

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Agronomía

**Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de
conservación La Capilla, Cañar**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Agrónomo

Autor:

Dick Miguel Vega Arteaga

Director:

Gabriela Carolina Villamagua Vergara

ORCID:  0000-0002-1678-3666

Cuenca, Ecuador

2024-08-08

Resumen

Se llevo a cabo un análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de conservación La Capilla, en el cantón Cañar durante el periodo de 1986 a 2021. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat, las cuales, mediante el proceso de generación de firmas espectrales, se logró la clasificación supervisada de nueve categorías de ocupación con la finalidad de identificar cambios significativos en las diferentes coberturas vegetales del área de estudio a lo largo de 35 años y se aplicó una tabla de evolución y tasa de cambio anual de la superficie conjunto con un análisis de matriz de tabulación cruzada. En términos generales, la cobertura de bosque nativo aumentó considerablemente durante los periodos de 2001 a 2021, solo se ve afectada temporalmente por el desarrollo de la cobertura plantación forestal de pino entre los años 1996 y 2001; posterior a este periodo, se nota una tendencia creciente a la recuperación de esta cobertura. La vegetación arbustiva, en cambio muestra una tendencia decreciente, hasta 2016 está se ve afectada disminuyendo su cobertura y se recupera ligeramente en 2021. Los principales patrones de cambio al interior del área de estudio están relacionados con incendios fortuitos y por la degradación del suelo, esto último aun condicionado por la ganadería realizada en el pasado. Por tanto, la estrategia de destinar el área para conservación, de manera general ha funcionado. Sin embargo, se requiere medidas de restauración más activas e integración de medidas productivas más sostenibles, puesto que existe una presión antrópica fuerte en los límites del área. Estos hallazgos destacan la importancia de monitorear y conservar la cobertura vegetal en La Capilla para mitigar los impactos ambientales y garantizar la provisión de servicios ecosistémicos.

Palabras clave del autor: teledetección, detección de cambios, imágenes Landsat, dinámica

Abstract

A multitemporal analysis of vegetation cover change in the La Capilla conservation area, in the Cañar canton, during the period from 1986 to 2021 was carried out. Using Landsat satellite images and by generating spectral signatures, a supervised classification of nine categories of occupation was carried out. The objective was to identify significant changes in the different vegetation covers of the study area over 35 years. A table of evolution and annual rate of change of the area was applied together with a cross-tabulation matrix analysis. In general terms, native forest cover increased considerably during the periods from 2001 to 2021. This increase was temporarily affected by the development of pine plantation forest cover between 1996 and 2001. After this period, an increasing trend of native forest recovery was observed. On the other hand, shrub vegetation showed a decreasing trend until 2016, recovering slightly in 2021. The main patterns of change within the study area are related to accidental fires and soil degradation, the latter conditioned by past cattle ranching. The strategy of earmarking the area for conservation has generally worked. However, more active restoration measures and integration of more sustainable productive measures are needed due to the strong anthropic pressure on the area's borders. These findings highlight the importance of monitoring and conserving vegetation cover in La Capilla to mitigate environmental impacts and guarantee the provision of ecosystem services.

Author keywords: remote sensing, change detection, Landsat imagery, dynamic

Índice de contenido

1. Introducción.....	10
1.1. Objetivos.....	12
1.1.1. Objetivo general.....	12
1.1.2. Objetivos específicos.....	12
2. Hipótesis.....	13
3. Revisión de literatura	14
3.1. Generalidades.....	14
3.1.1. Sensores remotos	14
3.1.2. Espectro electromagnético.....	16
3.1.3. Imágenes de sensores remotos.....	17
3.1.4. Satélites Landsat.....	18
3.2. Clasificación de imágenes satelitales.....	21
3.2.2. Cobertura vegetal y uso de suelo.....	22
3.2.2.1. Cobertura vegetal del suelo	22
3.2.2.2. Uso de suelo	23
3.2.2.3. Importancia del estudio de cobertura vegetal y uso de suelo.....	23
3.2.3. Análisis multitemporal	23
3.3. Impacto de la pérdida de cobertura vegetal en ecosistemas de montaña.....	24
3.4. Uso de sensores remotos y estudios de análisis multitemporales en ecosistemas de montaña.....	25
3.5. Sucesión ecológica en ecosistemas de montaña.....	27
4. Metodología	29
4.1. Área de estudio.....	29
4.2. Delimitación del área de entrenamiento para las diferentes categorías de cobertura vegetal	30
4.3. Antecedentes del uso de suelo	31
4.4. Obtención de imágenes satelitales	32

4.5. Procesamiento de imágenes satelitales	33
4.6. Recorte	35
4.7. Generación de firmas espectrales	36
4.8. Clasificación supervisada de las coberturas.....	40
4.9. Validación por encuestas.....	43
4.10. Análisis multitemporal y estadístico	43
5. Resultados.....	47
5.1. Cambios del uso de suelo y cobertura vegetal	47
5.2. Matriz de tabulación cruzada.....	64
6. Discusión.....	80
Conclusión	84
Referencias	87
Anexos	93

Índice de figuras

Figura 1. Plataformas usadas para los diferentes tipos de sensores.....	14
Figura 2. El espectro electromagnético.....	16
Figura 3. Bandas espectrales correspondientes a satélite Landsat 7: B1 (luz visible, azul); B2 (luz visible, verde); B3 (luz visible, roja); B4 (infrarrojo cercano); B5 (Infrarrojo medio); B6 (infrarrojo térmico)	17
Figura 4. Representación del satélite Landsat 8.....	19
Figura 5. Localización del sitio de estudio, área de conservación La Capilla, cantón y provincia de Cañar, entre las cuencas del río Paute y Cañar	29
Figura 6. Delimitación del área de entrenamiento para las diferentes categorías de cobertura vegetal, a nivel de las microcuencas de la Quebrada Zhamishan y del Río Tambo	31
Figura 7. Proceso de obtención de imágenes satelitales Landsat.....	32
Figura 8. Proceso de composición de imágenes satelitales mediante la herramienta Image Analysis del software ArcGIS Desktop.....	34
Figura 9. Creación de mosaicos para la eliminación de nubosidad mediante la herramienta Mosaic.....	35
Figura 10. Proceso de recorte de mosaicos mediante la utilización de los límites del área de entrenamiento y área estudio.....	36
Figura 11. Creación de áreas de entrenamiento de píxeles para la obtención de firmas espectrales.....	37
Figura 12. Firma espectral de especies forestales de pino obtenida tras el entrenamiento de píxeles	38
Figura 13. Comparación de firmas espectrales de todas las coberturas vegetales identificadas	39
Figura 14. Proceso de delimitación de polígonos en plantaciones forestales de pino para la creación de contenedores de información vectorial	40
Figura 15. Inicio del proceso de clasificación supervisada tras la creación de polígonos que contienen información vectorial.....	41
Figura 16. Mapa de cobertura vegetal a nivel de microcuencas de la Quebrada Zhamishan y del Río Tambo obtenido mediante el método de clasificación “Random Forest Classifier” del año 2016.....	42
Figura 17. Flujograma de geoprocesos realizados en este proyecto	45
Figura 18. Cambios en la cobertura vegetal a lo largo de 35 años.....	48
Figura 19. Tasa de cambio anual de la cobertura de Cuerpos de Agua en distintos periodos	57
Figura 20. Tasa de cambio anual de la cobertura de Suelos Descubiertos y Vías en distintos periodos	57
Figura 21. Tasa de cambio anual de la cobertura de Pastos en distintos periodos.....	58
Figura 22. Tasa de cambio anual de la cobertura de Bosque Nativo en distintos periodos.....	59
Figura 23. Tasa de cambio anual de la cobertura de Vegetación Arbustiva en distintos periodos	60
Figura 24. Tasa de cambio anual de la cobertura de Vegetación Herbácea en distintos periodos	61
Figura 25. Tasa de cambio anual de la cobertura de Humedales en distintos periodos	61

Figura 26. Tasa de cambio anual de la cobertura de Mosaico de Bosque en distintos periodos.....	62
Figura 27. Tasa de cambio anual de la cobertura de Plantación forestal de pinos en distintos periodos.....	63
Figura 28. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 1991 y 1996	66
Figura 29. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 1996 y 2001	68
Figura 30. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2001 y 2006	70
Figura 31. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2006 y 2011	72
Figura 32. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2011 y 2016	75
Figura 33. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2016 y 2021	77

Índice de tablas

Tabla 1. Longitud de bandas Landsat 8 y aplicación de cada tipo.....	20
Tabla 2. Numero de imágenes satelitales Landsat descargadas por año.....	33
Tabla 3. Ejemplo de matriz de tabulación cruzada para dos tiempos con pérdidas (P) y ganancias (G).....	45
Tabla 4. Resumen de cambios en la cobertura vegetal (en hectáreas) entre 1986 y 2021 en el área de conservación La Capilla.....	47
Tabla 5. Índice de Exactitud (IE) de la clasificación supervisada.....	49
Tabla 6. Evolución en superficie y porcentaje de la cobertura vegetal entre 1986 y 1991 ..	50
Tabla 7. Evolución en superficie y porcentaje de la cobertura vegetal entre 1991 y 1996 ..	51
Tabla 8. Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre 1996 y 2001 ..	52
Tabla 9. Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre 2001 y 2006 ..	53
Tabla 10. Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre los años 2006 y 2011 ..	54
Tabla 11. Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre los años 2011 y 2016 ..	55
Tabla 12. Evolución en superficie tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre los años 2016 y 2021 ..	56
Tabla 13. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal entre 1986 y 1991 (superficie en ha) ..	65
Tabla 14. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 1991 y 1996 (superficie en ha) ..	66
Tabla 15. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 1996 y 2001 (superficie en ha) ..	69
Tabla 16. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2001 y 2006 (superficie en ha) ..	71
Tabla 17. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2006 y 2011 (superficie en ha) ..	74
Tabla 18. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2011 y 2016 (superficie en ha) ..	76
Tabla 19. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2016 y 2021 (superficie en ha) ..	79

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Programa Montañas - GIZ Cañar, a la comunidad La Capilla y a su Consejo de Gobierno, por brindarme la oportunidad de involucrarme en el proceso de restauración de los páramos de la comunidad La Capilla del cantón Cañar, para realizar mi trabajo de titulación.

A mis padres Johnny Dick Vega Mora y Maritza Jahaira Arteaga Quiroz, les debo un inmenso agradecimiento por su constante apoyo en mi desarrollo profesional. Su amor, sacrificio y aliento han sido el motor que me impulsa a seguir adelante en cada paso que doy.

A mis amigos Juan Andrés Tamayo Álvarez y Franklin Alejandro Brito Velecela, les agradezco profundamente por estar siempre presentes, brindándome su amistad y apoyo incondicional.

Y finalmente, mi más sincero agradecimiento a mi tutora de Tesis, la Dra. Gabriela Carolina Villamagua Vergara, por su invaluable orientación, paciencia y dedicación. Su experiencia y guía fueron fundamentales para alcanzar este logro.

Dick Miguel Vega Arteaga

1. Introducción

Los ecosistemas de montaña están entre las áreas más amenazadas de los trópicos por la expansión de la frontera agropecuaria, los asentamientos humanos, la minería metálica y la explotación del recurso hídrico (Suarez et al., 2023); y a la vez, son zonas donde nacen la mayoría de cuencas de abastecimiento de agua y proveen una variedad de servicios ecosistémicos, tanto a las comunidades locales como a las ciudades, principalmente la regulación del agua en calidad y cantidad, almacenamiento de carbono y albergue de una diversidad de flora y fauna únicas (Del Castillo, 2015). Por eso, el monitoreo de áreas con cobertura vegetal nativa es de fundamental importancia, una vez que su conservación se hace necesaria, para evitar la sustitución de vegetación nativa densa por vegetación más rala o por suelo expuesto, teniendo en cuenta que un suelo sin vegetación es más sensible a la degradación ambiental (Coelho, 2015). Por lo tanto, garantizar la preservación de estos ecosistemas no solo es crucial para mantener su biodiversidad única y los servicios que proporcionan, sino también para asegurar la sostenibilidad de nuestras fuentes de agua y la salud ambiental de las regiones circundantes.

El estudio de los cambios espacio temporales de la cobertura vegetal, se han utilizado como un indicador a nivel del paisaje por su fácil localización geográfica, clasificación y cuantificación. También permite una mejor comprensión y monitoreo de las variaciones en el vigor vegetativo, abundancia y distribución de la cobertura vegetal en una determinada región (Gonzaga-Aguilar, 2015; Rosete-Vergés et al., 2008). Estos estudios son fundamentales no solo para evaluar el estado actual de la cobertura vegetal, sino también para prever y gestionar los cambios ambientales a largo plazo, contribuyendo así a estrategias efectivas de conservación y manejo del paisaje.

Según (Chuvienco, 2010), el análisis multitemporal permitirá detectar los diferentes cambios que ha sufrido un área de estudio determinada a lo largo de los años, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre el mismo.

En materia de conservación, manejo y restauración de la biodiversidad y los ecosistemas, un análisis multitemporal puede ayudar a evaluar áreas prioritarias para su conservación y/o restauración, así como establecer políticas públicas que promuevan la aplicación de medidas y el progreso de las mismas en estas áreas prioritarias; detectando los cambios que ha experimentado un área determinada y entendiendo cuales fueron los impulsores de este cambio (González, Grefa, y Paredes, 2019; Moreira, Nogueira, y Steenbock, 2015). Generalmente, los estudios del cambio de uso del suelo y cobertura vegetal evalúan la velocidad de la reforestación, determina su extensión geográfica y entiende que los

problemas son las causas sociales y económicas de los cambios, en las escalas global, regional y local (Jaqueline & Arévalo, 2016; Mier & Armando, 2018). Siendo cruciales para orientar estrategias efectivas de conservación y restauración de la biodiversidad, así como para informar políticas públicas que promuevan la sostenibilidad ambiental y la resiliencia de los ecosistemas.

En el Ecuador, 5,7 millones de personas en las zonas urbanas se abastecen del recurso hídrico provenientes de los ecosistemas de montaña (Ulloa, 2018), por lo que su conservación, manejo y restauración contribuyen directamente al bienestar humano y a mitigar los efectos del cambio climático. En este contexto, la provincia del Cañar, los ecosistemas páramo y bosques de montaña, constituyen las principales fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano y riego. El área de conservación La Capilla contribuye con un tercio del caudal necesario para abastecer la demanda de agua potable de la ciudad de Cañar (Gobierno Autónomo Descentralizado Intercultural del Cantón Cañar [GADICC], 2024), por lo que se plantea analizar el cambio de la cobertura vegetal que el área de conservación La Capilla ha experimentado en el periodo de 1986 hasta 2022 mediante el uso de imágenes satelitales.

Este trabajo también busco identificar cuáles son los patrones y tendencias en los cambios de la cobertura vegetal y su repercusión en el área causada por eventos naturales o antrópicos. Además, estos resultados, serán utilizados por las autoridades locales para generar insumos importantes para entender la evolución de los ecosistemas páramo y bosque de montaña desde 1986 y para la ejecución del Plan de restauración del paisaje del área de conservación La Capilla (Brito et al., 2023). Cabe indicar, que este estudio hace parte de las actividades contempladas en dicho Plan, y se espera que sirva como línea base para el monitoreo posterior de las medidas de restauración implementadas en el área de conservación La Capilla. Por último, la información que se ha obtenido al final de este trabajo de titulación será socializada y proporcionada a la comunidad La Capilla, quien es el principal actor encargado de llevar adelante el Plan.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Analizar el cambio de cobertura vegetal en el área de conservación La Capilla, cantón Cañar, desde 1986 hasta 2022.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar los cambios de cobertura vegetal a lo largo del tiempo, a través de imágenes satelitales.
- Identificar diferentes patrones y tendencias de cambio en la cobertura vegetal.
- Determinar si la estrategia de destinar esta área para conservación ha tenido algún efecto en la ganancia o pérdida de la cobertura vegetal.

2. Hipótesis

Con base en los fundamentos teóricos respecto a la trayectoria de sucesión secundaria se espera que después de prohibir actividades agroproductivas en el área de conservación La Capilla, el patrón de la vegetación sea predominante herbácea como los pajonales, siguiendo las formas arbustivas y finalmente arbóreas; estas últimas principalmente en las zonas de bosque nativo.

3. Revisión de literatura

3.1. Generalidades

3.1.1. Sensores remotos

Los sensores remotos son instrumentos capaces de percibir la energía electromagnética que es reflejada o emitida por la superficie terrestre (Shafian et al., 2018), estos métodos de detección son utilizados desde aeronaves hasta satélites, brindándonos información atmosférica, oceánica, meteorológica o sobre cobertura vegetal (Uttarakhand Open University, 2021). Estos sensores identifican estas energías mediante detectores de espectroscopios, los cuales se encuentran equipados en vehículos tripulados o no tripulados que se encuentran constantemente orbitando el espacio aéreo o la órbita de nuestra superficie terrestre y se encuentran constantemente apuntando hacia la misma (Figura 1), registrando de manera individual o en conjunto la energía que refleja un área determinada mediante un escaneo de barrido de la superficie total que se desea analizar (Yamazaki et al., 2016). Estos avances tecnológicos en la percepción remota son fundamentales para entender y gestionar eficazmente nuestro entorno terrestre y marítimo, proporcionando datos cruciales para una variedad de aplicaciones.

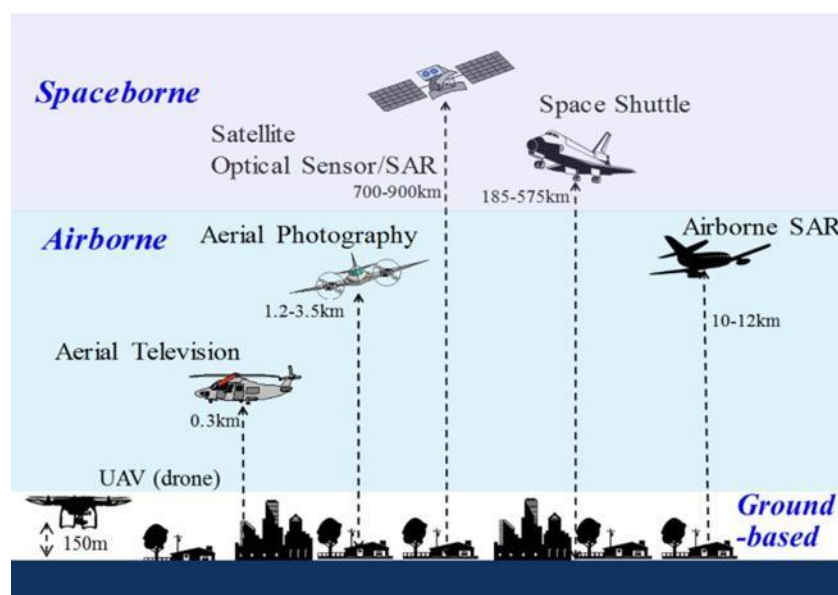


Figura 1. Plataformas usadas para los diferentes tipos de sensores

Fuente: Yamazaki & Liu (2016)

En total, el sensor forma una cuadrícula de celdas o píxeles que contienen un valor representativo de la energía detectada por los sensores; este valor asignado a cada píxel se

conoce como Nivel Digital. Mientras que el tamaño de los pixeles es denominado resolución espacial y es medida ya sea en metros o en centímetros (Ruíz Martínez et al., 2019). En total, el sensor generará múltiples matrices correspondientes a cada banda espectral que pueda detectar. La cantidad de bandas y el rango de detección de cada una se llama resolución espectral. Todas estas bandas juntas forman una imagen multiespectral, conocida coloquialmente como imagen satelital y el tiempo que existe entre cada captura de imágenes de un mismo lugar es denominado resolución temporal. Además, debido a que estos sensores se encuentran a una altura de más de 700 kilómetros sobre la superficie terrestre, la perspectiva de los sensores reduce considerablemente la resolución de las imágenes recopiladas en relación con la superficie (Ferreira et al., 2013). Hay varios tipos de sensores remotos, cada uno con sus propias características y aplicaciones:

- **Sensores ópticos:** Estos sensores capturan la luz visible e infrarroja reflejada por la superficie terrestre. Son ideales para obtener imágenes visuales de alta resolución y mapas detallados. Los sensores ópticos se utilizan ampliamente en aplicaciones como la cartografía, la monitorización ambiental y la agricultura de precisión (Ruíz Martínez et al., 2019). Esta capacidad para capturar detalles precisos es fundamental para la investigación y la gestión efectiva de recursos naturales y áreas agrícolas.
- **Sensores de radar:** Estos sensores utilizan microondas para penetrar la atmósfera y obtener imágenes de la superficie terrestre. Funcionan independientemente de las condiciones climáticas o de iluminación, lo que los hace especialmente útiles para observaciones nocturnas o en condiciones de nubosidad. Los sensores de radar se utilizan en aplicaciones como el monitoreo de desastres, la detección de cambios en el terreno y la vigilancia marítima (Mulla, 2013). La versatilidad para operar en diversas condiciones climáticas y de iluminación los convierte en herramientas fundamentales para el monitoreo y la detección precisa de cambios en el terreno.
- **Sensores hiperspectrales:** Estos sensores capturan información en múltiples bandas del espectro electromagnético, lo que permite un análisis detallado de la composición química y biológica de la superficie terrestre. Son útiles para aplicaciones como la detección de minerales, la clasificación de suelos y la identificación de vegetación saludable o estresada (Ferreira et al., 2013). Facilitando así la identificación precisa de características geológicas y biológicas en la superficie terrestre.

La mayoría de estas imágenes es recopilada a través de satélites en órbitas pertenecientes a programas de investigación de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), estos programas cuentan con una órbita heliosincrónica diseñadas para que

su posición se mantenga constante con respecto al sol, lo cual permite la obtención de imágenes de un mismo punto en una hora establecida y con igualdad de condiciones de observación, facilitando la realización de análisis multitemporales (Varela, s.f.). Este tipo de programas de percepción remota han sido desarrollados desde principios de los 70's, las cuales, han ido evolucionando y mejorando la frecuencia, el detalle y la calidad de información de manera contante (Roy et al., 2014). En la actualidad existen diversos sistemas operativos en órbita, los cuales han sido enfocados a distintas aplicaciones de investigación, conservando siempre sus principios básicos.

Para este trabajo de titulación han sido utilizadas las imágenes multiespectrales provenientes del programa Landsat, el cual se encuentra en órbita desde 1972, siendo la iniciativa más antigua para la adquisición de información espectral (Varela, s.f.). El uso de imágenes multiespectrales, proporciona una base histórica invaluable para estudios continuos de cambios ambientales y recursos naturales a lo largo del tiempo gracias a su base histórica invaluable.

3.1.2. Espectro electromagnético

Cada tipo de espectro electromagnético tiene características únicas, como su longitud de onda o su frecuencia y son utilizadas para diferentes propósitos en la tecnología y la ciencia. Las zonas del espectro se encuentran definidos según la longitud de su onda, energía y la frecuencia en la que esta se encuentra, esta energía atraviesa el espacio a la velocidad de la luz en formas de ondas. Esta gama completa de longitudes de onda de la radiación electromagnética va desde las ondas de radio hasta las ondas gamma (Yamazaki et al., 2016). Esto incluye las ondas de radio, microondas, infrarrojas, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma (Figura 2).

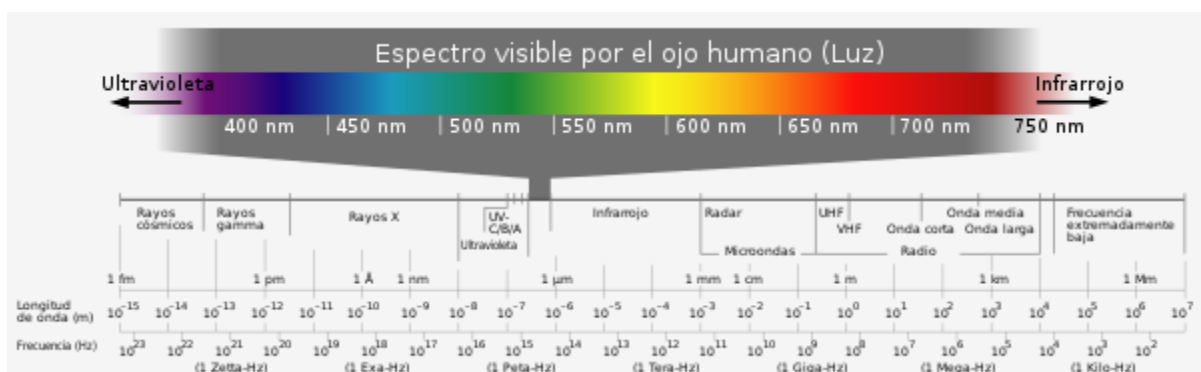


Figura 2. El espectro electromagnético

Fuente: (Yamazaki et al., 2016)

Las ondas de radio se utilizan en comunicaciones, las microondas en tecnologías como hornos y comunicaciones satelitales, el infrarrojo en aplicaciones térmicas y de visión nocturna, la luz visible en la percepción humana y aplicaciones de imágenes, el ultravioleta en desinfección y estudios astronómicos, los rayos X en medicina y análisis de materiales, y los rayos gamma en investigaciones nucleares y astrofísicas. Esta diversidad de frecuencias y energías permite una amplia variedad de usos en múltiples campos científicos y tecnológicos (James Campbell & Wynne, 2011). La diversidad de frecuencias y energías de las ondas electromagnéticas posibilita una vasta gama de aplicaciones en campos científicos y tecnológicos, demostrando su crucial importancia en la investigación y la innovación continua.

3.1.3. Imágenes de sensores remotos

Una imagen es un archivo de tipo ráster el cual se encuentra formado por una matriz de celdas las cuales son denominadas píxeles. Cada uno de estos píxeles cuenta con un valor digital asignado que corresponde a la reflectividad recogida por el sensor específico que es utilizado en los programas Landsat. Estas imágenes son almacenadas en diferentes bandas espectrales, las cuales almacenan el valor correspondiente a cada píxel de la imagen en un intervalo correcto del espectro electromagnético (Figura 3) (Wulder et al., 2011).

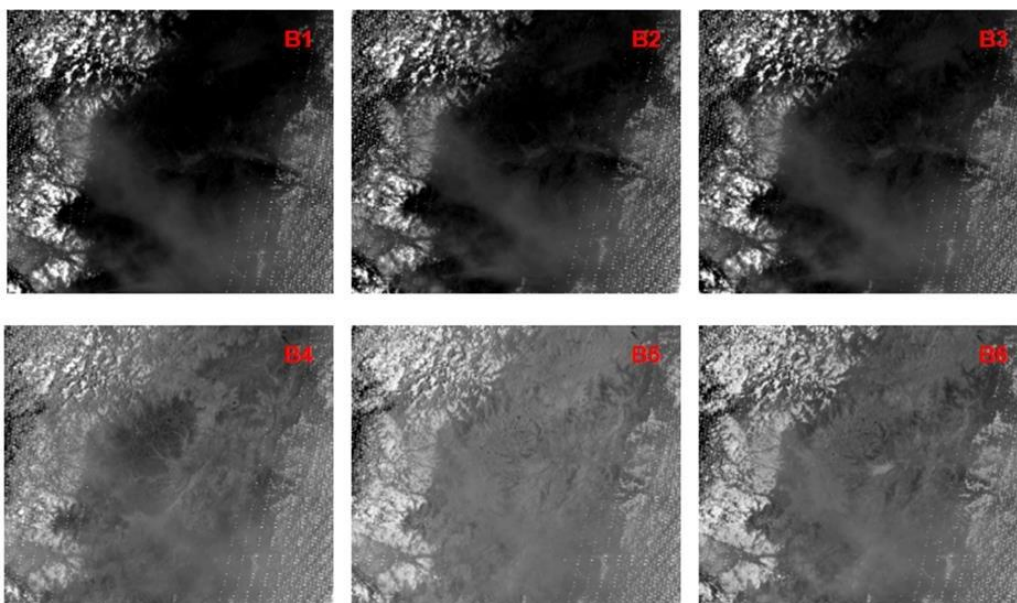


Figura 3. Bandas espectrales correspondientes a satélite Landsat 7: B1 (luz visible, azul); B2 (luz visible, verde); B3 (luz visible, roja); B4 (infrarrojo cercano); B5 (Infrarrojo medio); B6 (infrarrojo térmico).

Fuente: Wulder et al., (2011)

Estas imágenes generalmente se encuentran conformadas por tres tipos de espectros, según Wolf et al. (2000), los cuales son:

- **Pancromático:** El cual posee un canal infrarrojo cercano y es representada en escala de grises, permite identificar y medir eventos geográficos, infraestructura, objetos en la superficie, actualización de mapas al delimitar zonas, medir el incremento urbano y crear modelos digitales de elevación.
- **Multiespectral:** Capta la reflectancia en diferentes longitudes de onda y son combinadas para establecer un producto con color real.
- **Hiperespectral:** Mide las ondas en otras distancias, pero en anchos mucho más pequeños y de mayor número, este tipo de espectro se utiliza para descubrir leves diferencias entre los objetos de interés.

Estas imágenes de la superficie terrestre han sido obtenidas mediante sensores que se encuentran a bordo de vehículos aéreos, esta información aérea es de vital importancia debido a los diversos usos tanto en la ciencia como en la tecnología. Proporcionando métodos más efectivos para realizar diversos análisis, tales como los efectos de la erosión, el crecimiento de los bosques, planificación y gestión ambiental, planificación y gestión agrícola, crecimiento poblacional, entre otras aplicaciones (Li et al., 2007). No solo son cruciales para aplicaciones científicas y tecnológicas diversas, como la gestión ambiental, agrícola y de recursos naturales, sino que también nos permite realizar análisis detallados en diversas áreas de estudio.

3.1.4. Satélites Landsat

El programa Landsat desarrollado conjuntamente por la NASA y USGS, ofrece la colección más completa de observaciones terrestres a nivel mundial. Desde sus inicios en 1975 hasta la actualidad, continúa proporcionando valiosas imágenes científicas del planeta. A partir de 1972, los datos de Landsat han sido fundamentales para diversas disciplinas, incluyendo educación, silvicultura, geología, agricultura, planificación regional, cartografía e investigación sobre el cambio climático. Landsat ha establecido una serie de satélites dedicados a la observación de la Tierra, gestionados de manera conjunta por el USGS y la NASA (López y Gaitán, 2018) como se muestra en la figura 4.



Figura 4. *Representación del satélite Landsat 8*

Fuente: NASA/Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab.

Los satélites Landsat han desempeñado un papel fundamental en la observación de la Tierra desde el espacio durante décadas. Iniciado en 1972 con el lanzamiento del Landsat 1, este programa ha proporcionado una serie continua de imágenes de la superficie terrestre, convirtiéndose en una valiosa herramienta para una amplia gama de aplicaciones en ciencias de la Tierra. Desde su inicio, la serie Landsat ha experimentado varias mejoras tecnológicas. Cada nuevo satélite ha introducido mejoras en la resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes, lo que ha permitido una observación más detallada y completa de nuestro planeta (Wulder et al., 2011). La evolución continua de los satélites Landsat ha mejorado significativamente nuestra capacidad para monitorear y comprender los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, fortaleciendo su papel como una herramienta indispensable para aplicaciones en gestión ambiental.

Los satélites Landsat utilizan una combinación de sensores ópticos y térmicos para capturar datos sobre la superficie terrestre. Los sensores ópticos, como el sensor de teledetección de alta resolución (HRC) y el sensor de teledetección multispectral (MSS), capturan imágenes en múltiples bandas del espectro electromagnético, estas bandas tienden a presentar una longitud de onda que las distingue entre sí, además, de que cada una es útil para diferentes tipos de aplicación como se muestra en la Tabla 1. Estas imágenes se utilizan para aplicaciones como la cartografía, la monitorización de recursos naturales, la agricultura y la gestión ambiental (Roy et al., 2014). Además de los sensores ópticos, los satélites Landsat

también están equipados con sensores térmicos, como el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), que capturan información sobre la temperatura de la superficie terrestre. Esta información es crucial para el estudio de los cambios climáticos, la detección de incendios forestales y la gestión del agua (Varela, s.f.). La combinación de sensores ópticos y térmicos en los satélites Landsat proporciona una amplia gama de datos cruciales para aplicaciones como la cartografía, monitoreo de recursos naturales, la gestión ambiental, entre otros, demostrando su valor continuo en la observación y comprensión de la superficie terrestre.

Tabla 1. Longitud de bandas Landsat 8 y aplicación de cada tipo

Nº banda	Nombre de la banda	Longitud de onda (µm)	Resolución (m)	Aplicaciones de la banda
1	Aerosol costero	0,43-0,45	30	Estudios costeros y de aerosoles
2	Azul	0,45-0,51	30	Cartografía batimétrica y distinción del suelo de la vegetación
3	Verde	0,53-0,59	30	Distinción de los picos de vegetación máxima utilizado para evaluar el vigor de las plantas
4	Rojo	0,63-0,67	30	Distinción de ladera y vegetación
5	NIR	0,85-0,88	30	Énfasis en el contenido de costas y biomasa
6	SWIR1	1,57-1,65	30	Distinción de la humedad del suelo y la vegetación
7	SWIR2	2,11-2,29	30	Lectura de la humedad del suelo y vegetación
8	Pancromática	0,50-0,68	30	Definición de imágenes más nítidas
9	Cirrus	1,36-1,38	30	Mejora localización en cirros

Fuente: United States Geological Survey (USGS) landsat 8.

El programa Landsat ha tenido un impacto significativo en la comprensión del planeta y en la toma de decisiones basadas en datos. La disponibilidad gratuita y global de datos Landsat ha permitido a científicos, planificadores y responsables de políticas acceder a información vital sobre la Tierra, lo que ha contribuido a una gestión más eficaz de los recursos naturales y a la comprensión de los procesos ambientales a escala global. En la actualidad, Landsat se encuentra en su octava versión conocida como "*Landsat Data Continuity Mission*" (LDCM).

Este programa representa una mejora continua en el registro y desarrollo de imágenes multiespectrales, manteniendo la eficacia de sus siete predecesores. Landsat-8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 e incluye dos sensores de observación terrestre: el *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (Roy et al., 2014). Esta nueva generación de satélites continúa con la importante labor de proporcionar datos cruciales para diversas aplicaciones científicas y de monitoreo ambiental.

3.2. Clasificación de imágenes satelitales

La clasificación de imágenes satelitales es llevada a cabo por un operador que define las características espectrales de las clases mediante la identificación de áreas de muestreo, conocidas como áreas de entrenamiento. Es fundamental que el operador esté familiarizado con el área de interés (Chuvieco, 2010). Este método se basa en identificar zonas donde se conoce con certeza el tipo de vegetación u otras unidades (como nubes, cuerpos de agua, nieve o bosques húmedos), o donde se pueda identificar una diferencia sustancial en la cobertura. Posteriormente, se toman "muestras" de los valores espectrales presentes en esos sitios.

La clasificación de imágenes satelitales es una herramienta esencial en la conservación ambiental. Permite identificar y delimitar diferentes tipos de cobertura terrestre, lo que facilita el monitoreo de ecosistemas y la evaluación de cambios en el uso del suelo. Esta información es crucial para la planificación y gestión ambiental, incluyendo la identificación de áreas protegidas, la detección de deforestación, la monitorización de la biodiversidad y la evaluación de impactos ambientales (Chuvieco, 1996). Siendo esencial para la conservación ambiental al permitir la identificación precisa de coberturas terrestres y cambios en el uso del suelo.

Las imágenes satelitales también son utilizadas para crear mapas de uso del suelo, identificar patrones de deforestación, monitorizar la fragmentación del hábitat y estimar el estado de la vegetación. Estos datos son fundamentales para diseñar estrategias de conservación y manejo sostenible de recursos naturales, contribuyendo así a la protección y preservación de nuestros ecosistemas (Chuvieco, 2010). Volviéndose esencial para desarrollar estrategias efectivas de conservación y manejo sostenible de recursos naturales, asegurando la protección continua.

3.2.2. Cobertura vegetal y uso de suelo

3.2.2.1. Cobertura vegetal del suelo

La cobertura vegetal del suelo, comprendida como la presencia y distribución de vegetación en un área específica, constituye un componente fundamental del ecosistema terrestre. Esta vegetación, que puede abarcar árboles, arbustos, hierbas, musgos y otros tipos de plantas, conforma una capa que recubre el suelo (Bonan, 2013). Además de su función estética, la cobertura vegetal desempeña múltiples roles ecológicos vitales. Regula el ciclo del agua y del clima, conserva el suelo, provee hábitats para la fauna y captura carbono atmosférico, entre otras funciones cruciales para la salud y estabilidad de los ecosistemas y la calidad de vida de las personas (Stibig et al., 2004). La diversidad de funciones ecológicas de la cobertura vegetal no solo ayuda en la estabilidad y salud de los ecosistemas, sino que también influye directamente en la calidad de la vida humana.

El monitoreo de la cobertura vegetal emerge como una práctica esencial para mantener la salud de los ecosistemas y asegurar la sostenibilidad en la producción agrícola. Facilita la comprensión de los cambios en la vegetación, permitiendo identificar áreas afectadas por deforestación o degradación. Este monitoreo provee información valiosa para la implementación de medidas de conservación y manejo adecuadas, así como para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas y climáticas sobre los recursos naturales (Gasparri, 2010). La capacidad del monitoreo de la cobertura vegetal para identificar y gestionar los impactos ambientales y agrícolas subraya su importancia en la conservación de ecosistemas y la sostenibilidad de recursos naturales.

El análisis de la cobertura vegetal es una herramienta fundamental para la gestión sostenible de los recursos naturales y la toma de decisiones informadas en diversos sectores (Escobedo, et al, 2014). Desde la agricultura hasta la conservación ambiental, este análisis ofrece una perspectiva integral que permite identificar áreas propicias para cultivos, monitorear la salud de los bosques, detectar deforestación y evaluar el impacto de las actividades humanas sobre los ecosistemas (Bonan, 2013). Siendo crucial para la gestión sostenible de recursos naturales en diversos sectores, sino que también proporciona la base para decisiones informadas y estrategias efectivas que aborden la conservación ambiental y la planificación agrícola de manera integral.

3.2.2.2. Uso de suelo

El uso del suelo se refiere a cómo se utiliza activamente la superficie terrestre, incluyendo actividades humanas, agricultura, urbanización, recreación, conservación, entre otros. Se centra en las actividades humanas y en la función económica, social y ambiental de la tierra (Bonan, 2013), Abarcando las diversas actividades humanas que configuran la superficie terrestre.

3.2.2.3. Importancia del estudio de cobertura vegetal y uso de suelo

El estudio de la cobertura vegetal y el uso del suelo es fundamental para comprender la dinámica de los paisajes terrestres y los impactos de las actividades humanas en el medio ambiente. Proporciona información crucial para la planificación del uso del suelo, la gestión de recursos naturales, la conservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático y la toma de decisiones políticas (World Reference Base for Soil Resources [WRB], 2006). La combinación de información sobre la cobertura vegetal y el uso del suelo permite una comprensión más completa de la interacción entre los sistemas naturales y humanos en el paisaje. Además, el monitoreo periódico de los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo proporciona datos importantes para evaluar tendencias a lo largo del tiempo y para informar sobre políticas y acciones de gestión (Stibig et al., 2004). Siendo así que, no solo revela la compleja interacción entre los sistemas naturales y humanos en los paisajes terrestres, sino que también el monitoreo continuo de estos cambios para identificar tendencias a largo plazo e implementar de este modo políticas ambientales y de gestión sostenible.

3.2.3. Análisis multitemporal

El análisis multitemporal es una técnica utilizada para comparar datos y observaciones de diferentes momentos en el tiempo con el objetivo de entender cómo han cambiado ciertas variables o patrones a lo largo del tiempo. Según Seto, et al. (2002), esta técnica implica la recopilación y comparación de datos de diferentes períodos de tiempo para identificar patrones y tendencias. Es común en disciplinas como la geografía, biología, ecología, economía y planificación urbana, entre otras (Ridd, 1995). El análisis multitemporal, no solo revela cambios significativos en variables clave, sino que también proporciona perspectivas valiosas para diversas disciplinas, facilitando la comprensión profunda de las dinámicas ambientales.

Este tipo de análisis es útil para comprender cómo los cambios ambientales, políticos, sociales o económicos surgen en diferentes regiones o sistemas. Li et al., (2007) señalan que pueden ayudar a identificar problemas emergentes y diseñar estrategias efectivas para abordarlos. Para llevar a cabo un análisis multitemporal, según Seto, et al. (2002) y Elmasri, Cetin y Demir (2018), se requiere recopilar datos relevantes de diferentes momentos en el tiempo (Figura 5), utilizando diversas fuentes de información satelital y otros recursos. Los datos deben ser ajustados para prepararlos para el análisis.

Una vez que la información ha sido preparada, se procede a analizar los datos para evaluar los cambios que han ocurrido en el área de interés a lo largo del tiempo. Al mismo tiempo, se inicia el proceso de visualización de los datos utilizando herramientas que nos ayudan a representar los cambios que han surgido en el período de tiempo. Finalmente, se realiza la interpretación de los datos para entender los cambios que han ocurrido en el área de estudio a lo largo del tiempo (Fava, Tarantino & Lucà, 2018). Permitiendo así comprender la evolución de nuestro entorno y asentando las bases para una interpretación profunda de los impactos y tendencias observadas facilitando así la toma de decisiones en futuros estudios y proyectos.

3.3. Impacto de la pérdida de cobertura vegetal en ecosistemas de montaña

Las regiones montañosas representan aproximadamente el 20% de la superficie terrestre y desempeñan un papel crucial en los sistemas hidrológicos globales. Sin embargo, están bajo presión debido a la interferencia humana, y el cambio climático podría agravar esta situación. La evidencia paleoclimática indica que los cambios climáticos pasados han tenido efectos significativos en la distribución de la vegetación, y si continúa la tendencia actual de calentamiento, se espera que los impactos en los ecosistemas sean sustanciales en el siglo XXI. El calentamiento provocará la reducción de glaciares, la capa de nieve y el permafrost, lo que tendrá consecuencias en el suministro de agua dulce para la agricultura, el turismo y la energía hidroeléctrica, afectando tanto a las poblaciones de montaña como a las que dependen de los recursos hídricos provenientes de las montañas. Además, el cambio ambiental puede alterar la estructura social y los estilos de vida tradicionales de las comunidades de montaña en el mundo en desarrollo (Beniston, 1999). Ante estos desafíos ambientales y sociales, comprender la dinámica climática y sus impactos potenciales en las regiones montañosas es crucial no solo para la conservación de estos ecosistemas vitales, sino también para la sustentabilidad de las comunidades humanas que dependen de ellos.

Jin Kyoung et al., (2022) abordó la fragmentación de los ecosistemas forestales en Ecuador, específicamente en los Andes tropicales, durante el periodo de 1990 a 2014, donde mostró que la fragmentación de los bosques en los Andes estaba altamente correlacionada con la

deforestación y conversión a pastos, poniendo en riesgo la conservación de la biodiversidad, en materia de riqueza y endemismo de especies; y la sostenibilidad de los ecosistemas, al reducir la conectividad entre parches y por tanto dificultando el intercambio genético de flora y fauna entre estos y disminuyendo funciones y servicios ecosistémicos con repercusiones serias en el bienestar de las personas.

Otro factor, que influye en la pérdida de cobertura vegetal en los ecosistemas son los incendios forestales. Además, de las consecuencias inmediatas de la mortalidad de las plantas y la alteración de la dinámica comunitaria, existe un aumento en la floración y producción de semillas de determinadas especies en detrimentos de otras y consecuentemente la reducción de la biodiversidad, los incendios forestales degradan el suelo y liberan grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera, lo que contribuye al cambio climático (Gajendiran et al., 2024). Por lo tanto, la gestión adecuada de los incendios forestales no solo es crucial para mitigar la pérdida de cobertura vegetal y la biodiversidad, sino también para minimizar su impacto en el cambio climático y mantener la salud general de los ecosistemas

Uno de los ecosistemas de montaña, que presenta mayor frecuencia de incidencia de incendios es el páramo debido a la quema del pajonal para rebrote, como alimento para el ganado. No obstante, además de la pérdida de vegetación y remoción de hojarasca y materia orgánica del suelo, se tiene la evaporación del agua. El agua almacenada en el páramo al ocurrir un incendio evapora toda el agua retenida provocando fases más largas de estiaje en el periodo seco. Y con relación a su trayectoria sucesional, puede demorar décadas para que se recupere la vegetación de origen, puesto que los líquenes y musgos tardan en aparecer debido a que, el manto vegetal ha sido removido (Rodríguez Rey, 2024). La gestión adecuada de los incendios en los páramos es crucial no solo para conservar la vegetación y la biodiversidad, sino también para preservar el ciclo hidrológico y asegurar la resiliencia de estos ecosistemas ante el cambio climático.

3.4. Uso de sensores remotos y estudios de análisis multitemporales en ecosistemas de montaña

Una aplicación clave del sensoriamiento remoto en ecosistemas de montaña es el monitoreo de la cobertura vegetal y la detección de cambios en la vegetación a lo largo del tiempo. Un estudio realizado por Jin Kyoung et al., (2019) en la Cordillera del Himalaya utilizó imágenes de satélite Landsat para analizar la dinámica de la cobertura vegetal en el Parque Nacional Langtang de Nepal durante un período de 27 años. Los resultados mostraron una disminución

significativa en la cobertura vegetal debido a la deforestación y la expansión de áreas agrícolas, lo que resalta el impacto de la actividad humana en estos ecosistemas.

Otra aplicación importante es la evaluación de la degradación del suelo. En un estudio realizado por García-Ruiz et al., (2015) en los Pirineos españoles, donde se utilizó el sensor MODIS para detectar cambios en la erosión del suelo a lo largo de varias décadas. Los resultados revelaron un aumento significativo en la erosión del suelo debido a la combinación de factores climáticos y actividades humanas, como la agricultura y la construcción de infraestructuras.

Además, un estudio realizado por Maurer et al., (2020) en los Alpes suizos utilizó imágenes de satélite para analizar la evolución de los glaciares durante un período de 30 años. Los resultados mostraron una clara tendencia de retroceso glaciar, atribuida principalmente al calentamiento global. Un estudio similar fue realizado por Cabrera et al., (2022) en los Andes ecuatorianos, donde se cuantificó la pérdida de cobertura del glaciar del nevado Cayambe en el periodo 1990 a 2020 mediante imágenes satelitales Landsat. Como resultado el nevado presenta un retroceso de alrededor del 30% en los últimos 30 años, debido al aumento de la temperatura desde 2012.

Por otro lado, los análisis multitemporales permiten detectar cambios sutiles pero significativos en los ecosistemas de montaña a lo largo del tiempo. Un estudio llevado a cabo por Bollmann, et al., (2018) en los Cárpatos orientales utilizó datos de teledetección para analizar la fragmentación del hábitat de los mamíferos grandes durante un período de 40 años. Los resultados mostraron una disminución en la conectividad del hábitat debido a la expansión de la infraestructura y la fragmentación del paisaje.

Los análisis multitemporales pueden revelar patrones de cambio estacional en la vegetación de las montañas. Un artículo realizado por Wang et al., (2017) en el Tíbet utilizó imágenes de satélite para investigar la respuesta de la vegetación al cambio climático durante las estaciones cálidas y frías. Los resultados mostraron un aumento en la productividad primaria neta durante las estaciones cálidas, pero una disminución durante las estaciones frías, lo que sugiere una respuesta diferencial de la vegetación a las variaciones estacionales del clima. Los análisis multitemporales también pueden ayudar a evaluar el impacto de eventos extremos, como incendios forestales, en los ecosistemas de montaña.

3.5. Sucesión ecológica en ecosistemas de montaña

La "sucesión ecológica" es un término ampliamente aceptado entre los ecólogos para describir los cambios temporales que ocurren en la estructura, la composición taxonómica y las funciones de un ecosistema después de ser perturbado (Whitmore, 1978; Pickett & White, 1985; Bazzaz, 1996; Morin, 1999; Laska, 2001). Estos cambios ecológicos durante la sucesión, así como la rapidez con la que se desarrollan, dependen de factores como la extensión, la intensidad y la frecuencia del disturbio, la disponibilidad de propágulos regenerativos tanto locales como foráneos (semillas y plántulas), las interacciones bióticas (incluyendo depredadores, granívoros, herbívoros, patógenos y parásitos), y las condiciones abióticas predominantes en el área perturbada (Grubb, 1985; Pickett & White, 1985; Pickett et al., 1987). Comprender estos procesos de sucesión ecológica es fundamental para diseñar estrategias efectivas de restauración y conservación de ecosistemas, asegurando así su resiliencia frente a perturbaciones naturales y antropogénicas.

La trayectoria de sucesión ecológica puede ser primaria o secundaria. Es primaria cuando la comunidad que surge ocurre en locales originalmente deshabitados, es decir, ninguna especie vegetal nunca vivió allí, como una roca desnuda, una lava volcánica solidificada o una duna de arena. El periodo de duración para alcanzar un estado de sucesión avanzado se estima en 1000 años para completarse, puesto que debe iniciar con procesos de formación y recuperación de suelo. Mientras que, la sucesión secundaria surge en locales que fueron habitados anteriormente y que ya no lo son, como áreas de bosque deforestados, lugares donde existían plantaciones forestales o humedales que se secaron, por algún motivo. El periodo de duración para alcanzar un estado de sucesión avanzado se estima, en promedio, 100 años (De la Orden, 2020). Comprender las diferencias entre la sucesión primaria y secundaria es crucial para diseñar estrategias de restauración adaptadas a las condiciones específicas de cada tipo de ecosistema, maximizando así la eficiencia en la recuperación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

En el caso del ecosistema páramo, la trayectoria de sucesión-regeneración, según Vargas-Ríos (1997), después del disturbio quema, es el que se describe a continuación:

- Durante el primer año, después de la quema, las especies herbáceas perennes de la familia Poaceae (*Calamagrostis* spp., *Agrostis toluensis*, *Festuca* spp., *Paspalum* spp., *Chusquea weberbaueri*, entre otras) dominan el área quemada, son especies que no fueron afectadas por el fuego y cuyo aspecto es recuperado en este periodo, además florecen y dispersan su semilla.

- Posteriormente aparecen especies en forma de rosetas acaules, que tampoco son afectadas por el fuego, tales como: *Valeriana* spp., *Puya* spp., y *Paepalanthus* spp., son especies formadoras de bancos de semillas y produce abundantes plántulas.
- Cuando los suelos han sido muy alterados, una especie importante en la sucesión es *Oreobulus obtusangulus* según Vargas-Ríos (1997), porque favorece la sucesión secundaria.
- Especies como *Pinguicola elongata* aparece a los tres meses y *Castilleja fissifolia* entre cuatro y cinco meses.
- Después aparecen las especies semileñosas y semiarbusivas, especies del género *Ageratina*, por ejemplo, que florecen entre los ocho y nueve meses.
- Finalmente se espera, que la trayectoria sucesional hacia una condición boscosa, en el caso de presencia de árboles de pequeño porte en páramo arbustal y herbazal; y de árboles en general, en el bosque nativo (bosques secundarios) se estimó entre 20 y 30 años (Jin Kyoung et al., 2022). Estos tiempos estimados de sucesión subrayan la importancia de gestionar activamente los procesos de restauración ecológica para acelerar la recuperación de ecosistemas degradados y fomentar la resiliencia frente a los cambios ambientales.

4. Metodología

4.1. Área de estudio

El trabajo de titulación estuvo enfocado en el área de conservación La Capilla, la cual cuenta con una extensión de 303,46 ha. Esta zona se encuentra localizada en la región Sierra, provincia y cantón Cañar, mayoritariamente en la parroquia Chorocopte, en la comunidad La Capilla. Se encuentra entre las siguientes coordenadas UTM: 17S 727103E 9711319N (Figura 6).

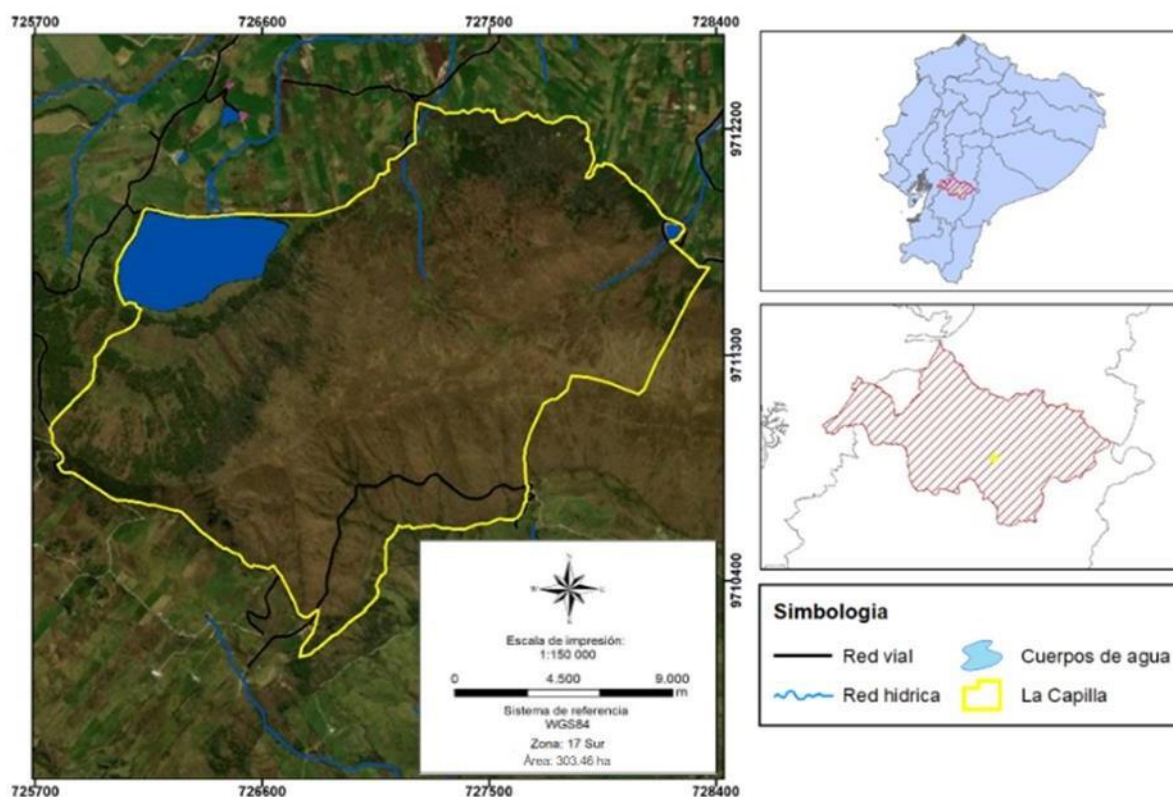


Figura 5. Localización del sitio de estudio, área de conservación La Capilla, cantón y provincia de Cañar, entre las cuencas del río Paute y Cañar.

Elaborado: Elaboración propia.

El rango altitudinal del área de conservación La Capilla oscila entre 3.517 a 3.854m s.n.m. Su topografía es irregular, presenta pendientes débiles menores a 5% hasta pendientes abruptas mayores al 70%, con un predominio de pendientes fuertes (25 al 50%), seguido de pendientes regulares entre el 12% y 25%. De acuerdo con los datos bajados del WorldClim (2020) para un periodo de 30 años (1970 - 2000), los valores referenciales de precipitación promedio anual para el área es de 1.079,94 mm, con temperaturas promedio de 7,2 °C y valores de temperatura mínimos de 6,7 °C y máximos de 8,2 °C (Brito et al., 2023).

El área de conservación La Capilla es fundamental para abastecer a las lagunas El Estero y Patococha, beneficiando a aproximadamente 767 personas al proporcionar agua para consumo humano a través de las Juntas Administradoras de Agua Potable (JAAP), así como a 700 usuarios de agua para riego destinada a las actividades de ganadería y agricultura de la zona (Programa Montañas, 2022). Además, esta área de conservación provee agua potable a cerca de 5000 habitantes de la ciudad de Cañar a través de la Empresa de Agua Potable (EMAP) (GADICC, 2024). Este servicio es vital para asegurar el acceso continuo y sostenible al recurso hídrico en la región, tanto para usos domésticos como agrícolas, contribuyendo significativamente al bienestar y desarrollo de las comunidades locales y la ciudad de Cañar.

4.2. Delimitación del área de entrenamiento para las diferentes categorías de cobertura vegetal

Dada la limitada extensión del área de conservación La Capilla (303,46 ha), se volvió complejo el proceso de generar las coberturas vegetales en la zona, dado el tamaño de pixel de las imágenes satelitales, por lo cual, se optó por llevar a cabo el proceso de generación de coberturas vegetales, considerando el área de conservación La Capilla como área núcleo y ampliándose hasta los límites de las microcuencas de Quebrada Zhamishan y el Río Tambo. La Quebrada Zhamishan tiene una superficie total de 3.367,86 ha, mientras que el Río Tambo abarca una superficie de 5.076,48 ha. Esto con el objetivo de establecer en las imágenes satelitales campos de entrenamiento para cada categoría de cobertura vegetal, reduciendo así el error al clasificar los tipos de coberturas que se encuentran en el área. Esta selección resultó en una delimitación del área total de entrenamiento de 8.444,34 ha (Figura 7), donde se llevó a cabo el entrenamiento y la generación de las coberturas.

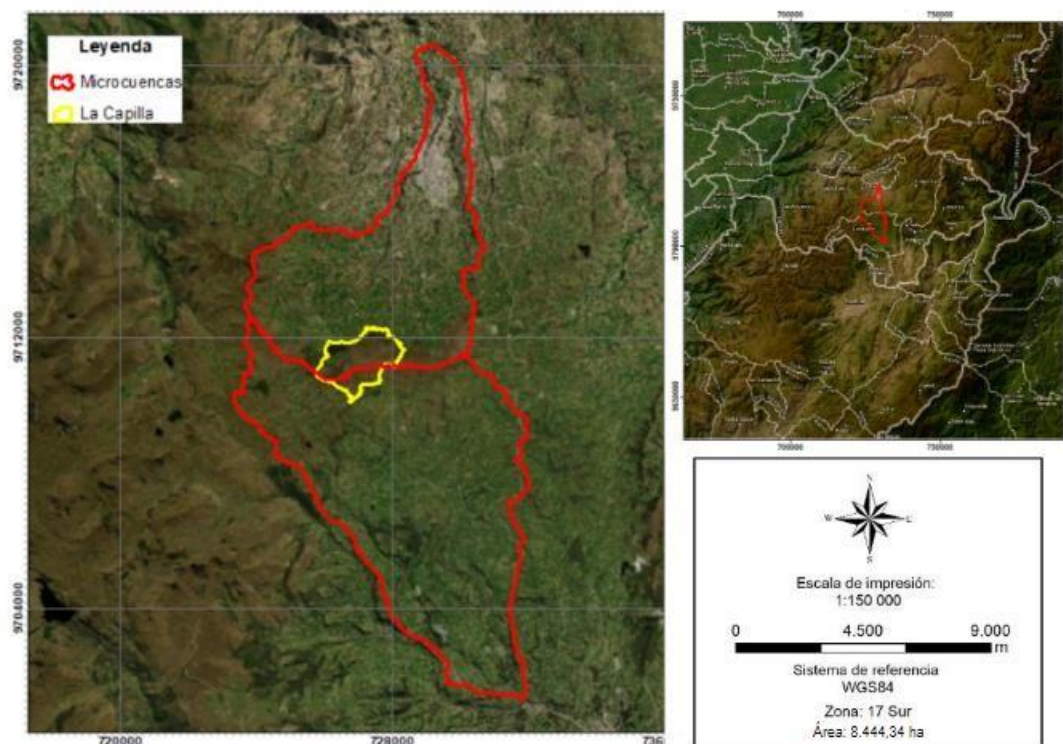


Figura 6. Delimitación del área de entrenamiento para las diferentes categorías de cobertura vegetal, a nivel de las microcuencas de la Quebrada Zhamishan y del Río Tambo

Elaborado: Elaboración propia.

Esta estrategia permitió obtener una resolución más precisa, considerando que los datos de los satélites Landsat poseen una resolución espacial de 30 x 30 metros por píxel, lo cual puede causar pérdida de información en áreas muy pequeñas. Esto facilitó una identificación más clara de las transformaciones en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo, mejorando así la capacidad de análisis de las variaciones en el paisaje dentro del área de conservación La Capilla.

4.3. Antecedentes del uso de suelo

Para definir los periodos de análisis y obtener la información satelital, se basó en la información proporcionada por A. Morocho (Comunicación personal, 6 de mayo de 2023), quién indicó los años en los que se produjeron los principales cambios significativos en el uso del suelo en el área de conservación La Capilla. Los años identificados fueron:

- 1974 - Primeros acuerdos en la comunidad para destinar el área de La Capilla como sitio de conservación, con la intención de preservar y proteger el área frente a posibles cambios en el uso de suelo que puedan comprometer su valor ecológico.

- 1980 - Se lleva a cabo la construcción del dique para el embalse de la laguna El Estero, esta infraestructura no implicó un cambio significativo en el uso de suelo a pesar de ser una modificación en el entorno.
- 1995 - Se realizó la plantación de especies forestales de pino (*Pinus patula* y *Pinus radiata*) dentro del área de conservación La Capilla, con la intención de fomentar la biodiversidad.
- 2013 - Ratificación como área de conservación La Capilla, junto con la implementación de medidas de delimitación física brindando restricción de acceso a la zona, evitando así alteraciones en la biodiversidad por actividades humanas no autorizadas.

Esta información permitió analizar el impacto de estos eventos en la cobertura natural del área de estudio.

4.4. Obtención de imágenes satelitales

Con el fin de analizar y cuantificar los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo, se utilizaron imágenes de Landsat TM (WGS 84 Zona 17 S) con un intervalo temporal de cinco años, comenzando en 1986, después de seis años que se construyó el dique para el embalse. Se tomó este año como referencia debido a la falta de información satelital en los años anteriores. Las imágenes satelitales fueron obtenidas de USGS. Las imágenes de USGS están procesadas con correcciones radiométricas, geométricas y topográficas para mejorar su calidad y precisión (Ruiz, Savé y Herrera, 2013) como se muestra en la figura 8.

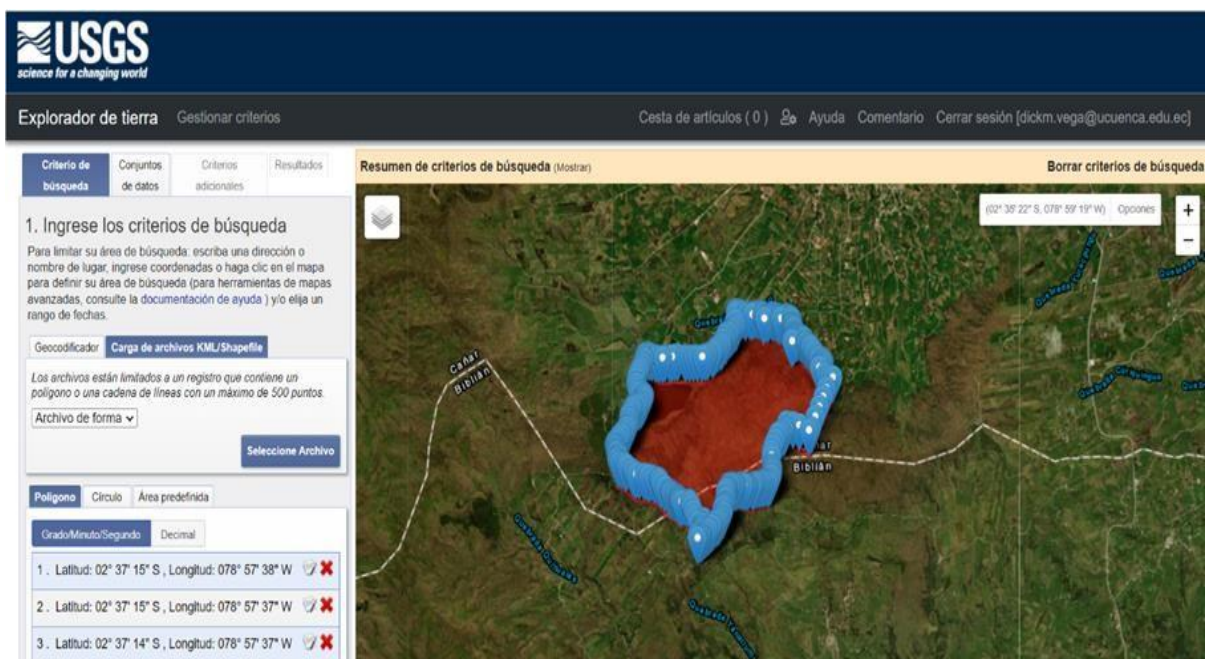


Figura 7. Proceso de obtención de imágenes satelitales Landsat

Con el fin de mejorar la precisión del proceso de selección de imágenes, se cargó previamente en las aplicaciones la delimitación del área de trabajo definida, lo que facilitó la descarga de imágenes satelitales con la menor cantidad de nubosidad presente en la zona. Además, utilizando el historial de uso del suelo, se identificaron los años de mayor relevancia dentro del proyecto para agilizar el proceso de búsqueda de imágenes. Con estos parámetros establecidos, se obtuvo la información detallada en la Tabla 2. Este enfoque permitió optimizar la recopilación de datos y garantizar la calidad de las imágenes seleccionadas para su posterior análisis, además, permitió obtener una visión detallada de la evolución del uso del suelo en el área de estudio a lo largo de las décadas, facilitando así el análisis de los cambios y sus implicaciones en los ecosistemas.

Tabla 2. *Numero de imágenes satelitales Landsat descargadas por año*

Imágenes satelitales	
Años	N.º de imágenes
1986	4
1991	5
1996	3
2001	5
2006	3
2011	3
2016	4
2021	6
Total, de imágenes obtenidas	33

Elaborado: Elaboración propia.

4.5. Procesamiento de imágenes satelitales

Una vez descargada toda la información necesaria, se procedió a generar los mosaicos anuales correspondientes a cada uno de los años. Para ello, se empleó la aplicación de ArcMap la cual pertenece a el software ArcGIS Desktop, donde se cargó la información satelital recopilada, incluyendo cada banda espectral de las imágenes Landsat. Posteriormente, utilizando la herramienta *Image Analysis* (Figura 9), se llevó a cabo la composición de bandas. Este proceso permitió crear imágenes compuestas que proporcionaron una representación más completa y detallada del área de estudio en cada uno de los años analizados.

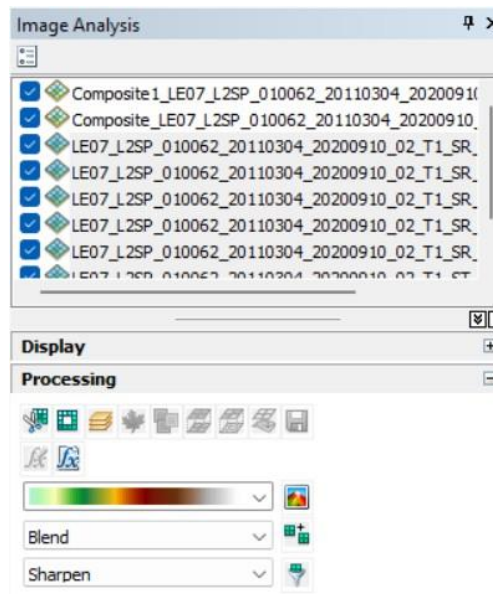


Figura 8. Proceso de composición de imágenes satelitales mediante la herramienta *Image Analysis* del software ArcGIS Desktop

Elaborado: Elaboración propia.

Mediante el uso de esta herramienta, se logró crear imágenes multiespectrales que integraban toda la información de las distintas bandas proporcionadas por los datos satelitales. Después de este paso, se procedió a combinar estas composiciones utilizando la herramienta *Mosaic*, donde se especificó que se realizará la unión mediante el método *Blend* (Figura 10). El propósito de este proceso era reducir al máximo la presencia de nubosidad en el área de estudio, lo que permitió obtener imágenes más nítidas y con información más precisa sobre el lugar. Esta técnica de mosaico aseguró una representación visual más clara y completa del área en cada uno de los años analizados, facilitando así el seguimiento de los cambios en el paisaje a lo largo del tiempo.

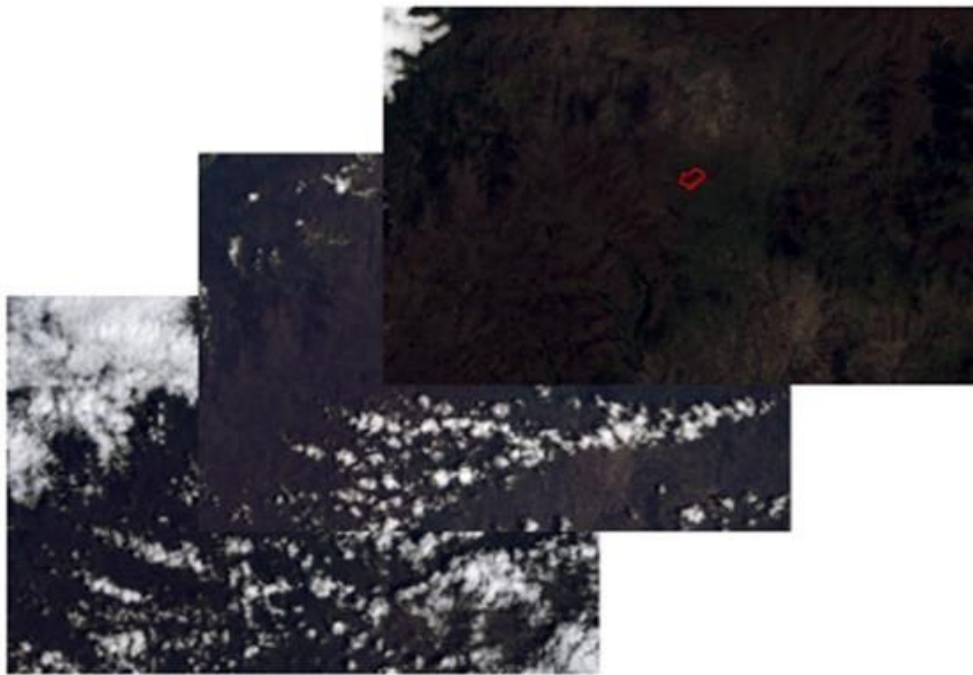


Figura 9. Creación de mosaicos para la eliminación de nubosidad mediante la herramienta Mosaic

Elaborado: Elaboración propia.

Es importante señalar que este proceso no logra eliminar la totalidad de la nubosidad. Esto se debe a que la función de esta herramienta es completar las áreas nubladas utilizando información proveniente de otras imágenes satelitales, lo que resulta en imágenes con una menor presencia de nubes, siempre y cuando el área cubierta por nubes esté despejada en alguna de las otras imágenes satelitales disponibles. Aunque este enfoque permite reducir significativamente la interferencia de las nubes en las imágenes compuestas, no puede garantizar la eliminación completa de la nubosidad en todas las áreas de interés.

4.6. Recorte

Una vez completados los mosaicos de cada año, se recortó las imágenes satelitales para facilitar el proceso de clasificación. Esta etapa reduce el número de píxeles que el programa debe procesar, centrándose exclusivamente en el área de interés. Se utilizó el programa ESA Snap (*Sentinel Application Platform*) para este propósito. En esta plataforma, se cargó los mosaicos previamente generados y también los datos corregidos del área de estudio en coordenadas *Geographic Lat/Long* (WGS 84). Con toda la información disponible en el programa, se procedió a realizar los recortes de imágenes satelitales utilizando el polígono

del área de estudio. Para esto, nos dirigimos a la opción "Raster" en la barra de herramientas superior. Allí, se seleccionó la opción "Mask" y se utilizó la herramienta "Land/Sea Mask" (Figura 11). Esta herramienta permitió cargar toda la información desplegada en el programa y especificar la capa vectorial (en este caso, el área de interés) con la que procedió a recortar la imagen multiespectral del mosaico. De esta manera, se obtuvo los recortes correspondientes a cada año, lo que simplifica el análisis y la interpretación de los datos para la clasificación de la cobertura terrestre.

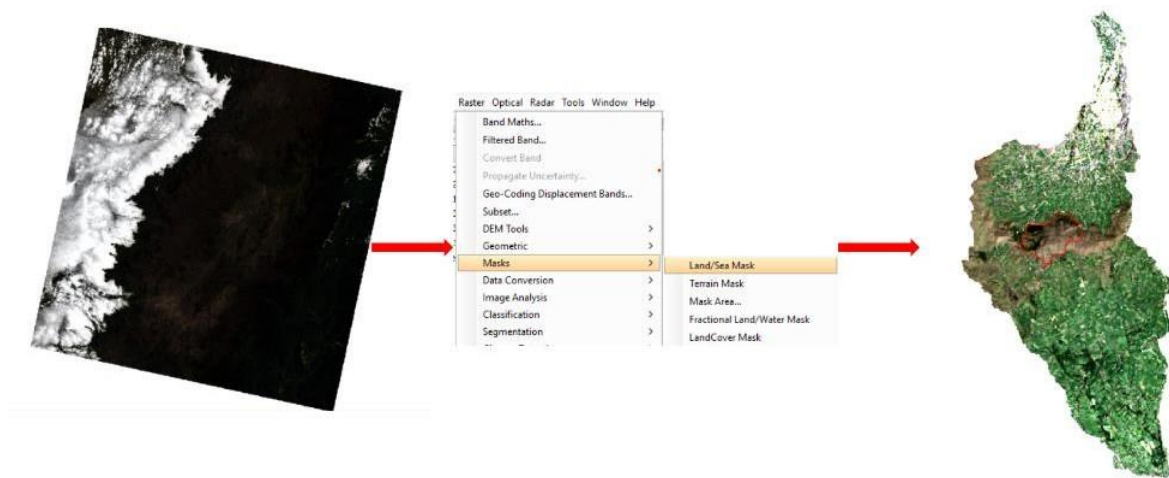


Figura 10. Proceso de recorte de mosaicos mediante la utilización de los límites del área de entrenamiento y área estudio

Elaborado: Elaboración propia.

4.7. Generación de firmas espectrales

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de entrenamiento riguroso de píxeles con el objetivo de lograr una clasificación precisa de los cambios en los tipos de cobertura del suelo. Para obtener los valores espectrales correspondientes a las diferentes coberturas del suelo, se utilizó la herramienta *Pin Placing Tool* del software ESA Snap. Esta herramienta nos permitió generar una capa de pines, mediante la cual se seleccionó las áreas representativas de cada una de las coberturas identificadas (Figura 12). Este enfoque permitió recopilar datos espectrales precisos para cada tipo de cobertura, lo que facilitó la posterior clasificación de las imágenes satelitales y la identificación de los cambios en el paisaje a lo largo del tiempo.



Figura 11. Creación de áreas de entrenamiento de píxeles para la obtención de firmas espectrales

Elaborado: Elaboración propia.

Los píxeles clasificados en cada una de estas áreas proporcionaron los patrones espectrales característicos de cada tipo de cobertura del suelo (ERDAS, 1997). Mediante esta técnica, se garantizó una mayor precisión en la identificación de las distintas coberturas del suelo, creando una base de datos amplia conforme a la extensión de cada clasificación. El objetivo era obtener un amplio rango espectral para cada tipo de cobertura, para lograr esto, se asignó un mínimo de 30 pines por tipo de cobertura, y un máximo de 50 pines según el tamaño de la muestra utilizada para el entrenamiento (Keil, Lang & Menzel, 2019). Este enfoque permitió recopilar datos geoespaciales más precisos y útiles. Además, permitió obtener una firma única para cada uso del suelo, así como una referencia de los límites que estas firmas espectrales deben mantener para alcanzar un nivel de precisión aceptable (Figura 13). Este

proceso garantizó una clasificación más precisa y confiable de las imágenes satelitales, lo que facilitó el análisis de los cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo.

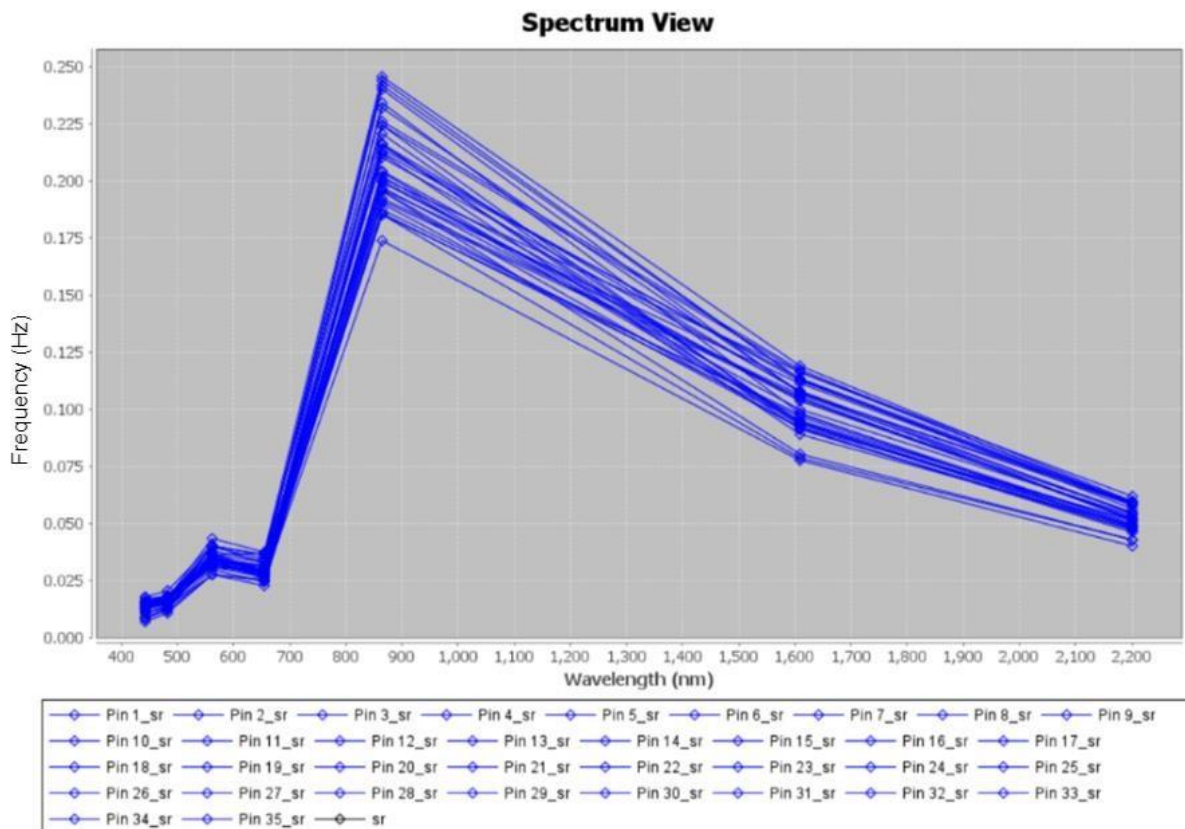


Figura 12. Firma espectral de especies forestales de pino obtenida tras el entrenamiento de píxeles

Elaborado: Elaboración propia.

De esta manera, se consiguió identificar los píxeles que comparten similitudes y que son representativos de cada una de las firmas espectrales. Se asignó una firma espectral específica a cada clase, lo que mejoró la precisión y confiabilidad de la clasificación de las diferentes coberturas del suelo. Estas coberturas se organizaron en las siguientes clases con base a la clasificación de uso de suelo y cobertura vegetal utilizado en Ecuador (Anexo A) y otros autores, citados abajo.

- Cuerpos de Agua
- Centros Poblados. (Gasparri, 2010)
- Suelos Descubiertos o Vías. (Gasparri, 2010)
- Bosque Nativo
- Mosaico de Bosques (Escobedo, Dardón, López, Martínez & Cardona, 2014)
- Plantación Forestal de Pino

- Vegetación Arbustiva
- Vegetación Herbácea
- Humedales
- Pastos
- Nubes
- Sombras

Este procedimiento es fundamental para asegurar la precisión y la fiabilidad de los datos geoespaciales empleados. Finalmente, se seleccionaron puntos al azar de cada firma espectral con el propósito de verificar que ninguna de estas firmas se pareciera a la de otra cobertura vegetal, como se ilustra en la Figura 14. Esto condujo a la obtención de zonas entrenadas para cada tipo de cobertura, así como firmas espectrales específicas para cada una, lo que simplificó el proceso de clasificación para todos los años analizados, garantizando así una identificación más precisa y confiable de las diferentes coberturas del suelo a lo largo del tiempo.

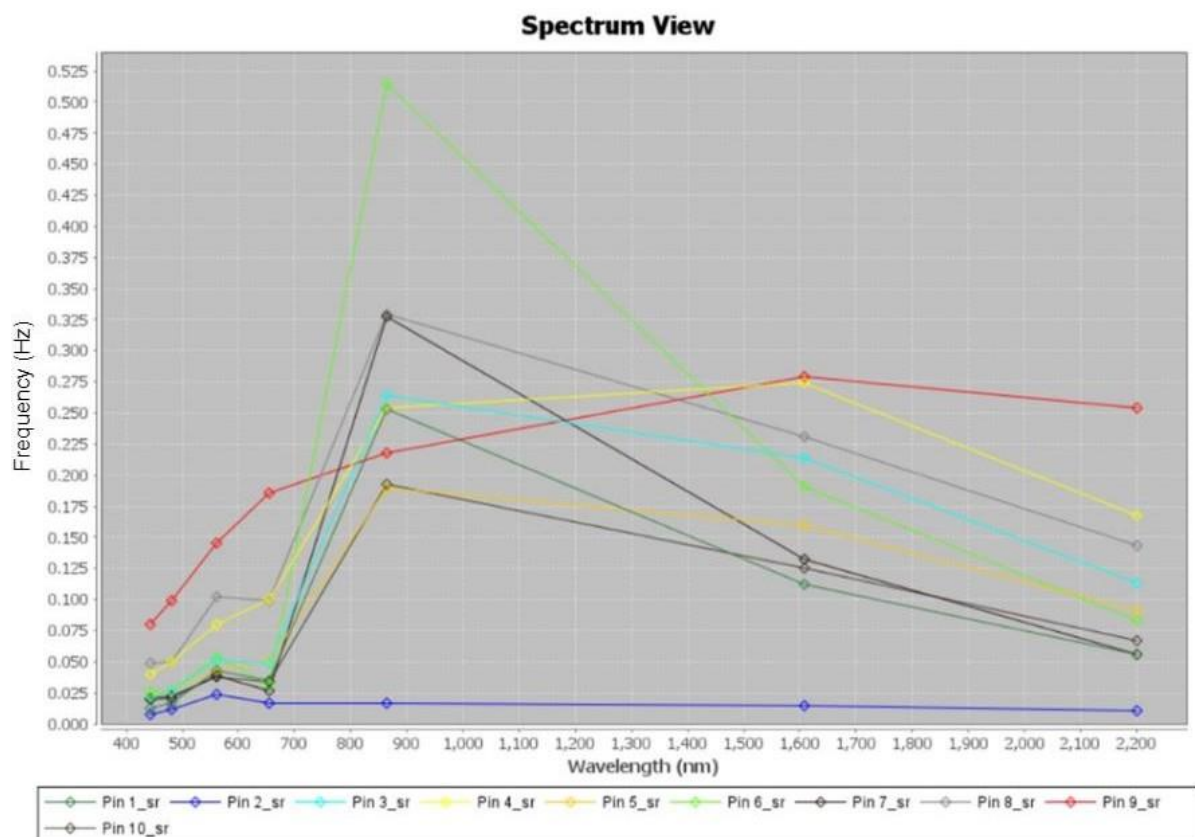


Figura 13. Comparación de firmas espectrales de todas las coberturas vegetales identificadas

Elaborado: Elaboración propia.

4.8. Clasificación supervisada de las coberturas

Después de obtener las firmas espectrales correspondientes a cada tipo de cobertura vegetal en la zona, se procedió a crear contenedores de datos vectoriales. Para ello, se utilizó la herramienta "*New vector data container*", que, como su nombre lo indica, permite la creación de contenedores de información vectorial. Estos contenedores se utilizaron para almacenar datos en forma de polígonos, utilizando la herramienta "*Rectangle drawing tool*". Esto marcó el inicio del proceso de delimitación de los polígonos asociados a cada tipo de cobertura, tal como se muestra en la Figura 15. Este enfoque permitió organizar y almacenar de manera eficiente la información sobre las diferentes coberturas del suelo, facilitando así la gestión en el proyecto.

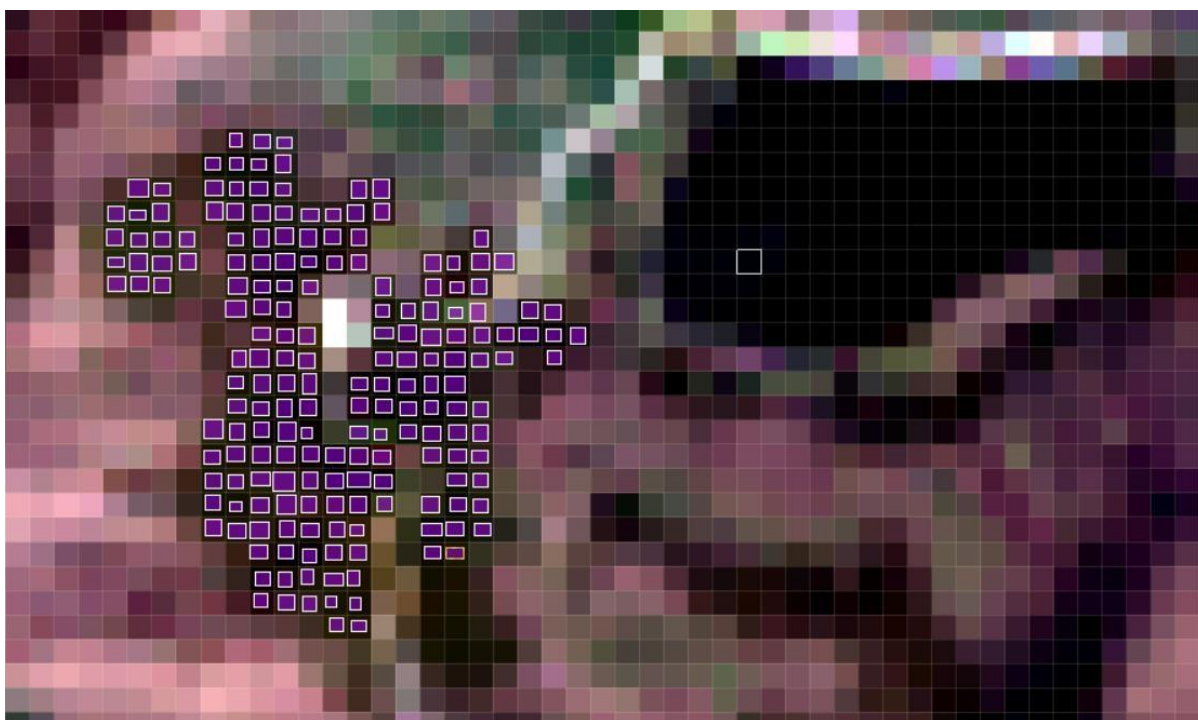


Figura 14. Proceso de delimitación de polígonos en plantaciones forestales de pino para la creación de contenedores de información vectorial

Elaborado: Elaboración propia.

Estas áreas, previamente delimitadas por las firmas espectrales, serán utilizadas por el programa para identificar los polígonos que representan a cada tipo de cobertura. De esta manera, se está proporcionando al programa la información necesaria para clasificar los datos vectoriales almacenados en cada clase. Una vez que se ha definido todas las coberturas en el programa ESA Snap, en la barra de herramientas ubicada en la pestaña "*Raster*" y se selecciona la opción "*Classification*" (Figura 16). Este paso marca el inicio del proceso de

clasificación de las imágenes satelitales, donde el programa utilizará la información de los polígonos definidos para asignar cada píxel a la clase correspondiente.

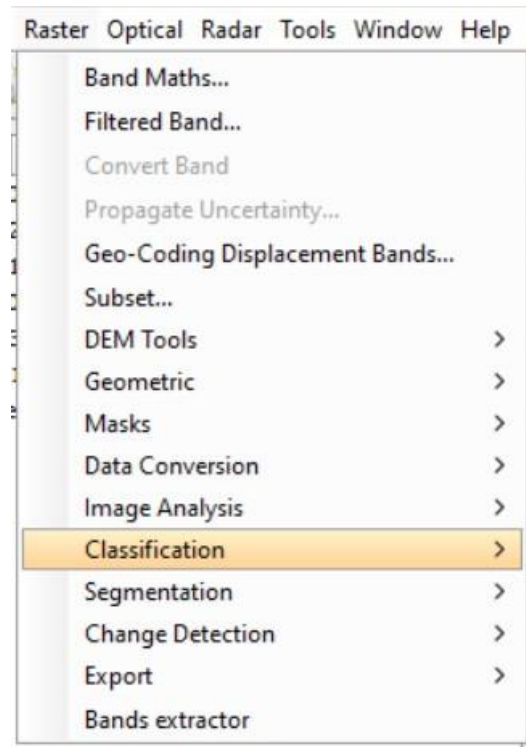


Figura 15. Inicio del proceso de clasificación supervisada tras la creación de polígonos que contienen información vectorial

Elaborado: Elaboración propia.

Posteriormente, se seleccionó la opción de Clasificación Supervisada, que ofrece varios tipos de clasificación. Para este proyecto, se optó por utilizar el método de clasificación denominado *Random Forest Classifier*. Este método es utilizado para clasificar imágenes satelitales en diferentes categorías predefinidas mediante un algoritmo de aprendizaje automático conocido como *Random Forest*. Este enfoque utiliza un conjunto de árboles de decisión para asignar píxeles de la imagen a clases específicas basadas en sus características espectrales. Es una herramienta útil para diversas tareas, como la identificación de tipos de cobertura terrestre, la detección de cambios en el uso del suelo y la monitorización de la vegetación, entre otras aplicaciones en la gestión ambiental y la investigación científica. El uso de este método proporciona resultados precisos y confiables, lo que facilita la toma de decisiones informadas en la conservación ambiental y el manejo de recursos naturales (Bonan, 2013).

Al seleccionar este proceso de clasificación, se abrirá una pestaña en la que se solicita especificar diversos parámetros. Estos incluyen la composición de la imagen satelital o mosaico sobre el cual se llevará a cabo la clasificación, la información vectorial previamente almacenada para las diferentes coberturas designadas, la cantidad de bandas espectrales que deseamos utilizar en el proceso, indicando la información espectral que se empleará, y la ubicación donde deseamos guardar la clasificación resultante.

De esta manera, se proporcionó a la aplicación los parámetros necesarios para generar un mapa de cobertura con alta precisión y mínimos niveles de error. Esto permite obtener mapas de cobertura vegetal detallados, como el que se muestra en la Figura 17.

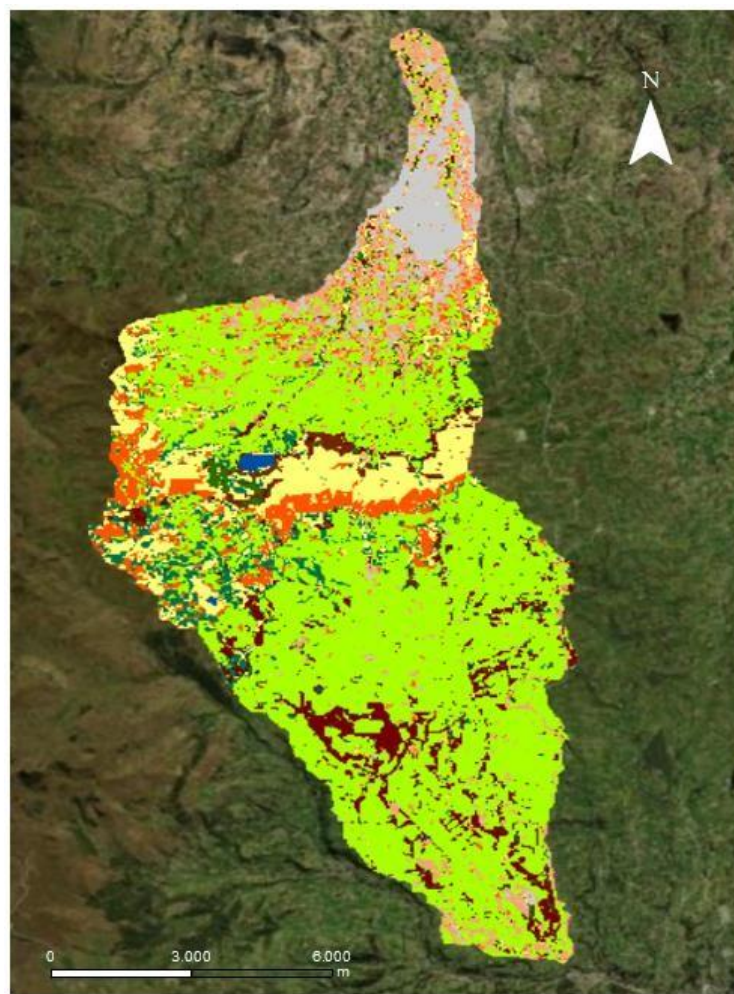


Figura 16. Mapa de cobertura vegetal a nivel de microcuencas de la Quebrada Zhamishan y del Río Tambo obtenido mediante el método de clasificación "Random Forest Classifier" del año 2016

Elaborado: Elaboración propia.

Finalmente, se repitió este proceso para cada año, lo que resultó en la generación de un mapa para cada período. En total, se crearon ocho mapas que ilustran la evolución de la cobertura vegetal a lo largo de los años. Estos mapas proporcionan una visión detallada de cómo ha cambiado la cobertura vegetal en el área de estudio durante el período analizado. Esta información es crucial para comprender los patrones de cambio en el paisaje y para identificar posibles tendencias a lo largo del tiempo. Los mapas resultantes constituyen una herramienta valiosa para evaluar el estado de los recursos naturales y diseñar estrategias efectivas de conservación.

4.9. Validación por encuestas

Posterior a la generación de los mapas de cobertura, se llevó a cabo varias visitas al área de conservación. El propósito de estas visitas fue recopilar información básica sobre el contexto de uso del suelo y cobertura vegetal mediante observación directa en campo donde se realizó un recorrido donde se comprobó si los resultados iniciales de la clasificación supervisada coincidían con la cobertura vegetal actual de la zona de estudio y vía encuestas realizadas a miembros de la comunidad La Capilla (Anexo B) con la finalidad de conocer como era el área de estudio en los diferentes años. Las personas seleccionadas, hacen las veces de informantes claves, toda vez que se identificó y seleccionó a las personas más antiguas y/o que manejaban información sobre los cambios de cobertura en el tiempo del área de conservación La Capilla. Estas encuestas incluyeron preguntas diseñadas para obtener información que permita complementar y/o explicar los resultados proporcionados por los mapas generados (Anexo C y D). El propósito fue comprender mejor los cambios ocurridos en la vegetación y evaluar los efectos de su evolución hasta la actualidad de La Capilla, desde su designación como área para la conservación en 1976.

4.10. Análisis multitemporal y estadístico

Una vez que la información obtenida mediante la clasificación supervisada y la validación en campo ha sido preparada, se procedió a analizar los datos para evaluar los cambios que han ocurrido en el área de interés a lo largo del tiempo, para lo cual se utilizó una tabla de superficie y tasa anual de cambio la cual es una tabla que muestra cómo cambia la superficie de un objeto o área específica a lo largo del tiempo, calculando la tasa de cambio anual correspondiente. Este tipo de tabla es comúnmente utilizada en diversos campos como la economía, la agricultura, la ecología y la gestión de recursos naturales para analizar y comprender las tendencias de crecimiento o decrecimiento de superficies en periodos temporales específicos. La tabla de evolución y tasa de cambio anual de la superficie es una

herramienta esencial en estudios de cambio de cobertura vegetal, utilizada para monitorizar y analizar cómo varía la extensión de áreas forestales, vegetales o de cualquier otro tipo de cobertura a lo largo del tiempo. Este tipo de tabla permite calcular la tasa de cambio anual de la superficie cubierta por vegetación, proporcionando datos clave para entender tendencias, evaluar impactos ambientales y desarrollar estrategias de conservación y gestión sostenible de recursos naturales (Livengood & Kumar, 2016). El uso de tablas de evolución y tasa de cambio anual de la superficie no solo facilita la comprensión de las dinámicas de cambio de cobertura vegetal, sino que también proporciona una base sólida para la formulación de políticas y estrategias efectivas de conservación y manejo ambiental.

La formulas que fueron utilizadas en este proceso fueron:

$$\text{Superficie} = (\text{categoría final} - \text{categoría inicial})$$

$$\text{Tasa anual de cambio (TAC)} = \frac{\text{Superficie}}{\text{Tiempo transcurrido entre categorías}}$$

Además, se utilizó una matriz de tabulación cruzada, conocida también como tabla de contingencia, la cual, es una herramienta estadística utilizada para resumir y visualizar la relación entre dos o más variables categóricas en un conjunto de datos, se suele utilizar comúnmente para examinar la asociación, la dependencia o la independencia entre las variables y para identificar patrones en los datos categóricos (Agresti, 2007). Esta matriz se utiliza en análisis multitemporales de cobertura vegetal para examinar las relaciones entre diferentes categorías de cobertura vegetal a lo largo del tiempo en diferentes periodos (Pettorelli et al., 2006).

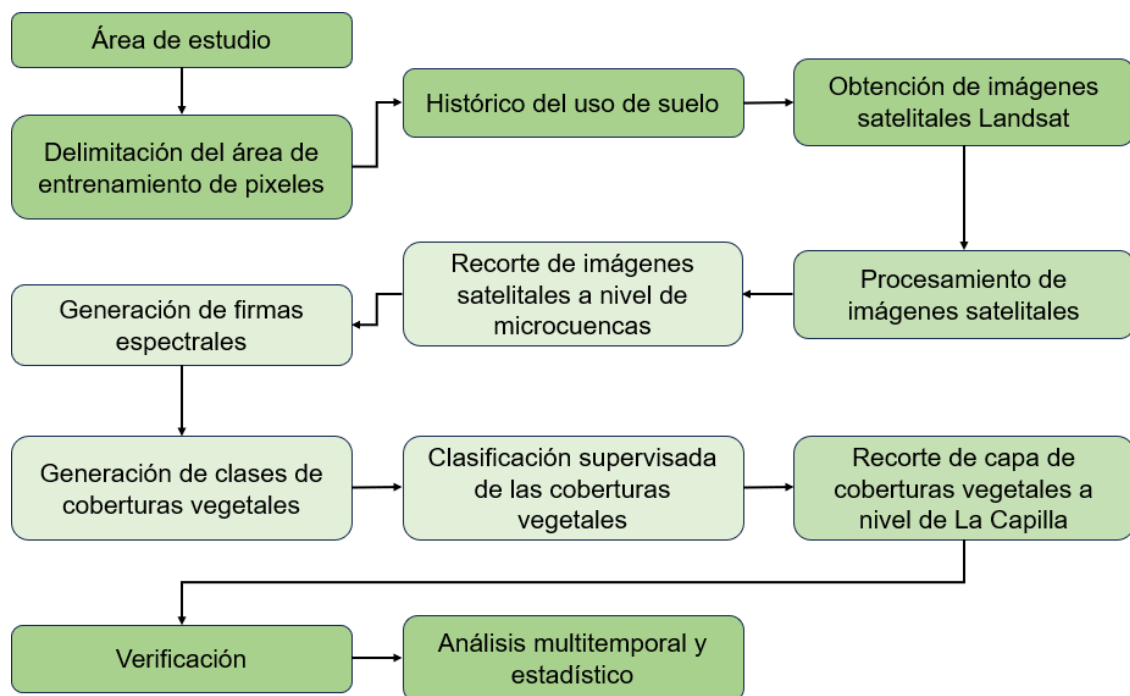
De esta manera se determinó la tasa de cambio en la cobertura vegetal mediante la comparación entre hectáreas de cada cobertura dentro del área de estudio La Capilla en los distintos años. Esto consiste en superponer los mapas por medio de la herramienta *Intersec* de geoprocetamiento en el software de *ArcGis Desktop*, para luego proceder con la aplicación de la matriz de tabulación cruzada, así como muestra en el ejemplo de la Tabla 3, en la cual se compara las categorías del tiempo 1 con las categorías del tiempo 2 con el objetivo de calcular las ganancias y pérdidas de las coberturas en los correspondientes años (Pineda et al., 2009).

Tabla 3. Ejemplo de matriz de tabulación cruzada para dos tiempos con pérdidas (P) y ganancias (G)

Matriz de tabulación cruzada		Tiempo 2				Total tiempo 1	Pérdidas (P)
Tiempo 1	Categoría 1	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
	Categoría 1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	$P_{11}+P_{12}+P_{13}+P_{14}$	$P_{12}+P_{13}+P_{14}$
	Categoría 2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	$P_{21}+P_{22}+P_{23}+P_{24}$	$P_{21}+P_{23}+P_{24}$
	Categoría 3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	$P_{31}+P_{32}+P_{33}+P_{34}$	$P_{31}+P_{32}+P_{34}$
	Categoría 4	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}	$P_{41}+P_{42}+P_{43}+P_{44}$	$P_{41}+P_{42}+P_{43}$
	Total tiempo 2	$P_{11}+P_{21}+P_{31}+P_{41}$	$P_{12}+P_{22}+P_{32}+P_{42}$	$P_{13}+P_{23}+P_{33}+P_{43}$	$P_{14}+P_{24}+P_{34}+P_{44}$		
Ganancias (G)		$P_{21}+P_{31}+P_{41}$	$P_{12}+P_{32}+P_{42}$	$P_{13}+P_{23}+P_{43}$	$P_{14}+P_{24}+P_{34}$		

Fuente: Pineda et al., (2009)

La tabulación cruzada permite saber el cambio neto de cada categoría, el cual se encuentra definido por las pérdidas (P) y ganancias (G) que han ocurrido en el área de conservación La Capilla. Para lo cual se realiza el cálculo de pérdidas menos ganancias en el área donde las diferentes coberturas del Tiempo 1 se superponen en las categorías del Tiempo 2. (Pineda et al., 2009).

**Figura 17.** Flujograma de geoprocesos realizados en este proyecto

Elaborado: Elaboración propia.

Adicionalmente, se verificó y describió el índice de exactitud para evaluar el nivel de precisión de los datos obtenidos. Estos valores del índice van de 0 a 1, donde valores

próximos a 1 indican un mayor grado de concordancia entre las clasificaciones realizadas, por tanto, un mejor modelamiento, con valores más próximo a la realidad (Akkara et al.,2022).

Finalmente, en la Figura 17, se resume de forma esquemática y secuencial los pasos seguidos para el desarrollo del presente análisis multitemporal.

5. Resultados

5.1. Cambios del uso de suelo y cobertura vegetal

En la Tabla 4, se presenta un resumen del cambio de coberturas vegetales en el periodo de análisis 1986 - 2021, lo cual permite analizar de manera detallada la distribución y evolución de diferentes tipos de vegetación en el área de conservación La Capilla. Cada fila de la tabla corresponde a un año específico, mientras que las columnas representan las diferentes categorías de cobertura vegetal, como vegetación arbustiva, herbácea, bosque nativo, plantaciones forestales, entre otras. Los valores en la Tabla 4 indican la extensión de cada tipo de cobertura vegetal en hectáreas para cada año registrado, permitiendo una comparación visual de cómo ha variado la composición vegetal a lo largo del tiempo. Esta herramienta proporciona una visión panorámica de los cambios en la vegetación a lo largo de décadas, lo que resulta invaluable para comprender la dinámica de los ecosistemas y orientar la toma de decisiones en materia de conservación y manejo del ambiente (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de cambios en la cobertura vegetal (en hectáreas) entre 1986 y 2021 en el área de conservación La Capilla

Años	Cambios en la cobertura vegetal a lo largo de los años					
	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea Humed
1986	0,00	20,04	12,17	40,47	100,89	
1991	12,72	2,66	0,18	37,67	153	
1996	16,58	0,05	0,00	55,06		
2001	16,09	0,02	1,88			
2006	15,16	3,31	0			
2011	17,62	0,46				
2016	16,99					
2021						

Fuente: Elaboración propia

Podemos notar claramente un cambio drástico en la cobertura de cuerpos de agua lo cual se debe a un accidente dentro del embalse donde se abrieron las compuertas de las mismas secando la laguna en el año de 1986, viendo que en el año de 1991 se recuperaron 12,72 ha de esta cobertura lo cual se debe a la fuerte presencia de lluvias dentro de la zona de estudio. Esto también explica la disminución de las áreas de suelos descubiertos o vías dado a que parte de las 20.04 ha presentes en 1986 se deben pertenecen al área de los cuerpos de agua. También podemos notar una gran disminución de la cobertura de pastos.

Mientras que los bosques nativos mantienen cambios constantes donde el punto mas bajo de esta cobertura es de 24,18 ha en el año 2001 lo cual puede deberse a que por este año fue introducido en la zona la especie forestal de pino en el área sumado a los incendios que han ocurrido en el área, también se logra apreciar que la cobertura forestal desde el año 2001 ha ido incrementando su cobertura de manera constante. En la Figura 18 se observa que las coberturas como los cuerpos de agua, suelos descubiertos, y el mosaico de bosques se mantienen bastante constantes con ligeras variaciones. Las coberturas de pastos, bosques naturales, vegetación arbustiva y herbácea muestran fluctuaciones más notables a lo largo del tiempo, mientras que las plantaciones forestales de pinos han aumentado de manera más constante en los años más recientes.

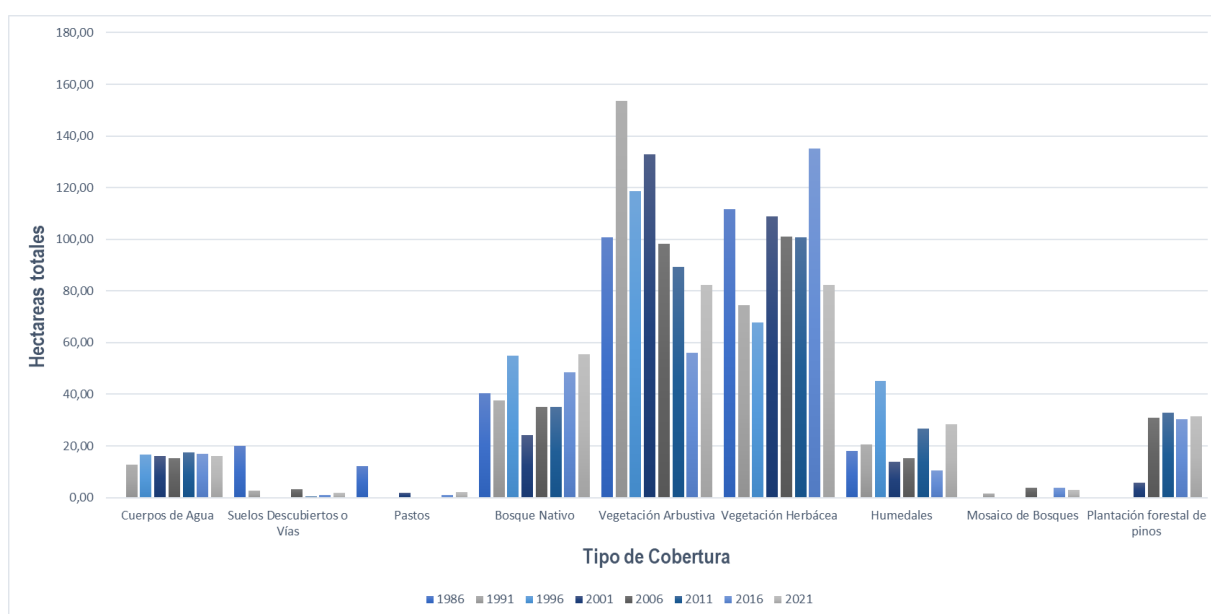


Figura 18. Cambios en la cobertura vegetal a lo largo de 35 años

A continuación, se describe el índice de exactitud o de precisión mostrando el nivel de eficacia en la clasificación y estimación de datos. Los valores obtenidos muestran un alto nivel de precisión, lo que sugiere una clasificación más confiable y precisa, con un mejor nivel de modelamiento, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Índice de Exactitud (IE) de la clasificación supervisada

	Años	Índice de Precisión	Exactitud del Índice
La Capilla	1986	0,81	Casi perfecto
	1991	0,93	Casi perfecto
	1996	0,81	Casi perfecto
	2001	0,94	Casi perfecto
	2006	0,96	Casi perfecto
	2011	0,96	Casi perfecto
	2016	0,98	Casi perfecto
	2021	0,94	Casi perfecto

Fuente: Elaboración propia

En las Tablas 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 se muestra los cambios en la superficie de los diferentes usos y coberturas del suelo del área de conservación La Capilla, para los años 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 y 2021, a partir de nueve categorías identificadas para este estudio.

En la Tabla 6, se observa que durante el periodo de 1986 a 1991, en el área de conservación La Capilla, la superficie de los cuerpos de agua sufrió una recuperación en 12,72 ha; principalmente el embalse (laguna El Estero) presentó un aumento del espejo de agua, esto se da gracias a que en el periodo de 1986 hubo la apertura de las compuertas del embalse, según supieron manifestar los moradores de la comunidad La Capilla encuestados (Anexo E) lo cual generó una sequía del mismo en este periodo y a su vez siendo un cambio que no afectó de manera significativa a las coberturas locales como se muestra en (Anexo F), por lo cual su evolución entre 1986 y 1991 es tan notable con una tasa de cambio de 2,54%; mientras, la vegetación herbácea de páramo tuvo una reducción drástica de 37,10 ha, presentando una tasa anual de cambio (TAC) del -7.42%

Por otro lado, se observó un aumento en las superficies de vegetación arbustiva de páramo y humedales. La vegetación arbustiva incrementó en 52,81 ha, con una TAC del 17,40%; mientras los humedales aumentaron en 2,29 ha, con una TAC del 0,76%. En el caso de la vegetación arbustiva presentó un cambio significativo, incrementándose en aproximadamente un 50% a más, esta cobertura en el periodo 1986-1991 (Tabla 6).

En términos de conservación, se registró una reducción en los valores de superficie de suelos descubiertos (1,82 ha) y pastos (11,99 hectáreas), con TAC de -0,60% y -3,95%, respectivamente.

Tabla 6. Evolución en superficie y porcentaje de la cobertura vegetal entre 1986 y 1991

Cobertura de suelo	Año 1986		Año 1991		Superficie y tasa anual de cambio	
	Área ha	Área %	Área ha	Área %	Área ha	TAC
Cuerpos de Agua	-	-	12,72	4,19	12,72	2,54
Suelos Descubiertos o Vías	20,04	6,60	2,66	0,88	-17,38	-3,48
Pastos	12,17	4,01	0,18	0,06	-11,99	-2,40
Bosque Nativo	40,47	13,34	37,67	12,41	-2,80	-0,56
Vegetación Arbustiva	100,89	33,25	153,70	50,65	52,81	10,56
Vegetación Herbácea	111,69	36,80	74,59	24,58	-37,10	-7,42
Humedales	18,20	6,00	20,49	6,75	2,29	0,46
Mosaico de Bosques	-	-	1,46	0,48	1,46	0,29
Plantación forestal de pinos	-	-	-	-	-	-
TOTAL	303,46	100,00	303,46	100,00		

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7, se observa los cambios de cobertura vegetal en el período comprendido entre 1991 y 1996, registrando una primera y marcada reducción en la extensión de la vegetación arbustiva de páramo, con una pérdida total de 35,12 ha, lo que representa un TAC de -7,02%. Esta disminución fue significativa en comparación con el período anterior (1986-1991), considerando que, entre 1986-1991, no se registraron pérdidas, sino un aumento considerable de la cobertura vegetación arbustiva de páramo. Asimismo, se registró una nueva reducción en la superficie cubierta por vegetación herbácea de páramo, con una pérdida de 6,90 ha, equivalente a una TAC de -1,38%.

Por otro lado, se observó una notable recuperación en la extensión de bosques nativos, con un incremento de 17,39 ha, representando un aumento del 3,48% en la TAC. También se evidenció un aumento en la cobertura de humedales, con un incremento significativo de 24,81 ha, lo que equivale a una TAC de 4,96%. Además, se registró un leve aumento de la superficie suelos descubiertos y para 1996, no se identificó áreas de pasto (Tabla 7).

Tabla 7. Evolución en superficie y porcentaje de la cobertura vegetal entre 1991 y 1996

Cobertura de suelo	Año 1991		Año 1996		Superficie y tasa anual de cambio	
	Área ha	Área %	Área ha	Área %	Área ha	TAC
Cuerpos de Agua	12,72	4,19	16,58	5,46	3,86	0,77
Suelos Descubiertos o Vías	2,66	0,88	0,05	0,02	-2,61	-0,52
Pastos	0,18	0,06	-	-	-0,18	-0,04
Bosque Nativo	37,67	12,41	55,06	18,14	17,39	3,48
Vegetación Arbustiva	153,70	50,65	118,58	39,08	-35,12	-7,02
Vegetación Herbácea	74,59	24,58	67,68	22,30	-6,90	-1,38
Humedales	20,49	6,75	45,30	14,93	24,81	4,96
Mosaico de Bosques	1,46	0,48	0,21	0,07	-1,24	-0,25
Plantación forestal de pinos	-	-	-	-	-	-
TOTAL	303,46	100,00	303,46	100,00		

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8, en materia de conservación, se observaron cambios significativos en la cobertura de tierra entre 1996 y 2001, hubo aumentos notables en áreas de vegetación arbustiva y herbácea (14,26 ha y 41,16 ha, respectivamente), mientras que se registraron pérdidas significativas en bosque nativo (30,87 ha) y humedales (31,47 ha); y en menor proporción en los cuerpos de agua (0,49 ha); con TAC que fueron entre -0,16% y -10,37%.

En 2001, ya se puede apreciar la presencia de una superficie de 5,71 ha de la cobertura plantación forestal de pino, que fue plantada en 1995, por la propia comunidad de La Capilla. Con relación a los pastos, estos reaparecen, también al final del periodo y aumentó en 1,88 ha, cuando comparado al periodo anterior (1991-1996), con una TAC del 0,62% (Tabla 8).

Tabla 8. Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre 1996 y 2001

Cobertura de suelo	Año 1996		Año 2001		Superficie y tasa anual de cambio	
	Área ha	Área %	Área ha	Área %	Área ha	TAC
Cuerpos de Agua	16,58	5,46	16,09	5,30	-0,49	-0,16
Suelos Descubiertos o Vías	0,05	0,02	0,02	0,01	-0,03	-0,01
Pastos	-	-	1,88	0,62	1,88	0,62
Bosque Nativo	55,06	18,14	24,18	7,97	-30,87	-10,17
Vegetación Arbustiva	118,58	39,08	132,84	43,78	14,26	4,70
Vegetación Herbácea	67,68	22,30	108,84	35,87	41,16	13,56
Humedales	45,30	14,93	13,83	4,56	-31,47	-10,37
Mosaico de Bosques	0,21	0,07	0,06	0,02	-0,16	-0,05
Plantación forestal de pinos	-	-	5,71	1,88	5,71	1,88
TOTAL	303,46	100,00	303,46	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Durante el período comprendido entre 2001 y 2006, se registró un notable incremento en la cobertura de plantaciones forestales de pino, con un aumento de 25,27 ha. Este incremento fue uno de los más significativos en términos de aumento de cobertura, extendiéndose el pino por el área, como especie exótica y desplazando superficies de especies locales, reflejado en una TAC del 1,26%. Paralelamente, se observó una recuperación en la extensión de bosques nativos, con un incremento de 11,02 ha, un valor considerable en comparación con el periodo anterior (1996-2001), con un TAC del 0,55%.

Sin embargo, entre los años mencionados, las coberturas más afectadas fueron la vegetación arbustiva y la vegetación herbácea, con una pérdida de 34,67 ha y 7,68 ha respectivamente. Estas pérdidas representan cambios significativos en comparación con el periodo anterior (1996-2001), con valores de -1,73% y -0,38% respectivamente (Tabla 9).

Tabla 9. Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre 2001 y 2006

Cobertura de suelo	Año 2001		Año 2006		Superficie y tasa anual de cambio	
	Área ha	Área %	Área ha	Área %	Área ha	TAC
Cuerpos de Agua	16,09	5,30	15,16	5,00	-0,93	-0,05
Suelos Descubiertos o Vías	0,02	0,01	3,31	1,09	3,29	0,16
Pastos	1,88	0,62	0,21	0,07	-1,66	-0,08
Bosque Nativo	24,18	7,97	35,21	11,60	11,02	0,55
Vegetación Arbustiva	132,84	43,78	98,17	32,35	-34,67	-1,73
Vegetación Herbácea	108,84	35,87	101,16	33,34	-7,68	-0,38
Humedales	13,83	4,56	15,35	5,06	1,52	0,08
Mosaico de Bosques	0,06	0,02	3,89	1,28	3,84	0,19
Plantación forestal de pinos	5,71	1,88	30,98	10,21	25,27	1,26
TOTAL	303,46	100,00	303,46	100,00		

Fuente: Elaboración propia

En el periodo 2006 y 2011, los cambios más significativos fueron de la cobertura de humedales, pues se aprecia que, en este periodo, esta cobertura aumentó su superficie en 11,44 ha lo cual representa un cambio en la TAC de 3,77% de crecimiento; mientras que la cobertura de vegetación arbustiva sufrió una disminución de 8,82 ha, lo cual indica una pérdida de 2,91% en la cobertura vegetal.

Mientras que, en el resto de las coberturas, se notó cambios menores. Hubo un aumento de la superficie en la cobertura de cuerpos de agua del 2,46 ha, que representa el 0,81% de TAC, al igual que la cobertura de plantaciones forestales cuya superficie creció en 1,91 ha, que representa el 0,63% de TAC (Tabla 10).

Tabla 10. *Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre los años 2006 y 2011*

Cobertura de suelo	Año 2006		Año 2011		Superficie y tasa anual de cambio	
	Área ha	Área %	Área ha	Área %	Área ha	TAC
Cuerpos de Agua	15,16	5,00	17,62	5,81	2,46	0,81
Suelos Descubiertos o Vías	3,31	1,09	0,46	0,15	-2,85	-0,94
Pastos	0,21	0,07	0,16	0,05	-0,05	-0,02
Bosque Nativo	35,21	11,60	35,15	11,58	-0,05	-0,02
Vegetación Arbustiva	98,17	32,35	89,35	29,44	-8,82	-2,91
Vegetación Herbácea	101,16	33,34	100,79	33,21	-0,37	-0,12
Humedales	15,35	5,06	26,78	8,83	11,44	3,77
Mosaico de Bosques	3,89	1,28	0,24	0,08	-3,65	-1,20
Plantación forestal de pinos	30,98	10,21	32,90	10,84	1,91	0,63
TOTAL	303,46	100,00	303,46	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Durante el período comprendido entre 2011 y 2016, se observó un crecimiento considerable en la extensión de la cobertura de vegetación herbácea, con un aumento de 34,39 ha, representando una TAC del 6,88%. Esta recuperación fue notable en comparación con la superficie registrada entre 2006 y 2011. Además, se detectó una recuperación de 13,42 ha en los bosques nativos, lo que equivale a un TAC del 2,68%, cambios significativos, con respecto a la evolución previa de la superficie.

Sin embargo, se evidenció una pérdida en la extensión de la vegetación arbustiva, con un total de 33,17 ha, lo que representa una disminución del 6,63% de la TAC. Asimismo, los humedales también se vieron afectados con una pérdida de 16,32 ha, lo que se traduce en un valor de -3,26% del TAC (Tabla 11).

Tabla 11. Evolución en superficie y tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre los años 2011 y 2016

Cobertura de suelo	Año 2011		Año 2016		Superficie y tasa anual de cambio	
	Área ha	Área %	Área ha	Área %	Área ha	TAC
Cuerpos de Agua	17,62	5,81	16,99	5,60	-0,63	-0,13
Suelos Descubiertos o Vías	0,46	0,15	1,11	0,36	0,65	0,13
Pastos	0,16	0,05	0,90	0,30	0,74	0,15
Bosque Nativo	35,15	11,58	48,58	16,01	13,42	2,68
Vegetación Arbustiva	89,35	29,44	56,18	18,51	-33,17	-6,63
Vegetación Herbácea	100,79	33,21	135,18	44,55	34,39	6,88
Humedales	26,78	8,83	10,46	3,45	-16,32	-3,26
Mosaico de Bosques	0,24	0,08	3,69	1,22	3,46	0,69
Plantación forestal de pinos	32,90	10,84	30,36	10,01	-2,53	-0,51
TOTAL	303,46	100,00	303,46	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Por último, se comparó el periodo 2016 – 2021, donde se encontró que la cobertura vegetal de vegetación arbustiva presenta un incremento de 26,13 ha, lo cual representa un aumento del 8,61% en esta cobertura; seguido de los humedales, los cuales también presentan un aumento en su superficie de 17,89 ha, siendo una TAC del 5,89%. Esto indica, un cambio positivo en la cobertura vegetal de la zona demostrando que la designación del lugar como área de conservación ha tenido un cambio significativo en términos de biodiversidad de la zona.

Cabe recalcar, que los bosques nativos del lugar también presentan un cambio positivo con un aumento en su superficie vegetal del 7,03 ha, lo cual representa un aumento en la TAC de 2,23%. Mientras que la TAC de la plantación forestal de pino presenta un aumento pequeño del 1,07 ha de cobertura, lo cual representa tan solo un 0,35% de aumento de la TAC. Esto muestra que, las coberturas nativas del área de estudio están recuperándose. Sin embargo, existe una disminución abrupta de la cobertura de vegetación herbácea en la zona, la cual es del -52,75 ha, que representa una pérdida del -17,38% de la cobertura como se muestra a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12. Evolución en superficie tasa anual de cambio en la cobertura vegetal entre los años 2016 y 2021

Cobertura de suelo	Año 2016		Año 2021		Superficie y tasa anual de cambio	
	Área ha	Área %	Área ha	Área %	Área ha	TAC
Cuerpos de Agua	16,99	5,60	16,18	5,33	-0,81	-0,27
Suelos Descubiertos o Vías	1,11	0,36	1,89	0,62	0,79	0,26
Pastos	0,90	0,30	2,22	0,73	1,32	0,44
Bosque Nativo	48,58	16,01	55,61	18,33	7,03	2,32
Vegetación Arbustiva	56,18	18,51	82,31	27,12	26,13	8,61
Vegetación Herbácea	135,18	44,55	82,44	27,17	-52,75	-17,38
Humedales	10,46	3,45	28,35	9,34	17,89	5,89
Mosaico de Bosques	3,69	1,22	3,01	0,99	-0,68	-0,22
Plantación forestal de pinos	30,36	10,01	31,44	10,36	1,07	0,35
TOTAL	303,46	100,00	303,46	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Entre 1986 y 1991, se registra un aumento significativo de 12,72 unidades, posiblemente debido a políticas ambientales efectivas o condiciones favorables. De 1991 a 1996, el aumento es de 3,86 unidades, indicando un posible cambio en las condiciones o políticas. Entre 1996 y 2001, se observa una disminución de -0,49 unidades, atribuible a sequías, sobreexplotación de recursos o expansión urbana. De 2001 a 2006, la disminución se intensifica a -0,93 unidades, sugiriendo problemas persistentes en la gestión del agua. El periodo 2006-2011 muestra una recuperación con un aumento de 2,46 unidades, probablemente por políticas de recuperación o mejores condiciones climáticas. Sin embargo, de 2011 a 2016, se vuelve a una tendencia de disminución de -0,63 unidades, reflejando problemas continuos en la gestión de recursos hídricos, que persisten entre 2016 y 2021 con una disminución de -0,81 unidades, posiblemente debido al cambio climático o la urbanización como se muestra en la Figura 19.

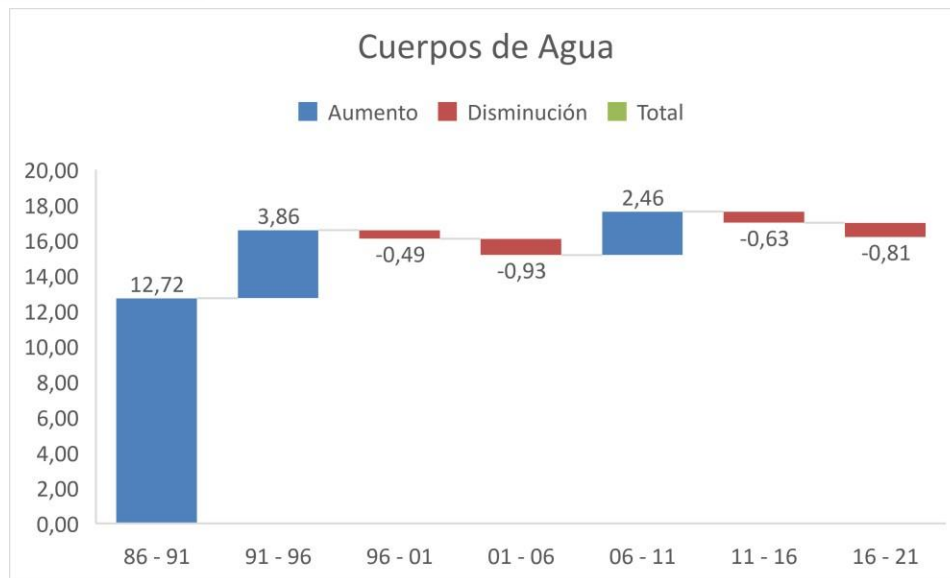


Figura 19. Tasa de cambio anual de la cobertura de Cuerpos de Agua en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

Entre 1986 y 1991, se registra una disminución significativa de -17,38 unidades, sugiriendo una posible revegetación o reducción en áreas descubiertas. De 1991 a 1996, la disminución es de -2,61 unidades, indicando una continuidad en la reducción, aunque a un ritmo menor. Entre 1996 y 2001, la tasa de cambio casi se estabiliza con una ligera disminución de -0,03 unidades. De 2001 a 2006, se observa un aumento de 3,29 unidades, posiblemente debido a la urbanización o desarrollo de infraestructuras.

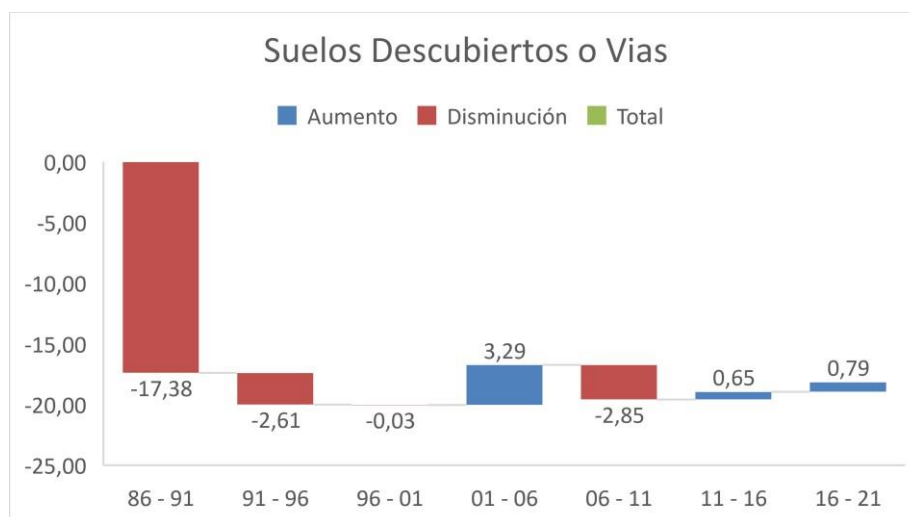


Figura 20. Tasa de cambio anual de la cobertura de Suelos Descubiertos y Vías en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

El periodo 2006-2011 muestra nuevamente una disminución de -2,85 unidades, indicando una posible reforestación o desuso de vías. De 2011 a 2016, se registra un aumento de 0,65 unidades, seguido de otro aumento de 0,79 unidades entre 2016 y 2021, sugiriendo una reactivación en el desarrollo urbano o infraestructura como se muestra en la Figura 20.

Entre 1986 y 1991, se registra una disminución significativa de -11,99 unidades, indicando una posible conversión de pastos a otros usos del suelo. De 1991 a 1996, la disminución es de -0,18 unidades, mostrando una estabilidad relativa en la cobertura de pastos. Entre 1996 y 2001, se observa un aumento de 1,88 unidades, posiblemente por una recuperación o expansión de áreas de pasto. De 2001 a 2006, vuelve una disminución de -1,66 unidades, sugiriendo una reconversión de tierras de pasto. El periodo 2006-2011 muestra una ligera disminución de -0,05 unidades, indicando estabilidad en la cobertura de pastos. De 2011 a 2016, se registra un aumento de 0,74 unidades, seguido de otro aumento de 1,32 unidades entre 2016 y 2021, reflejando una recuperación o expansión continua de las áreas de pasto (Figura 21).

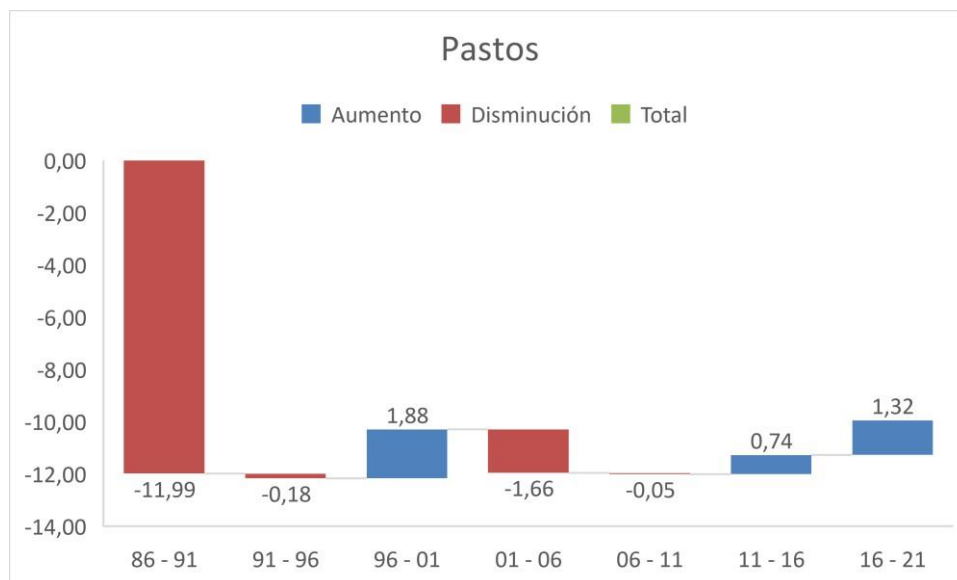


Figura 21. Tasa de cambio anual de la cobertura de Pastos en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

Entre 1986 y 1991, se registra una disminución de -2,80 unidades, indicando una posible deforestación o conversión de tierras. De 1991 a 1996, se observa un aumento significativo de 17,39 unidades, lo cual puede estar relacionado con políticas de reforestación o recuperación de áreas boscosas. Entre 1996 y 2001, hay una disminución drástica de -30,87

unidades, sugiriendo una deforestación intensiva posiblemente debido a la expansión agrícola o actividades madereras.

De 2001 a 2006, se registra un aumento de 11,02 unidades, indicando una recuperación parcial del bosque nativo. El periodo 2006-2011 muestra una ligera disminución de -0,05 unidades, reflejando una estabilidad relativa en la cobertura forestal. De 2011 a 2016, hay un aumento significativo de 13,42 unidades, sugiriendo un esfuerzo considerable en la reforestación o recuperación de bosques nativos. Finalmente, entre 2016 y 2021, se observa un aumento de 7,03 unidades, indicando una continuación en la tendencia de recuperación de la cobertura de bosque nativo (Figura 22).

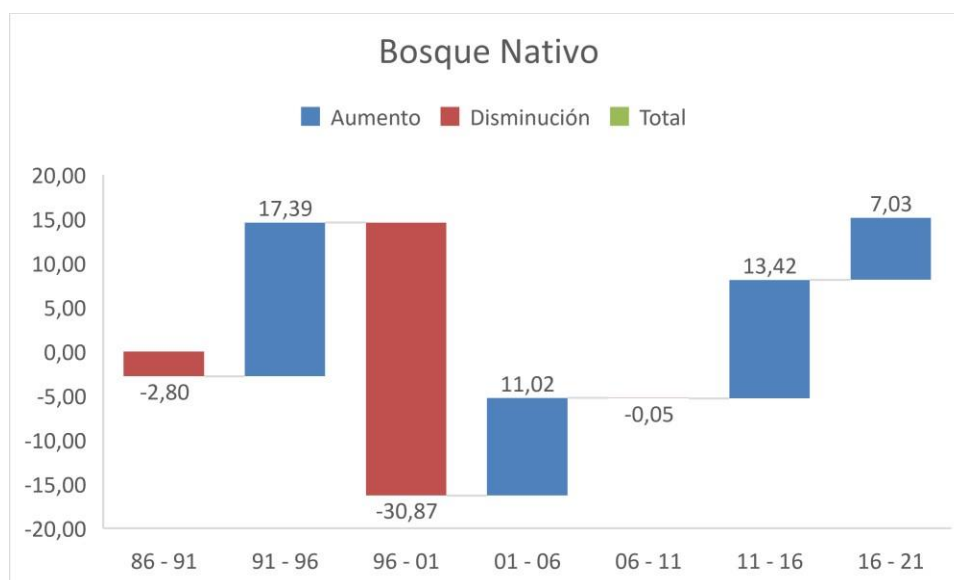


Figura 22. Tasa de cambio anual de la cobertura de Bosque Nativo en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

Entre 1986 y 1991, se observa un aumento de 52.81 unidades, seguido de una disminución de -35.12 unidades entre 1991 y 1996. En el periodo de 1996 a 2001, se registra un aumento de 14.26 unidades. Posteriormente, entre 2001 y 2006, la cobertura disminuye en -34.67 unidades, y de 2006 a 2011 se reduce en -8.82 unidades. Entre 2011 y 2016, la vegetación arbustiva disminuye nuevamente en -33.17 unidades, pero de 2016 a 2021 muestra una recuperación con un incremento de 26.13 unidades. Estas variaciones pueden atribuirse a una combinación de factores climáticos, como cambios en patrones de precipitación y eventos extremos, así como impactos antropogénicos, incluyendo deforestación, cambio de uso de suelo y políticas ambientales como se muestra en la Figura 23.

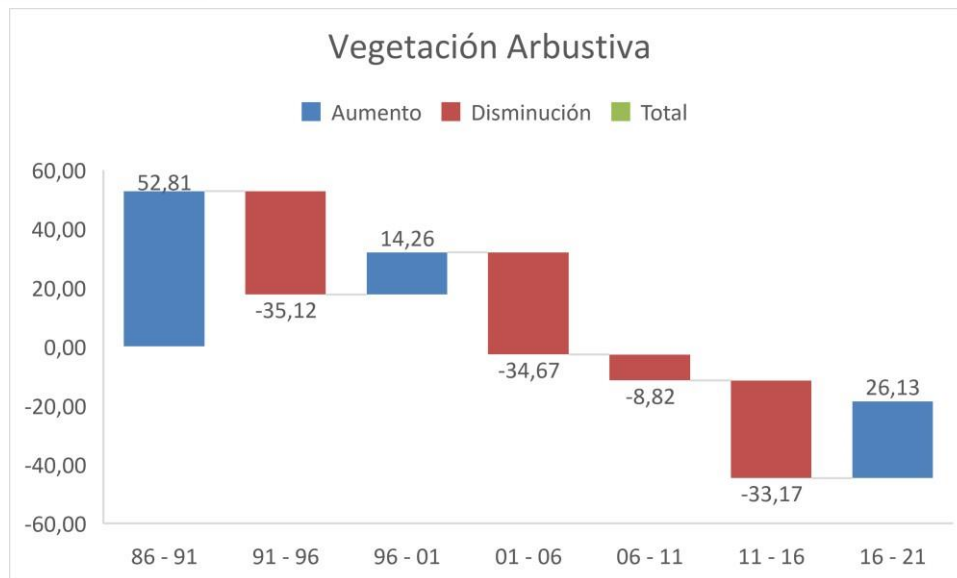


Figura 23. Tasa de cambio anual de la cobertura de Vegetación Arbustiva en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

Entre 1986 y 1991, se registra una disminución significativa de -37,10 unidades, lo cual puede estar relacionado con la conversión de tierras herbáceas a otros usos, como la agricultura o la urbanización. De 1991 a 1996, se observa una disminución de -6,90 unidades, indicando una continuación en la reducción de la vegetación herbácea, aunque a un ritmo menor.

Entre 1996 y 2001, hay un aumento notable de 41,16 unidades, sugiriendo una posible recuperación o expansión de áreas de vegetación herbácea, quizás debido a la implementación de políticas de conservación o a un cambio en el uso del suelo. De 2001 a 2006, se registra una disminución de -7,68 unidades, reflejando nuevamente una conversión de tierras herbáceas a otros usos.

El periodo 2006-2011 muestra una ligera disminución de -0,37 unidades, indicando una estabilidad relativa en la cobertura de vegetación herbácea. De 2011 a 2016, hay un aumento significativo de +4,39 unidades, sugiriendo una recuperación importante de la vegetación herbácea, posiblemente debido a esfuerzos de restauración ecológica o cambios en las prácticas de manejo del suelo. Finalmente, entre 2016 y 2021, se observa una disminución drástica de -52,75 unidades, indicando una pérdida significativa de cobertura de vegetación herbácea, quizás debido a intensificación de actividades agrícolas, urbanización u otros factores antropogénicos (Figura 24).

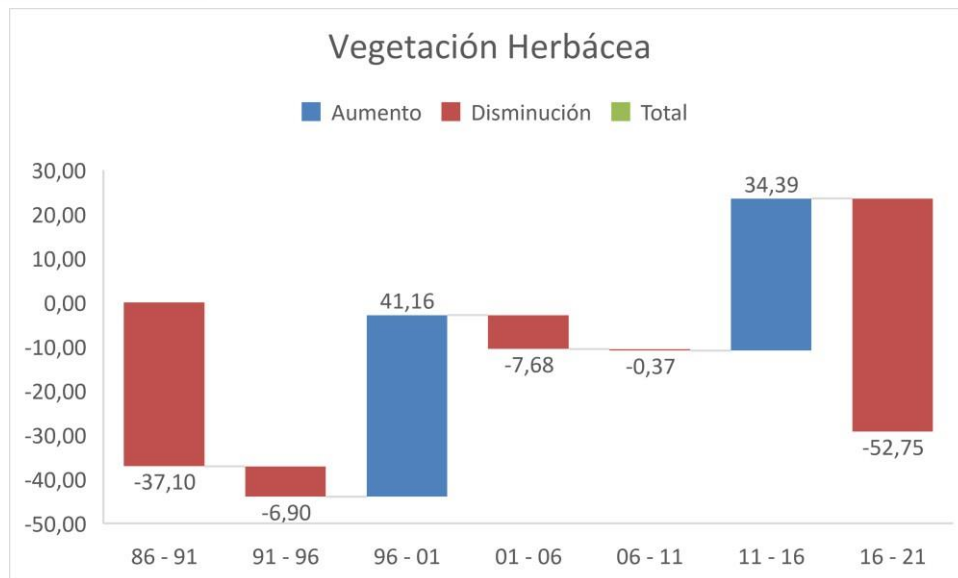


Figura 24. Tasa de cambio anual de la cobertura de Vegetación Herbácea en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

Entre 1986 y 1991, se registra un aumento de 2.29 unidades. En el periodo de 1991 a 1996, se observa un aumento significativo de 24.81 unidades, seguido por una drástica disminución de -31.47 unidades entre 1996 y 2001. De 2001 a 2006, hay un leve aumento de 1.52 unidades. Entre 2006 y 2011, se experimenta un incremento de 11.44 unidades.

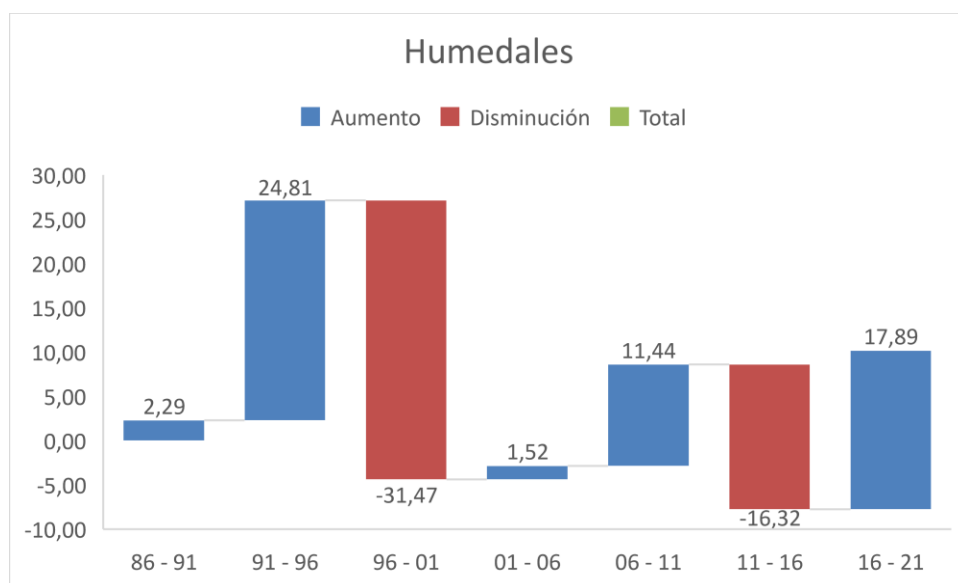


Figura 25. Tasa de cambio anual de la cobertura de Humedales en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, de 2011 a 2016, la cobertura de humedales disminuye en -16.32 unidades. Finalmente, en el periodo de 2016 a 2021, se registra una recuperación con un aumento de 17.89 unidades (Figura 25).

En el periodo 1986-1991, se registró un aumento de 1,46 en la cobertura de cuerpos de agua, sin disminuciones aparentes. El periodo 1991-1996 muestra una disminución de -1,24 sin aumentos registrados. Entre 1996-2001, se observa una ligera disminución de -0,16. El periodo 2001-2006 destaca con el mayor incremento en la cobertura de cuerpos de agua, registrando un aumento de 3,84. Por el contrario, el periodo 2006-2011 experimentó la mayor disminución, con un valor de -3,65. Durante 2011-2016, hay un aumento significativo de 3,46 en la cobertura de cuerpos de agua. Finalmente, el periodo 2016-2021 muestra una disminución de -0,68. La variabilidad temporal sugiere influencias de factores climáticos, antropogénicos y naturales, siendo crucial contextualizar estos cambios con eventos específicos como políticas de gestión del agua y fenómenos climáticos extremos como se presenta en la Figura 26.

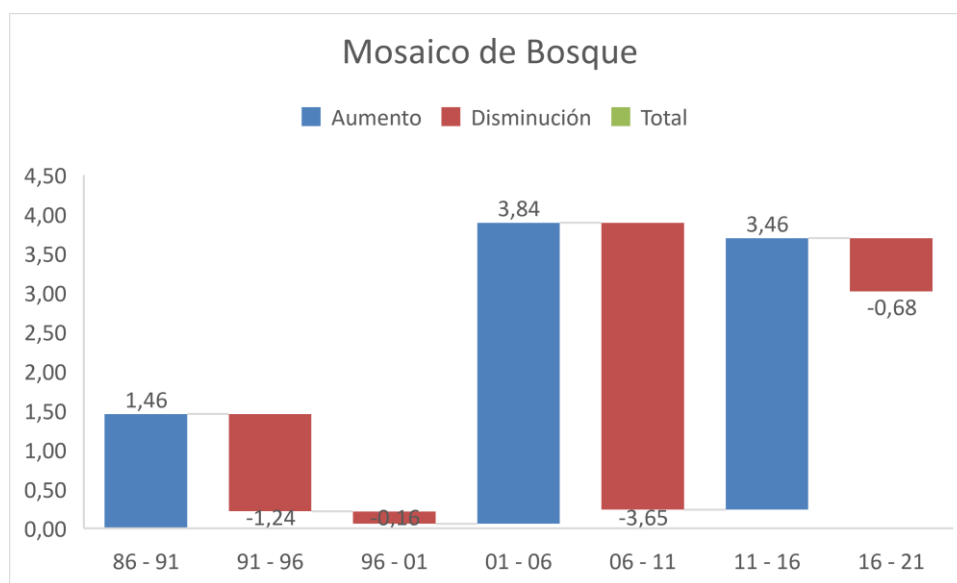


Figura 26. Tasa de cambio anual de la cobertura de Mosaico de Bosque en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

Durante los periodos 1986-1991 y 1991-1996, no se registraron cambios en la cobertura de pinos. Entre 1996-2001, se observa un aumento significativo de 5,71. Este incremento se amplifica excesivamente en el periodo 2001-2006, con un aumento de 25,27, indicando una expansión considerable de la cobertura forestal de pinos. Sin embargo, en el periodo 2006-2011, el crecimiento se modera a un aumento de 1,91. El periodo 2011-2016 muestra una

disminución notable de -2,53, lo que representa una contracción en la cobertura forestal. Finalmente, entre 2016-2021, se registra un aumento de 1,07 como lo muestra la Figura 27.

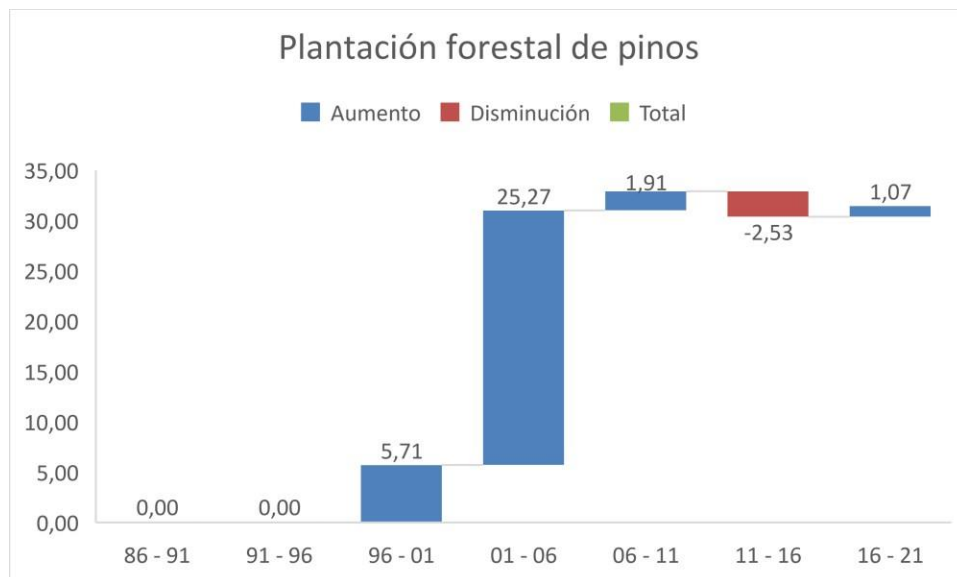


Figura 27. Tasa de cambio anual de la cobertura de Plantación forestal de pinos en distintos periodos

Fuente: Elaboración propia

5.2. Matriz de tabulación cruzada

En las Tablas 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 se muestran las tablas de tabulación cruzada con su respectiva interpretación de datos entre 1896 y 2021 mediante las nueve categorías que han sido utilizadas en este proyecto.

El análisis de tabulación cruzada revela patrones similares de estabilidad y persistencia en la cobertura vegetal de la región durante el período de 1986 a 1991. La vegetación arbustiva muestra una permanencia de 72,79 ha, indicando su alta resiliencia para mantener su extensión a lo largo de 35 años y su contribución a la regulación hídrica. Esta estabilidad se refleja también en su baja variabilidad a los cambios ambientales y su importancia para la conservación de los ecosistemas locales. Por otro lado, la vegetación herbácea también exhibe una importante permanencia, con un total de 52,58 ha, durante el periodo analizado. Esta persistencia en la cobertura vegetal herbácea muestra que no ha podido evolucionar para una vegetación arbustiva o arbustiva herbácea, pues los efectos de la quema y pastoreo (pasados e incendios forestales fortuitos) como se muestra en el anexo J. Asimismo, la presencia de 12,66 ha de bosque natural resalta su contribución a la conservación de la biodiversidad y su papel crucial en la regulación del clima regional. A pesar de que estos valores pueden parecer modestos en comparación con otros períodos analizados, su significancia no debe subestimarse, ya que cada tipo de cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en el equilibrio ecológico y la sostenibilidad del ecosistema. También logramos notar de mejor manera el cambio en cuerpos de agua donde notamos con mayor claridad la recuperación de esta cobertura. (Tabla 13).

Tabla 13. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal entre 1986 y 1991 (superficie en ha)

	Estables	Año 1991								Total 1986	Perdidas	
	146,25	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea	Humedales	Mosaico de Bosques			Plantación forestal de pinos
Año 1986	Cuerpos de Agua	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Suelos Descubiertos o Vías	7,92	1,54	0,00	1,78	1,87	1,54	4,61	0,78	-	20,04	18,50
	Pastos	0,19	0,10	0,08	2,31	6,55	1,20	1,73	0,00	-	12,17	12,09
	Bosque Nativo	1,53	0,02	-	12,66	23,17	2,32	0,62	0,00	-	40,47	27,80
	Vegetación Arbustiva	1,35	0,35	0,00	8,72	72,79	15,06	2,31	0,01	-	100,89	28,10
	Vegetación Herbácea	0,78	-	0,09	10,87	42,08	52,48	4,51	0,01	-	111,69	59,20
	Humedales	0,65	0,66	0,00	0,33	7,24	1,97	6,69	0,65		18,20	11,50
	Mosaico de Bosques	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Plantación forestal de pinos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total año 1991	12,72	2,66	0,18	37,67	153,70	74,59	20,49	1,46	-	303,46	157,21
	Ganancias	12,72	1,13	0,10	25,00	80,91	22,10	13,79	1,46	-	157,21	

Fuente: Elaboración propia

Durante el período comprendido entre 1991 y 1996, se observa una estabilidad en la cobertura vegetal de la región. En particular, la vegetación herbácea destaca por su significativa persistencia, con un total de 104,32 ha, lo que indica una consistencia notable en su extensión a lo largo del tiempo. Este hallazgo contrasta con los datos anteriores y subraya la importancia de esta cobertura en el ecosistema regional. Asimismo, la cobertura de vegetación arbustiva también muestra una presencia estable, con 52,21 ha de persistencia, lo que sugiere una adaptación eficaz a las condiciones locales. Los bosques nativos, por su parte, exhiben una notable permanencia de 22,21 ha, lo que resalta su papel crucial en la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento del equilibrio ecológico. Por último, los humedales mantienen una extensión de 11,23 ha a lo largo del período analizado, lo que confirma su importancia como ecosistema vital en la región (Tabla 14). Este conjunto de resultados refleja la resiliencia y la estabilidad de diferentes tipos de cobertura vegetal, destacando su papel fundamental en la sostenibilidad y la salud del ecosistema regional como se muestra en la Figura 28.

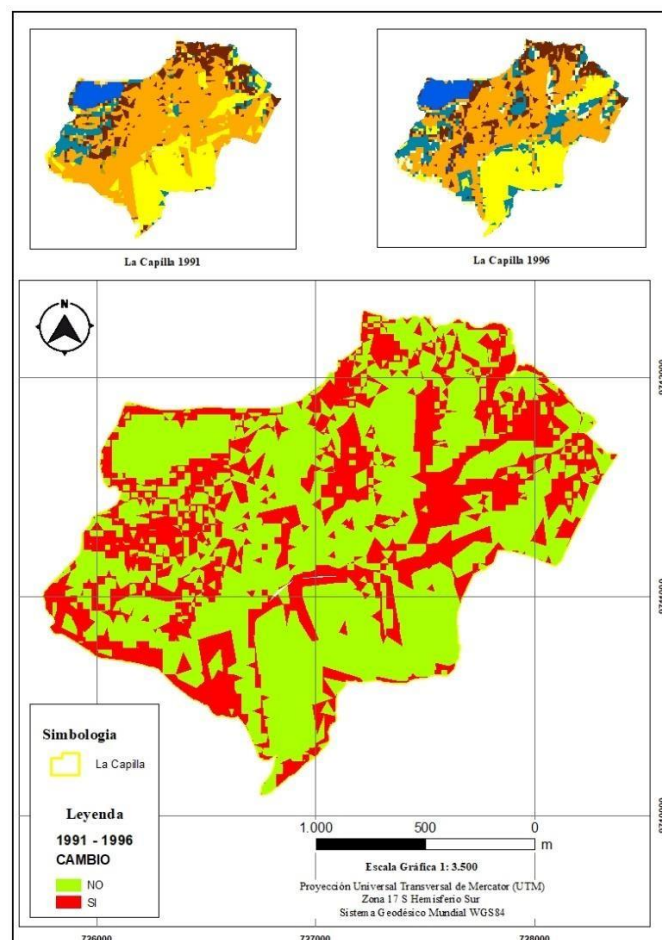


Figura 28. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 1991 y 1996

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 1991 y 1996 (superficie en ha)

Estables		Año 1996								Total 1991	Perdidas	
201,88	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea	Humedales	Mosaico de Bosques	Plantación forestal de pinos			
Año 1991	Cuerpos de Agua	11,86	-	-	0,18	0,14	0,55	-	-	-	12,72	0,86
	Suelos Descubiertos o Vías	0,53	0,05	-	0,79	0,02	1,24	0,04	-	-	2,66	2,61
	Pastos	0,03	-	-	0,03	-	0,09	0,03	-	-	0,18	0,18
	Bosque Nativo	2,07	-	-	22,21	6,19	3,29	3,74	0,17	-	37,67	15,46
	Vegetación Arbustiva	0,99	-	-	22,91	104,32	6,97	18,48	0,03	-	153,70	49,38
	Vegetación Herbácea	0,33	-	-	4,82	5,44	52,21	11,79	-	-	74,59	22,38
	Humedales	0,66	-	-	3,52	2,32	2,75	11,23	-	-	20,49	9,26
	Mosaico de Bosques	0,69	-	-	0,59	0,15	-	0,01	0,01	-	1,46	1,45
	Plantación forestal de pinos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total año 1996	16,58	0,05	-	55,06	118,58	67,68	45,30	0,21	-	303,46	101,58
Ganancias		4,72	0,00	-	32,85	14,26	15,47	34,07	0,20	-	101,58	

Fuente: Elaboración propia

El mantenimiento de más de 91 ha de vegetación arbustiva durante el período de 1996 a 2001 subraya la capacidad de esta cobertura para resistir los cambios ambientales y conservar su extensión a lo largo del tiempo. Esta estabilidad es fundamental para la salud del ecosistema, ya que la vegetación arbustiva proporciona refugio y alimento para la fauna local, así como ayuda a prevenir la erosión del suelo. Por otro lado, la cobertura de vegetación herbácea, con un valor de 55,11 ha, también demuestra una resistencia significativa a los cambios, lo que sugiere una adaptación eficaz a las condiciones locales (Figura 29). La vegetación herbácea es crucial para mantener la biodiversidad y la calidad del suelo, además de proporcionar alimento para la fauna silvestre.

Aunque los valores de 14,05 ha para el bosque y 9,98 ha para los humedales pueden parecer modestos en comparación con las coberturas anteriores, no deben subestimarse. El bosque nativo, a pesar de su extensión más limitada, desempeña un papel crucial en la conservación de la biodiversidad y la regulación del clima. Asimismo, los humedales, aunque su área no sea tan extensa, son ecosistemas vitales que proporcionan hábitats importantes para una variedad de especies, para la retención del agua y purificación el agua (Tabla 15).

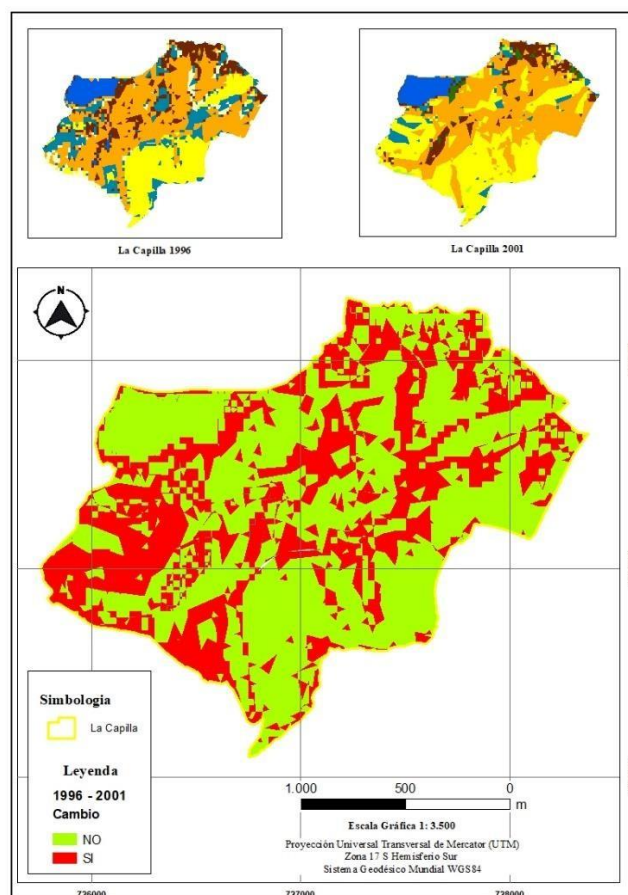


Figura 29. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 1996 y 2001

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 1996 y 2001 (superficie en ha)

Estables		Año 2001								Total 1996	Perdidas	
184,85	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea	Humedales	Mosaico de Bosques	Plantación forestal de pinos			
Año 1996	Cuerpos de Agua	14,34	-	0,00	1,57	0,08	0,03	0,46	-	0,09	16,58	2,24
	Suelos Descubiertos o Vías	-	-	0,03	-	-	0,02	-	-	0,00	0,05	0,05
	Pastos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bosque Nativo	0,51	-	0,67	14,05	22,24	12,90	1,30	0,06	3,33	55,06	41,00
	Vegetación Arbustiva	0,42	-	0,01	6,95	91,37	17,46	0,57	-	1,80	118,58	27,21
	Vegetación Herbácea	0,81	-	0,89	0,44	8,62	55,11	1,52	-	0,29	67,68	12,57
	Humedales	0,01	0,02	0,27	0,99	10,53	23,31	9,98	-	0,19	45,30	35,32
	Mosaico de Bosques	-	-	-	0,19	-	-	-	-	0,02	0,21	0,21
	Plantación forestal de pinos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total 2001	16,09	0,02	1,88	24,18	132,84	108,84	13,83	0,06	5,71	303,46	118,61
Ganancias	1,75	0,02	1,88	10,13	41,48	53,73	3,85	0,06	5,71	118,61		

Fuente: Elaboración propia

La comparación de los datos entre los años 2001 y 2006 revela patrones interesantes en la estabilidad y variabilidad de la cobertura vegetal en la región. Se destaca que tanto la vegetación arbustiva como la herbácea muestran una notable constancia en sus coberturas, manteniendo extensiones de 81,24 ha y 80,05 ha respectivamente.

Por otro lado, los bosques naturales, aunque siguen siendo una cobertura importante, experimentan una disminución considerable en comparación con períodos posteriores, lo que podría indicar presiones ambientales o cambios en el uso de la tierra. Sin embargo, es importante destacar que la cobertura de humedales muestra una constancia notable, manteniendo una extensión de 7,84 ha, lo que resalta su importancia como ecosistema estable en la región (Figura 30). Además, se observa un aumento en la cobertura de especies forestales, con un incremento constante de 3,16 ha, como se evidencia en la Tabla 16. Estos cambios indican posibles tendencias en la dinámica de la cobertura vegetal, que podrían estar influenciadas por factores ambientales y humanos.

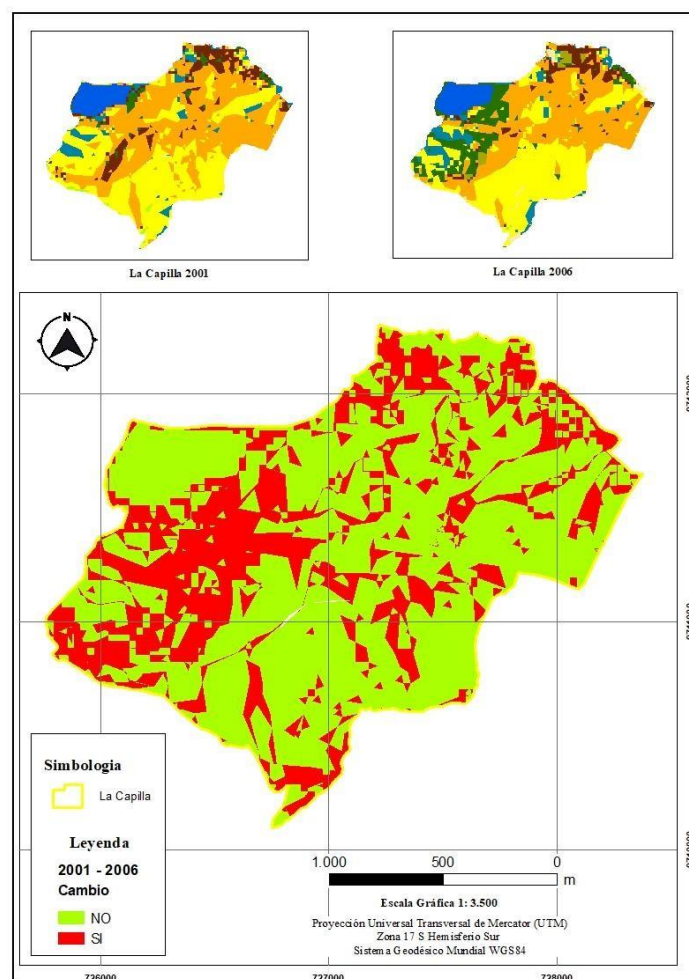


Figura 30. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2001 y 2006

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2001 y 2006 (superficie en ha)

	Estables	Año 2006								Total 2001	Perdidas	
	194,81	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea	Humedales	Mosaico de Bosques			Plantación forestal de pinos
Año 2001	Cuerpos de Agua	14,93	0,07	-	0,01	0,01	0,47	0,01	-	0,60	16,09	1,17
	Suelos Descubiertos o Vías	-	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02
	Pastos	0,01	0,40	-	0,11	0,16	1,16	0,04	-	0,01	1,88	1,88
	Bosque Nativo	0,14	0,17	-	7,53	5,80	2,01	0,33	2,50	5,70	24,18	16,65
	Vegetación Arbustiva	0,07	0,30	-	21,69	81,25	15,56	0,60	0,29	13,08	132,84	51,60
	Vegetación Herbácea	0,01	1,32	0,03	4,86	8,60	80,05	6,42	-	7,56	108,84	28,79
	Humedales	-	1,06	0,17	0,46	1,64	1,70	7,84	0,07	0,88	13,83	5,98
	Mosaico de Bosques	-	-	-	0,00	-	-	-	0,05	-	0,06	0,00
	Plantación forestal de pinos	0,01	0,00	-	0,53	0,72	0,21	0,09	0,98	3,16	5,71	2,55
	Total 2006	15,16	3,31	0,21	35,21	98,17	101,16	15,35	3,89	30,98	303,46	108,64
Ganancias	0,24	3,31	0,21	27,67	16,93	21,12	7,50	3,84	27,82	108,64		

Fuente: Elaboración propia

La vegetación herbácea es uno de los aspectos más destacados en esta tabla debido a su notable estabilidad a lo largo del período analizado. A lo largo de los años, ha mantenido una extensión constante de más de 37 ha, a pesar de las diversas adversidades presentes en la zona. Este dato es particularmente relevante ya que la estabilidad de la vegetación herbácea demuestra que no ha logrado evolucionar a otras coberturas de tipo arbustiva a causa de los efectos persistentes de incendios forestales que son comunes dentro de la zona de estudio (Anexo K).

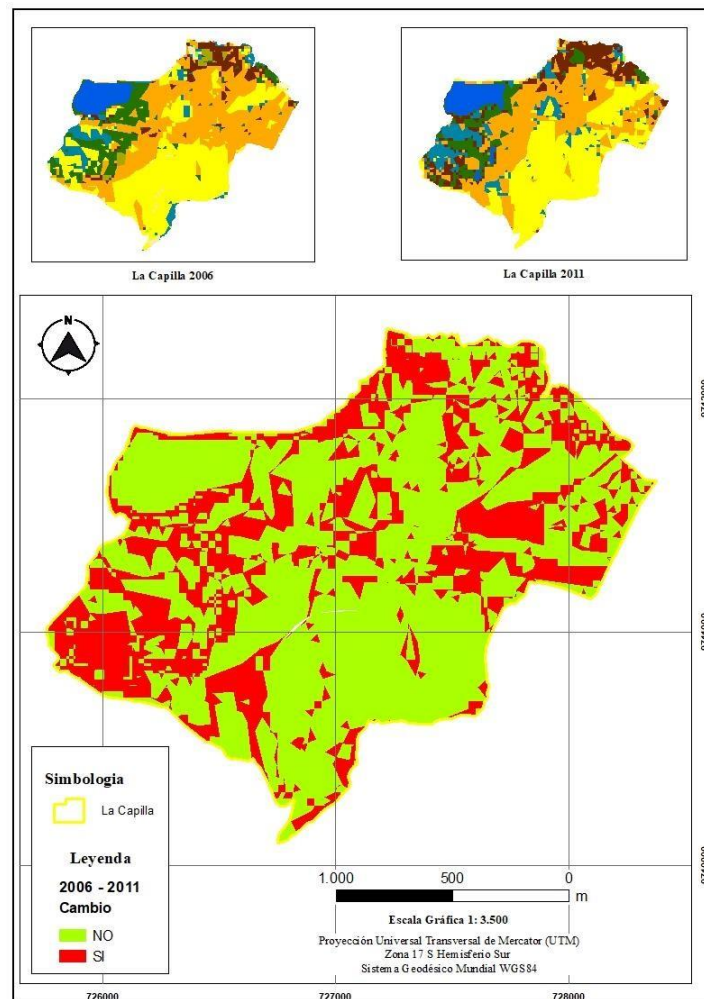


Figura 31. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2006 y 2011

Fuente: Elaboración propia

Seguido de esta cobertura, encontramos otros datos notables. La vegetación arbustiva, por ejemplo, se ha mantenido con un valor muy cercano al anterior, con aproximadamente 34.49 ha en 2006, a pesar de haber experimentado pérdidas considerables de 63 ha en ese año y también hay que decir que experimentó unas ganancias de 89,35 ha en 2011. Esta capacidad

para mantener su extensión, a pesar de las pérdidas significativas, sugiere una cierta resiliencia de la vegetación arbustiva frente a las presiones ambientales (Figura 31).

El bosque nativo, aunque su extensión no es muy alta en comparación con otras coberturas, muestra una notable estabilidad, manteniéndose en alrededor de 14.59 ha a lo largo del período. Sin embargo, es digno de mención que en 2011 este valor experimentó un aumento considerable, alcanzando las 35.15 ha, lo que indica un período de ganancias para esta cobertura (Tabla 17).

Tabla 17. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2006 y 2011 (superficie en ha)

Estables		Año 2011								Total 2006	Perdidas	
123,53	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea	Humedales	Mosaico de Bosques	Plantación forestal de pinos			
Año 2006	Cuerpos de Agua	14,15	-	-	0,01	0,44	0,22	0,01	-	0,33	15,16	1,02
	Suelos Descubiertos o Vías	0,05	0,08	0,03	0,70	0,86	1,32	0,23	-	0,03	3,31	3,23
	Pastos	-	-	0,01	0,18	-	-	0,03	-	-	0,21	0,20
	Bosque Nativo	0,49	0,35	-	14,60	2,27	12,36	0,09	0,03	5,02	35,21	20,61
	Vegetación Arbustiva	0,11	-	-	7,47	34,50	46,04	3,88	0,01	6,17	98,17	63,68
	Vegetación Herbácea	-	-	-	3,95	42,58	37,47	11,44	-	5,73	101,16	63,70
	Humedales	0,03	0,02	0,12	2,50	0,94	2,24	9,11	0,01	0,39	15,35	6,24
	Mosaico de Bosques	0,78	-	-	1,16	0,04	0,01	-	0,16	1,75	3,89	3,74
	Plantación forestal de pinos	2,01	0,01	-	4,60	7,73	1,10	2,01	0,03	13,47	30,98	17,51
	Total 2011	17,62	0,46	0,16	35,15	89,35	100,79	26,78	0,24	32,90	303,46	179,92
Ganancias		3,47	0,38	0,15	20,56	54,85	63,33	17,68	0,08	19,42	179,92	

Fuente: Elaboración propia

Durante este intervalo de tiempo, se evidencia una notable disminución en la cobertura de vegetación arbustiva, la cual experimenta una reducción significativa hasta alcanzar 4,30 ha. Este declive es particularmente marcado en comparación con periodos anteriores, reflejando posibles presiones ambientales o cambios en el uso del suelo. En contraste, se observa un continuo aumento en la extensión de las plantaciones forestales, con un incremento notable de 18,86 hectáreas en comparación con los datos previos, señalando un cambio en la composición de la cobertura vegetal.

Por otro lado, las coberturas de vegetación herbácea, bosque nativo y humedales muestran una notable estabilidad en sus extensiones. La vegetación herbácea mantiene una constancia en su cobertura con 47,17 ha, mientras que los bosques nativos y los humedales conservan extensiones de 23,28 ha y 6,03 ha respectivamente (Figura 32). Estos resultados indican la resiliencia de estas coberturas frente a las variaciones ambientales y sugieren su importancia continua en el mantenimiento del equilibrio ecológico en la región (Tabla 18).

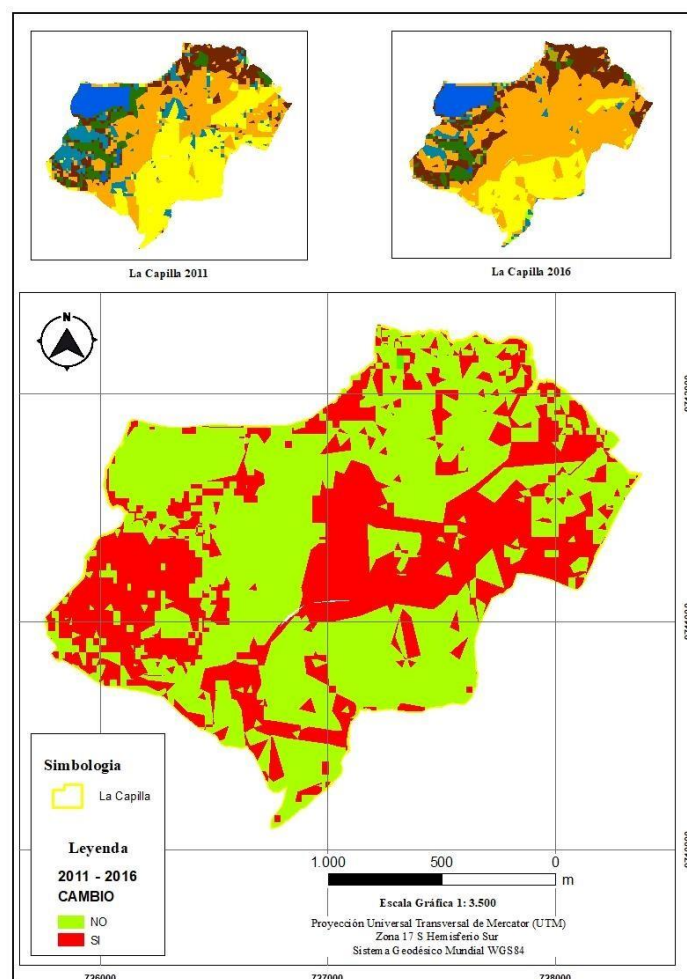


Figura 32. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2011 y 2016

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2011 y 2016 (superficie en ha)

Estables		Año 2016								Total 2011	Perdidas	
115,63	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea	Humedales	Mosaico de Bosques	Plantación forestal de pinos			
Año 2011	Cuerpos de Agua	15,67	-	-	0,57	-	0,01	0,12	0,44	0,82	17,62	1,96
	Suelos Descubiertos o Vías	-	0,23	0,02	-	0,15	0,05	0,00	-	-	0,46	0,23
	Pastos	-	-	0,00	0,06	-	0,04	0,01	0,04	-	0,16	0,16
	Bosque Nativo	0,10	0,00012	0,0004	23,28	0,05	5,69	1,16	1,25	3,62	35,15	11,88
	Vegetación Arbustiva	0,06	0,01	0,01	13,52	4,30	66,44	0,84	0,30	3,87	89,35	85,05
	Vegetación Herbácea	0,01	0,77	0,71	0,26	48,48	47,17	1,74	0,20	1,46	100,79	53,63
	Humedales	0,05	0,00	0,06	1,92	1,20	15,18	6,03	0,60	1,74	26,78	20,75
	Mosaico de Bosques	-	-	-	0,14	-	-	-	0,10	-	0,24	0,14
	Plantación forestal de pinos	1,12	0,09	0,11	8,83	2,00	0,58	0,55	0,76	18,86	32,90	14,04
	Total 2016	16,99	1,11	0,90	48,58	56,18	135,18	10,46	3,69	30,36	303,46	187,83
Ganancias	1,33	0,87	0,90	25,30	51,88	88,02	4,43	3,59	11,51	187,83		

Fuente: Elaboración propia

La vegetación herbácea es uno de los aspectos más destacados en esta tabla de correlación, ya que muestra una cobertura que ha permanecido relativamente constante durante todo el período de observación. A lo largo de los años estudiados, ha mantenido una extensión de más de 40 ha, a pesar de las diversas adversidades presentes en la zona. Este dato es particularmente relevante, ya que la estabilidad de la vegetación herbácea puede ser un indicador importante de la salud general del ecosistema. Sin embargo, aunque la vegetación herbácea ha mostrado consistencia, otras coberturas también presentan datos notables. Por ejemplo, tanto la vegetación arbustiva como el bosque nativo tienen valores de 25,51 y 21,80 hectáreas, respectivamente. Estas cifras indican una extensión significativa de estas coberturas, que también han demostrado ser relativamente estables a lo largo del tiempo.

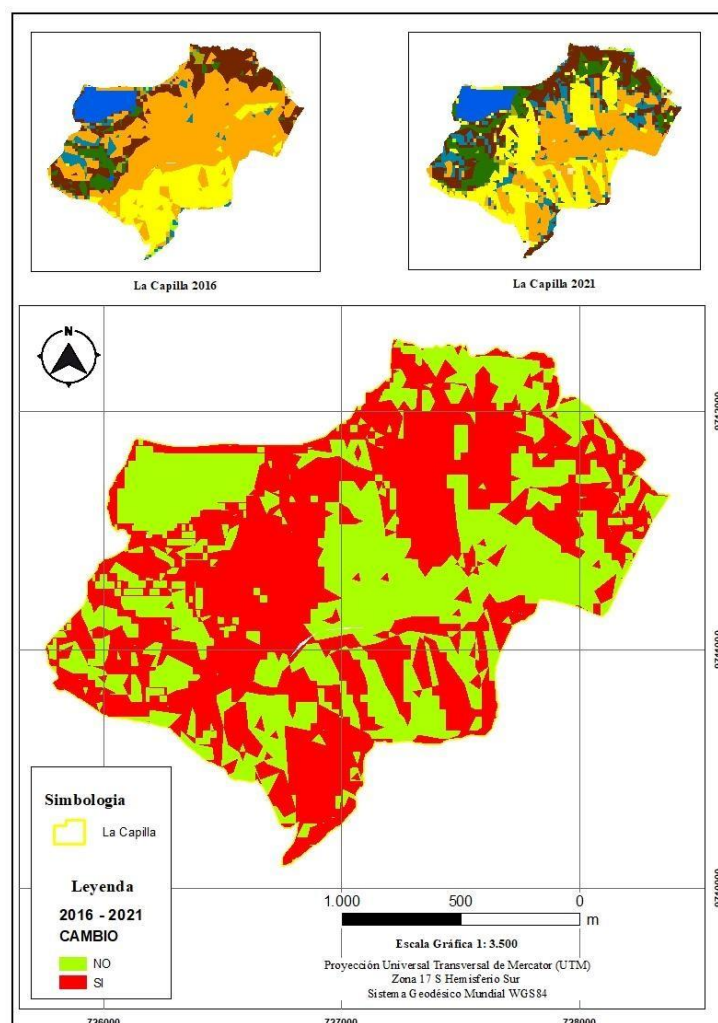


Figura 33. Cambio en la cobertura vegetal del área La Capilla entre los años 2016 y 2021

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que, aunque estas coberturas han mantenido un tamaño similar, han experimentado pérdidas considerables en 2016. En este año en particular, una de las coberturas perdió más de 30 ha. A pesar de esto, su capacidad para recuperarse y mantener una extensión considerable es un indicador de su resiliencia (Figura 33).

Es interesante notar que, aunque las pérdidas fueron significativas en 2016, las ganancias hasta 2021 duplicaban estas pérdidas (Tabla 19). Esto sugiere una tendencia de recuperación y crecimiento para estas coberturas en el período posterior a 2016; además de la vegetación herbácea, la vegetación arbustiva y el bosque nativo, también se observan otras coberturas que muestran fluctuaciones a lo largo de la década analizada. Estas fluctuaciones pueden ser el resultado de una variedad de factores, como cambios en el uso del suelo, eventos climáticos extremos o impactos humanos.

Tabla 19. Matriz de transición obtenida de la tabulación cruzada de los mapas de cobertura vegetal de los años 2016 y 2021 (superficie en ha)

	Estables	Año 2021								Total 2016	Perdidas	
	119,15	Cuerpos de Agua	Suelos Descubiertos o Vías	Pastos	Bosque Nativo	Vegetación Arbustiva	Vegetación Herbácea	Humedales	Mosaico de Bosques			Plantación forestal de pinos
Año 2016	Cuerpos de Agua	15,17	-	-	-	0,49	0,50	-	0,17	0,67	16,99	1,82
	Suelos Descubiertos o Vías	0,07	0,07	0,14	0,11	0,35	0,35	0,00	-	0,03	1,11	1,03
	Pastos	-	-	0,05	0,33	0,00	0,02	0,48		0,01	0,90	0,85
	Bosque Nativo	0,19	0,04	0,94	21,80	9,58	0,77	0,76	0,81	13,67	48,58	26,78
	Vegetación Arbustiva	-	0,89	0,01	0,91	25,51	24,75	4,08	0,02	0,01	56,18	30,67
	Vegetación Herbácea	0,60	0,87	0,37	25,67	44,50	40,69	18,42	0,07	4,00	135,18	94,50
	Humedales	0,01	0,02	0,07	4,45	0,32	0,44	4,57	-	0,58	10,46	5,89
	Mosaico de Bosques	0,11	-	0,43	1,18	0,26	0,08	0,04	0,20	1,39	3,69	3,49
	Plantación forestal de pinos	0,04	-	0,22	1,15	1,29	14,84	0,00	1,74	11,08	30,36	19,28
	Total 2021	16,18	1,89	2,22	55,61	82,31	82,44	28,35	3,01	31,44	303,46	184,31
Ganancias	1,01	1,82	2,17	33,81	56,80	41,75	23,78	2,81	20,36	184,31		

Fuente: Elaboración propia

6. Discusión

Con base a los resultados obtenidos en el estudio multitemporal sobre la cobertura vegetal en el área de conservación La Capilla, se puede identificar tendencias significativas que arrojan luz sobre los cambios en el paisaje a lo largo del tiempo y las implicaciones de la designación del área como zona de conservación.

Encontrando las tendencias más significativas en la vegetación arbustiva y herbácea de páramo, dado a que sus resultados muestran variaciones significativas a lo largo de los diferentes períodos analizados. Entre 1986 y 1991, la vegetación arbustiva experimentó un aumento significativo de 52.81 ha, pasando de 100.89 ha a 153.70 ha. Este aumento representa un incremento del 52.5%. En contraste, la vegetación herbácea de páramo, o pajonal, mostró una disminución notable de 37.10 ha, reduciéndose de 111.69 ha a 74.59 ha, lo que equivale a una disminución del 33.2%. Por otro lado, entre 2016 y 2021, se observaron nuevos patrones: la vegetación arbustiva aumentó notablemente en 26.13 ha, pasando de 56.18 ha a 82.31 ha, lo que representa un incremento del 46.5%. En contraste, la vegetación herbácea de páramo mostró una disminución significativa de 52.74 ha, pasando de 135.18 ha a 82.44 ha, lo que representa una reducción del 38.9% en esa categoría.

Estos cambios subrayan la dinámica compleja de la vegetación en el área de estudio, indicando períodos de expansión y contracción que pueden estar influenciados por diversos factores ambientales y de gestión del paisaje. Las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea (páramo), las personas entrevistadas señalan que el área es propensa a incendios (Anexo K), lo cual puede explicar la reducción de la cobertura de vegetación arbustiva entre 2006 y 2011; y una drástica disminución de su superficie en 2016. En el Plan de restauración del paisaje del área de conservación La Capilla se menciona un incendio ocurrido en la parte alta del área de conservación en 2008 (Gualán et al., 2023), lo que concuerda con la pérdida de vegetación arbustiva entre 2006 y 2011. En 2016, también se registró un aumento significativo de vegetación herbácea en detrimento de la vegetación arbustiva, lo que lleva a confirmar que hubo un incendio en ese periodo, por cuanto la quema del pajonal hace que este se revigore y aumente su biomasa.

La cobertura de vegetación arbustiva ha experimentado un notable incremento en el área de conservación La Capilla de Cañar. Entre 2016 y 2021, dado a que, pese a disturbios como el fuego, se ha registrado un significativo crecimiento de 26.13 hectáreas en esta categoría, lo que equivale a un aumento del 8.61% en su extensión total. Este incremento sugiere un exitoso proceso de regeneración en la vegetación arbustiva, posiblemente favorecido por medidas de regeneración natural asistida, como el cercamiento del área. Este fenómeno es

similar a lo observado por Rosete, Pérez y Bocco (2008) en su investigación sobre el cambio de uso del suelo y la vegetación en la Península de Baja California, México, donde también se documentó un incremento significativo en la vegetación arbustiva tras el abandono de áreas previamente utilizadas para la agricultura.

En cuanto a la cobertura de bosque nativo, los resultados muestran un incremento en la superficie de esta cobertura en algunos periodos, lo que indica una tendencia positiva en la conservación y recuperación de este tipo de vegetación. Por ejemplo, entre 2016 y 2021, la cobertura de bosque nativo aumentó en 7,03 ha, lo que representa un aumento del 2,32% en la superficie.

Los resultados indican una tendencia creciente en la cobertura de bosque nativo de manera consistente, contrastando con posibles variaciones observadas en la vegetación arbustiva y herbácea de páramo. Estas variaciones podrían ser influenciadas por diversos factores como el manejo del suelo, condiciones climáticas y actividades antropogénicas como la quema. Este patrón coincide con los hallazgos de García y Hachi (2021), quienes realizaron un análisis multitemporal de la dinámica del uso del suelo y la cobertura vegetal en la microcuenca del río Illangama del cantón Guaranda. En su estudio, observaron un incremento progresivo en ciertas coberturas vegetales a lo largo del tiempo, atribuido a las prácticas de conservación de páramos promovidas en el área de estudio para asegurar una protección sostenible de estos ecosistemas y los bosques asociados.

Se observa un aumento notable en la cobertura de bosque nativo y vegetación arbustiva, así como una expansión de los humedales, indicativos de una mejora en la biodiversidad y la vitalidad del ecosistema. Estos cambios positivos sugieren que la estrategia de conservación implementada ha jugado un papel crucial en la protección y regeneración de la vegetación en el área de estudio. Este hallazgo coincide con los resultados de García y Hachi (2021), quienes observaron una recuperación de las coberturas vegetales en la zona, atribuyendo estos efectos positivos a la regeneración natural facilitada por las estrategias de conservación de páramos promovidas por el gobierno nacional a través del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica.

Durante el período de 1986 - 1991, se registró un aumento en la vegetación arbustiva y una disminución en la vegetación herbácea. Estos cambios pueden explicarse por procesos naturales de sucesión ecológica. La vegetación herbácea es típica en áreas recién perturbadas, mientras que la vegetación arbustiva tiende a aumentar a medida que el ecosistema se estabiliza. Esto sugiere que el área estaba en transición hacia un estado más

maduro de vegetación (Silva et al., 2019; Veldman et al., 2015). Entre 1996 y 2001, se observó un aumento en la vegetación herbácea y una disminución en el bosque nativo. La vegetación herbácea puede haber aumentado debido a disturbios naturales o antropogénicos, como incendios forestales o actividades agrícolas (Anexo I). La disminución del bosque nativo puede atribuirse a la deforestación por conversión de tierras para la ganadería de la zona (Armenteras et al., 2017; Lugo et al., 2018). De 2006 - 2011, se registró un aumento en los humedales y una disminución en la vegetación arbustiva. Mientras que la disminución de la vegetación arbustiva puede estar relacionada con cambios en el uso de la tierra o la urbanización (Mitsch et al., 2017; Silva et al., 2019). Por último, entre 2016 y 2021, hubo una disminución significativa en la vegetación herbácea y un aumento en la vegetación arbustiva. Esta disminución en la vegetación herbácea podría deberse tanto a incendios dentro de la zona (Anexo L), como a quemas accidentales y pastoreo, puesto que este tipo de vegetaciones se ve fuertemente afectadas por estos eventos. Mientras que el aumento en la vegetación arbustiva puede ser una respuesta a estas condiciones climáticas cambiantes, ya que los arbustos tienden a ser más resistentes a la sequía que la vegetación herbácea (Veldman y otros., 2015; Silva y otros., 2019). Estos patrones de cambio en la cobertura vegetal a lo largo de diferentes períodos indican dinámicas complejas influenciadas por procesos naturales y actividades humanas variadas, destacando la importancia de monitorear continuamente estos ecosistemas en transición para entender y gestionar mejor su evolución futura.

La vegetación arbustiva ha mostrado una persistencia notable a lo largo de 35 años, con aumentos registrados tanto de 1986 a 1991 como de 2016 a 2021. Este incremento puede atribuirse a su capacidad para adaptarse a diversas condiciones ambientales, incluyendo períodos de sequía. Según Kéfi et al. (2017), los arbustos tienden a ser más resistentes a las sequías y a la pérdida de suelo en comparación con otros tipos de vegetación, lo que les permite mantenerse en áreas donde otras coberturas podrían disminuir. En contraste, la vegetación herbácea ha experimentado una significativa disminución, especialmente entre 2016 y 2021. Esto podría ser resultado de quemas accidentales dentro de la zona y del pastoreo excesivo, que conducen a la degradación de los pastos y a una menor producción de biomasa. Estas conclusiones se sustentan en los resultados de encuestas que indican la susceptibilidad del área de estudio a estos eventos. La baja productividad de biomasa es un indicador crucial de la salud del páramo, señalando que esta cobertura vegetal enfrenta desafíos significativos en su recuperación, dado que requiere décadas para restaurarse completamente. Además, según Hoover et al. (2018), el cambio climático también está

teniendo un impacto negativo en la vegetación herbácea en diversas regiones, lo que podría contribuir a su declive en el área de conservación.

El bosque nativo también ha disminuido, lo que puede atribuirse principalmente a la deforestación y la conversión de tierras para la agricultura y la ganadería. Según Armenteras et., (2017), la deforestación causada por la expansión urbana y la agricultura comercial es una de las principales causas de la pérdida de bosque nativo en América Latina. Esta disminución indica una amenaza para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en el área de conservación. En cuanto a los cuerpos de agua, la disminución de los humedales de 2016 a 2021 sugiere una pérdida en las áreas acuáticas dentro del área de conservación. Esto podría ser por extracción excesiva de agua por parte de las especies forestales sembradas. Según Mitsch y otros. (2017), la pérdida de humedales está ocurriendo a una tasa alarmante en todo el mundo, lo que amenaza la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados con estos ecosistemas.

En cuanto a la cobertura de plantación forestal de pino, esta fue introducida en 1995, es de las coberturas que más cambios ha demostrado dentro de la zona de estudio, siendo esta la que más ha aumentado desde el año de plantío, hasta la actualidad, demostrando un crecimiento abrupto entre 2001 y 2006 (Anexo G) y causando una disminución de la cobertura de cuerpos de agua y humedales en el mismo periodo (Tabla 4). En efecto, los moradores del sector señalaron que el pino, desde su plantación en el área, ha demostrado un crecimiento acelerado en el área, donde mencionan que 2006, el pino demostró un mayor desarrollo en el área de conservación La Capilla.

En cuanto a la cobertura de suelos descubiertos o vías, se observa en los mapas e imágenes satelitales cómo esta cobertura ha experimentado alteraciones significativas, siendo una superficie considerable en 1986 y reduciéndose drásticamente desde 1991, con un ligero repunte en 2006, lo que puede estar relacionado con actividades humanas, como la apertura de caminos alternos o procesos naturales, como la erosión o la sucesión ecológica.

Conclusión

La investigación sobre la dinámica de la cobertura vegetal en el área de conservación La Capilla ha proporcionado una visión detallada de los cambios ocurridos entre 1986 y 2021, revelando patrones significativos influenciados por múltiples factores ambientales y humanos. Estos hallazgos son cruciales para comprender la evolución de los ecosistemas locales y para informar estrategias efectivas de conservación y manejo ambiental.

Durante las primeras décadas del estudio, se observaron pérdidas considerables en áreas de bosque nativo y vegetación arbustiva, principalmente debido a la expansión agrícola y urbana. Estos resultados subrayan la presión continua sobre los paisajes naturales por parte de actividades humanas, resaltando la importancia de medidas de conservación proactivas para mitigar estos impactos negativos. Además, se evidencia la necesidad de implementar medidas complementarias para acelerar este proceso y promover la recuperación efectiva del área, ya que destinarla únicamente para conservación no garantiza su plena restauración. El análisis multitemporal de imágenes satelitales también revela cambios significativos en la cobertura vegetal de La Capilla a lo largo de 35 años, con énfasis en los principales ecosistemas presentes, como la vegetación arbustiva, el bosque nativo y los humedales. Contrario a las expectativas, se observa un incremento en la extensión del bosque nativo, lo cual sugiere, que la regeneración natural asistida de los ecosistemas a través del cercamiento de la zona, ha funcionado.

Entre 1991 y 2001, se detectaron signos de recuperación en algunas áreas de bosque y vegetación arbustiva, posiblemente impulsados por políticas de conservación implementadas y cambios en las prácticas agrícolas. Sin embargo, el período entre 2001 y 2011 presentó desafíos adicionales, incluyendo fluctuaciones en la cobertura vegetal debido a eventos climáticos extremos y presiones económicas.

El análisis de los datos entre 2011 y 2021 reveló una tendencia mixta en la dinámica de la cobertura vegetal, con ganancias significativas en áreas de vegetación herbácea y bosque nativo, contrarrestadas por pérdidas en humedales y mosaicos de bosques. Estos cambios reflejan la complejidad de los procesos ambientales y las interacciones entre diferentes tipos de vegetación en respuesta a las variaciones climáticas y las actividades humanas. Además de los impactos directos del cambio de uso del suelo, la investigación identificó la importancia de considerar variables climáticas y socioeconómicas en la interpretación de las tendencias observadas. La variabilidad en las precipitaciones y la intensificación de eventos climáticos extremos pueden tener efectos significativos en la dinámica de la vegetación, afectando la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio global.

En cuanto a la vegetación arbustiva, se aprecia una marcada recuperación durante el periodo comprendido entre 2016 y 2021. Esta recuperación puede atribuirse al mantenimiento del cercado, a su localización dentro del área (más próxima del centro) y a la reducción de quemas fortuitas en la zona, que históricamente han afectado este tipo de vegetación. Por otro lado, la vegetación herbácea muestra una tendencia a la disminución durante el mismo intervalo de tiempo, lo cual puede ser resultado de disturbios recurrentes por incendios; y por encontrarse este tipo de vegetación en los límites del área, en zonas más antropizadas, siendo más susceptibles a incendios. En cuanto a los humedales, se observa un patrón interesante de cambio, especialmente relacionado con el plantío de pinos, pues en el año en el que esta especie forestal es introducida, notamos una pérdida considerable en esta cobertura, lo cual se debe inicialmente al exceso de agua que estas especies consumen, principalmente en los primeros ocho años. Sin embargo, con el tiempo, este efecto tiende a estabilizarse, mostrando una lenta recuperación de los humedales.

Mientras que, los principales patrones de cambio en la cobertura vegetal dentro del área de conservación La Capilla revela fluctuaciones significativas a lo largo del tiempo. Se observa que la cobertura de vegetación arbustiva, a pesar de haber tenido una mayor extensión en 1991, muestra una tendencia a disminuir entre los años 2001 y 2016, seguida de un aumento posterior hasta 2021. Este patrón de altibajos contrasta con la tendencia de la cobertura de vegetación herbácea, que disminuye entre 1986 y 1996, se mantiene estable entre 2001 y 2016, y luego experimenta una disminución en 2021, mostrando una tendencia general a la reducción a lo largo de los periodos analizados. Por otro lado, la cobertura de bosque nativo exhibe un patrón de crecimiento más estable. Alcanza su punto máximo en 1996, coincidiendo con la introducción de especies forestales, para luego disminuir considerablemente hasta 2001. Sin embargo, logra recuperar su cobertura total hacia 2021. Aunque este aumento del bosque nativo es alentador, es necesario reconocer que el área de conservación de La Capilla requiere de medidas de restauración activa y no solo pasiva, como ha venido siendo.

Cabe destacar que la vegetación idónea en el área de conservación La Capilla abarca principalmente los tres ecosistemas altoandinos: bosque nativo, vegetación arbustiva y vegetación herbácea de páramo; siendo estos tres los responsables de la regulación hídrica. Por lo tanto, cualquier estrategia de conservación debe considerar la diversidad de estos ecosistemas y promover su protección integral para garantizar la resiliencia y la sostenibilidad a largo plazo del área de conservación La Capilla. A pesar de los signos positivos de aumento del bosque nativo, los resultados sugieren que la conservación en La Capilla enfrenta

desafíos significativos. La recuperación parcial de ciertas coberturas vegetales no garantiza el éxito de la estrategia de conservación. Por lo tanto, se recomienda la implementación de medidas de restauración activa que ayuden a acelerar la recuperación de los ecosistemas de montaña en el área. Estas medidas deben ser diseñadas con un enfoque integral y considerar tanto la recuperación como la protección de los servicios ecosistémicos y la biodiversidad; así como el bienestar de las comunidades locales que dependen de estos recursos naturales. En términos de implicaciones para la gestión y conservación de La Capilla y áreas similares, es fundamental desarrollar estrategias integradas que promuevan la restauración ecológica y la resiliencia frente a futuros cambios ambientales. Esto podría incluir la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, la expansión de áreas protegidas y la implementación de corredores biológicos que conecten hábitats fragmentados

Referencias

- Akkara, M. S., Pimpale, A. R., Wadatkar, S. B., & Rajankar, P. B. (2022). Role of Multispectral Vegetation Indices in Precision Agriculture—A Review. *International Journal of Agriculture, Environment And Biotechnology*, 277.
- Armenteras, D., Espelta, J.M. & Rodà, F. (2017). Land-use changes and socioeconomic factors intertwine to explain forest cover change in the Atlantic Forest (1970–2013), Brazil. *Applied Geography*, 82, 188-197.
- Bazzaz F.A. (1996). *Plants in Changing Environments*. Linking Physiological, Population, and Community Ecology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Beniston, M. (1999). Cambio ambiental global en las regiones montañosas: una visión general. *Geographica Helvetica*, 54(3):120-124. doi: 10.5194/GH-54-120-1999
- Bollmann, K., Czajkowski, M., Schönbrodt-Stitt, S. & Sîrbu, I. (2018). 40 years of habitat fragmentation in the Carpathians: Intensive forestry has reduced habitat connectivity for large mammals. *Biological Conservation*, 218, 221-230.
- Bonan, G. B. (2013). *Land use and land-cover change*. In *Ecological Climatology* (pp. 432–469). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511805530.028>
- Brito, F., Gualán, N., Sánchez, J.C., Tamayo, J.A. & Vega, D. (2023). *Plan de restauración del paisaje del área de conservación La Capilla*. Universidad de Cuenca.
- Cabrera, E., Vega, J. & Jácome, G. (2022). Estimación actual y futura del retroceso glaciar del nevado Cayambe, en Ecuador. *Sathiri*, 18(1), 158-178. <https://doi.org/10.32645/13906925.1197>
- Campbell, J. B. & Wynne, R. H. (2011). Sample Chapter: Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition. <https://www.guilford.com/books/Introduction-to-Remote-Sensing/Campbell-Wynne-Thomas/9781462549405>
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección*. Madrid. España: 3ª edición revisada. Ediciones RIALP.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental La observación de la Tierra desde el*. Barcelona - España: Ariel Ciencia. Nueva edición actualizada.
- Coelho, I. A. M. (2015); Estudo da dinâmica da cobertura vegetal no município de floresta/pe através de processamento digital de imagens. *Revista Geama*, 2, 7-24. <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/486/1427>
- Del Castillo, J. M. (2015). Lima biotopo: ecosistemas de montaña, patrimonio arqueológico indígena y activismo en los intersticios urbanos de la megalópolis andina. Ponencia presentada en el VII Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Montevideo.
- De la Orden, E. A. (2020). Sucesión ecológica. Tendencias esperadas. Universidad Nacional de Catamarca.

<https://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/Ecologia/imagenes/pdf/ecologia%202/Sucesion.pdf>

- Elmasri, R., Cetin, M. & Demir, O. (2018). Análisis de detección de cambios utilizando imágenes satelitales multitemporales para el mapeo de uso de la tierra/cobertura de la tierra en la región de Antalya, Turquía. *Revista Árabe de Geociencias*, 11(22), 677.
- ERDAS, I. (1997). *Field Guide*. Atlanta, Georgia, USA: Fifth edition, revised and expanded.
- Escobedo, N., Dardón, M. J., López, J. E., Martínez, O. & Cardona, E. (2014). Efecto de la configuración del paisaje en las comunidades de abejas (Apoidea) de un mosaico de bosque pino-encino y áreas agrícolas de Sacatepéquez y Chimaltenango. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 1(1), 13–20.
- Fava, F., Tarantino, C. & Lucà, F. (2018). Análisis multitemporal de cambios en la vegetación urbana utilizando datos de Sentinel-2: un estudio de caso en Roma, Italia. *Detección remota*, 10(8), 1295.
- Ferreira, M. S., De, M. & Galo, L. B. T. (2013). Chlorophyll a spatial inference using artificial neural network from multispectral images and in situ measurements. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 85(2), 519-532. <https://www.scielo.br/j/aabc/a/9J5rBCrmKrdpcWNBSpwzLXn/?format=pdf&lang=en>
- Gajendiran, K., Kandasamy, S. & Narayanan, M. (2024). Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental Research*, 240, 117537. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117537>.
- García Culqui, C., & Hachi Pazmiño, M. (2021). Análisis multitemporal de la dinámica de uso de suelo y cobertura vegetal en la microcuenca del Río Illangama. *Revista De Investigación Talentos*, 9(2), 101-116. <https://doi.org/10.33789/talentos.9.2.173>
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., Sanjuán, Y., & Arnáez, J. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160-173.
- Gasparri, N. I. (2010). Efecto del cambio de uso de la tierra sobre la cobertura vegetal y dinámica de biomasa del chaco semiárido argentino. *Población y sociedad*, 17(2), 187-190.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Intercultural del Cantón Cañar. (28 de abril de 2024). *Cañar consume agua segura*. <https://www.facebook.com/watch/?v=551326843845114>
- Gonzaga-Aguilar, C. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ*, 5(1), 30-41.
- González, J., Grefa, N. & Paredes, M. (2019). Prioridades ambientales en el Ecuador: análisis de los informes nacionales sobre el estado del ambiente. *Ambiente & Sociedade*, 22.

- Grubb P.J. (1985). *Plant population and vegetation in relation to habitat, disturbance and competition: problems of generalization*. En: White J. Ed. *The Population Structure of Vegetation*, pp. 595-621, Dr W. Junk, Dordrecht, Holanda.
- Hoover, D.L., Knapp, A.K. & Smith, M.D. (2018). Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes. *Ecology*, 99, 822–831.
- Jin Kyoung, N., Echeverría, C., Gaona, G., Kleemann, J., Koo, H., Fürst, C. & Pablo Cuenca. (2022). Fragmentación de los ecosistemas forestales en Ecuador: Desafíos para el uso sostenible de la tierra en el Andino Tropical. *Land* 11(2): 287. <https://doi.org/10.3390/land11020287>
- Keil, I., Lang, M. and Menzel, A. (2019). *Atmospheric Correction of Satellite Data with SCILAB Using the Graphical User Interface of ESA SNAP*. En *Geospatial Data in a Changing World, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer, Cham, 2019, pp. 233-247.
- Kéfi, S., Domínguez-García, V., Donohue, I., Fontaine, C., Thébault, E., & Dakos, V. (2017). Advancing our understanding of ecological stability. *Ecology Letters*, 20(2), 117-126.
- Koutsias, N., Martínez-Sánchez, J. J., Karteris, M., Allgöwer, B., Mallinis, G., Kalopesa, E., ... & Xanthopoulos, G. (2013). Wildfire-driven long-term forest dynamics in the Mediterranean basin: synergistic drivers of change. *Forest Ecology and Management*, 294, 36-47.
- Lambin, E., Turner, B., Geist, H., Agbola, S., Angelsen, A., Bruce, J., Coomes, O., Dirzo, R., Fischer G., Folke S., George, P., Homewood, K., Imbernon J., 69 Leemans, R., Li, X., Moran, E., Mortimore, M., Ramakrishnan, P., Richards, J., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G., Svedin, U., Veldkamp, T., Vogel, C., y Xu, J., (2003). Las causas del cambio en el uso y la cobertura del suelo: más allá de los mitos. *Cambio ambiental global*, 11 (4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Laska G. (2001). The disturbance and vegetation dynamics: a review and an alternative framework. *Plant Ecology*, 157:77-99
- Li, B. L. T., Lambin, E. F. & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *PNAS*, 104(52), 20666-2067. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
- Li, M., Liu, W., Zhang, H. & Lai, J. (2019). Assessment of forest cover changes and forest landscape patterns in the Langtang Himalaya, Nepal. *Ecological Indicators*, 101, 1051-1060.
- Livengood, S. V., & Kumar, P. (2016). "Analyzing deforestation trends and drivers: An example from the Philippines". *Applied Geography*, 74, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.006>
- Lugo, A. E., Cuevas-Reyes, P. & Sánchez-Muñoz, B. (2018). Abandonment of agricultural lands in the tropical mountains, land cover change, and conservation biogeography in Mexico. *Journal of Land Use Science*, 13(6), 482-501.

- Maciel, J. S. (2021). *Análisis de los cambios de cobertura vegetal y sus tendencias en la mesoregión Borborema paraibana*. Tesis de maestría. Universidad Federal de Campina Grande, Centro de Tecnología y Recursos Naturales.
- Maurer, J. M., Schaefer, M., & Fischer, M. (2020). Rapid acceleration of mountain glacier retreat in the Swiss Alps tracking global warming. *Nature Communications*, 11(1), 1-9.
- Mier, R. & Armando, O. (2018). Análisis Multitemporal del Uso del Suelo y Cobertura Vegetal de la Cuenca del Río Tahuando y Proyección de Cambios al Año 2031, en el Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura. *Universidad Técnica del Norte*, 1-79.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2016). “Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra 1990, 2000, 2008 y 2014.” Ecuador. <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). *Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador*. Quito: Subsecretaría de Patrimonio Natural.
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., ... & Brix, H. (2017). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 32(1), 1-22.
- Moreira, F., Nogueira, E. & Steenbock, W. (2015). Análisis multitemporal de la cuenca del río Napo, Amazonía ecuatoriana: detección de cambios en la cobertura vegetal y deforestación. *Revista de Geografía Norte Grande*, 61, 89-106.
- Morin P. J. (1999). *Community Ecology*. Black well Science, Oxford.
- Morocho, A. (6 de mayo de 2023). Comunicación Personal – Comunidad La Capilla.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Orduña, F. (24 de julio de 2017). *Composición online de imágenes de satélite con Land Viewer*. Obtenido de UNIGIS Web site.
- Pettorelli, N., Vik, J., Mysterud, A., Gaillard, J., Tucker, C. & Stenseth, N. (2006). Satellite Remote Sensing for Applied Ecologists: Opportunities and Challenges. *Journal of Applied Ecology*, 43(3), 485-492.
- Pickett S.T.A., Collins S.L. y Armesto J.J. (1987). A hierarchical consideration of causes and mechanisms of succession. *Vegetation*, 69:109-114.
- Pickett S.T.A. y White P.S. (1985). *Patch dynamics: a synthesis*. En: Pickett S.T.A. y White P.S. Eds. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*, pp. 371-383, Academic Press, Nueva York.
- Pinos Arévalo, N. J. (2016). Prospectiva del uso de suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial - Caso cantón Cuenca. *Estoa*, 9(5), 7-19.
- Programa Montañas (2022). Ficha de identificación del área de páramo de la comunidad La Capilla. Azogues: GIZ Cañar.

- Ridd, M. (1995). Exploración de un modelo VIS (vegetación-superficie impermeable-suelo) para el análisis de ecosistemas urbanos a través de sensores remotos: Anatomía comparativa para ciudades. *Revista internacional de teledetección*, 16(12), 2165-2185.
- Rodríguez Rey, S. (24 de enero de 2024). Páramos, las principales víctimas de los incendios forestales: pasarán décadas para que se recuperen. *Infobae*. <https://www.infobae.com/colombia/2024/01/25/paramos-las-principales-victimas-de-los-incendios-forestales-pasaran-decadas-para-que-se-recuperen/>
- Rosete Vergés, F. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación de la Península de Baja California, México. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 67, 39-58.
- Rosete Vergés, F. A., Pérez Damián, J. L., & Bocco, G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (Número 67), 39-58.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E., W., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindaschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Ruíz Martínez, W., Díaz-Gutiérrez, Y., Ferro-Escobar, R., & Pallares, L. (2019). Application of the Internet of Things through a Network of Wireless Sensors in a Coffee Crop for Monitoring and Control its Environmental Variables. *TecnoLógicas*, 22(46), 155–170. <https://doi.org/10.22430/22565337.1485>
- Ruiz, V., Savé, R. & Herrera, A. (2013). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. *Ecosistemas. Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 22(3):117-123.
- Seto, K., Woodcock, C., Song, C., Huang, X., Lu, J. & Kaufmann, R. (2002). Monitoreo del cambio de uso de la tierra en el delta del río Pearl usando Landsat TM. *Revista internacional de teledetección*, 23(10), 1985-2004.
- Shafian, S., Rajan, N., Schnell, R., Bagavathiannan, M., Valasek, J., Shi, Y. & Olsenholler, J. (2018). Unmanned aerial systems-based remote sensing for monitoring sorghum growth and development. *PLoS ONE*, 13(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196605>
- Silva, R. A., Hartz, S. M., Almeida, J. A., & Fearnside, P. M. (2019). Deforestation and agricultural expansion in Paraguay. *Environmental Science & Policy*, 92, 51-61.
- Stibig, H.-J., Achard, F., & Fritz, S. (2004). A forest cover map of continental southeast Asia derived from SPOT-VEGETATION satellite imagery. *Applied Vegetation Science*, 7.

- Suarez, E., Encalada, A., Chimbolema, S., Jaramillo, R., Duchicela, S., Segovia, C., . . . Hofsted, R. (2023). *Ecología de los páramos del Ecuador: Un paisaje altoandino integrado por múltiples ecosistemas*. En Hofstede, R., Mena, P. & Suárez, E. Los páramos del Ecuador pasado, presente y futuro (págs. 158-159). Quito: USFQ PRESS.
- Ulloa, D. (2018). Aguas y páramos: temas de fondo. Ecuador Terra incógnita. <https://www.pressreader.com/ecuador/ecuador-terra-incognita/20180301/282076277931085>
- Uttarakhand Open University. (2021). *Fundamentals of photogrammetry and remote sensing*, (Vol. 1). GIS-502/DGIS-502/ CGIS-502
- Varela, G. (s.f.). LANDSAT.
- Vargas-Ríos, O. Un modelo de sucesión-renegación de los páramos después de quemas. *Caldasia*, 19(1-2), 331-345.
- Veldman, J. W., Overbeck, G. E., Negreiros, D., Mahy, G., Le Stradic, S., Fernandes, G. W. ... & Durigan, G. (2015). Where tree planting and forest expansion are bad for biodiversity and ecosystem services. *BioScience*, 65(10), 1011-1018.
- Wang, L., Chen, X., Zhang, Y., Wang, H. & Wu, Q. (2017). Seasonal and spatial variations in vegetation productivity and their relations to climate factors in the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 9(6), 547.
- Whitmore T.C. (1978). *Gaps in the forest canopy*. En: Tomlinson P. B. y Zimmerman M.H. Eds. *Tropical Trees as Living Systems*, pp. 639-655, Cambridge University Press, Nueva York.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A. & Wilkinson, B. E. (2000). *Elements of photogrammetry with application in GIS*.
- World Reference Base for Soil Resources (2006). *World Soil Resources Reports No. 84*.
- Wulder, M. A., White, J. C., Masek, J. G., Dwyer, J. & Roy, D. P. (2011). Continuity of Landsat observations: Short term considerations. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 747–751. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.002>
- Yamazaki, F., Liu, W. & Yamazaki, F. (2016). *Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake*. In Asia Conference on Earthquake Engineering (Issue 6ACEE). <https://www.researchgate.net/publication/307351403>

Anexos

Anexo A. Coberturas y usos de la tierra utilizados en Ecuador para este estudio

Nivel II (MAG, MAATE e IEE)	Definición operativa	Observaciones específicas del área	Fuente
Bosque nativo	Ecosistema arbóreo, conservado o secundario, regenerado por sucesión natural, caracterizado por la presencia de árboles de diferentes especies nativas, edades y portes variados, con uno o más estratos.	Corresponde a Bosque siempre verde montano alto y montano alto superior de páramo. En campo se observó asociaciones entre especies del género <i>Gynoxys</i> , <i>Polylepis</i> y <i>Weimannia</i> .	MAE (2016), MAE (2012)
Mosaico de Bosque	Estructura compleja de un bosque que contiene una variedad de tipos de vegetación, como árboles, arbustos y plantas herbáceas que no son posibles de diferenciar.	Corresponde a coberturas de tipo boscoso cuya firma espectral no coincidía con las firmas de bosques nativos, formados por especies tanto arbustivas como árboles y herbáceas.	Escobedo, Dardón, López, Martínez y Cardona (2014)
Plantación forestal	Masa arbórea establecida antropicamente con una o más especies forestales.	Plantío forestal de <i>Pinus patula</i> y <i>Pinus radiata</i> .	MAE (2011)
Vegetación arbustiva	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas no arbóreas. Incluye áreas degradadas en transición a una cobertura densa de dosel.	Corresponde a Herbazal y arbustal montano alto y montano alto superior de páramo.	MAE (2011)
Vegetación herbácea	Áreas constituidas, por especies herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo que son utilizados para pastoreo, vida silvestre o protección.	Corresponde a Herbazal y arbustal montano alto y montano alto superior de páramo. Sin embargo, existe un predominio de especies herbáceas influido fuertemente por las quemas y ganadería extensiva del pasado.	SINAGAP-CLIRSEN (2012)
Pastos	Área bajo cultivo agrícola o con pastos plantados, o que se encuentra dentro de una rotación entre estos.	Corresponde a pastos.	MAE-MAGAP-IEE (2012)
Cuerpo de agua natural	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento.	Laguna El Estero, tiene un dique de piedras. Lagos.	MAE-MAGAP-IEE (2012)
Área poblada	Áreas principalmente ocupadas por viviendas y edificios destinados a colectivos o servicios públicos.	Centro poblado de Cañar, Centro poblado de Biblián e infraestructuras de la zona.	MAE-MAGAP-IEE (2012)
Área sin cobertura vegetal	Áreas generalmente desprovistas de vegetación que por sus limitaciones edafoclimáticas, topográficas o antrópicas no son	Suelo desnudo o vías	MAE-MAGAP-IEE (2012)

aprovechadas para uso agropecuario o forestal, y, sin embargo, pueden tener otros usos.

Anexo B. Informantes claves encuestados pertenecientes a la comunidad La Capilla

Información personal	
Nombre de las personas encuestadas	Edad de las personas encuestadas
Aurelio Duy	65
Alfonso Duchi	74
Carlos Padilla	63
Don Alfonso Duy	65
Doña María Sebastiana Alulema	86
Jesús Duchi	72
Juan Quispilema	77
Elifonsio Martínez	78
María Morocho	72

Fuente: Encuestas realizadas a personas de la comunidad La Capilla

Anexo C. Formato encuesta realizada en la comunidad La Capilla hacia los principales actores en el proceso de los acuerdos de protección del área.

Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de conservación La Capilla, Cañar

1. Información Personal

Nombre:

Edad:

Ocupación:

Instrucción:

- a) Escuela
- b) Colegio
- c) Bachillerato
- d) Universidad
- e) Ninguno

Organización

- a) Si
- b) No

Nombre de la organización:

Género

- a) Masculino
- b) Femenino

2. Conocimientos sobre Cobertura Vegetal

¿Qué tipo de cobertura vegetal predomina en el área natural de La Capilla (Laguna El Estero) actualmente?

- a) Pino
- b) Bosque natural
- c) Paramo arbustivo
- d) Paramo herbáceo
- e) Humedal
- f) Suelo descubierto
- g) Lagos
- h) Pastos
- i) Otros:

¿Cree usted que las especies de pinos introducidas han afectado a las otras coberturas de la zona de alguna manera?

- a) De manera muy significativa
- b) De manera significativa
- c) De manera poco significativa

¿Desde qué año, usted ha notado que las especies introducidas de pino han empezado a tener un mayor desarrollo en la zona?

- a) 1996
- b) 2001
- c) 2006

¿Desde qué año ha notado usted que las especies introducidas de pino han afectado de mayor manera a las otras coberturas?

- a) 1996
- b) 2001
- c) 2006
- d) 2011
- e) 2016
- f) 2021

¿Ha notado cambios en las coberturas vegetales en La Capilla desde 1986 hasta 2021?

- a) Si
- b) No

En caso afirmativo, ¿podrías describir los cambios que has observado y en esos años?

3. Sequía de la laguna El Estero en 1986

¿Tienes conocimiento de la sequía de la laguna El Estero que ocurrió en 1986 en área natural de La Capilla?

- a) Si
- b) No. (En el caso de haber sido no su respuesta diríjase al literal 5)

Sí es afirmativo, ¿Cuánto fue el periodo que duro esta sequia?

4. Impacto de la Sequía en el Ecosistema

¿Consideras que la sequía de 1986 tuvo un impacto a largo plazo en las coberturas vegetales en el área natural de La Capilla hasta 2021?

- a) Si
- b) No

En caso afirmativo, ¿de qué manera?

- a) Intensamente significativo
- b) Muy significativo
- c) Regularmente significativo
- d) Poco significativo
- e) Nada significativo

¿Cuál de las siguientes coberturas vegetales piensa usted que han sido más afectadas?

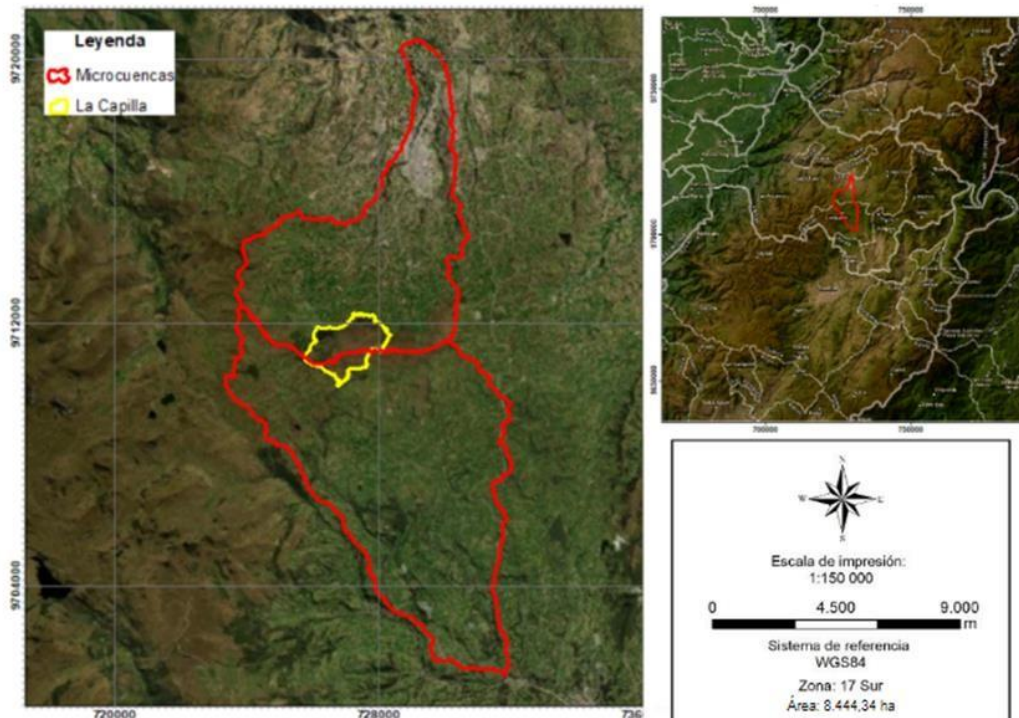
- a) Bosque natural
- b) Humedales
- c) Pajonal herbáceo
- d) Pajonal arbustivo

Observaciones:

Introducción

El **Uso de la Tierra** se refiere a la manera en que las personas aprovechan y gestionan el suelo para diversas actividades o el cómo cada uno de nosotros maneja y utiliza nuestro pedazo de tierra para distintas actividades tales como la ganadería y la agricultura. La finalidad de este concepto es observamos si ha habido cambios notables en la forma en que la gente utiliza la tierra y cómo estos cambios pueden haber afectado la vegetación en la zona.

Mapa de ubicación



5. Uso de la Tierra

¿Cuál es el uso más frecuente de la tierra en el área natural de La Capilla desde 1986 hasta 2021?

- a) Agricultura
- b) Ganadería
- c) Urbanización
- d) Conservación
- e) Otros:

¿Piensa usted que ha existido un crecimiento significativo en el uso de suelo para la agricultura y ganadería?

- a) Si
- b) No

¿Cree que el cambio en el uso de la tierra (introducción de pasto, pino...) ha afectado las coberturas vegetales durante este período?

- a) Intensamente significativo
- b) Muy significativo
- c) Regularmente significativo
- d) Poco significativo
- e) Nada significativo

6. Percepciones Personales

La **Salud Vegetal** se refiere al estado general de las plantas que habitan en un espacio natural. Esto implica el evaluar la vitalidad de la vegetación, la diversidad de especies y cómo interactúan con su entorno. Una buena salud vegetal sugiere un ecosistema robusto y sostenible, donde las plantas contribuyen al equilibrio biológico y al bienestar general del área de conservación.

Según el concepto anterior indique. En una escala del 1 al 10, ¿cómo calificarías la salud general de las coberturas vegetales en La Capilla desde 1986 hasta 2021?

¿Cuáles coberturas cree usted que contribuyen al bienestar de la biodiversidad?

- a) Bosque natural
- b) Pajonal herbáceo
- c) Pajonal arbustivo
- d) Humedales
- e) Otros:

¿Ha ocurrido accidentes o incendios dentro de la zona de conservación?

- a) Si
- b) No

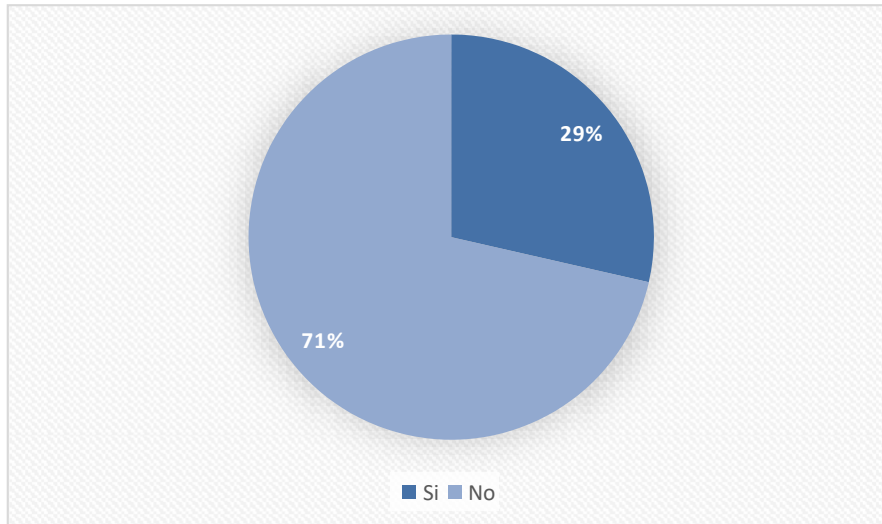
¿Piensa que estos accidentes pudieron afectar de manera negativa a la salud de las coberturas vegetales?

- a) Si
- b) No

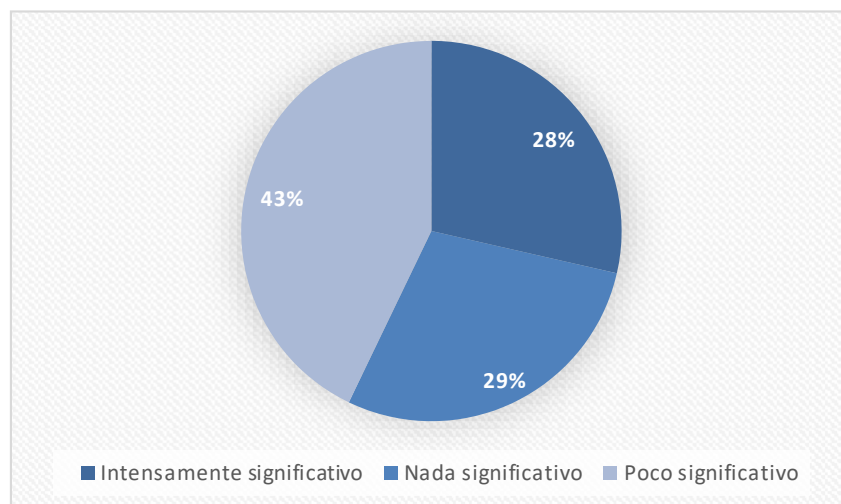
Anexo D. Aplicación de encuestas en la comunidad La Capilla, Cañar, con la ayuda del personal técnico del Programa Montañas – GIZ Cañar



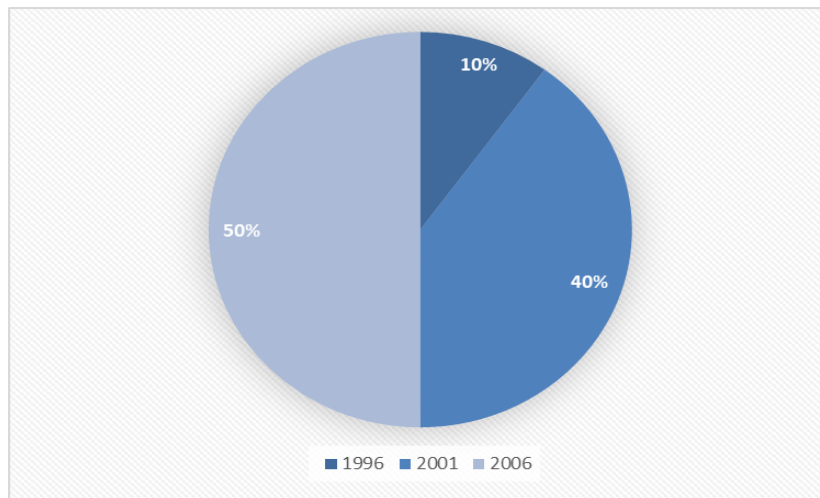
Anexo E. Conocimiento de los residentes locales sobre el secado de la laguna El Estero ocurrido en 1986 en el área de conservación La Capilla, en porcentaje



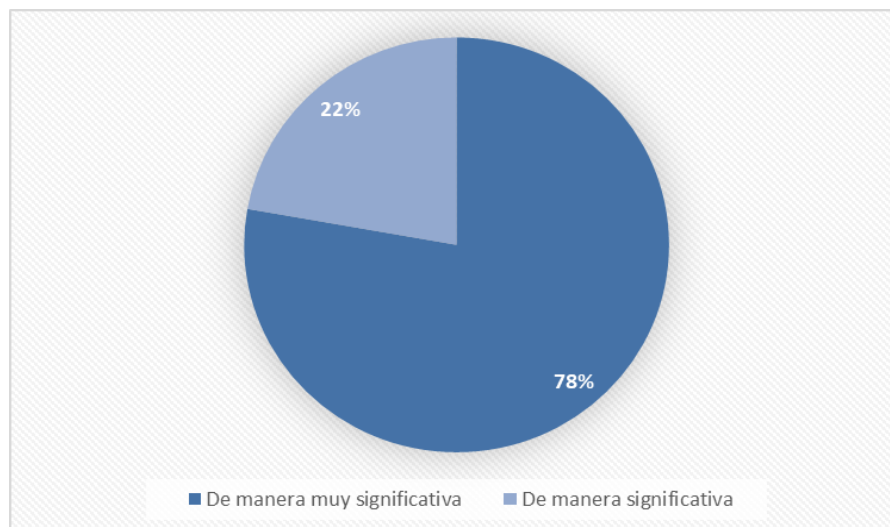
Anexo F. Percepción social del impacto a largo plazo sobre las coberturas vegetales del área de conservación La Capilla a partir del secado de la Laguna El Estero en 1986

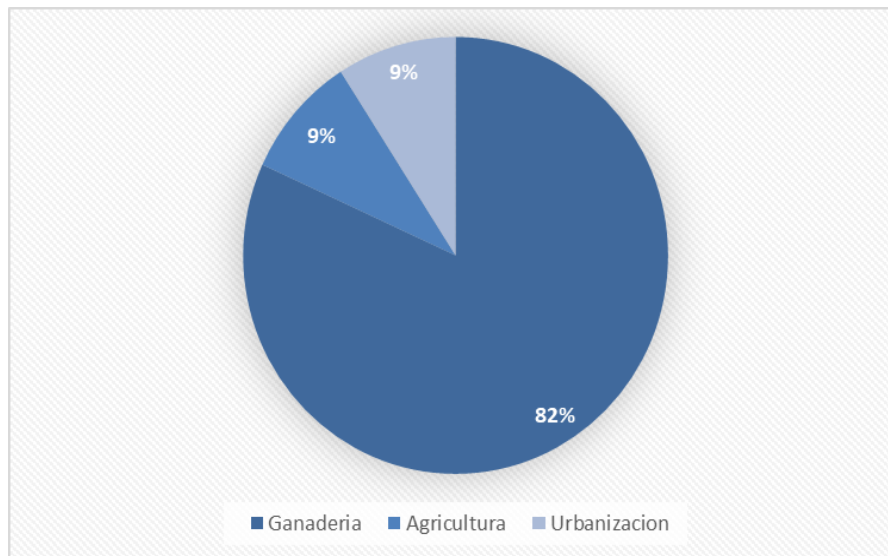
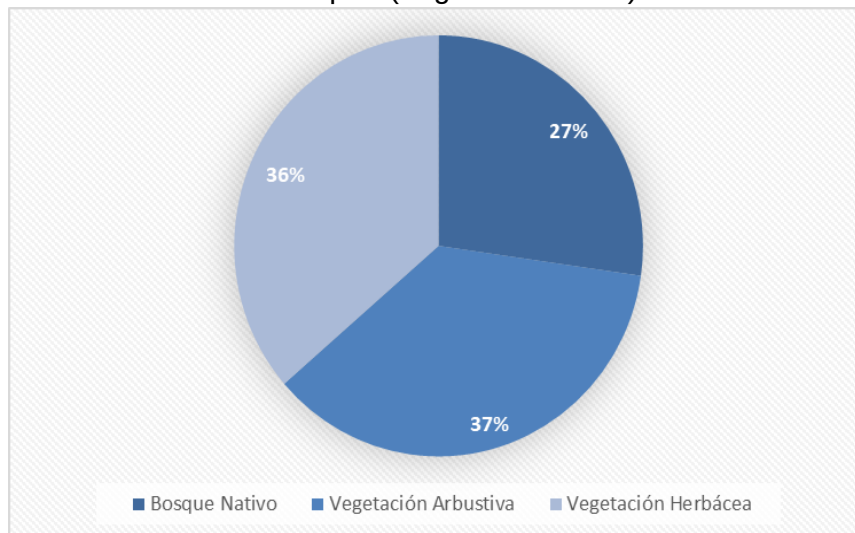


Anexo G. Percepción social de un mayor desarrollo de la plantación forestal de pino a través de los años en la zona de estudio

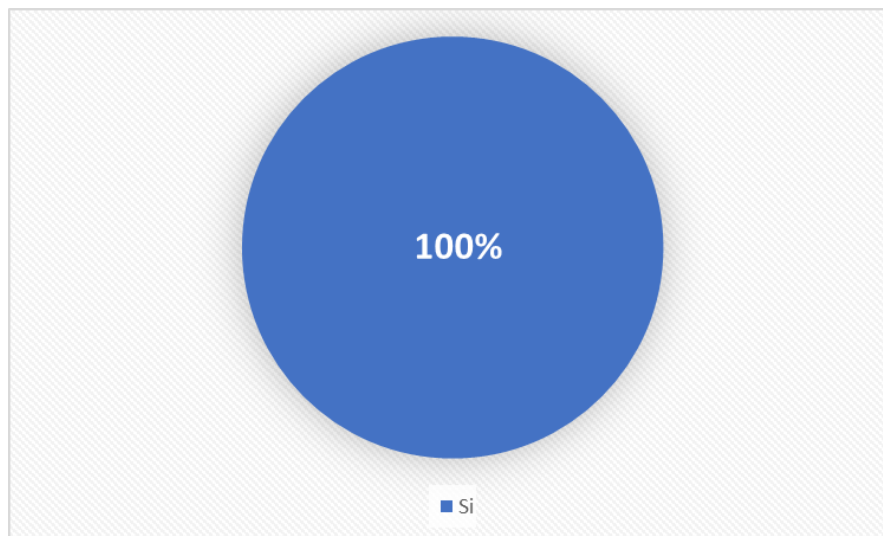


Anexo H. Nivel de afectación de la introducción del pino en la zona, según la comunidad La Capilla

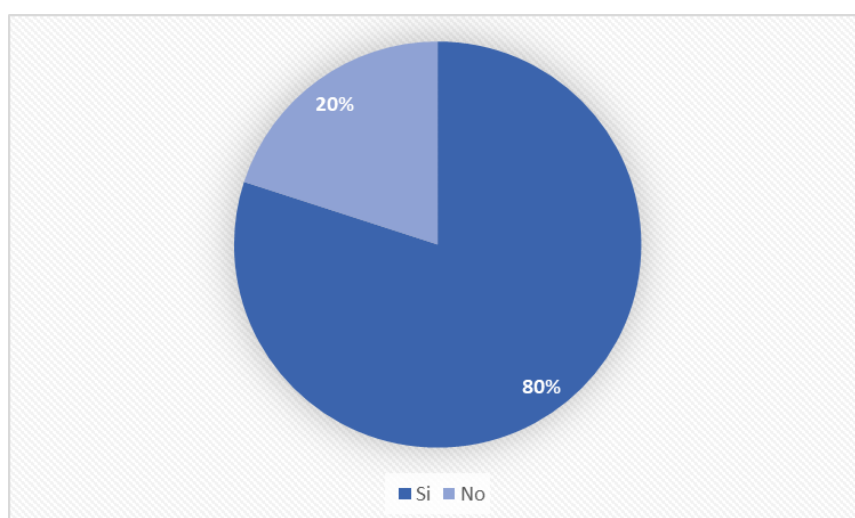


Anexo I. Uso más frecuente de la tierra en la comunidad La Capilla desde 1986 hasta 2021**Anexo J.** Tipos de coberturas vegetales propensas a incendios en el área de conservación La Capilla (Laguna El Estero)

Anexo K. Conocimiento de los moradores sobre si han ocurrido incendios fortuitos dentro del área de conservación La Capilla



Anexo L. Percepción social sobre el nivel de daños generados por los incendios sobre la las coberturas vegetales



Anexo M. Tipos de coberturas vegetales predominantes en el área de conservación La Capilla (Laguna El Estero)

