023 se visualiza en el mapa de cambio una mayor incidencia de zonas con disminución en coberturas en una franja que se extiende en dirección suroeste a noreste (**Figura 18**), en comparación con el mapa de cambio anterior. Durante estos 7 años, se registraron modificaciones en un total de 4299,70 ha. En términos de pérdida de área, se observó una disminución en las coberturas de vegetación densa y vegetación herbácea y/o arbustiva, mientras que las categorías de territorios agrícolas, pastos limpios, tierras desnudas y tejido urbano experimentaron un aumento en su extensión (**Tabla 8**).

En la matriz de transición, se denota que para la clase vegetación densa, las principales transiciones se dirigieron hacia las categorías de vegetación herbácea y/o arbustiva con una extensión de 1058,21 ha, y territorios agrícolas con una extensión de 1289,15 ha. En el caso de la categoría de vegetación herbácea y/o arbustiva, se mantuvo sin cambios en 4855,68 ha, mientras que la superficie restante se transformó en territorios agrícolas con 1409,34 ha, tierra desnuda con 255,76 ha y pastos limpios con 221,59 ha. La clase de pastos limpios se mantuvo constante en 398,70 ha y experimentó principalmente una transición hacia territorios agrícolas con una extensión de 252,84 Ha. Finalmente, la

cobertura de territorios agrícolas se mantuvo invariable en 2433,58 ha y también tuvo una transición hacia la categoría de tierra desnuda en 106,53 ha (**Tabla 9**).

En resumen, durante este período, se observa una pérdida significativa de las coberturas de vegetación densa y vegetación herbácea y/o arbustiva, al mismo tiempo que se registra un aumento constante en las categorías de territorios agrícolas y tierras desnudas. Esto indica un cambio importante en el uso de la tierra en la zona, con una tendencia hacia la conversión de áreas naturales en zonas más destinadas a actividades agrícolas y urbanas.

Figura 18. Mapa de cambio de coberturas de tierra para los años 2016-2023



Fuente: Autores, 2023.

Tabla 8. Relación de áreas de cobertura para los años 2016 y 2023

	Cobertura	2016 (ha)	2023 (ha)	Diferencia (ha)	2016 (%)	2023 (%)	Diferencia (%)
1	Vegetación densa	8106,89	6761,94	-1344,95	38,74	32,31	-6,43
2	Vegetación herbácea y/o arbustiva	7462,42	6657,52	-804,90	35,66	31,81	-3,85
3	Tejido urbano	128,2	153,23	25,03	0,61	0,73	0,12
4	Pastos limpios	849,83	1106,76	256,93	4,06	5,29	1,23
5	Territorios agrícolas	3957,75	5486,51	1528,76	18,91	26,22	7,31
6	Tierra desnuda	421,84	760,96	339,12	2,02	3,64	1,62
	TOTAL	20926,93	20926,93		100	100	

Fuente: Autores, 2023.

Tabla 9. Matriz de transición para las coberturas de los años 2016 y 2023. Vd: Vegetación densa, Vhya: vegetación herbácea, Tu: Tejido urbano, Pl: Pastos limpios, Ta: Territorios agrícolas y Td: Tierra desnuda.

		AÑO 2023						Total 2016
		Vd	Vhya	Tu	Pl	Ta	Td	
AÑO 2016	Vd	5595,79	1058,21	9,14	71,02	1289,15	83,58	8106,89
	Vhya	663,78	4855,68	56,27	221,59	1409,34	255,76	7462,42
	Tu	3,31	3,54	81,69	0,27	36,71	2,67	128,20
	Pl	31,57	161,56	2,20	398,70	252,84	2,95	849,83
	Ta	454,73	546,06	3,74	413,10	2433,58	106,53	3957,75
	Td	12,77	32,46	0,19	2,07	64,90	309,46	421,84
Total 2023		6761,94	6657,52	153,23	1106,76	5486,51	760,96	20926,93

Fuente: Autores, 2023.

6.2.3 Cambio de coberturas en los últimos 37 años

En el análisis de cambio de coberturas tomando las coberturas de 1986 y 2023 se registró una reducción asociada a las coberturas de vegetación densa, vegetación herbácea y/o arbustiva y pastos limpios, por otro lado, se presenta un incremento en la extensión en superficie de las coberturas territorios agrícolas, tierra desnuda y tejido urbano (**Tabla 10**).

La vegetación densa se mantuvo constante en 4878,72 ha y experimentó transiciones hacia otras categorías, como vegetación herbácea y/o arbustiva en 1297,33 ha, territorios

agrícolas en 773,54 ha y tierra desnuda en 103,21 ha. Por otro lado, la vegetación herbácea y/o arbustiva se mantuvo invariable en 4392,92 ha y pasó a territorios agrícolas en 1106,18 ha, tierra desnuda en 209,03 ha y pastos limpios en 162,59 ha. La cobertura pastos limpios experimentó una transición hacia territorios agrícolas en 653,58 ha. Finalmente, la cobertura de territorios agrícolas se mantuvo en 2880,42 ha y tuvo una transición hacia tierras desnudas en 169,98 ha (**Tabla 11**).

La expansión de la cobertura de tierras desnudas está vinculada al aumento de actividades mineras en la región, especialmente en la zona oriental del municipio. También está relacionada con la presencia de movimientos de remoción en masa, como el deslizamiento de Coloradales - El Salitre, que comenzó en 1987 y que hasta la fecha ha generado una extensa área de esta cobertura. Estos factores contribuyen al cambio en la cobertura de tierras desnudas en la región de Paz de Río.

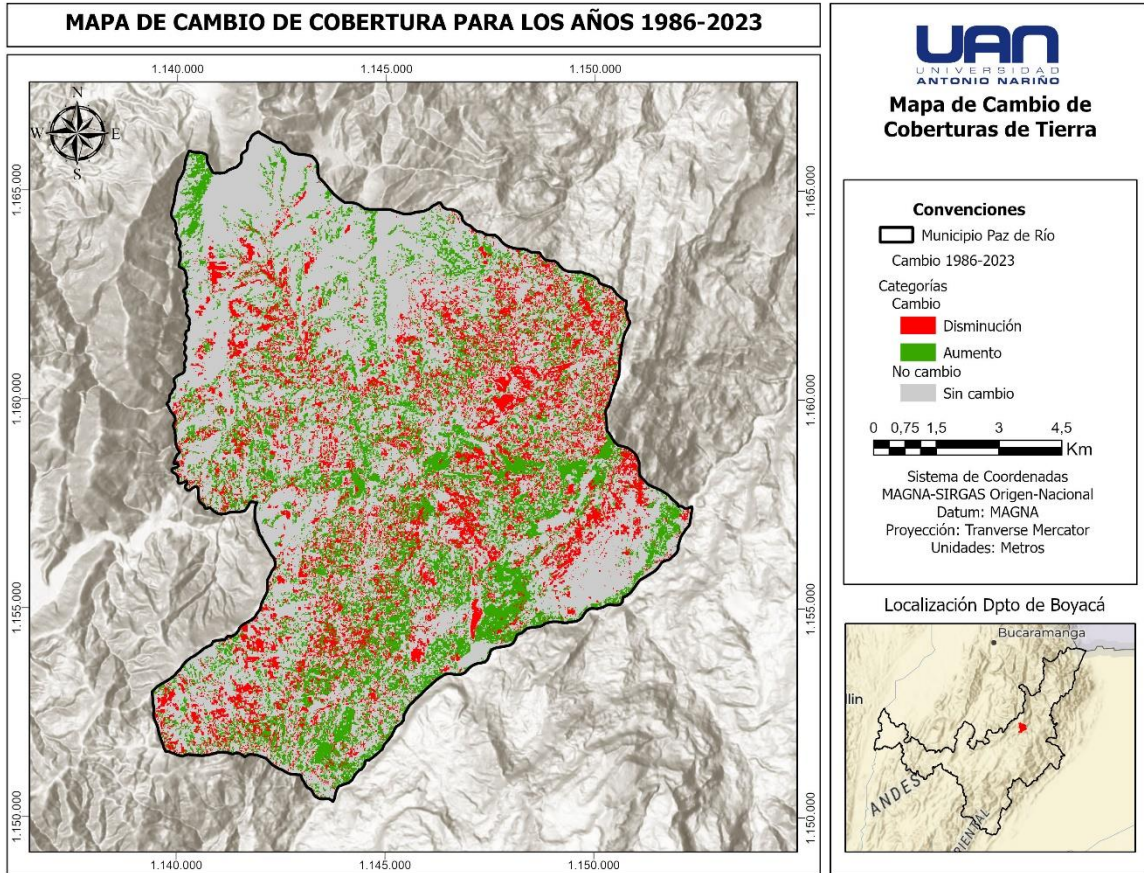
La diferencia entre las coberturas de vegetación densa y vegetación herbácea y/o arbustiva de los años 1986 al 2023 representan una cantidad menor a la reportada en el análisis de los años 2016 al 2023. Esto podría estar influenciado por los planes de reforestación propuestos en el Plan de Desarrollo del municipio, que tenían como objetivo plantar alrededor de 120 ha por año durante el período de 2005 a 2015.

Tabla 10. Relación de áreas de cobertura para los años 1986 y 2023

	Cobertura	1986 (ha)	2023 (ha)	Diferencia (ha)	1986 (%)	2023 (%)	Diferencia (%)
1	Vegetación densa	7095,61	6761,94	-333,67	33,91	32,31	-1,60
2	Vegetación herbácea y/o arbustiva	6806,05	6657,52	-148,53	32,52	31,81	-0,71
3	Tejido urbano	57,84	153,23	95,39	0,28	0,73	0,45
4	Pastos limpios	1947,58	1106,76	-840,82	9,31	5,29	-4,02
5	Territorios agrícolas	4640,07	5486,51	846,44	22,17	26,22	4,05
6	Tierra desnuda	379,77	760,96	381,19	1,81	3,64	1,83
	TOTAL	20926,93	20926,93		100	100	

Fuente: Autores, 2023.

Figura 19. Mapa de cambio de coberturas de tierra para los últimos 37 años 2016-2023



Fuente: Autores, 2023.

Tabla 11. Matriz de transición para las coberturas de los años 1986 y 2023. Vd: Vegetación densa, Vhya: vegetación herbácea, Tu: Tejido urbano, Pl: Pastos limpios, Ta: Territorios agrícolas y Td: Tierra desnuda.

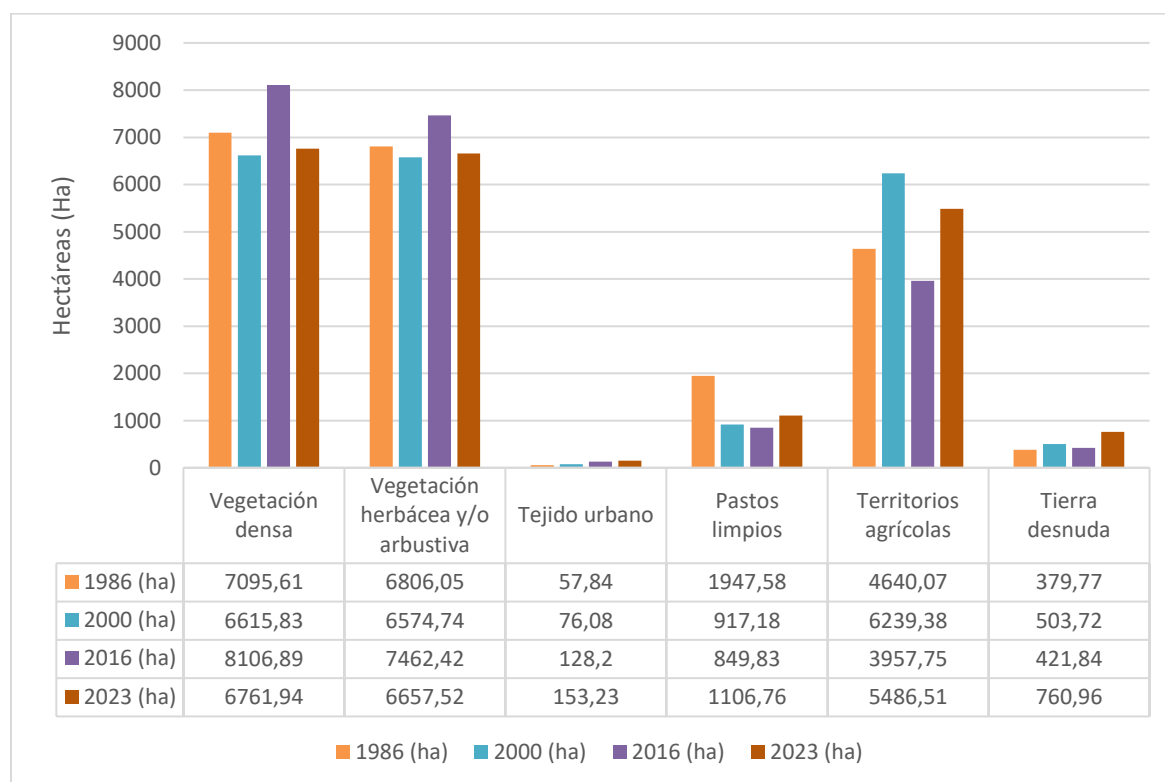
		AÑO 2023						Total 1986
		Vd	Vhya	Tu	Pl	Ta	Td	
AÑO 1986	Vd	4878,72	1297,33	8,56	34,25	773,54	103,21	7095,61
	Vhya	860,91	4392,92	74,43	162,59	1106,18	209,03	6806,05
	Tu	1,03	2,52	44,58	0,25	9,26	0,19	57,84
	Pl	162,28	485,24	2,31	590,84	653,58	53,33	1947,58
	Ta	823,98	424,88	23,07	317,73	2880,42	169,98	4640,07
	Td	35,02	54,63	0,26	1,11	63,54	225,22	379,77
Total 2023		6761,94	6657,52	153,23	1106,76	5486,51	760,96	20926,93

Fuente: Autores, 2023.

En términos generales, para los cuatros años se denota una tendencia a la disminución en la superficie de las coberturas de vegetación densa y vegetación y/o arbustiva, con la excepción del año 2016, como se mencionó anteriormente, lo cual podría estar relacionado con planes de reforestación. Igualmente, se evidencia una tendencia a la reducción de la cobertura de pastos limpios, que, según los datos analizados, tiende a ser reemplazada por territorios agrícolas.

En contraste, se observa una tendencia positiva en los cuatro años con un aumento en las coberturas de territorios agrícolas, tierras desnudas y tejido urbano. Estos cambios reflejan la dinámica en la transformación de las coberturas de tierra en la región de Paz de Río durante el período de estudio (**Figura 20**).

Figura 20. Variación de las coberturas de la tierra en las 4 imágenes analizadas



Fuente: Autores, 2023.

7. CONCLUSIONES

- A través de la fotointerpretación de imágenes satelitales Landsat en el municipio de Paz de río para los años 1986, 2000, 2016 y 2023, se identificaron seis categorías de coberturas: 1. Vegetación densa, 2. Vegetación herbácea y/o arbustiva, 3. Tejido Urbano, 4. Pastos limpios, 5. Territorios agrícolas y 6. Tierra Desnuda.
- Durante el período entre 1986 y 2000, se observó un notable aumento en la expansión de territorios agrícolas, con un incremento de 1599,31 ha. Este aumento estuvo relacionado con la disminución de las áreas de vegetación densa (-479,78 ha), vegetación herbácea y/o arbustiva (-231,31 ha), y pastos limpios (-1030,40 ha).
- Entre 2016 y 2023, se destacó un significativo cambio en el uso de la tierra en el municipio. Se evidenció una marcada disminución de áreas naturales representadas por la vegetación densa y la vegetación herbácea y/o arbustiva, mientras que se registró un aumento en las actividades agrícolas y urbanas. Este cambio se relacionó principalmente con el aumento de las coberturas de territorios agrícolas (1528,76 ha) y tierra desnuda (339,12 ha), siendo esta última asociada a procesos de minería y eventos de remoción en masa.
- Los resultados obtenidos del análisis multitemporal que abarca un período de 37 años resaltan una clara tendencia de cambio en el uso de la tierra. Esta tendencia se caracteriza por un incremento constante en las actividades agropecuarias, agrícolas mixtas y urbanas, lo cual se refleja en la continua expansión de las coberturas de territorios agrícolas, y en menor medida, de tierras desnudas. En contraste, se observa una tendencia decreciente en las áreas cubiertas por vegetación densa y vegetación herbácea y/o arbustiva. En lo que respecta a la cobertura de tejido urbano, se evidencia un crecimiento progresivo, aunque este es lento en comparación con las otras transformaciones del uso de la tierra.

- En el año 2016, se observó un incremento notable en las coberturas de vegetación densa y vegetación herbácea y/o arbustiva. Esta tendencia posiblemente está vinculada con la ejecución del plan de reforestación 2005-2015 establecido en el Plan de Desarrollo de Paz de Río.
- A través del análisis del comportamiento de las coberturas de la tierra en el municipio de Paz de Río, se observa un cambio significativo en la dinámica económica, con una clara tendencia al crecimiento en los sectores de agricultura y minería. Este cambio se refleja en el aumento de las coberturas de territorios agrícolas y tierras desnudas. Paralelamente, se destaca un desarrollo ambiental, posiblemente relacionado con la implementación exitosa de planes de reforestación llevados a cabo en el municipio
- El estudio actual de coberturas proporciona al municipio de Paz de Río una visión integral de la evolución de las coberturas del suelo en los últimos 37 años, siendo una herramienta de apoyo para la elaboración de Esquemas de Ordenamiento Territorial a futuro, así como en la toma de decisiones en pro del desarrollo sostenible del municipio.
- El estudio actual fue llevado a cabo utilizando las herramientas proporcionadas por la Universidad Antonio Nariño, con un enfoque especial en el software ArcGIS PRO, donde se ejecutó el proceso de clasificación supervisada.

8. RECOMENDACIONES

- Es importante destacar que, debido a las variadas características de diferentes satélites, es posible que se observen diferencias en la resolución de las imágenes resultantes. Por ejemplo, es notable para la imagen Landsat 5 carece de la banda pancromática, lo que implica la necesidad de realizar procesamientos distintos según el satélite utilizado. Se recomienda preferentemente emplear imágenes generadas con el mismo tipo de sensor para mantener una consistencia en el análisis.
- Según la metodología empleada, se sugiere que, para el entrenamiento de la clasificación en ArcGIS Pro, se recojan como mínimo 300 puntos de muestra por cada cobertura. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este valor puede variar en función de la escala del estudio y la resolución de la imagen utilizada.
- Se sugiere llevar a cabo un trabajo de campo con el propósito de validar las clasificaciones de coberturas, permitiendo la identificación directa y precisa de las características del terreno.
- Se sugiere al municipio de Paz de Río que tome en cuenta este tipo de estudios, los cuales comprenden análisis multitemporales, con el objetivo de dirigir su crecimiento, uso y cobertura del suelo hacia áreas más propicias. Además, estos estudios pueden servir como guía para tomar decisiones informadas en los Planes y Esquemas de Ordenamiento Territorial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alejandro Murillo Castañeda, R., & Enrique Ortiz Davila, Á. (2018). Máquinas de soporte vectorial para clasificación supervisada de imágenes en bases de datos espaciales. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informacao*.
- Ardila León, J. F., & Quintero Delgado, Ó. Y. (2013). Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: Río Soapaga, sector Paz De Río, Boyacá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(2). <https://doi.org/10.18359/rcin.223>
- Belgiu, M., & Drăgu, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 114). <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Catalán Urzúa, A. (2019). Técnicas De Procesamiento Digital De Imágenes. *Revista de Marina N°969*, 969.
- Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52, 1–371.
- Chuvieco Emilio. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52, 1–371.
- Corpoboyacá. (2007). *Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Paz de Río*.
- Flórez-Yepes, G. Y., Rincón-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M. (2017). Multitemporal analysis of the vegetation cover in the area of influence of the mines located in the high part of Maltería in Manizales, Colombia. *DYNA (Colombia)*, 84(201). <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>
- García-Calabrese, M. V., Amarilla Rodríguez, S. M., Rodas Insfrán, O. I., & Echeverría Medina, C. G. (2017). Multitemporal analysis of changing land use in the Department Alto Paraguay, Paraguay. *Investigación Agraria*, 19(2), 93–100. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2017.diciembre.93-100>
- Gregorio, A. Di, & Jansen, L. J. M. (2005). Land Cover Classification System. In *October* (Issue October).
- IDEAM. (2012). CATÁLOGO DE PATRONES DE COBERTURAS DE LA TIERRA COLOMBIA Interpretes participantes (Patrones y fotos terrestres). *Carrera*, 10(20).

- Jansen, J. R. (2016). *Introductory Digital Processing: A Remote Sensing Perspective: Vol. 4th Edición* (Pearson, Ed.).
- Lira Chávez, J. (n.d.). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*.
- Molo, C. X., & Cardozo, O. D. (2021). Análisis de la dinámica de las coberturas de la tierra en el este chaqueño entre 2015 y 2019. *Geográfica Digital*, 18(36).
<https://doi.org/10.30972/geo.18365822>
- PIMIENTO, M. (2019). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL PARAMO DE PISBA JURISDICCION DEL MUNICIPIO DE TASCO PARA EL PERIODO 1990 - 2015* [PDF- Trabajo de Grado]. UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.
- Poveda-Sotelo, Y., Bermúdez-Cella, M. A., & Gil-Leguizamón, P. (2022a). Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2). <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022002>
- Poveda-Sotelo, Y., Bermúdez-Cella, M. A., & Gil-Leguizamón, P. (2022b). Evaluation of supervised classification methods for the estimation of spatiotemporal changes in the Merchán and Telecom paramos, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 51–72.
<https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022002>
- Quezada, A. S., Sevilla Tapia, J. D., & Avilés Sacoto, E. C. (2022). Estimación de la tasa de deforestación en Pastaza y Orellana- Ecuador mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales durante el período 2000-2020. *Revista Alfa*, 6(17), 282–299.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i17.168>
- Richards, J. A. (2022a). Remote sensing digital image analysis. In *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6>
- Richards, J. A. (2022b). Remote sensing digital image analysis. In *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6>
- Running, S. W. (2008). Climate change: Ecosystem disturbance, carbon, and climate. In *Science* (Vol. 321, Issue 5889). <https://doi.org/10.1126/science.1159607>
- U.S. Geological Survey. (2019). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*.

USGS. (n.d.). *Landsat Satellite Missions*. Retrieved September 2, 2023, from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>

Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2018). Sistema multi-algoritmo para la clasificación de coberturas de la tierra en el bosque seco tropical del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 58. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3497>

Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.006>