



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE BIOLOGÍA, ECOLOGÍA Y GESTIÓN

**Dinámica del cambio de uso del suelo en la cuenca del río
Tomebamba entre los años 2001 - 2015 y su proyección al año 2030**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

BIÓLOGA CON MENCIÓN EN ECOLOGÍA Y GESTIÓN

Autor:

GEOVANNA MICHELLE CABRERA LITUMA

Director:

MSc. OMAR DELGADO INGA

CUENCA, ECUADOR

2019

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por el apoyo incondicional que me brinda todos los días, sin ustedes no podría haber llegado hasta aquí.

De la misma manera al MSc. Omar Delgado Inga por compartir sus conocimientos para el desarrollo de esta investigación. Al equipo del IERSE de la Universidad del Azuay especialmente a MSc. Carlos Tenesaca, Ing. Edgar Toledo, MSc. Paul Bravo y MSc. Jheimy Pacheco.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I:.....	3
METODOLOGÍA	3
1.1. Ubicación geográfica de la subcuenca del Río Tomebamba	3
1.2. Selección de imágenes digitales.....	3
1.2.1. Estandarización de las imágenes satelitales de los años 2001 y 2015.....	4
1.3. Metodología para la generación de mapas de cobertura.....	4
1.3.1. Fase de entrenamiento.....	5
1.3.2. Fase de asignación	8
1.3.3. Validación de los mapas de uso del suelo de los años 2001 y 2015.....	9
1.4. Metodología empleada en el análisis multitemporal.....	10
1.4.1. Uso de bandas multiespectrales e índices espectrales	11
1.5. Estimación de cambios de uso de suelo	11
CAPÍTULO 2:	13
RESULTADOS	13
2.1. Selección de imágenes digitales.....	13
2.1.1. Estado original de las imágenes.....	13
2.1.2. Estandarización de las imágenes.....	15
2.1. Clasificación digital de imágenes	15
2.2. Análisis multitemporal con bandas multiespectrales e índices espectrales.....	18
2.3. Estimación de cambios de uso del suelo para el año 2030	20
2.3.1. Mapa de proyección para el año 2030	20
2.3.1.1. Validación del mapa de cambio de uso del suelo 2030.....	21
2.4. Análisis de los cambios del uso de suelo de la subcuenca del Río Tomebamba...	22
2.5. Medidas de prevención para el manejo del suelo rural de protección y producción de la subcuenca del Río Tomebamba	25
CAPÍTULO 3:	27
DISCUSIONES	27
CAPÍTULO 4:	29
CONCLUSIONES.....	29
BIBLIOGRAFÍA.....	30
ANEXOS	35

Anexo 1. Descripción de bandas entre Landsat 7 y 8	35
Anexo 2. Reporte de análisis de la firma Cuerpos de Agua.....	36

Índice de tablas

Tabla 1.1. Leyenda temática	7
Tabla 2.1. Tabla de valores originales de la información satelital, años 2001 y 2015.....	13
Tabla 2.2. Tabla de valores modificados de la información satelital, de los años 2001 y 2015	15
Tabla 2.3. Área en hectáreas (ha) y área en porcentaje, 2001 y 2015	17
Tabla 2.4. Matriz de probabilidad de transición al 2030 derivado de mapas de uso de suelo 2001 y 2015 a través de modelos de Markov en la subcuenca del Río Tomebamba.....	22
Tabla 2.5. Incremento y disminución de las coberturas y usos del suelo en área hectáreas y área en porcentaje del año 2015 al 2030.....	24

Índice de figuras

Figura 1.1. Mapa de la subcuenca del Río Tomebamba	3
Figura 1.2. Mapa de puntos de muestreo dividido por zonas.....	9
Figura 2.1. Imagen satelital original de la subcuenca del Río Tomebamba, 2001.....	14
Figura 2.2. Ejemplo de una imagen original satelital de la subcuenca del Río Tomebamba, 2015	14
Figura 2.3. Mapa de Cobertura y Uso de Suelo del año 2001.	16
Figura 2.4. Mapa de Cobertura y Uso de Suelo del año 2015	17
Figura 2.5. Mapa de composiciones de color de la subcuenca del río Tomebamba	18
Figura 2.6. Mapa de los cocientes multitemporales de la subcuenca del río Tomebamba	19
Figura 2.7. Mapa de los cocientes multitemporales de la subcuenca del río Tomebamba. ...	20
Figura 2.8. Mapa de proyección para el año 2030.	21
Figura 2.9. Mapa de cambios de Cobertura y Uso de Suelo del año 2015 al 2030.....	24

Índice de anexos

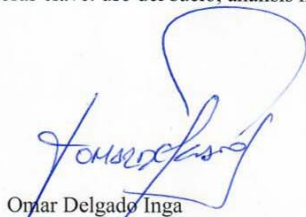
Anexo 1. Descripción de bandas entre Landsat 7 y 8	35
Anexo 2. Reporte de análisis de la firma Cuerpos de Agua.....	36
Anexo 3. Reporte de análisis de la firma Páramo.	37
Anexo 4. Reporte de análisis de la firma Vegetación leñosa.	38
Anexo 5. Reporte de análisis de la firma Áreas sin cobertura vegetal.....	39
Anexo 6. Reporte de análisis de la firma Tierras agropecuarias.....	40
Anexo 7. Fotografías paisajísticas de la subcuenca del Río Tomebamba de acuerdo a niveles de análisis	40
Anexo 8. Tabla de definiciones de los índices de vegetación.....	42
Anexo 9. Mapa de nubes presentes en las imágenes de los años 2001 y 2015.	42

**Dinámica del cambio de uso del suelo en la subcuenca del río Tomebamba
entre los años 2001 - 2015 y su prospectiva al año 2030**

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar la dinámica del uso del suelo en la cuenca del río Tomebamba entre los años 2001 y 2015, para construir escenarios prospectivos al 2030. Ejecutándose en varias etapas. Se parte de los mapas de uso del suelo del año 2001 y 2015 en los que no se advierte mucha variación en las categorías de páramo y vegetación leñosa, no así en las áreas sin cobertura vegetal y las tierras agropecuarias. Como resultado se obtiene los análisis multitemporales. La prospectiva para el año 2030 señala posibles problemáticas en el uso de suelo con fines agropecuarios.

Palabras clave: uso del suelo, análisis multitemporales, prospectiva, río Tomebamba.



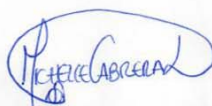
Omar Delgado Inga

Director de Trabajo de Titulación



Antonio Manuel Crespo Ampudia

Coordinador de Escuela



Michelle Cabrera Lituma

Autora

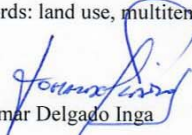
CABRERA LITUMA

**Dynamics of land use change in the Tomebamba River sub-basin between
2001 - 2015 and its prospective for 2030**

ABSTRACT

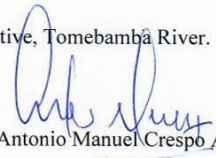
This study aims to characterize the dynamics of land use in the Tomebamba river basin between 2001 and 2015 to build prospective scenarios for the year 2030. The study was executed in several stages. The investigation is based on the maps of land use of 2001 and 2015 in which there is not much variation in the moorland and woody vegetation categories, unlike in areas without vegetation cover and agricultural land. As a result, multitemporal analyzes were obtained. The prospect for the year 2030 indicates possible problems in the use of land for agricultural purposes.

Keywords: land use, multitemporal analysis, prospective, Tomebamba River.



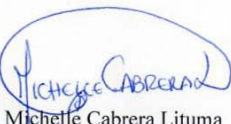
Omar Delgado Inga

Thesis Director



Antonio Manuel Crespo Ampudia

Faculty Coordinator



Michelle Cabrera Lituma

Author



Universidad del
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by
Ing. Paul Arpi

INTRODUCCIÓN

El permanente cambio de uso del suelo ocasionado por las actividades humanas, y por factores naturales a lo largo de las cuencas de los ríos está provocando cambios en el comportamiento hidrológico (Javier & Rodríguez López, 2016). La ciudad de Cuenca está inmersa en la subcuenca del Río Tomebamba, que se conforma por cinco microcuencas, en las cuales se capta el agua para tratamiento y abastecimiento de agua potable (Puma & Lopez, 2015), razón por la cual, es imprescindible evaluar con mayor detalle y profundidad los cambios del uso del suelo que están ocurriendo en este espacio.

En el Ecuador el cambio de uso de suelo en los últimos años se ha incrementado drásticamente por la intervención de las actividades humanas y las transformaciones naturales de los ecosistemas (Ministerio del Ambiente, 2018). Estudios demuestran que el cambio de uso del suelo conlleva efectos negativos en ciertos elementos atmosféricos del ciclo hidrológico, que podrían alterar drásticamente el clima regional. Como es de conocimiento, el cambio de uso del suelo modifica principalmente dos aspectos estructurales de los ecosistemas, la vegetación y el suelo, alterando los procesos del ciclo hidrológico y con ello reduciendo la disponibilidad de agua (Galicia, 2014).

Los estudios realizados por el Ministerio del Ambiente Ecuatoriano (MAE) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) determinan que el 50% de los suelos de nuestro país se encuentran en proceso de degradación. En este proceso de degradación el Azuay es una de las provincias más afectadas (Ministerio del Ambiente, 2018). Siendo Cuenca el cantón más grande de la provincia es indispensable evaluar los cambios de uso del suelo, particularmente en la subcuenca del Río Tomebamba, ya que ésta es la fuente permanente de abastecimiento de agua para la ciudad de Cuenca (Piedra Aguilera Alexandra, 2017).

En el presente estudio se realiza un abordaje de los elementos teórico que dan validez al análisis de uso y cobertura de suelos empleando imágenes satelitales del programa satelital Landsat, además la generación del mapa de cobertura y uso del suelo, el análisis multitemporales, así como el estado del arte de la prospectiva empleando las cadenas de Markov y autómatas celulares.

Es reconocido que Cuenca es la ciudad con mejor calidad de agua potable del país y la subcuenca del Río Tomebamba una de las más antiguas en su aprovechamiento, se considera importante realizar este estudio para analizar cuál es la dinámica del cambio del uso del suelo entre los años 2001 y 2015, para su posterior prospectiva al 2030. Los resultados esperados es contar con información que contribuya para la planificación de la toma de decisiones para la subcuenca hidrográfica. Originándose las siguientes preguntas ¿Qué cambios en el uso del suelo han ocurrido en la cuenca del río Tomebamba entre los años 2001 y 2015? Y ¿Cuál es la prospectiva al 2030 del uso del suelo en la cuenca del río Tomebamba?

Con base en lo expuesto, se formulan los objetivos: general y específicos.

Objetivos

Objetivo general

- Caracterizar la dinámica del uso del suelo en la subcuenca del Río Tomebamba entre los años 2001 y 2015, para construir escenarios prospectivos al 2030.

Objetivos específicos

- Seleccionar las imágenes Landsat de cada área de estudio.
- Generar el mapa de cobertura y uso del suelo en los años 2001 y 2015.
- Realizar análisis multitemporales de los años 2001 y 2015 para caracterizar los cambios en el uso del suelo.
- Estimar cambios del uso del suelo en el 2030 aplicando cadenas de Markov y autómatas celulares.
- Analizar los cambios del uso de suelo de la subcuenca del Río Tomebamba.

Este procedimiento permitirá obtener información que contribuya a identificar las áreas en las cuales el uso del suelo ha cambiado desde el año 2001 hasta el 2015 y las áreas donde se cambiará el uso de suelo en el año 2030 que serán presentadas en forma de mapas y cuadros estadísticos para evaluar los porcentajes de variación. Con estos resultados se obtendrá una herramienta de decisión para los administradores de la subcuenca.

CAPÍTULO I: METODOLOGÍA

1.1. Ubicación geográfica de la subcuenca del Río Tomebamba

La subcuenca del Tomebamba (Figura 1.1.), se encuentra localizada en la cordillera de los Andes, al sur de Ecuador, en la provincia del Azuay, tiene una extensión de 1275, 4 Km² (Fernando & Puma, 2015) con una gradiente altitudinal en el rango de 2600 m s.n.m – 4300 m s.n.m., y tiene su origen en el límite norte del Parque Nacional Cajas (PNC). Este río atraviesa el noreste de la ciudad de Cuenca, luego de circunvalar el centro histórico de la ciudad, llega a unirse con el río Machángara formando el río Cuenca (Condo & Juela, 2017).

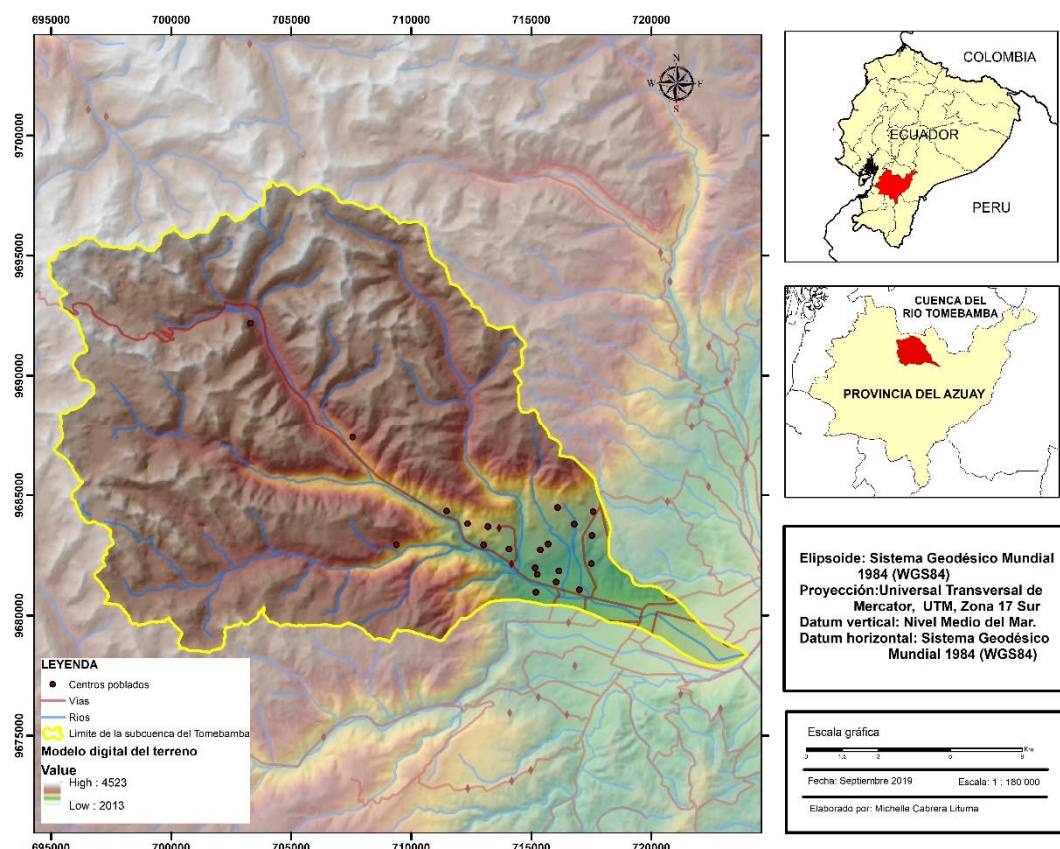


Figura 1.1. Mapa de la subcuenca del Río Tomebamba
 Fuente: USGS. Elaboración: Propia

1.2. Selección de imágenes digitales

La selección se realiza en tres etapas, 1) identificación de imágenes del programa Landsat a ocupar de distintos años pero de épocas similares, que presenten la menor cobertura de nubes dentro del área de estudio, 2) obtención de imágenes en las bandas

originales, bandas con corrección radiométrica e índices espectrales. 3) preparación y tratamiento digital de imágenes. Las imágenes seleccionadas corresponden a las fechas 3 de noviembre del 2001 y 15 de septiembre del 2015, cada una con sus respectivas bandas (Anexo 1). Estas imágenes fueron descargas de la página de la USGS (<https://espa.cr.usgs.gov>).

1.2.1. Estandarización de las imágenes satelitales de los años 2001 y 2015

En este procedimiento, lo que se hizo fue revisar la información que contenían las imágenes satelitales para luego proceder a las correcciones radiométricas y geométricas que son necesarias para nuestros análisis. Y con esto lograr eliminar cualquier anomalía detectada en las imágenes. (Chuvieco, 2010).

La homogeneización radiométrica, se realiza por las variaciones que introducen las condiciones de observación, situaciones atmosféricas o calibración del sensor. Variaciones que modifican la signatura del sensor de un pixel. Es por ello que se debe homogeneizar los niveles digitales de las imágenes que intervienen. Este asunto se produce mediante la calibración de los niveles digitales de modo absoluto, convirtiéndolos a parámetros físicos vistos previamente, además, se puede equiparar los niveles digitales entre imágenes para facilitar su comparación. El ajuste geométrico está superado porque se emplea imágenes del USGS (Chuvieco, 2010).

A continuación, se recortaron las imágenes en base del límite de la subcuenca del Río Tomebamba.

1.3. Metodología para la generación de mapas de cobertura

Con las imágenes listas se procede a realizar un mapa de uso del suelo para cada año, en ellos se desarrollan tres etapas: 1) fase de entrenamiento, 2) fase de asignación y 3) obtención de resultados. En la fase de entrenamiento, se determinará el método a utilizar, entre supervisado y no supervisado. Para nuestro estudio el método será el supervisado debido a que se tiene un conocimiento previo al área de estudio, en este método se utilizan muestras representativas de las clases seleccionadas para establecer un modelo del proceso de clasificación (Girón & Patarroyo, 2016).

En la fase de asignación, existen muchos tipos de clasificadores, entre ellos; mínima distancia, clasificador paralelepípedos, máxima probabilidad, clasificador en árbol,

mapeo del ángulo espectral, clasificación de objetos y redes neuronales artificiales que se desglosan a continuación.

En el estudio se utilizó la técnica de Mapeo del Ángulo Espectral debido a que este método considera la información angular con respecto a los patrones previamente seleccionados para cada clase. Cada uno de ellos produce m número de ángulos el cual equivale al número de clases espectrales, además este patrón es la clase del ángulo más pequeño. Con esto se calcula que los píxeles pertenezcan a cada una de las categorías. Este método clasificador es fácil y rápido para mapear la similitud de espectros de referencia. Además, es un poderoso método de clasificación porque reprime la influencia de efectos de sombreado para acentuar la reflectancia.

Adicionalmente a la técnica de Mapeo del Ángulo Espectral, se realiza una validación de los resultados mediante tres métodos, 1) revisión de cartografía de años cercanos a los seleccionados, 2) verificación directa en el área de estudio en lugares estables (bosque protegidos, cuerpos de agua, cultivos permanentes, etc.) y 3) revisión de ortofotografías de mayor resolución. Con ello se certifica los resultados obtenidos.

Para el procedimiento descrito se emplea programas de tratamiento digital de imágenes (TDI) en el cual se ingresa un archivo con las muestras previamente seleccionadas y con el método de Mapeo del Ángulo Espectral del año 2001 y 2015. La obtención de mapa de cobertura y uso del suelo se realizó en los programas ArcMap y Qgis.

1.3.1. Fase de entrenamiento

En esta fase el objetivo es generar muestras de la variedad de firmas espectrales relacionadas a cada clase para esto lo primero que debemos hacer es determinar la leyenda a ocupar, en esta ocasión se tuvo en cuenta la resolución espectral y espacial del sensor Landsat, así como las características del área de estudio y la aplicabilidad de la información temática.

Las imágenes Landsat tienen una resolución espacial de 30 metros con una unidad mínima cartografial de 100m y con una escala límite de producción 1:100.00 (Lencinas & ASiebert, 2009). Según (Chuvienco, 2010) estos son los principales parámetros que se deben tomar en cuenta para seleccionar una leyenda idónea para cualquier estudio a realizarse. Con base en esto y a las leyendas propuestas por

Ministerio del Ambiente (MAE), se han definido cinco clases de uso y cobertura del suelo que exponen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Leyenda temática

Nivel	Definición operativa	Código
Cuerpos de Agua	“Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento”(Ministerio del Ambiente, 2018).	1
Paramo	“Vegetación tropical alto andino caracterizada por especies dominantes no arbóreas que incluyen fragmentos de bosque nativo propios de la zona”(Ministerio del Ambiente, 2018a).	2
Vegetación leñosa	“Masa arbórea establecida antrópicamente con una o más especies forestales”(Ministerio del Ambiente, 2018a).	3
Área sin cobertura vegetal	“Áreas generalmente cubiertas por nubes y desprovistas de vegetación, que por sus limitaciones edáficas, climáticas, topográficas o antrópicas, no son aprovechadas para uso agropecuario o forestal, sin embargo pueden tener otros usos”(Ministerio del Ambiente, 2018a).	4
Tierras agropecuarias	“Área bajo cultivo agrícola y pastos plantados, o que se encuentran dentro de una rotación entre éstos” (Ministerio del Ambiente, 2018a).	5

Elaboración: Propia

Establecida la leyenda, se procede a seleccionar los sitios de entrenamiento, también llamado “muestras”. Se trató de que los sitios sean homogéneos y estar a lo largo de toda la imagen, además que sean lo más grande posible, lo cual es

un factor indicativo de que la muestra es homogénea en comparación a las otras de la misma clase.

La fase de entrenamiento o muestreo se realizó a través del programa Qgis con el plugin *Semi-Automatic Classification*¹ y la opción *SCP Dock* que viene dentro de este plugin. Para poder ejecutar esta etapa, como primer paso, se debe cargar las imágenes satelitales (azul, verde, roja, infra-roja, swir 1 y swir 2), con estas imágenes se crean un ráster de juego de bandas. Creado el ráster procedemos a la selección de los sitios de entrenamiento respectivos para cada clase de cobertura, verificamos que la distancia, mínimo y máximo tengan los mismos valores debido a que las muestras se pueden sobreponer.

Para verificar que nuestras firmas espectrales sean aptas para el modelo se analiza su desviación estándar, si ésta es razonablemente pequeña para cada una de sus firmas en cada banda. Si su desviación estándar es grande podría indicarnos que su ROI no es lo suficientemente homogéneo. También, podemos observar las distancias espectrales entre las firmas, lo que nos ayuda para evaluar la separabilidad o la similitud entre los ROI.

En el presente caso, se empleó el algoritmo de Mapeo de Angulo Espectral, por lo cual, la medida de separabilidad o similitud que nos interesa es el Angulo espectral. En él, si los valores son 0 significa que las muestras son exactamente iguales pero si sus resultados son ≥ 30 significa que son diferentes. Una manera más rápida es que si el resultado de la medida de separabilidad se encuentra en rojo, se infiere que las firmas son particularmente similares. Ejemplos de los análisis de la firma mediante Mapeo de Angulo Espectral, se observan en los Anexos 2-6.

En este último análisis nuestras firmas comparadas entre otras firmas de la clase, nos dan resultados satisfactorios, debido a que, todas están dentro del rango de similitud, es decir, son homogéneas.

1.3.2. Fase de asignación

Una vez listas las muestras, procedemos a ejecutar la clasificación. Para esta parte usamos el *algoritmo de clasificación* en el SCP Dock. Seleccionando *Usar MC ID*, en

¹ En cursivas se anotará el nombre de la función en el programa lo cual aplica para éste capítulo y el capítulo de resultados.

Algoritmo seleccionamos *Mapeo del Angulo Espectral*, en Clasificación de las Firmas de la Cobertura Terrestre seleccionamos LCS para que se use la Clasificación de la Firma de la Cobertura Terrestre y Algoritmo para que aquellos pixeles que no estén clasificados formen parte de los más cercanos según su ángulo espectral.

1.3.3. Validación de los mapas de uso del suelo de los años 2001 y 2015

Una vez generado los mapas de cobertura y uso del suelo de los años 2001 y 2015, se procede a una siguiente validación en campo en la cual, se seleccionaron sitios de muestreo específicos de cada una de las clases como se ilustra en la Figura 1.2 y se procedió a una observación directa de cada uno de los puntos seleccionados para verificar la clasificación (Anexo 7).

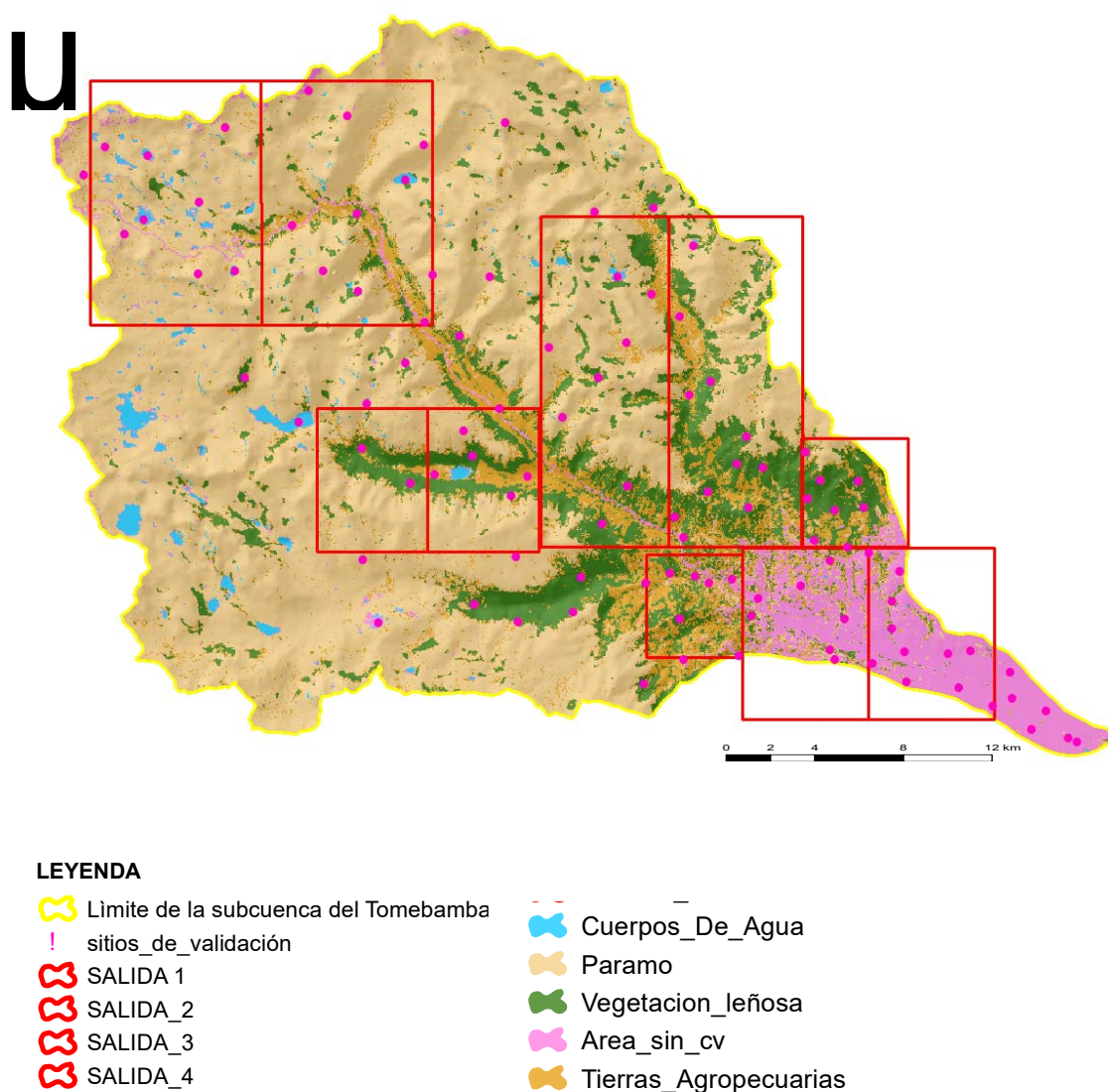


Figura 1.2. Mapa de puntos de muestreo dividido por zonas.

Fuente: USGS. Elaboración: Propia

1.4. Metodología empleada en el análisis multitemporal

Para el análisis multitemporal se exige 4 condiciones: corrección geométrica, corrección radiométrica eliminación de nubes y que correspondan a la misma época. También se puede ejecutar análisis estacionales en el que se obtiene como resultado imágenes que determinen los perfiles estacionales en las cubiertas vegetales de interés, utilizando imágenes de distintas fechas de forma simultánea. En el estudio se pretende conocer la dinámica del bosque nativo, cultivos, pastizales, etc. Para este caso a más de emplear imágenes de radiancia se emplearon índices espectrales como NDVI, EVI, SAVI, MSAVI (Anexo 8). Con el objetivo de clasificar las imágenes con mayor precisión (Chuvieco, 2010).

Existen también estudios para la detección de cambios los cuales tienen como objetivo analizar las modificaciones presentes en un determinado territorio entre dos o más fechas. Estas técnicas se realizan con operaciones algebraicas entre las que se destaca composiciones de color, diferencia entre imágenes y cocientes multitemporales. En composiciones de color, se trata de combinar las imágenes en los canales RGB (red, green, blue) más el índice espectral que se desee, obteniendo una imagen, en la cual en tonos rojizos se presentarán los lugares donde existe pérdida de vegetación y en cian los lugares donde la vegetación se ha mantenido (Chuvieco, 2010).

El análisis también se realizará estableciendo las diferencias entre imágenes, el cual consiste en una resta algebraica de píxeles de las dos imágenes de cada año, produciendo una tercera imagen la cual nos presentará los cambios entre las fechas, la información resultante se presentará en colores oscuros los lugares donde se dieron cambios. En este análisis se puede ocupar las bandas originales o los índices espectrales (Chuvieco, 2010)

$$ND = ND_{t2} - ND_{t1}$$

Análisis de cocientes multitemporales, para este análisis se deben tomar en cuenta los niveles digitales (ND) de las imágenes a ocupar, debido a que si una reducción de 20 ND entre fechas puede significar un cambio si el ND original era de 40, pero en el caso de que si la primera fecha es de 200 ND el resultado será poco significativo. En este análisis se divide la imagen de la segunda fecha para la primera, como resultado obtendremos una imagen en tonos grises, en los cuales los colores más oscuros representan la pérdida de vegetación (Chuvieco, 2010).

$$ND = (ND_{t2} / ND_{t1})$$

Los análisis de detección de cambios se realizarán para examinar en nuestro estudio la dinámica de los ecosistemas frágiles y amenazados, según sus causas naturales o por la intervención del ser humano. Los resultados que se obtienen tras aplicar técnicas de análisis multitemporal permite contar con herramientas para la toma de decisiones que identifica que sitios se han conservados, reforestados o tratados de manera específica para su recuperación, debido a que cada uno de ellos son de vital importancia para la conservación de flora, fauna, fuentes hídricas, la vida del ser humano, etc.

1.4.1. Uso de bandas multiespectrales e índices espectrales

En esta etapa necesitamos las imágenes de las bandas multiespectrales e índices espectrales. Para la ejecución de este apartado se necesita eliminar las nubes presentes en las imágenes (Anexo 9) y aquellos datos que no nos permitan ejecutarlo. Obteniendo una nueva imagen dentro de los rangos necesarios.

1.5. Estimación de cambios de uso de suelo

La prospectiva, se realizará la prospectiva del cambio de uso del suelo, en la cual se utilizará técnicas combinadas de los modelos de transición: cadenas de Markov y autómatas celulares. Las cadenas de Markov nos ayudarán a calcular la probabilidad de cambio de un pixel a otro generando una matriz de probabilidad de transición y otra de áreas de transición. Para este cálculo se utilizarán los mapas de uso del suelo de 2001 y 2015, que serán ejecutados en el módulo Markov del software IDRISI considerando un intervalo de 15 años (2030). Obteniendo como resultados una matriz de probabilidad de transición y otra de áreas de transición, además de una variedad de mapas que presentan las áreas de transición para las diferentes categorías del uso del suelo en el 2030 (Palomeque-De la Cruz et al., 2016).

Los resultados obtenidos de Markov se utilizarán como variables para ejecutar el módulo de autómatas celulares de IDRISI y con esto se generará el mapa del 2030. La aplicación de este módulo genera un estadístico Kappa con el cual se puede evaluar la similitud entre la clasificación y si los resultados son cercanos a 1 se determina que existe una precisión en la construcción de los escenarios (Palomeque de la Cruz et al., 2017).

Para de evaluar la precisión del modelo de Markov-autómatas celulares para la proyección 2030, se usó un mapa de uso de suelo del 2009 generado a través de imágenes Landsat 7 ETM+ 30 m y el mapa de uso de suelo 2001, para proyectar un mapa de uso de suelo 2015. Con el mapa generado a partir de imágenes Landsat y el mapa proyectado al 2015, se ejecutó una comparación de semejanza entre ambos mapas usando el modulo *Validate* de Idrisi Selva. Y como resultado se obtuvo el estadístico Kappa para evaluar la semejanza entre la clasificación actual 2015 y el mapa proyectado al 2015. Esto nos permitió obtener una referencia sobre la precisión de la proyección al 2030 generada a base de los mapas de 2001 y 2015.

CAPÍTULO 2:

RESULTADOS

2.1. Selección de imágenes digitales

2.1.1. Estado original de las imágenes

Debido a que eran dos satélites distintos, las imágenes satelitales, no contaban con los mismos niveles digitales, por ello se advierte diferente cantidad de filas y de columnas en la Tabla 2.1. Existen 7821 filas en el año 2001 y de 7601 en el año 2015, así como de 6991 columnas en el año 2001 y de 7751 en el año 2015.

Tabla 2.1. Tabla de valores originales de la información satelital, años 2001 y 2015

Propiedades	Valores 2001	Valores 2015
Filas y columnas	7821, 6991	7601, 7751
Número de bandas	6	6
Tamaño del pixel	30, 30	30, 30
Profundidad del pixel	8 bit	16 Bit
Referencia Espacial	WGS_1984_UTM_ZONE_17S	WGS_1984_UTM_Zone_17S
Extensión	Norte -214785	Norte 9796015
	Sur -424515	Sur 9563485
	Este 825315	Este 825615
	Oeste 590685	Oeste 597585

Elaboración: Propia

Los diferentes valores en filas y columnas, constituye un error frecuente en la descarga de imágenes de la información satelital. La imagen satelital del año 2001 se puede observar en la Figura 2.1 y del año 2015 en la Figura 2.2. Como se puede observar, no es posible distinguir en la imagen la diferencia de los valores entre niveles digitales, así como entre filas y columnas.

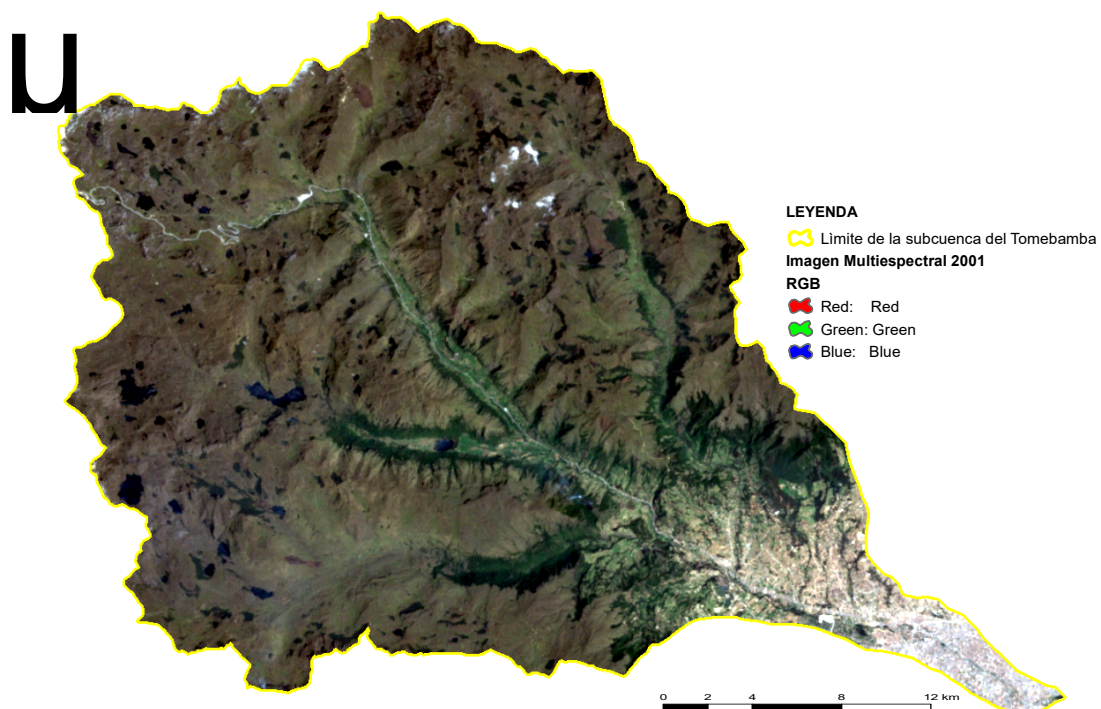


Figura 2.1. Imagen satelital original de la subcuenca del Río Tomebamba, 2001
 Fuente: USGS. Elaboración: Propia

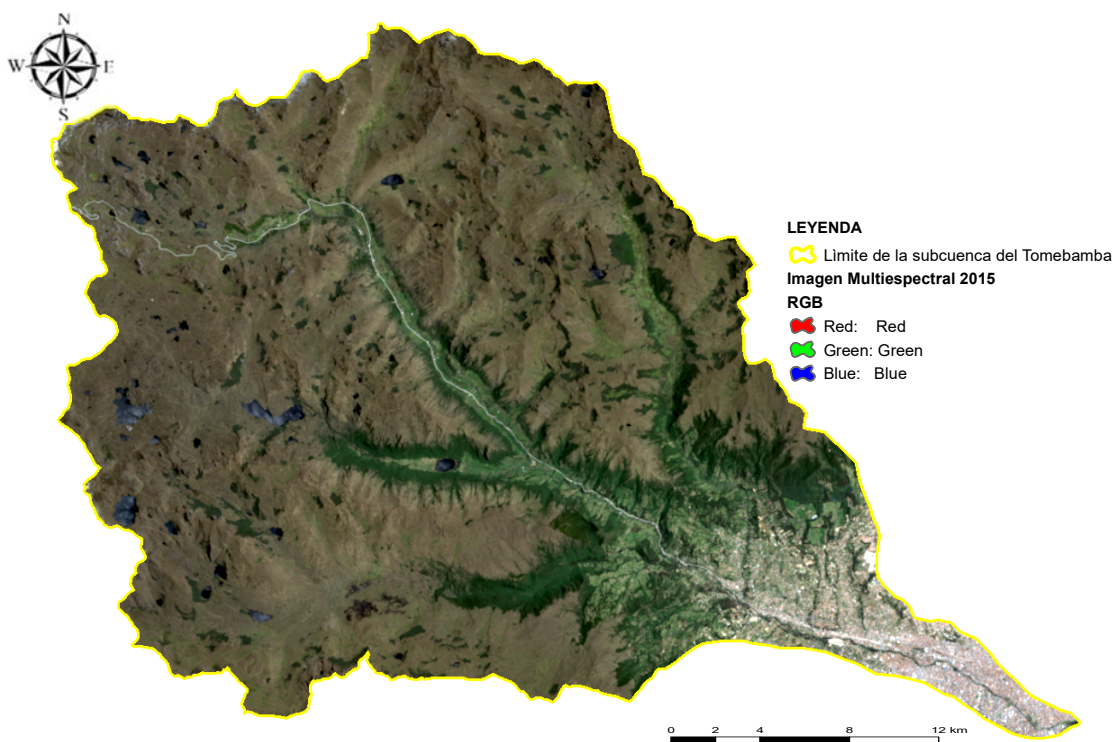


Figura 2.2. Ejemplo de una imagen original satelital de la subcuenca del Río Tomebamba, 2015
 Fuente: USGS. Elaboración: Propia

Estas imágenes demandan corrección, asunto que se realiza por medio de la estandarización.

2.1.2. Estandarización de las imágenes

La estandarización consiste en obtener resultados homogéneos que se puede apreciar en la Tabla 3.2. Estos valores ya están listos para ser ocupados en la siguiente etapa. No se hacen constar los mapas debido a que no se distingue a simple vista las variaciones expuestas.

Tabla 2.2. Tabla de valores modificados de la información satelital, de los años 2001 y 2015

Propiedades	Valores 2001	Valores 2015
Filas y columnas	672, 968	672, 968
Número de bandas	6	6
Tamaño del pixel	30, 30	30, 30
Profundidad del pixel	8 Bit	8 Bit
Referencia Espacial	WGS_1984_UTM_Zone_17S	WGS_1984_UTM_Zone_17S
Extensión	Norte 9698065	Norte 9698065
	Sur 9677875	Sur 9677875
	Este 723975	Este 723975
	Oeste 694935	Oeste 694935

Elaboración: Propia

2.1. Clasificación digital de imágenes

Durante la clasificación se tuvo errores y se tomaron muestras nuevamente de dicha clase y se repitieron las fases de Entrenamiento y de Asignación. Con esos resultados obtuvimos los siguientes mapas:

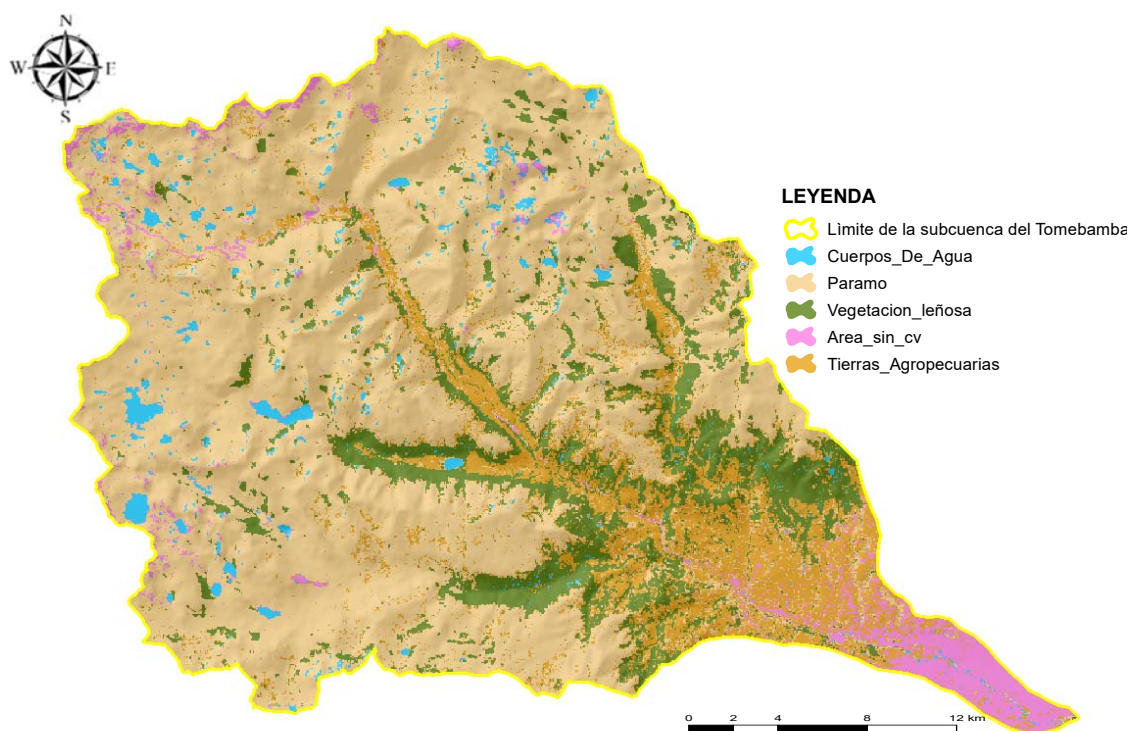


Figura 2.3. Mapa de Cobertura y Uso de Suelo del año 2001.
Fuente: USGS. Elaboración: Propia

El mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de 2001 (Figura 2.3) y la Tabla 2.3 determina que las áreas que más sobresalen es Páramo con un 66.27% y entre Vegetación leñosa con un 13.47% y Tierras agropecuarias con 13.44%. Estos resultados son debido a que la subcuenca del Río Tomebamba la mayor parte está dentro de un área protegida.

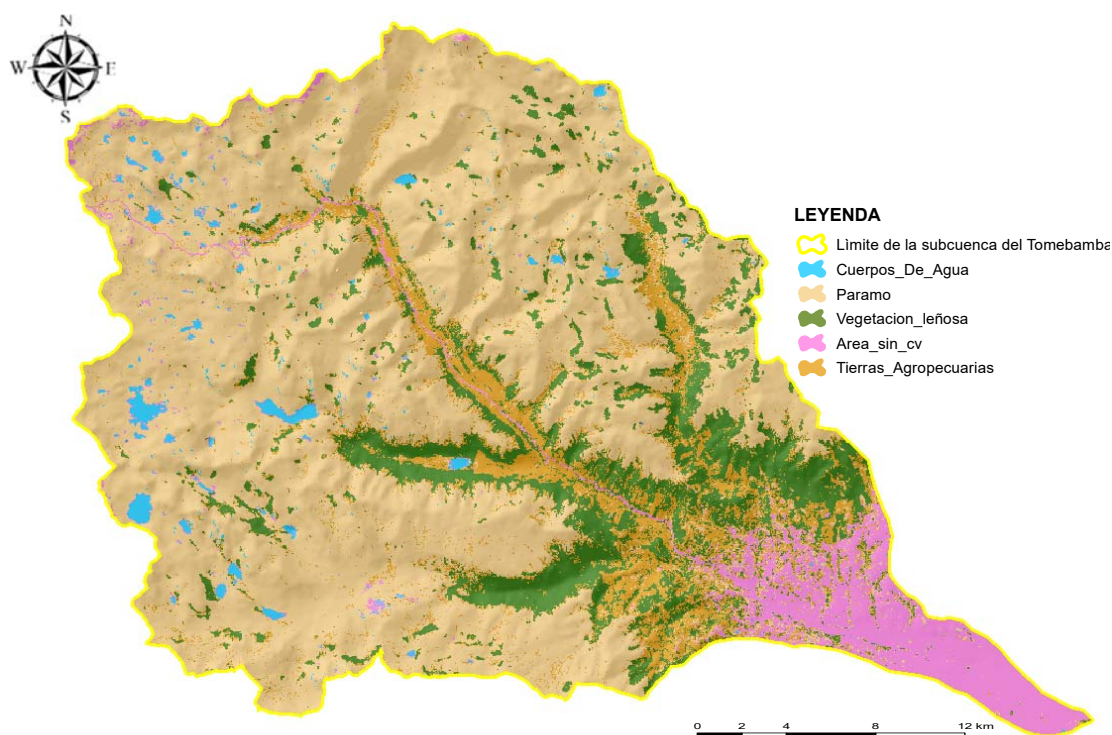


Figura 2.4. Mapa de Cobertura y Uso de Suelo del año 2015

Fuente: USGS. Elaboración: Propia

El mapa de cobertura vegetal y uso del suelo 2015 (Figura 2.4,) y la Tabla 2.3 advierte que las áreas que más sobresalen son Páramo con un 66.64% y entre Vegetación leñosa con un 13.42% y Tierras agropecuarias con 11.46%

Tabla 2.3. Área en hectáreas (ha) y área en porcentaje, 2001 y 2015

2001-2015	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
CA	266850	2.42	160860	1.46
PR	7314240	66.27	7357830	66.64
VL	1486290	13.47	1482090	13.42
SC	486210	4.41	774840	7.018
TA	1483260	13.44	1265610	11.46

CA= Cuerpos de agua, PR= Páramo, VL=Vegetación leñosa, SC= Área sin cobertura vegetal, TA= Tierras agropecuarias.

Elaboración: Propia

2.2. Análisis multitemporal con bandas multispectrales e índices espectrales

La Figura 2.5 nos ilustra el análisis multitemporal de las composiciones de color entre los años 2001 y 2015 en el cual podemos observar en rojo las pérdidas de vegetación y en cian las zonas donde se ha mantenido. Deduciendo que, la parte urbana se empieza expandir hacia la parte alta de la subcuenca, también la en la parte media de la subcuenca podemos observar una pequeña cantidad de tonos rojizos.

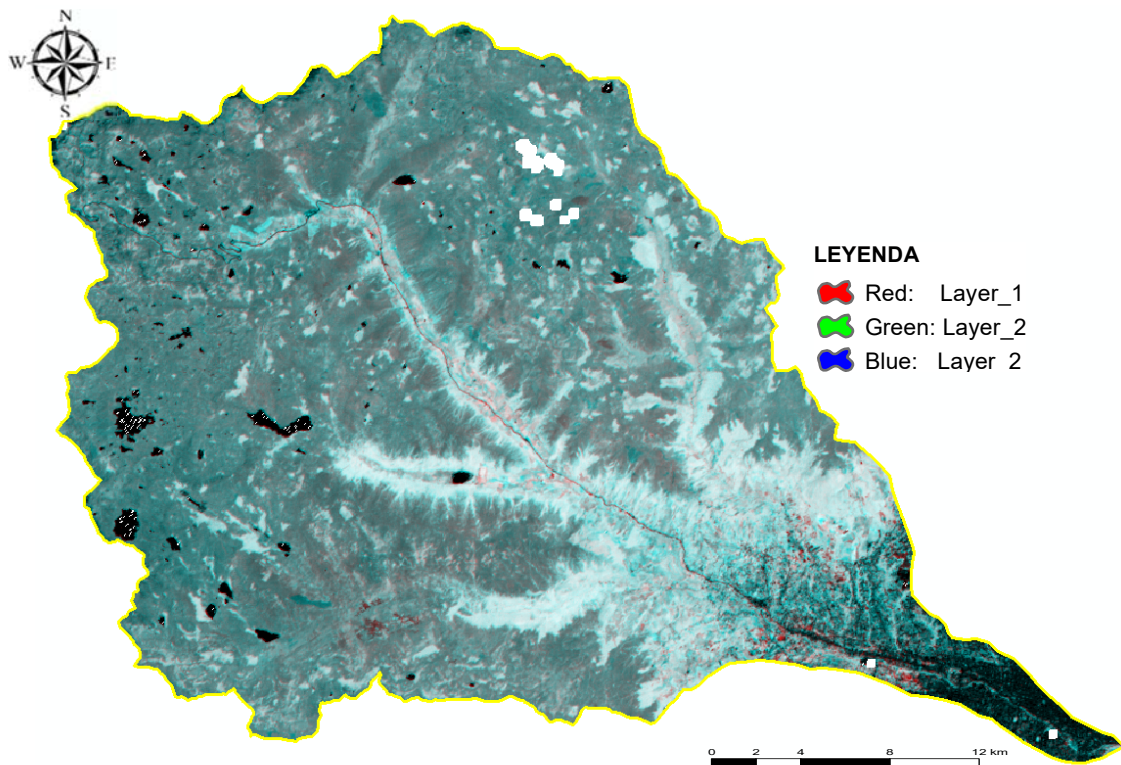


Figura 2.5. Mapa de composiciones de color de la subcuenca del río Tomebamba
Fuente: USGS. Elaboración: Propia

La Figura 2.6 nos ilustra el análisis multitemporal de los cocientes multitemporales de los años 2001 y 2015. En el cual en tonos oscuros cercanos al negro nos indica una pérdida de vegetación, corroborando al análisis de composiciones de color. Además, en este análisis podemos observar de manera más detallada cambios a lo largo de la vía que atraviesa nuestra zona.

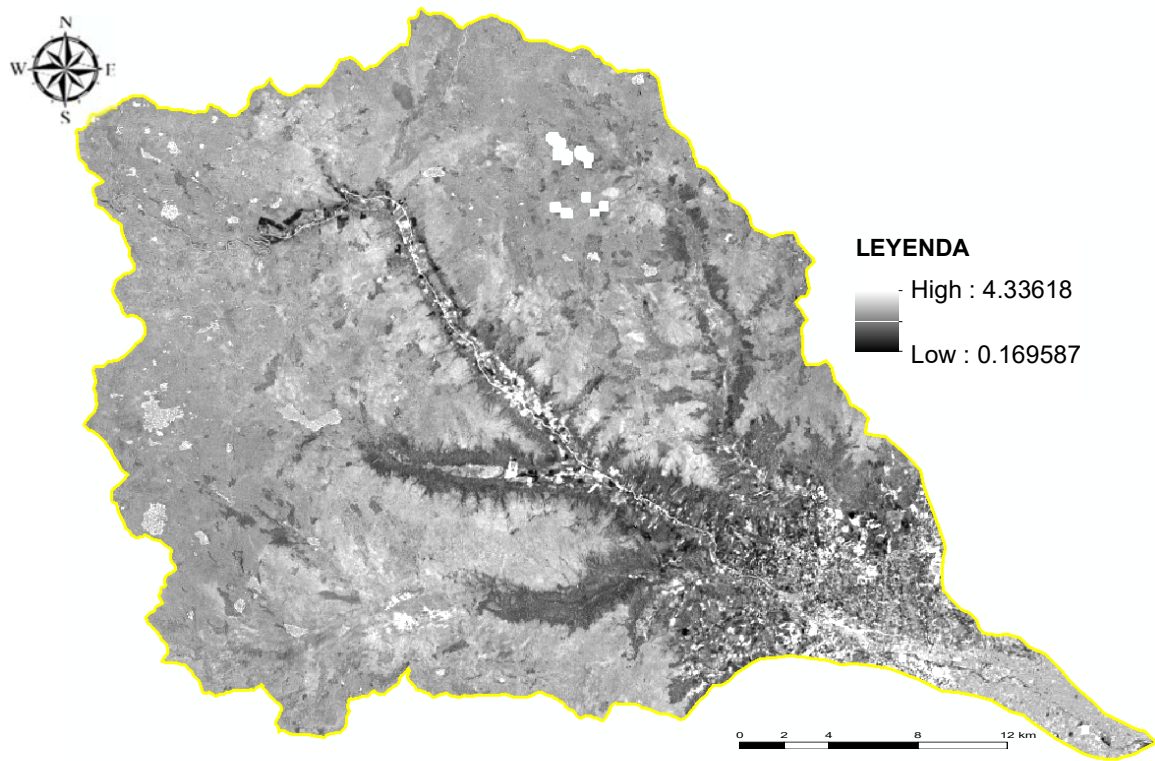


Figura 2.6. Mapa de los cocientes multitemporales de la subcuenca del río Tomebamba
Fuente: USGS. Elaboración: Propia

La Figura 2.7 nos ilustra el análisis de diferencia de imágenes, el cual al igual que el mapa de análisis de cocientes multitemporales nos indica en tonos oscuros cercanos al negro aquellas zonas donde existió un cambio, el cual nos ayuda a diferenciar de mejor manera los cambios que ocurrieron la parte baja de la subcuenca. Además, los valores mientras más cercanos a 0 indican zonas estables. Estos cambios no significan pérdida, si no aquellas zonas que experimentan cambios entre las fechas.

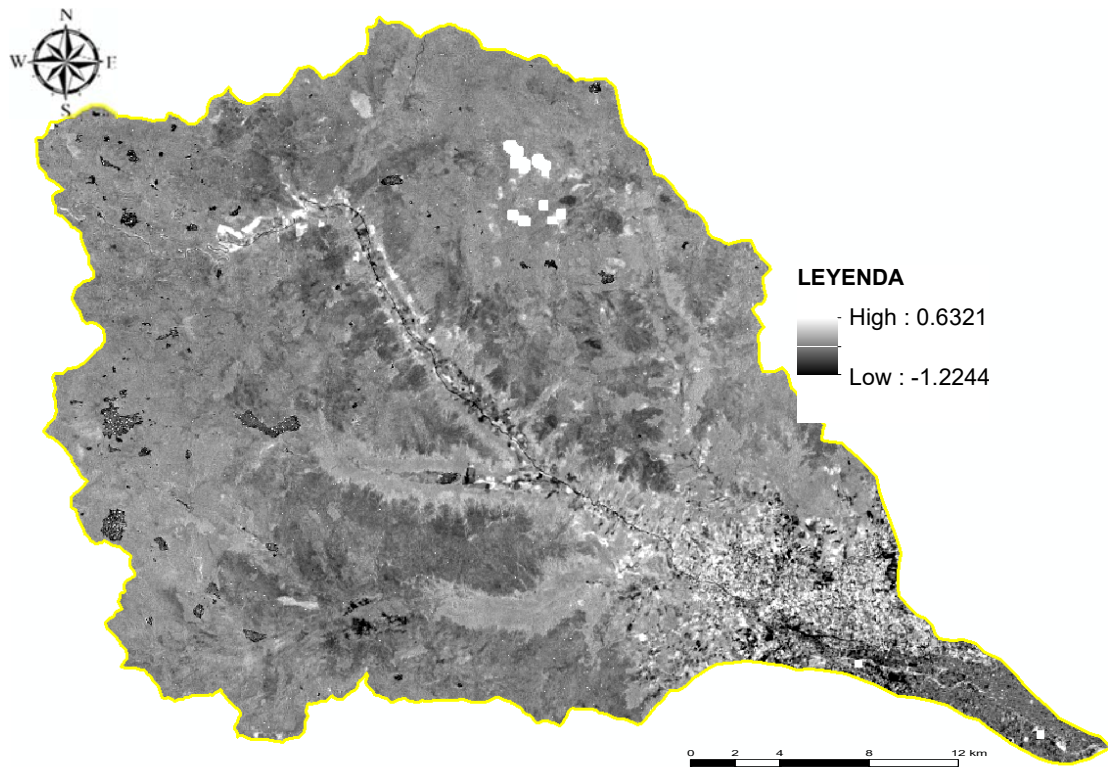


Figura 2.7. Mapa de los cocientes multitemporales de la subcuenca del río Tomebamba.
Fuente: USGS. Elaboración: Propia

2.3. Estimación de cambios de uso del suelo para el año 2030

2.3.1. Mapa de proyección para el año 2030

Los resultados de la validación mediante el estadístico Kappa estuvieron por encima de 0.95 (Kestándar= 0.968, Kno = 0.975, y Klocation = 0.981) por lo cual son considerados aceptables, es decir existe una precisión en la construcción de los escenarios (Viera A. J. & Garrett J. M., 2005).

Validada la información, se procedió a ejecutar los datos para la obtención del mapa de proyección para el año 2030, que se ilustra en la Figura 2.8.

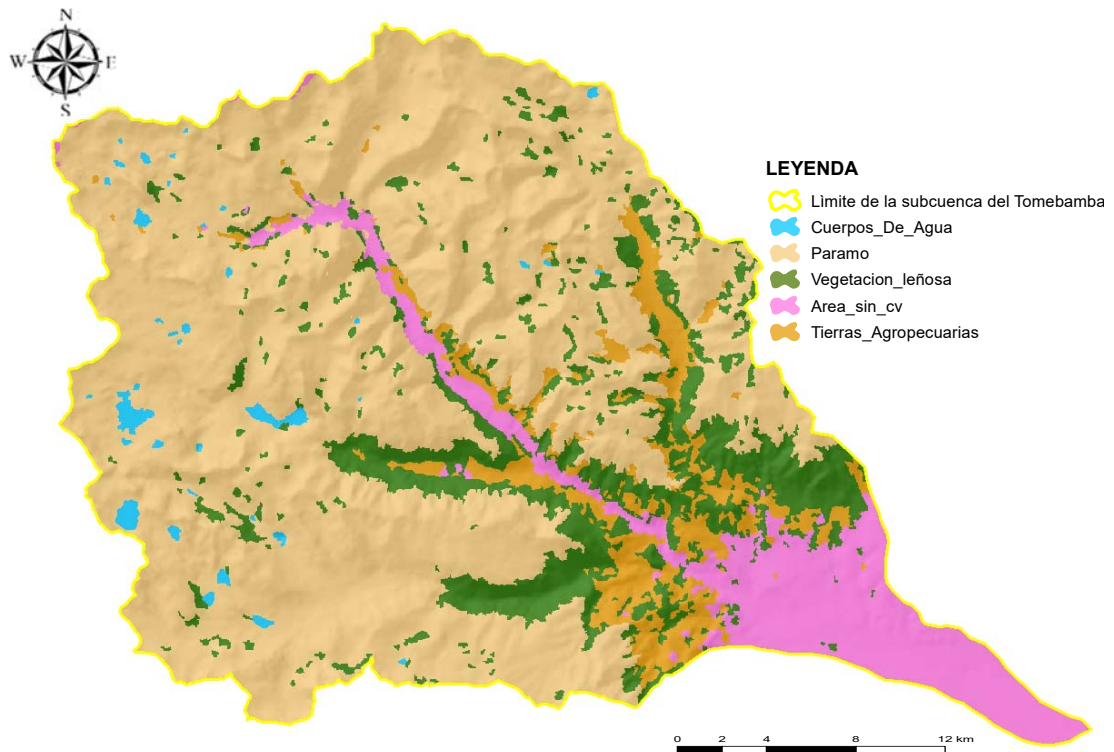


Figura 2.8. Mapa de proyección para el año 2030.

Fuente: USGS. Elaboración: Propia

2.3.1.1. Validación del mapa de cambio de uso del suelo 2030

Los resultados de la validación del mapa generado con Markov al 2015 y el mapa generado con imágenes Landsat a través del algoritmo Validate de Idrisi, existe una alta similitud entre el mapa clasificado y los mapas de probabilidades proyectados a 2030. Todos los estadísticos Kappa estuvieron por encima del 0.9 (Kestándar= 0.941, Kno = 0.953, y Klocation = 0.956), por lo que se considera aceptables (Viera A. J. & Garrett J. M., 2005).

Adicionalmente, en la Tabla 2.4 se detalla la matriz de transición al 2030. En esta los valores marcados con negrita nos indican las superficies que se mantendrán estables entre los años 2015 y 2030. Los valores colaterales indican las superficies de cambio. Con lo cual podemos deducir que el porcentaje de permanencia fue mayor en Páramo (0.91), Vegetación leñosa (0.72) y Área sin cobertura vegetal (0.70). Se destaca que las probabilidades más altas de transición de Páramo a otros usos se registraron en las categorías de Cuerpos de agua (0.33), Tierras agropecuarias (0.28). En el caso de

Vegetación leñosa (0.07) y Área sin cobertura vegetal (0.00) no representan una amenaza para el Páramo.

En el caso de Vegetación leñosa y Área sin cobertura vegetal presentan valores altos con la probabilidad de cambiar a Tierras Agropecuarias con 0.20 y 0.01. Por otro lado, los cuerpos de agua están cambiando con un 0.33 a Páramo y 0.14 para Áreas sin cobertura vegetal. Estas probabilidades son importantes particularmente, ya que se puede analizar que existe una alta probabilidad de amenaza hacia por las Tierras agropecuarias y el Área sin cobertura vegetal. Cabe recalcar que estos resultados son matemáticos y existen transiciones que se podrían estar presentando debido a que no fueron insertadas variables al momento de la ejecución del modelo.

Tabla 2.4. Matriz de probabilidad de transición al 2030 derivado de mapas de uso de suelo 2001 y 2015 a través de modelos de Markov en la subcuenca del Río Tomebamba.

	CA	PR	VL	SC	TA	TOTAL
CA	0.39	0.33	0.09	0.14	0.04	0.99
PR	0.00	0.91	0.02	0.01	0.06	0.99
VL	0.00	0.07	0.72	0.00	0.20	0.99
SC	0.01	0.00	0.01	0.70	0.01	0.99
TA	0.00	0.28	0.18	0.23	0.31	0.99
TOTAL	0.41	1.85	1.02	1.09	0.63	9.99

CA= Cuerpos de agua, PR= Páramo, VL=Vegetación leñosa, SC= Área sin cobertura vegetal, TA= Tierras agropecuarias. Elaboración: Propia

2.4. Análisis de los cambios del uso de suelo de la subcuenca del Río Tomebamba

En cuanto a los cambios que podrían ocurrir a lo largo de la subcuenca del Río Tomebamba en la cobertura de páramo en ciertos espacios hay un decrecimiento de 0.51% que equivale a 299 ha, y un crecimiento en otras áreas de un 0.40 % que equivale a 237 ha. Observándose un mayor cambio de paramo a tierras agropecuarias debido al avance de la frontera agrícola, de la misma manera el paso de páramo a cuerpos de agua es debido a que se podría ocurrir eutrofización en dichas zonas.

En el caso de vegetación leñosa en ciertos espacios hay un decrecimiento de 0.66 % que equivale a 387 ha, y un crecimiento en otras áreas de un 0.28 % que equivale a 162 ha. El mayor cambio se observa de vegetación leñosa a tierras agropecuarias, de

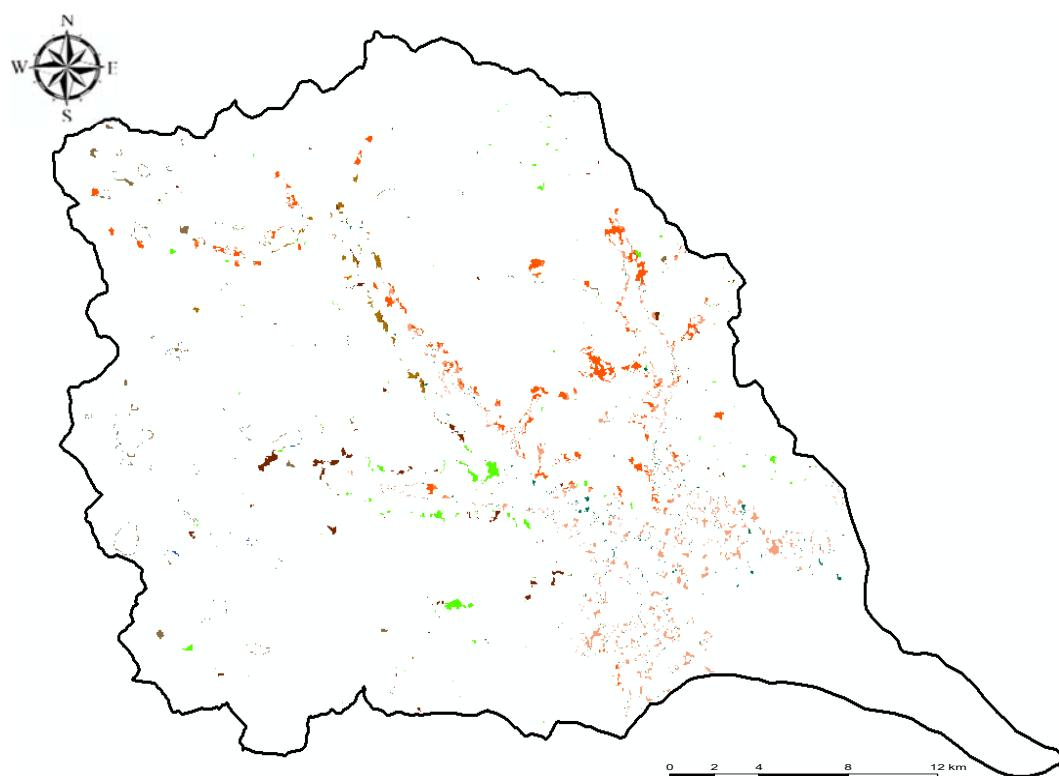
igual manera por el avance de la frontera agrícola. Otro cambio importante es el incremento de vegetación leñosa en ciertas zonas específicas, debido posiblemente a la siembra de plantaciones forestales y en pequeña proporción a la regeneración natural.

En cuerpos de agua en ciertos espacios hay un decrecimiento de 0.18 % que equivale a 106 ha, y crecimiento en otras áreas de un 0.01 % que equivale a 6 ha. Como se mencionó anteriormente existe un decrecimiento en ciertos cuerpos de agua, los mismos que han sido remplazados por paramo. Este cambio se creería que es nuevamente por eutrofización.

En tierras agropecuarias en ciertos espacios hay un decrecimiento de 1.56 % que equivale a 914 ha, y un crecimiento en otras áreas de un 0.79 % que equivale a 461 ha. Y se observa decrecimiento de tierras agropecuarias debido principalmente a la expansión urbana que forma parte de las áreas sin cobertura vegetal. Además, un incremento en estas zonas por la expansión de la frontera agrícola en el páramo y en la vegetación leñosa.

En áreas sin cobertura vegetal en ciertos espacios existe un pequeño decrecimiento de 0.15 % que equivale a 89 ha, además nos indica un importante crecimiento en otras áreas de un 1.58% que equivale a 929 ha, especialmente en tierras agropecuarias debido a la expansión urbana.

Todos estos datos se ilustran en la Figura 2.9 y la Tabla 2.5.



Leyenda

	TOM_LIMITE		Paramo a Tierras Agropecuarias
	Vegetacion leñosa a Tierras Agropecuarias		Tierras Agropecuarias a Paramo
	Tierras Agropecuarias a Vegetacion leñosa		Paramo a Cuerpos de Agua
	Cuerpos de Agua a Tierras Agropecuarias		Cuerpos de Agua a Paramo
	Tierras Agropecuarias a Cuerpos de Agua		Paramo a Vegetacion leñosa
			Vegetacion leñosa a Paramo

Figura 2.9. Mapa de cambios de Cobertura y Uso de Suelo del año 2015 al 2030

Fuente: Mapa de proyección. Elaboración: Propia

Tabla 2.5. Incremento y disminución de las coberturas y usos del suelo en área hectáreas y área en porcentaje del año 2015 al 2030

2015 - 2030	< Área (ha)	>Área (ha)	< Área (%)	>Área (%)
CA	106	6	0.18	0.01
SC	89	929	0.15	1.58
VL	387	162	0.66	0.28
TA	941	461	1.56	0.79
PR	299	237	0.51	0.40

CA= Cuerpos de agua, PR= Páramo, VL=Vegetación leñosa, SC= Área sin cobertura vegetal, TA= Tierras agropecuarias. Elaboración: Propia

2.5. Medidas de prevención para el manejo del suelo rural de protección y producción de la subcuenca del Río Tomebamba

En esta sección nos basaremos en dos aspectos protección y producción. Dentro del cual se han analizado las categorías de uso y cobertura del según su importancia. En protección tenemos Páramo, Vegetación leñosa y Cuerpos de agua, en producción tenemos Tierras agropecuarias y en otros está Área sin cobertura vegetal.

Según la distribución anterior se procederá a dar sugerencias para la planificación de los diferentes usos y coberturas existentes en la subcuenca del río Tomebamba en áreas de protección y producción.

Páramo

Considerando que la mayor amenaza al Páramo es el crecimiento de la frontera agrícola, y al estar esta cobertura dentro de la protección estricta del MAE, se plantea que sea esta institución la encargada de implementar un mayor control en dichas áreas. Por otro lado, se debería generar incentivos por parte de instituciones del estado como el MAG y los GAD's a los agricultores que se encuentren aledaños a las zonas de páramo para que mejoren los espacios en los que actualmente desarrollan sus actividades agropecuarias y de esta manera evitar este problema.

Vegetación leñosa

De acuerdo a la información obtenida, la vegetación leñosa está siendo disminuida principalmente por el avance de la frontera agrícola por lo que se propone realizar las mismas medidas sugeridas para el páramo. De la misma manera, se sugiere que las plantaciones forestales especialmente con especies exóticas sean extraídas y se propicie la regeneración natural. Además, aquellas zonas que no se encuentren dentro de áreas de protección sean consideradas dentro de las mismas.

Cuerpos de agua

Al considerar un decrecimiento en esta zona, se deberían mantener y proteger los causes y drenajes naturales para garantizar la permanencia de estas áreas, correspondiéndole a instituciones como el MAE y SENAGUA el cuidado y manejo de dichas zonas. Por otra parte, para garantizar la cantidad y calidad del agua en otras zonas se recomienda obras físicas (cercado) y biológicas mediante la siembra de especies nativas en los márgenes y fuentes hídricas.

Tierras agropecuarias

Siendo el principal problema en las Tierras agropecuarias la expansión urbana, se recomienda delimitar el área de expansión, debiendo incluirse en los planes de desarrollo y ordenamiento territorial, y a través de ordenanzas controlar el decrecimiento de estas áreas y de esta forma se estaría también evitando el avance de la frontera agrícola hacia espacios como el páramo y la vegetación leñosa.

CAPÍTULO 3:

DISCUSIONES

En base a los resultados obtenidos del análisis multitemporal y la prospectiva al año 2030 respecto a las imágenes utilizadas, se pueden generar varios insumos que permitan realizar una discusión sobre los cambios de uso y cobertura del suelo en la subcuenca del río Tomebamba.

Para la validación de prospectiva el índice Kappa generado supera el 0.95% lo cual concuerda con los resultados obtenidos en un estudio de prospectiva realizado en Villahermosa, Tabasco (Palomeque de la Cruz et al., 2017). Lo cual sustenta que la proyección es confiable para ser representar cambios en el uso del suelo.

En la prospectiva, los cambios están relacionados principalmente con la disminución de cuerpos de agua y tierras agropecuarias, también existe un aumento en área sin cobertura vegetal, recalando que páramo es la cobertura que más se conserva. En el trabajo elaborado por Ramos & Palomeque de la Cruz (2017), muestran una pérdida de cobertura en cuerpos de agua en México entre los años 2010 y 2030 de 1.049 ha (0.7%) respectivamente, esta disminución el autor atribuye a que la cobertura de pastizal presentan una gran probabilidad de transformarse en cuerpos de agua la que podría ser por eutrofización. En esta investigación la pérdida de cuerpos de agua es un 106 ha (0.18) siendo la principal causa la eutrofización de igual manera que el estudio de Ramos y Palomeque de la Cruz.

En el caso de tierras agropecuarias, los resultados nos indican que el principal problema es la expansión urbana la cual forma parte del uso de área sin cobertura vegetal. En el estudio realizado por Pinos (2016) en el cantón Cuenca la cual está inmersa en la parte baja de la subcuenca, corrobora estos resultados, señalando que los usos que incluye la categoría de tierras agropecuarias vienen acompañados de una vivienda aislada y ésta categoría tiene el mayor crecimiento dentro del escenario próximo transformándose a zonas de tejido urbano.

De la misma manera Leonel (2015) en el estudio realizado en Sangolquí-Pichincha, señala que el incremento del área urbana es debido a que los asentamientos rurales

empiezan a desarrollarse disminuyendo los usos agrícolas y pecuarios que en este estudio están dentro de la cobertura de tierras agropecuarias.

En el estudio de Arévalo(2014) en donde realiza una prospectiva entre los años 2001 y 2030 evidenció que en la cobertura páramo en Chimborazo existe un crecimiento de 4621 ha y al mismo tiempo una de pérdida de 10920 ha. De igual forma se observa que en la subcuenca del río Tomebamba se originaría una ganancia 237 ha y pérdida 299 ha en su proyección al año 2030, lo que para esta categoría significaría más pérdida que ganancia, siendo una preocupación para la subcuenca del Tomebamba. Sin embargo, Ruiz (2016) señala que en Cotacachi, el análisis de prospectiva indica que el páramo aumentara en 2.990,34 ha, pero presentando una gran disminución en el resto de usos, lo cual no sería conveniente para la zona de estudio.

CAPÍTULO 4:

CONCLUSIONES

El cambio de uso del suelo ocasionado por actividades humanas u otros motivos es progresivo a lo largo de los años, teniendo en cuenta que existen lugares en los cuales esto debería ser controlado en la subcuenca del Río Tomebamba por su importancia para el tratamiento y abastecimiento de agua para la ciudad de Cuenca, se decidió realizar varios análisis para conocer cuales fueron y cuáles podrían ser los cambios que esta sufra. Los resultados del estudio comprueban la dinámica de los cambios en el uso del suelo. En el periodo analizado (2001-2015) mediante los mapas generados se determinó que el área sin cobertura vegetal fue la que más cambios sufrió en conjunto con los cuerpos de agua, pero podemos recalcar que la cobertura de páramo fue la que más se mantuvo. Además, en cuanto a los análisis multitemporales se puede observar la pérdida de vegetación en la parte baja de la subcuenca progresando hasta la parte media de la misma corroborando los resultados del primer análisis anterior. Posteriormente, en cuanto al análisis de proyección para el año 2030 obtuvimos nuevamente que los cambios fuertes ocurrirán en el área sin cobertura vegetal, observando una expansión en la zona urbana hacia la parte media de la subcuenca ocasionando una disminución en la cobertura de Tierras Agropecuarias, pero en la cobertura del Páramo una vez más los resultados nos indican que se sigue conservando en su mayoría, indicando que las normas establecidas para su cuidado se están respetando pero existiendo zonas que podrían ser conservadas de mejor manera. Finalmente, se puede concluir que para que estos resultados no llegaran a ocurrir o a su vez para mejorar las zonas que tienen un uso inapropiado, se podría fomentar prácticas de manejo adecuado de la subcuenca con la intervención técnica y comprometida de las instituciones correspondientes, ya que con esto obtendremos mantener estable la subcuenca del Río Tomebamba.

BIBLIOGRAFÍA

- Andino, R. E. C., & López, V. L. O. (2017). Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. *Ciencias Espaciales*, 9(1), 81–96. Retrieved from <https://lamjol.info/index.php/CE/article/view/3127/2880>
- Arévalo, W. D. (2014). Determinación De Cambios De La Cobertura Arbórea Usando Imágenes Satelitales Landsat 7Etm+ a Través De Redes Neuronales Artificiales En La Parroquia Achupallas, Canton Alausí, Provincia De Chimborazo, 109.
- Betancourt, P. I., Paola, J., & Mora, M. (2017). *Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en la cuenca del Rio Pauto, departamento del Casanare*. Retrieved from http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5383/1/Informe_final_proyecto_graduado.pdf
- Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. (2017). cartográfica : una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica, 20(2), 265–280.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental : la observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=WiTCXwAACAAJ&dq=teledeteccion+ambiental&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjEwsKzobjdAhWHyVMKH66Be0Q6AEILDAB>
- Chuvieco, E., & Book Print Digital). (2008). *Teledetección ambiental : la observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel.
- Condo, A., & Juela, M. (2017). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y ESTADO ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO TOMBAMBA Y YANUNCAY DURANTE EL AÑO 2015*. Retrieved from http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/27757/1/PROYECTO_TÉCNICO_COMPLETO.pdf
- Gagniuc, P. A. (2017). *Markov chains : from theory to implementation and experimentation* (Third). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Galicia, L. (2014). El cambio de uso de suelo: consecuencias en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua. *AZ Revista de Educación y Cultura*, 82(July), 15–18.
- García, M., Stella, M., Rodríguez, A., Insfrán, O., Rodas, I., & Medina, C. (2017). Análisis multitemporal del cambio de uso de la tierra en el Departamento de Alto Paraguay,

- Paraguay. Retrieved from
<http://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/422/373>
- George, J., Baby, L., Arickal, A. P., & Dev Vattoly, J. (2016). Land Use/ Land Cover Mapping With Change Detection Analysis of Aluva Taluk Using Remote Sensing and GIS, 4(2). Retrieved from <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Girón, A. &, & Patarroyo, L. (2016). *CSISNE” PLUGIN PARA LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE IMÁGENES SATELITALES MEDIANTE EL USO DEL ALGORITMO PERCEPTRÓN MULTICAPA BASADOS EN REDES NEURONALES*. BOGOTÁ, COLOMBIA. Retrieved from
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5182/1/GirónGómezAndreaNiyibeth2016.pdf>
- Griffiths, P., Kuemmerle, T., Kennedy, R. E., Abrudan, I. V., Knorn, J., & Hostert, P. (2012). Using annual time-series of Landsat images to assess the effects of forest restitution in post-socialist Romania. *Remote Sensing of Environment*, 118, 199–214. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.11.006>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V, Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science (New York, N.Y.)*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Instituto de Ecología (Mexico), J. M., Juan Pérez, J. I., Pineda Jaimes, N. B., Cadena Vargas, E. G., Bravo Peña, L. C., & Sánchez López, M. (2015). *Madera y bosques. Madera y bosques* (Vol. 21). Instituto de Ecología. Retrieved from
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712015000100008&script=sci_arttext&tlng=pt
- Javier, C., & Rodríguez López, Y. (2016). *Ingeniería hidráulica y ambiental. Ingeniería Hidráulica y Ambiental* (Vol. 37). Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Retrieved from
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000200004
- Lanfredi, M., Coppola, R., Simoniello, T., Coluzzi, R., D’Emilio, M., Imbrenda, V., ... Macchiato, M. (2015). Early Identification of Land Degradation Hotspots in Complex Bio-Geographic Regions. *Remote Sensing*, 7(6), 8154–8179. <https://doi.org/10.3390/rs70608154>
- Lencinas, J., & ASiebert, A. (2009). Forest survey based on satellite imagery: spatial

- resolution and scale, *I7*, 101–105. Retrieved from <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/v17a11.pdf>
- Leonel, J. (2015). Departamento de ciencias de la tierra y la construcción carrera de ingeniería geográfica y del medio ambiente.
- Ministerio del Ambiente. (2018a). Cobertura y Uso de la Tierra (CUT 2018). Retrieved September 20, 2019, from <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>
- Ministerio del Ambiente. (2018b). Ecuador, primer país Latinoamericano, sede del Día Mundial de Lucha contra la Desertificación y la Sequía | Ministerio del Ambiente. Retrieved September 12, 2018, from <http://www.ambiente.gob.ec/ecuador-primer-pais-latinoamericano-sede-del-dia-mundial-de-lucha-contra-la-desertificacion-y-la-sequia/>
- Mishra, V., Rai, P., & Mohan, K. (2014). Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: A case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*, 64(1), 111–127. <https://doi.org/10.2298/IJGI1401111M>
- Nájera, O., Bojórquez, J., Cifuentes, J., & Marcelino, S. (2010). Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. *Biociencias*, 1(1), 19–29.
- NASA. (2019). Landsat 9 «Landsat Science.
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamaigua, S., & Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 310–326. Retrieved from <https://www.lamjol.info/index.php/CE/article/view/2055/1850>
- Palomeque-De la Cruz, M. Á., Galindo-Alcántara, A., Escalona-Maurice, M. J., Ruiz-Acosta, S. del C., Sánchez-Martínez, A. J., & Pérez-Sánchez, E. (2016). Analysis of land use change in an urban ecosystem in the drainage area of the Grijalva river, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(1), 105–120. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.03.018>
- Palomeque de la Cruz, M. A., Galindo Alcántara, A., Pérez Sánchez, E., Sánchez, A. D. J., Escalona Maurice, M. J., Palomeque de la Cruz, M. Á., ... Escalona Maurice, M. J. (2017). Modelos geomáticos con base en transición para el análisis espacial en Villahermosa, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 253. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.48>
- Pflugmacher, D., Cohen, W. B., & E. Kennedy, R. (2012). Using Landsat-derived

- disturbance history (1972–2010) to predict current forest structure. *Remote Sensing of Environment*, 122, 146–165. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.09.025>
- Piedra Aguilera Alexandra. (2017). *ESTUDIO AMBIENTAL (ExPost) DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE PARA LA CIUDAD DE CUENCA EN SU ETAPA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO*. Retrieved from <https://maeazuay.files.wordpress.com/2017/03/estudio-ambiental-expost-del-sistema-de-abastecimiento-de-agua-potable-para-la-ciudad-de-cuenca-en-su-etapa-de-operacion3b3n-y-mantenimiento.pdf>
- Pinos-Arévalo, N. (2016). Prospective land use and vegetation cover on land management - Case canton Cuenca. *Estoa*, 5(9), 7–19. <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.02>
- Pinos, N. (2016). Prospectiva del uso de suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial - Caso cantón Cuenca. *Estoa*, 5(9), 7–19. <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.02>
- Puma, F., & Lopez, E. (2015). *ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA PARA LA CUENCA DEL RIO TOMBAMBA EN MONAY*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21701/1/TESIS.pdf>
- Ramos, R., & Palomeque de la Cruz, M. Á. (2017). Modelación del cambio de uso del suelo en Comalcalco, Tabasco, México. *Revista de Urbanismo*, (37), 1. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2017.47986>
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E., W., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... 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>
- Ruiz, F. (2016). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA DE PÁRAMO EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO APUELA, CANTÓN COTACACHI, PROVINCIA DE IMBABURA*.
- Sandoval Bayona, E. C., & García Rodríguez, K. A. (2018). Análisis Multitemporal de la Deforestación del Páramo de Sumapaz, por Medio de Imágenes LANDSAT ETM y LANDSAT OLI TIRS del Año 2002 al 2017. Retrieved from <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7896>
- Santos, R. R., Lazalde, J. R. V., Maurice, M. J. E., Posadas, H. M. de los S., & Hernández, M. J. P. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de

- cambio de uso de suelo. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 72-81 p.
- Sidhu, N., Rishi, M. S., & Singh, R. (2016). Spatio-Temporal Study of the Distribution of Land Use and Land Cover Change Pattern in Chandigarh, India Using Remote Sensing and GIS Techniques. In *Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment* (pp. 785–789). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18663-4_121
- USGS. (2017). Product Guide, 24(2), 1–16.
- Viera A. J., & Garrett J. M. (2005). Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic. *Family Medicine*, 37(5), 360–363. Retrieved from http://www1.cs.columbia.edu/~julia/courses/CS6998/Interrater_agreement.Kappa_statistics.pdf
- Wang, L., Huang, J., Du, Y., Hu, Y., & Han, P. (2013). Dynamic assessment of soil erosion risk using landsat TM and HJ satellite data in danjiangkou reservoir area, China. *Remote Sensing*, 5(8), 3826–3848. <https://doi.org/10.3390/rs5083826>
- Wiegand, C., Rutzinger, M., Heinrich, K., Geitner, C., Wiegand, C., Rutzinger, M., ... Geitner, C. (2013). Automated Extraction of Shallow Erosion Areas Based on Multi-Temporal Ortho-Imagery. *Remote Sensing*, 5(5), 2292–2307. <https://doi.org/10.3390/rs5052292>
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55(3), 601–644. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.55.601>

ANEXOS

Anexo 1. Descripción de bandas entre Landsat 7 y 8

Landsat 7 ETM+		Landsat 8 OLI	
Número de banda	Descripción	Número de banda	Descripción
		1	Coastal / Aerosol – 30 metros
1	Blue – 30 metros	2	Blue – 30 metros
2	Green – 30 metros	3	Green – 30 metros
3	Red – 30 metros	4	Red – 30 metros
4	NIR – 30 metros	5	NIR – 30 metros
5	SWIR – 30 metros	6	SWIR – 30 metros
6	TIR – 60 metros	10	TIR – 1 – 100 metros
7	SWIR -2 – 30 metros	11	TIR – 2 – 100 metros
8	Pan – 15 metros	7	SWIR -2 – 30 metros
		8	Pan – 15 metros
		9	Cirrus – 30 metros

Elaboración: Propia

Anexo 2. Reporte de análisis de la firma Cuerpos de Agua.

	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 1 C_info = cuerpos_de_agua
	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 8 C_info = cuerpos_de_agua
Jeffries-Matusita distance	1.8635398941489976
Spectral angle	2.7963775228650256
Euclidean distance	86.05393298779079
Bray-Curtis similarity [%]	95.11976467292338

	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 1 C_info = cuerpos_de_agua
	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 9 C_info = cuerpos_de_agua
Jeffries-Matusita distance	1.9983578823435095
Spectral angle	8.794528575293413
Euclidean distance	266.80419809504275
Bray-Curtis similarity [%]	81.32951461633694

	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 1 C_info = cuerpos_de_agua
	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 10 C_info = cuerpos_de_agua
Jeffries-Matusita distance	1.7242008978379308
Spectral angle	3.688264581286116
Euclidean distance	106.40862934410886
Bray-Curtis similarity [%]	93.66150175398731

	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 1 C_info = cuerpos_de_agua
	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 2 C_info = cuerpos_de_agua
Jeffries-Matusita distance	1.1529318766177354
Spectral angle	1.8407391225656025
Euclidean distance	30.34411821384904
Bray-Curtis similarity [%]	98.63259339991029

	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 1 C_info = cuerpos_de_agua
	MC_ID = 1 MC_info = cuerpos_de_agua C_ID = 3 C_info = cuerpos_de_agua
Jeffries-Matusita distance	1.6485381910299466
Spectral angle	2.715647724075558
Euclidean distance	39.41361429366441
Bray-Curtis similarity [%]	98.16396248254698

Elaboración: Propia

Anexo 3. Reporte de análisis de la firma Páramo.

	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 20 C_info = paramo
	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 24 C_info = paramo
Jeffries-Matusita distance	1.9999980267261634
Spectral angle	0.8400640982829918
Euclidean distance	161.87767280382081
Bray-Curtis similarity [%]	97.0821046096539

	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 20 C_info = paramo
	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 25 C_info = paramo
Jeffries-Matusita distance	1.9998932203036934
Spectral angle	2.8004485118455165
Euclidean distance	334.2214568549157
Bray-Curtis similarity [%]	94.91461983571399

	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 20 C_info = paramo
	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 26 C_info = paramo
Jeffries-Matusita distance	1.999999998587548
Spectral angle	1.6586554654494037
Euclidean distance	239.76922237851954
Bray-Curtis similarity [%]	96.48324369052544

	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 20 C_info = paramo
	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 27 C_info = paramo
Jeffries-Matusita distance	1.9999874325779385
Spectral angle	1.162766232911501
Euclidean distance	209.8008287760133
Bray-Curtis similarity [%]	96.94307501984896

	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 20 C_info = paramo
	MC_ID = 2 MC_info = paramo C_ID = 28 C_info = paramo
Jeffries-Matusita distance	1.9999999897063987
Spectral angle	1.0149145488536397
Euclidean distance	176.29690865128612
Bray-Curtis similarity [%]	97.24360270145596

Elaboración: Propia

Anexo 4. Reporte de análisis de la firma Vegetación leñosa.

	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 160 C_info = vegetacion_lenosa
	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 161 C_info = vegetacion_lenosa
Jeffries-Matusita distance	1.3106147280320504
Spectral angle	1.113204481125224
Euclidean distance	193.36123929730687
Bray-Curtis similarity [%]	96.32878405455982

	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 160 C_info = vegetacion_lenosa
	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 162 C_info = vegetacion_lenosa
Jeffries-Matusita distance	1.974437421392001
Spectral angle	4.021029395336596
Euclidean distance	176.49741850557928
Bray-Curtis similarity [%]	95.79940417080437

	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 160 C_info = vegetacion_lenosa
	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 163 C_info = vegetacion_lenosa
Jeffries-Matusita distance	1.1766405629074133
Spectral angle	1.7422444198034408
Euclidean distance	129.1510972356014
Bray-Curtis similarity [%]	97.10262272569543

	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 160 C_info = vegetacion_lenosa
	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 164 C_info = vegetacion_lenosa
Jeffries-Matusita distance	1.9488696584908527
Spectral angle	6.103429763306168
Euclidean distance	796.0708280760009
Bray-Curtis similarity [%]	85.01780900728521

	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 161 C_info = vegetacion_lenosa
	MC_ID = 3 MC_info = vegetacion_lenosa C_ID = 162 C_info = vegetacion_lenosa
Jeffries-Matusita distance	1.872931568461956
Spectral angle	4.652234704357892
Euclidean distance	229.06781679528453
Bray-Curtis similarity [%]	95.84376447136755

Elaboración: Propia

Anexo 5. Reporte de análisis de la firma Áreas sin cobertura vegetal.

	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 2 C_info = area_sin_cv
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 17 C_info = area_sin_cv
Jeffries-Matusita distance	1.9999203414074451
Spectral angle	3.9131192311934075
Euclidean distance	316.738411846354
Bray-Curtis similarity [%]	96.69689646723249
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 2 C_info = area_sin_cv
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 18 C_info = area_sin_cv
Jeffries-Matusita distance	1.9981795924449597
Spectral angle	2.822845407176117
Euclidean distance	293.2746382313889
Bray-Curtis similarity [%]	97.81294582338553
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 2 C_info = area_sin_cv
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 19 C_info = area_sin_cv
Jeffries-Matusita distance	1.9956529339600442
Spectral angle	3.4824297967255
Euclidean distance	474.78944059138655
Bray-Curtis similarity [%]	96.06861796445085
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 2 C_info = area_sin_cv
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 20 C_info = area_sin_cv
Jeffries-Matusita distance	1.9965915572673796
Spectral angle	2.461571255847828
Euclidean distance	198.93802017948644
Bray-Curtis similarity [%]	97.81081155089126
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 2 C_info = area_sin_cv
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 21 C_info = area_sin_cv
Jeffries-Matusita distance	1.9991375538524372
Spectral angle	3.6914841983574997
Euclidean distance	376.6959346639918
Bray-Curtis similarity [%]	95.81110224008663
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 2 C_info = area_sin_cv
	MC_ID = 4 MC_info = area_sin_cv C_ID = 22 C_info = area_sin_cv
Jeffries-Matusita distance	1.999999999599305
Spectral angle	6.572422367261006
Euclidean distance	525.0303879930341
Bray-Curtis similarity [%]	94.57869801259028

Elaboración: Propia.

Anexo 6. Reporte de análisis de la firma Tierras agropecuarias.

	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 86 C_info = pastizal
	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 91 C_info = pastizal
Jeffries-Matusita distance	1.7739240199883761
Spectral angle	1.5883987939996789
Euclidean distance	276.7761329626848
Bray-Curtis similarity [%]	97.09883584392928

	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 86 C_info = pastizal
	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 92 C_info = pastizal
Jeffries-Matusita distance	1.3584345402896991
Spectral angle	0.6951840909786222
Euclidean distance	161.3609344986496
Bray-Curtis similarity [%]	98.49282061817598

	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 86 C_info = pastizal
	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 93 C_info = pastizal
Jeffries-Matusita distance	1.9493472615790457
Spectral angle	2.147270122034182
Euclidean distance	460.3181150714612
Bray-Curtis similarity [%]	94.73485278680995

	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 88 C_info = pastizal
	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 92 C_info = pastizal
Jeffries-Matusita distance	1.999994077717972
Spectral angle	2.1873685767502744
Euclidean distance	860.5814686520556
Bray-Curtis similarity [%]	90.08905447579872

	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 88 C_info = pastizal
	MC_ID = 5 MC_info = tierras_agropecuarias C_ID = 93 C_info = pastizal
Jeffries-Matusita distance	1.910356987041778
Spectral angle	0.7845568392533837
Euclidean distance	274.0619205363784
Bray-Curtis similarity [%]	96.83478299640456

Elaboración: Propia

Anexo 7. Fotografías paisajísticas de la subcuenca del Río Tomebamba de acuerdo a niveles de análisis

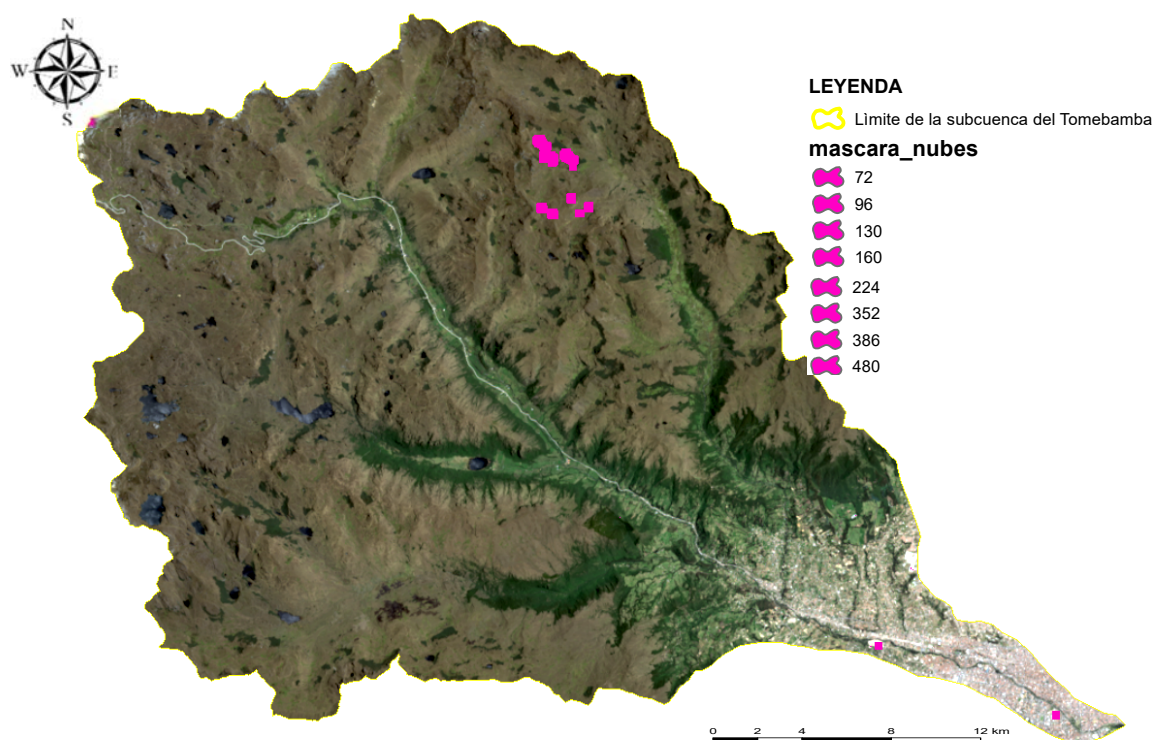
Nivel	Descripción fotográfica	Código
Cuerpos de Agua		1

Páramo		2
Plantación forestal		3
Área sin cobertura vegetal		4
Tierras agropecuarias		5

Anexo 8. Tabla de definiciones de los índices de vegetación.

Índice	Formula	Definición
NDVI	$\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	Índice de vegetación de diferencia normalizada. Indicando la vegetación presente según la coloración de la vegetación(USGS, 2017).
EVI	$EVI = G * ((NIR - R) / (NIR + C1 * R - C2 * B + L))$	Índice de vegetación mejorado. Indicando la presencia de la vegetación en regiones con abundante biomasa(USGS, 2017)
SAVI	$((NIR - R) / (NIR + R + L)) * (1 + L)$	Índice de vegetación ajustado al suelo. Indicando la reflectividad del suelo, aislando la información de la vegetación que se encuentra sobre él(USGS, 2017).
MSAVI	$(2 * NIR + 1 - \sqrt{((2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - R))}) / 2$	Índice modificado de vegetación ajustado al suelo. Indicando la reflectividad del suelo en áreas con una gran cantidad de superficie expuesta al suelo(USGS, 2017).

Elaboración: Propia



Anexo 9. Mapa de nubes presentes en las imágenes de los años 2001 y 2015.

Elaboración: Propia