DINÁMICAS DE CAMBIO DE LAS COBERTURAS VEGETALES PERTENECIENTES A LA MICROCUENCA DEL RÍO SOACHA PARA EL PERIODO DE 1999 A 2040

-Municipio de Soacha, Colombia-

.

Dynamics of change of landcover use belonging to the micro- watershed of the river Soacha for the period of 1999 to 2040

-Municipality of Soacha, Colombia-

Harold E. Pineda Valles

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA FORESTAL
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA
2019

DINÁMICAS DE CAMBIO DE LAS COBERTURAS VEGETALES PERTENECIENTES A LA MICROCUENCA DEL RÍO SOACHA PARA EL PERIODO DE 1999 A 2040

-Municipio de Soacha, Colombia-

Harold E. Pineda Valles
hepinedav@correo.udistrital.edu.co
hepv_123@hotmail.com

Semillero de Investigación:
AGUA Y TERRITORIO

Trabajo de grado en modalidad de investigación-innovación como requisito para optar por el título de INGENIERO FORESTAL

Luis Fernando Ortiz Quintero
Biólogo; Magister en Geografía y Análisis Ambiental
- Director -

Rodolfo Franco
Ingeniero Forestal; Especialista en Sistemas de Información Geográfica
- Evaluador -

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA FORESTAL
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA
2019

Resumen

Las dinámicas de cambio de las coberturas pueden generar consigo el deterioro ambiental de amplias zonas del paisaje, actualmente debido a la explosión demográfica acelerada, se evidencia en el espacio un crecimiento urbano descontrolado y no planificado; convirtiéndose en uno de los principales factores para la transformación de coberturas naturales y productivas por otro tipo de áreas, principalmente para uso de carácter residencial; las coberturas naturales son las que tienen mayor presión y se ven afectadas por acciones antrópicas. El municipio de Soacha ha experimentado en las últimas décadas un aumento poblacional acelerado y asociado a diversas condiciones socioeconómicas de la población, a la conurbación con la capital y a una planeación desbordada y escasa, ha generado el crecimiento del borde urbano afectando amplios sistemas naturales, actualmente el Río Soacha se ha convertido en un caño receptor de múltiples fuentes contaminantes. Este estudio provee un análisis de las dinámicas de cambio de las coberturas vegetales en el área de la microcuenca del Río Soacha para un periodo de análisis entre 1999 a 2040. Se emplearon imágenes multiespectrales de acceso libre (Landsat y Sentinel) para el procesamiento digital e identificación de clases de coberturas en el área, la dinámica de cambio se realizó a partir del empleo de matrices de transición e índices del paisaje de composición, configuración espacial, conectividad y heterogeneidad a nivel estructural del paisaje, esto con el fin de comprobar su comportamiento espacio-temporal de transformación durante el periodo de evaluación, de igual manera se utilizó el Land Change Modeler para predecir los potenciales de transición de las coberturas con una red neuronal artificial e incluyendo variables de influencia, la predicción fue realizada por medio de cadenas de Márkov. En la microcuenca se evidencian diversos cambios en su espacio, siendo el más importante y a su vez el que mayor preocupación genera, el aumento del tejido urbano, las coberturas naturales de los bosques fragmentados y los arbustales sufren la mayor presión, disminuyendo con el paso del tiempo su superficie; la transformación son de un orden superior al 50% en la zona, lo que indica el alto grado de intervención que existe en el área, siendo el escenario degradativo de coberturas el más fuerte; el paisaje exhibe claramente un proceso de fragmentación para todas sus coberturas, con mayores repercusiones para los arbustales, los bosque naturales en cambio presentan un patrón de agregación pero con disminución notoria de su superficie (perdida de hábitat); la heterogeneidad del paisaje se complejiza con el paso de los años; las proyecciones de las coberturas siguen manteniendo el patrón de la dinámica de cambio, consolidando para años posteriores al tejido urbano como la cobertura dominante mientras que las coberturas vegetales y productivas se reducen. Todas las implicaciones anteriores buscan articularse en la planificación territorial y las transiciones socio-ecológicas para la sostenibilidad.

Palabras claves: Análisis espacial, Aprendizaje automático, Crecimiento urbano, Ecología del paisaje, Modelamiento, Red neuronal, Transformación.

Abstract:

The dynamics of change of the coverage can generate with it the environmental deterioration of large areas of the landscape, currently uncontrolled and unplanned urban growth in space due to the population explosion is one of the main factors for the transformation of natural and productive coverage by other types of areas, mainly residential; natural coverages are the ones that have the greatest pressure and are affected by anthropic actions. The municipality of Soacha has experienced in the last decades an accelerated population increase and associated to diverse socioeconomic conditions of the population, to the conurbation with the capital and to an overflowed and scarce planning, has generated the growth of the urban edge affecting wide natural systems, currently the Soacha River has become a receiving channel of multiple polluting sources. This study provides an analysis of the dynamics of change of plant cover in the area of the Soacha River basin for a period of analysis from 1999 to 2040. Multispectral images of free access (Landsat and Sentinel) were used for digital processing and identification of classes of coverage in the area, the dynamics of change were made from the use of transition matrices and landscape indexes of composition, spatial configuration, connectivity and heterogeneity at the structural level for the landscape, this in order to verify their spatial-temporal transformation behavior during the evaluation period, in the same way the Land Change Modeler was used to predict the transition potentials of the coverage with an artificial neural network and including variable of influence, the prediction was made by means of chains of Márkov. In the micro-basin there are several changes in its space, the most important and I get the most concern is the increase in the urban fabric, the natural coverage of fragmented forests and shrubs suffer the greatest pressure, decreasing over time surface; the transformation is of an order superior to 50% in the zone, which indicates the high degree of intervention that exists, being the degradative scenario of coverage the strongest; the landscape clearly exhibits a process of fragmentation for all its coverings, with greater repercussions for the shrubs; natural forests, on the other hand, present a pattern of aggregation but with a marked decrease in their area; the heterogeneity of the landscape becomes more complex over the years; Coverage projections continue to maintain the pattern of the dynamics of change, consolidating for subsequent years the urban fabric as the dominant coverage while plant and productive coverage are reduced. All the previous implications seek to be articulated in territorial planning and socio-ecological transitions for sustainability.

Key words: *Landscape ecology, Machine learning, Modeling, Neuronal red, Spatial analysis, Transformation, Urban growth*.

Tabla de Contenido

Resumen **1**
Abstract 2
1. Introducción **6**
2. Justificación **8**
3. Planteamiento del Problema **9**
4. Objetivos **10**
4.1. Objetivo General 10
4.2. Objetivos Específicos 10
5. Marco Teórico **11**
5.1. Marco Conceptual 11
5.1.1. Clasificación de Imágenes Satelitales *11*
5.1.2. Análisis de Dinámicas de Cambio *14*
5.1.3. Ecología del Paisaje *15*
5.1.4. Modelación de Cambio de Coberturas *17*
5.2. Antecedentes 19
5.2.1. Clasificación Supervisada de Imágenes Satelitales *20*
5.2.2. Evaluación de Dinámicas de Cambio *20*
5.2.3. Modelación de Tendencias de Cambio *22*
6. Área de Estudio **23**
6.1. Localización 23
6.2. Clima 24
6.3. Hidrografía 24
6.4. Coberturas Vegetales 25
6.5. Componente Socioeconómico 26
7. Metodología **27**
7.1. Fase 1: Recopilación de Información 27
7.2. Fase 2: Procesamiento de Información 29
7.2.1. Software Empleados *29*
7.2.2. Delimitación de la microcuenca del Río Soacha *29*
7.2.3. Clasificación de Coberturas *30*
7.3. Fase 3: Verificación en Campo 32
7.4. Fase 4: Análisis de Dinámicas de Cambio 33
7.4.1. Dinámicas de cambio *33*
7.4.2. Matrices de transición *33*
7.4.3. Análisis de paisaje *33*
7.5. Fase 5: Modelación de Tendencias de Cambio 36
8. Resultados **38**
8.1. Delimitación de la microcuenca del Río Soacha 38
8.2. Clasificación de Coberturas 41
8.2.1. Preprocesamiento de Clasificación *41*
8.2.2. Clasificación Supervisada de Imágenes Satelitales *43*
8.2.3. Validación de la clasificación *47*
8.3. Análisis de Dinámicas de Cambio 55
8.3.1. Dinámica de las coberturas vegetales través del tiempo *55*
8.3.2. Perdida y Ganancia Neta de Coberturas *57*

8.3.3. Matrices de Transiciones de Cambio de Coberturas *61*
8.3.4. Métricas de Paisaje *69*
8.4. Modelamiento de Tendencia de Cambio 78
8.4.1. Análisis de Cambios *79*
8.4.2. Potenciales de Transición *83*
8.4.3. Predicción de Tendencias de Cambio *90*
8.4.4. Validación *98*
9. Discusión **100**
9.1. Clasificación de Imágenes Satelitales 100
9.2. Dinámicas de Cambio 101
9.3. Modelación de Transformaciones 102
10. Conclusiones **104**
11. Recomendaciones **106**
Agradecimientos 107
12. Bibliografía **108**

Índice de Tablas

Tabla 1. Índices del paisaje 16
Tabla 2. Distribución de la microcuenca 23
Tabla 3. Coberturas vegetales en la cuenca del Río Soacha 25
Tabla 4. Imágenes satelitales obtenidas del portal EarthExplorer 27
Tabla 5. Leyenda CLC de clasificación 31
Tabla 6. Matriz de cambio de uso 33
Tabla 7. Métricas de paisaje a evaluar 34
Tabla 8. Diferencias de área de la microcuenca 40
Tabla 9. Combinación de bandas 44
Tabla 10. Calculo NDVI 45
Tabla 11. Validación de clasificación de imágenes satelitales 47
Tabla 12. Verificación en campo 48
Tabla 13. Matriz de Confusión para la validación 50
Tabla 14. Matriz de errores y exactitud de la clasificación 51
Tabla 15. Dinámica de cambio de coberturas 55
Tabla 16. Distribución geográfica de cambio de coberturas 58
Tabla 17. Matrices de transición 62
Tabla 18. Matriz de Cambio-Persistencia 63
Tabla 19. Matriz de cambio de Coberturas 65
Tabla 20. Matriz de carácter de cambio 67
Tabla 21. Métricas del paisaje 69
Tabla 22. Conectividad espacial 74
Tabla 23. Heterogeneidad del paisaje 76
Tabla 24. Valores de V Cramer 83
Tabla 25. Potenciales de transición de cambio de coberturas 86
Tabla 26. Tasa de precisión del MLP 89
Tabla 27. Matriz de transición para el año 2030 91
Tabla 28. Matriz de transición para el año 2040 91
Tabla 29. Dinámica de cambio de coberturas en el área de estudio 93
Tabla 30. Proyección de dinámica de cambio para la microcuenca del Río Soacha 95
Tabla 31. Validación del modelo 99

Índice de Figuras

Figura 1. Bandeado en imágenes satelitales Landsat 7 11
Figura 2. Matriz de confusión 13
Figura 3. Matriz de transición 15
Figura 4. Esquema de funcionamiento de MLP 18
Figura 5. Localización microcuenca Río Soacha 23
Figura 6. Histograma de precipitación 24
Figura 7. Población del municipio de Soacha 26
Figura 8. DEM ALOS PALSAR (12.5 m) 28
Figura 9. Imágenes de ortofotomosaico escala 1:10.000 29
Figura 10. Delimitación de microcuenca 30
Figura 11. Gap Fill - Restauración de imagen satelital 31
Figura 12. Pan Sharpening para la mejora de resolución espacial 32
Figura 13. Land Change Modeler - TerrSet 18.21 36
Figura 14. Diagrama de flujo de metodología para LCM 36
Figura 15. Esquema metodológico empleado para el análisis y modelamiento espacial 37
Figura 16. Comparación de microcuenca Río Soacha 38
Figura 17. Diferencia de punto de desembocadura del Río Soacha 39
Figura 18. Delimitación microcuenca Río Soacha 40
Figura 19. Gap-Fill imagen Landsat 7 2009 41
Figura 20. Pan Sharpening imagen Landsat 7 1999 42
Figura 21. Contraste lineal 43
Figura 22. Combinación de Bandas 44
Figura 23. Índice NDVI 45
Figura 24. Gráficos de dispersión de ROI´s 46
Figura 25. Suavizado en la clasificación 53
Figura 26. Clasificación de coberturas 54
Figura 27. Dinámica de cambio de coberturas 56
Figura 28. Cambio porcentual de la dinámica de cambio 56
Figura 29. Pérdidas y ganancias en el tiempo 57
Figura 30. Transición de cambio y persistencia 64
Figura 31. Transición de cambio de coberturas 66
Figura 32. Transición de carácter de cambio 68
Figura 33. Composición y configuración espacial 71
Figura 34. Índice de forma 73
Figura 35- Conectividad espacial 75
Figura 36. Heterogeneidad del paisaje 77
Figura 37. Insumos LCM 78
Figura 38. Ganancias y pérdidas de coberturas 79
Figura 39. Cambio neto de coberturas 80
Figura 40. Mapa de persistencia de coberturas 81
Figura 41. Áreas de pérdidas y ganancias de coberturas 82
Figura 42. Variables del modelo 84
Figura 43. Panel de activación de submodelos de transición 85
Figura 44. Potencial de transición 92
Figura 45. Proyección de coberturas vegetales 94
Figura 46. Proyección de dinámica de cambio para la microcuenca 96
Figura 47. Proyecciones de cambio de coberturas 97

1. Introducción

Las dinámicas de cambio de coberturas vegetales se pueden definir como la perdida de cubierta vegetal asociada a un proceso degradativo principalmente por factores antrópicos, que generan una pérdida del potencial de uso de los bienes y servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas para el bienestar humano y biológico (Torres, *et al.*, 2016).

Sin duda alguna uno de los mayores factores de deterioro ambiental esta dado por un crecimiento urbano descontrolado y no planificado en el espacio, el cual reclama áreas naturales y productivas para el establecimiento residencial, así lo comprueba (Achicanoy, *et al.*, 2018). Con lo cual se deben de realizar reconsideraciones acerca de la conservación de la biodiversidad y el desarrollo de las ciudades, donde se articule diversas acciones de la mano con organizaciones a nivel regional para orientar procesos que contribuyan a alcanzar objetivos trazados en generar un hábitat efectivo y sostenible hacia el logro de una equidad humana y territorial.

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación, asociado a su proceso dinámico a través del análisis temporal permiten tener referentes para conocer las transiciones de distintos sucesos de perturbación que conllevan a la pérdida de biodiversidad (Camacho-Sanabria *et al., 2015),* volviéndose un herramienta que permite identificar y representar espacialmente las áreas más susceptibles a procesos de transformación y en ocasiones son empelados para el desarrollo de modelos de cambio en diferentes escenarios hipotéticos.

La modelación de las transiciones de cambio de coberturas vegetales integradas a factores biofísicos y la dinámica del paisaje en el tiempo, puede contribuir a generar intervenciones de planificación social y ambiental (Jiménez, 2019), esto puede ser tomado como pautas que ayuden a el equilibrio en la balanza del desarrollo sostenible y progreso de las poblaciones. Sobre la base de las consideraciones anteriores (Andrade, *et al.*, 2018) señala que se requiere del diseño y la planificación de transiciones socio-ecológicas para el futuro de las ciudades y los paisajes rurales, que conduzcan a Colombia hacia la sostenibilidad

Algunos estudios en el municipio de Soacha indican las transformaciones que ha sufrido, siendo evidente la alta expansión del tejido urbano, aproximándose a un patrón exponencial durante las últimas décadas (Gonzáles, 2010). La conurbación del municipio con la cuidad, la mala planeación administrativa a nivel territorial, la inequidad social y diversos factores socioeconómicos han contribuido a la perdida de áreas naturales y productivas (Cantillo & Murcia, 2015). Los estudios presentados por (Forero, 2015) y (Medina, 2012) indican la presión actual que vive la subcuenca del Río Soacha y principalmente en su eje hídrico.

Diversos estudios de análisis multitemporal a partir de sistemas de información geográfica apoyan la idea de que estos son herramientas apropiadas para la determinación de dinámicas de cambio a escala de paisaje (Leguizamón & Puentes, 2016) y (Mendoza & García, 2011); las reconsideraciones del manejo actual que vive la microcuenca del Río Soacha propuestas por (Ruiz, J. 2012), requieren de la generación de escenarios a futuro, con lo cual la simulación y modelamiento del paisaje puede articularse a la planificación y toma de decisiones (Rimal *et al.*, 2017).

El presente estudio tiene como propósito determinar las dinámicas de cambio de las coberturas vegetales pertenecientes a la microcuenca del Río Soacha para un periodo de evaluación desde el año de 1999 y poder proyectarlo hacia el periodo de 2040, esta investigación se vincula al semillero de investigación "Agua y Territorio" articulado a su vez en el grupo de investigación "PROPOBOS" del proyecto curricular de ingeniería forestal, soportado en su línea de investigación de dinámica y zonificación de paisajes forestales, con el fin de poder identificar la configuración espacial de los usos del suelo a lo largo del tiempo y pronosticar las transiciones a futuro de las coberturas en el área de interés; constituyéndose como un aporte al conocimiento ya que genera nociones que apoyan una planificación que equilibre las necesidades de la sociedad creciente y la protección de los recursos naturales y productivos en la región

El contenido del presente trabajo de investigación muestra en su parte inicial la justificación asociada a las diversas presiones que se ven sometidas las coberturas vegetales y las problemáticas que esto conlleva, seguido del planteamiento del problema de investigación que tiene como objetivo analizar, determinar y formular el comportamiento de las coberturas vegetales dentro de la microcuenca del Río Soacha.

En el marco teórico, en su parte conceptual se incluye información clave sobre clasificación, dinámica de cambio, ecología del paisaje y modelación; para luego presentar los antecedentes de mayor relevancia sobre estudios en el área, la clasificación supervisada de imágenes satelitales, la evaluación de dinámicas de transición y la modelación de tendencia de cambio. Después de lo anterior expuesto, se presenta una descripción básica del área de estudio y se desvela el esquema metodológico diseñado en cinco fases de operación.

Posteriormente, se encuentran los resultados y su análisis, asociados a la delimitación correcta de la microcuenca, la clasificación supervisada realizada para la categorización de las coberturas vegetales, el análisis de las dinámicas de cambio y transformación del paisaje y el respectivo modelamiento para los periodos de 2030 y 2040. En la discusión se comparan los resultados obtenidos con otros estudios relacionados, enfocados a los ítems principales de la investigación; para finalmente establecer las conclusiones del estudio y algunas recomendaciones para posteriores investigaciones.

2. Justificación

Las altas presiones a las que se ven sometidas las coberturas vegetales generan dinámicas de perturbación y perdida de ecosistemas estratégicos; el municipio de Soacha experimento según (Dureau & Gouëset, 2011) la integración de manera física a la urbe de la capital, siendo considerada hoy en día como "ciudad-dormitorio", sigue presentando múltiples inequidades sociales, siendo esto un factor que vinculado al crecimiento poblacional del municipio durante las últimas décadas, desencadeno el incremento exponencial del tejido urbano, transformando sus coberturas naturales y productivas por áreas de tipo residencial de forma legal e ilegal por medio de barrios de invasión en zonas no aptas para este uso.

El deterioro ambiental dentro de la microcuenca del Río Soacha es notorio como lo indican diversos autores (Forero, 2015); (Bautista & Pérez, 2018) y (Ruíz, 2012); la principal problemática asociada a las transformaciones de coberturas vegetales se debe al crecimiento demográfico que vive el municipio, el detrimento ambiental y a una baja concientización de la población. (León, 2012) caracteriza algunos de los conflictos ambientales que suceden en el área debido a la explotación minera de materiales para construcción (arcillas, arenas y recebos), el cual ha generado un escenario en donde Soacha se ha volcado a la minería sin tener en cuenta su sostenibilidad ecológica en el tiempo.

La toma de decisiones debe estar basada en principios técnicos, la CAR mediante resolución 1278 de 2016, determina la zona de protección del Río Soacha; el presente estudio establece las dinámicas de cambio que ha sufrido la microcuenca durante los últimos años, y como la eliminación de la vegetación natural puede incurrir en una pérdida de funciones reguladoras y protectoras de las aguas; haciéndose necesario reglamentar una zona de protección ambiental del cauce del río Soacha, regular el uso del agua para las diferentes actividades mineras, instaurar restricciones para construcciones ubicadas sobre la zona de ronda del cauce; señalamientos presentado en el POT del municipio. (Alcaldía Municipal de Soacha, 2018). Todas estas disposiciones deben ser establecidas por los tomadores de decisiones de manera integral y participativa con la comunidad.

La mala ordenación del espacio físico puede ser entendida de acuerdo a su dinámica de transformación, (Aguilera, 2008) desarrolla criterios de planificación a partir de la modelación de las dinámicas de cambio por la aglomeración urbana; por su lado (Valbuena, 2011) indica que el seguimiento de los cambios en la coberturas permite identificar procesos de expansión y colonización, lo que permite tomar decisiones sobre la planificación territorial que se ajusten a los procesos dinámicos de las diversas actividades productivas de una región y que contribuyan a la sostenibilidad ecológica.

Finalmente, entendiendo que el fenómeno de expansión urbana se ha incrementado exponencialmente debido al crecimiento poblacional, generando consigo un impacto ambiental a los ecosistemas circundantes a los asentamientos urbanos (Achicanoy, *et al.*, 2018). Este trabajo proyecta las dinámicas de transformación, el modelamiento, la expansión urbana y el cambio de coberturas vegetales sobre la microcuenca del Río Soacha, que permite vislumbrar nociones para generar una planificación que equilibre las necesidades de la sociedad creciente y la protección de los recursos naturales y productivos.

3. Planteamiento del Problema

Los cambios de coberturas vegetales están dados por eventos naturales y antrópicos, estos últimos constituyen el principal motor de transformación de coberturas vegetales y están asociados a actividades humanas como la minería, la agricultura y a las transiciones de uso del suelo para áreas de carácter residencial (Cortés, 2017). Todo esto genera un impacto directo sobre la biodiversidad y hábitats naturales; constituyéndose en una de las principales preocupaciones para los países en desarrollo, ya que debido al rápido crecimiento poblacional que se ha experimentado durante los últimos años, se ha generado un ordenamiento no planificado, el cual ha contribuido a un rápido deterioro ambiental y a una expansión urbana no ordenada.

El municipio de Soacha presenta la población con mayor tasa de crecimiento urbanístico y demográfico para Colombia (Ruíz, 2012); lo que ha generado consigo una escasa planificación, siendo esta pobre y desbordada en su capacidad, y combinada con una serie de factores socioeconómicos de las personas asentadas en el municipio, condujo a la conurbación con la capital. Toda esta expansión se ha dado en una serie de ecosistemas estratégicos y áreas productivas para cultivos y pastizales.

(Bautista & Pérez, 2018) expresan que se hace imperativo lograr una priorización y reconsideración del manejo actual que se está dando a los recursos naturales en el municipio de Soacha debido al progresivo deterioro y presión que se genera en las cuencas hidrográficas. Para el caso de la microcuenca del Río Soacha, gran cantidad de sus arroyos y quebradas afluentes han desaparecido por diversos factores; (Forero, 2015) indica que este río se ha convertido en un caño receptor de aguas residuales contaminadas; debió al vertido directo de aguas residuales domiciliarias de sectores urbanos y suburbanos, y a todos los procesos asociados de los sectores agrícola, pecuario y de la industria minera de cielo abierto de explotación de materiales para construcción que opera sobre el área de influencia de la subcuenca y que incide además en elevados niveles de sedimentación dentro de la cuenca.

Entendiendo que los cambios de ocupación en el territorio no son homogéneos en el espacio ni en el tiempo, esta investigación busca dar respuesta a preguntas como:

- ¿Cuáles son las dinámicas de cambio de las coberturas en la microcuenca del Río Soacha durante las últimas dos décadas?

- ¿Cuál ha sido el proceso de estructura y configuración espacial de las coberturas a lo largo del tiempo?

- ¿Se puede predecir las transformaciones a futuro de las coberturas vegetales para la microcuenca del Río Soacha?

4. Objetivos

4.1.Objetivo General

Analizar las dinámicas de cambio de las coberturas vegetales pertenecientes a la microcuenca Río Soacha para el periodo de 1999 al 2040.

4.2.Objetivos Específicos

- Establecer la clasificación de coberturas vegetales mediante imágenes satelitales Landsat 7 y Sentinel 2 a partir de procesamiento digital, basado en la metodología Corine Land Cover.

- Determinar las dinámicas de cambio de las coberturas por medio de matrices de transición y la heterogeneidad espacial del paisaje por medio de métricas.

- Formular un modelo de tendencia de cambio de las coberturas para los años 2030 y 2040, basado en los potenciales de transición empleando una red neuronal artificial por medio del software Land Change Modeler – TerrSet 18.21.

5. Marco Teórico

5.1.Marco Conceptual

5.1.1. Clasificación de Imágenes Satelitales

De acuerdo a (Borràs *et al*., 2017) la clasificación digital es el proceso por el que a cada elemento contenido en una imagen satelital se le asigna una categoría, la clasificación supervisada fuerza el resultado para que se corresponda con coberturas previamente definidas por el usuario; y según (Mata, *et al*., 2014) en este proceso algunas veces se requiere realizar operaciones básicas relacionadas con correcciones y calibración de la imágenes satelitales, como media de preprocesamiento.

- **Preprocesamiento de Imágenes Satelitales**

Partiendo del hecho señalado por (Chen, *et al*., 2011) acerca de las fallas presentadas en el escáner del corrector de línea de exploración del sensor ETM+ del satélite Landsat 7, se hace necesario la corrección del bandeado generado en las imágenes de este satélite para poder emplearlas como insumo en procesamientos digitales. Este proceso puede realizarse con una transformación lineal de los valores de pixeles medios de cada banda cercanos a las brechas de la imagen satelital (Scaramuzza, *et al.*, 2004).

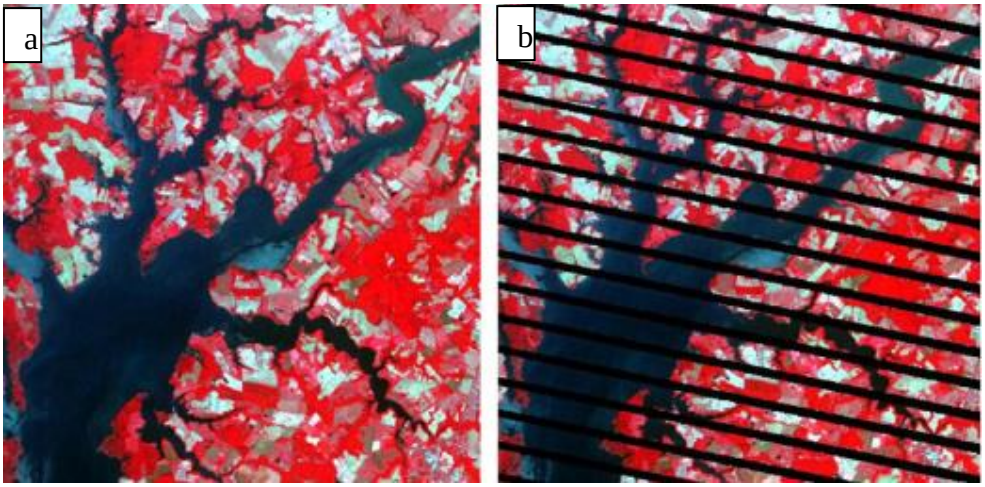


Figura 1. Bandeado en imágenes satelitales Landsat 7
a. Imagen sin fallas, b. Imagen con errores de bandeo
Fuente: (Chen, *et al.*, 2011)

(Scaramuzza, *et al.*, 2004) realiza la transformación lineal empleando la siguiente formula, a partir de los pixeles validos en la imagen para rellenar los *Gaps*:

$$Y \approx GX + B$$
$$G = \frac{\sigma y}{\sigma x}$$
$$B = \bar{Y} - G\bar{X}$$

Donde:
Y matriz de escena corregida.
G ganancia del histograma de la imagen para corregir las brechas.
B sesgo empleado para coincidir las brechas con los demás pixeles.
X matriz de escena de relleno.
$\bar{Y}$ media de la matriz de la escena corregida.
$\bar{X}$ media de la matriz de relleno.
σy desviación estándar de la imagen primaria.
σx desviación estándar de los datos de la imagen de relleno.

El mejoramiento de resolución espacial de las imágenes satelitales expresadas en la patente de (Laben *et al*., 2000) por medio del el algoritmo Gram-Schmidt Pan Sharpening, combina los datos multiespectrales de las bandas de mayor resolución pancromáticas, con las respuesta espectral de las de menor resolución, interpolando las estadísticas de mejor resolución de la banda pancromática y ajustándolas para que coincidan con los esquemas de las bandas multiespectrales, mejorando su resolución espacial en un proceso automático.

- **Clasificación Supervisada**

La clasificación de imágenes satelitales puede ser supervisada o no supervisada. El método supervisado es más preciso, pero requiere de una interpretación por medio de la delimitación de áreas de entrenamiento o puntos de muestreo en campo (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2018), concluyen que el algoritmo de *Maximum Likelihood*, es uno de los más precisos que existe, ampliamente empleado en teledetección y fácil de manejar. (Toro Espín, *et al*., 2015) india que la clasificación por el algoritmo de máxima verosimilitud o máxima probabilidad, parte del supuesto de que los valores de reflectividad en cada una de las clases siguen una distribución de probabilidad normal multivariante; con lo cual, a cada pixel se le categoriza finalmente en la clase cuya probabilidad de pertenencia sea mayor; de esta manera se pueden hacer ajustes previos en el proceso, ya que se obtiene un número de píxeles sin clasificar, pudiendo retomar la fase de entrenamiento para derivar nuevas categorías o corregir las ya existente.

- **Post-Clasificación de Imágenes Satelitales**

Dentro de los procesos de post-clasificación encontramos el suavizado y la validación de la categorización de las coberturas vegetales, el primero como lo menciona (Franco & Rodríguez, 2004) permite generalizar las áreas y evitar la aparición posterior de polígonos muy pequeños imperceptibles a la escala de trabajo; por su parte el proceso de validación se realiza con el empleo de una matriz de confusión, la cual permite mostrar la precisión de los resultados de la clasificación (Cortés, 2017); estos resultados son comparados con información real del terreno (G*round truth*). En la matriz las filas expresan el expresan el número de píxeles asignados a una clase, mientras que las columnas los valores verdaderos en pixeles apoya de información auxiliar.

(Mas, *et al.*, 2003) indica que en la diagonal de la matriz se expresa el número de sitios de la clasificación donde existe concordancia entre el mapa realizado y los datos de referencia, mientras que las demás celdas indican los datos erróneos.

	Mapa				
Referencia	1	2	...	q	Total
1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1q}	p_{1+}
2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2q}	p_{2+}
...	...	...	...	...	...
q	p_{q1}	p_{q2}	...	p_{qq}	p_{q+}
Total	p_{+1}	p_{+2}	...	p_{+q}	

Figura 2. Matriz de confusión
Fuente: (Mas, *et al.*, 2003)

Derivada de la matriz de confusión se pueden calcular diversos índices de confiabilidad como lo son: la precisión global (*overall accuracy*), la precisión del productor (*producter accuracy*) y del usuario (*user accuracy*), el coeficiente Kappa y los errores de comisión y omisión (Cortés, 2017).

- ***Overall accuracy***: Pondera el número de píxeles correctamente clasificados.

$$Overall\ acuracy = \frac{\sum_{i=1}^{r} Xii}{N}$$

Donde:
r es el número de filas de la matriz.
X_{ii} es el número de observaciones en la fila $_i$ y la columna $_i$ (diagonal).
N número total de pixeles de referencia.

- **Coeficiente Kappa**: Indica el grado de concordancia de la exactitud de la clasificación con los valores designados a cada categoría y los del terreno. Un valor Kappa igual a 1 indica un ajuste perfecto, mientras un valor cercano a 0 sugiere un mal proceso.

$$Kappa = \frac{N\sum_{i=1}^{r} Xii - \sum_{i=1}^{r}(X_{i+} * X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{r}(X_{i+} * X_{+i})}$$

Donde:
r es el número de filas de la matriz.
X_{ii} es el número de observaciones en la fila $_i$ y la columna $_i$ (diagonal).
X_{i+} pixeles totales en la fila $_i$.
X_{+i} pixeles totales en la columna $_i$.
N número total de pixeles de referencia.

- ***Producter accuracy***: Indica la probabilidad de que un píxel de referencia del terreno sea ubicado en la categoría designada para la clasificación. Su desviación estándar produce el error de *omisión*.

$$Producter\ accuracy = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} * 100$$

Donde:

X_{ii} es el número de observaciones en la fila $_i$ y la columna $_i$ (diagonal).

X_{i+} pixeles totales en la fila $_i$.

- **U*ser accuracy***: Indica la probabilidad de que un píxel clasificado represente la categoría de los pixeles tomados del terreno. Su desviación estándar produce el error de *comisión*.

$$User\ accuracy = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} * 100$$

Donde:

X_{ii} es el número de observaciones en la fila $_i$ y la columna $_i$ (diagonal).

X_{+i} pixeles totales en la columna $_i$.

5.1.2. Análisis de Dinámicas de Cambio

La dinámica de transformaciones o cambio de las coberturas vegetales es un proceso importante que ofrece el potencial de determinar perturbaciones y otros cambios que ocurren en los territorios, a partir de su representación espacial; su análisis por lapsos del tiempo proporciona las modificaciones que se llevan a cabo en nuestras áreas de interés. (Riaño, 2002).

Los análisis multitemporales según (Mendoza & García, 2011) permiten generar el reconocimiento correspondiente a las variaciones en el tiempo de las coberturas o clases definidas en un área, identificando las transformaciones que suceden en las cubiertas a través del tiempo, presentando su estado, condición y modificación a la que se ven sometidos diversos recursos naturales por medio del procesamiento digital de imágenes satelitales. Los cambios de las coberturas vegetales como lo indican (Morales-Hernández, *et al.*,2016) pueden ocurrir de manera natural debido a procesos de sucesión, variaciones climáticas, erupciones volcánicas o huracanes; en este mismo sentido también pueden ocurrir cambios de tipo antropogénicos siendo los factores demográficos, socioeconómicos y políticos los que contribuyen a las transiciones de las coberturas principalmente vegetales por otro tipo; siendo la intervención humana la que ha producido mayores transformaciones sobre la superficie terrestre durante los últimos años.

El monitoreo espacio-temporal de la dinámica de cambio de coberturas y uso del suelo puede realizarse a partir del empleo de una matriz de transición, según (Farfán *et al.*, 2016) este es un análisis que consiste en la sobreposición cartográfica cruzada, generando una tabulación en un intervalo de tiempo de dos fechas. Las transiciones de cambio de coberturas están representadas en la figura siguiente (figura 3), donde el eje horizontal de las clases indica las coberturas para una fecha inicial *x*, mientras que las columnas representan los usos para una fecha *y*, dada por el segundo periodo de evaluación; por su lado, la diagonal en este caso

representa la superficie que permanece sin cambio durante el periodo estimado, mientras que las demás celdas exhiben la transición de una cobertura *i* a una cobertura *j*.

		Fecha 2				Suma total fecha 1(P_{i+})	Pérdida (L_i)	Cambio total (Ct)
		Cat 1(j)	Cat 2	Cat 3	Cat$j$			
Fecha 1	Cat 1(i)	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{1j}	P_{1+}	P_{1+}-P_{11}	= L + G
	Cat 2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{2j}	P_{2+}	P_{2+}-P_{22}	
	Cat 3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{3j}	P_{3+}	P_{3+}-P_{33}	
	Cat$_i$	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{ij}	P_{i+}		
	Suma total fecha 2 (P_{+j})	P_{+1}	P_{+2}	P_{+3}	P_{+j}	1		
	Ganancia (G_j)	P_{+1}-P_{11}	P_{+2}-P_{22}	P_{+3}-P_{33}				

Figura 3. Matriz de transición
Fuente: (Farfán *et al.*, 2016)

La ganancia de área por coberturas (G_j), es estimada por la sustracción de la superficie total de área para una cobertura $_j$ en el segundo periodo de evaluación versus su persistencia.

$$G_j = \left(P_{+j}\right) - (P_{jj})$$

Donde:
(P_{+j}) área total de una clase cobertura para la segunda fecha.
(P_{jj}) persistencia de una clase de cobertura.

La pérdida de área por coberturas (L_i) se estima por diferenciación de superficie inicial versus su persistencia.

$$L_i = (P_{i+}) - (P_{jj})$$

Donde:
(P_{i+}) área total de una clase cobertura para el periodo inicial.
(P_{jj}) persistencia de una clase de cobertura.

Y finalmente. Para la estimación del cambio total de una cobertura, se realiza por la suma de las ganancias y las pérdidas para cada clase. (Farfán *et al.*, 2016).

5.1.3. Ecología del Paisaje

De acuerdo a (Troll,1939) citado por (Vila, *et al.*, 2006) la definición de ecología del paisaje (*landscape ecology*) puede ser interpretada como *"el estudio de toda la complejidad de relaciones causa-efecto que existen entre las comunidades de seres vivos y sus condiciones ambientales en una sección específica de paisaje"*, con el fin de analizar las interacciones de los patrones espaciales y los procesos ecológicos en la heterogeneidad espacial del paisaje.

Su análisis está sustentado en tres niveles: 1.Fragmento o Parche; 2.Clase y 3.Paisaje, (McGarigal, K., Marks, 1994) y (McGarigal, *et al.*, 2012), con lo cual se pueden cuantificar cinco grandes tipos de índices o métricas del paisaje para realizar estudios de los rasgos del paisaje y su comportamiento a nivel de composición, estructura, configuración, funcionalidad y temporalidad.

Tabla 1. Índices del paisaje

No.	Métrica	Descripción	Principales índices
1	**Índices de área, superficie, densidad y variabilidad**	Presenta la configuración y estructuración espacial del paisaje, ya que se centra en las características de dimensión y número de fragmentos que conforman el área de estudio.	●Área ●Perimeter ●Radius of Gyration ●Total (Class) Area ●Percentage of Landscape ●Largest Patch Index ●Total Edge ●Edge Density ●Total Area ●Largest Patch Index ●Total Edge ●Edge Density
2	**Índices de forma**	Exterioriza la configuración y el funcionamiento del paisaje, ya que se concentra en las características de forma de los fragmentos que constituyen un determinado paisaje.	●Perimeter-Area Ratio ●Shape ●Fractal Dimension ●Related Circumscribing Circle ●Contiguity ●Perimeter-Area Fractal Dimension ●Perimeter-Area Fractal Dimension
3	**Índices de ecotono y hábitat interior**	Manifiesta la relación funcional del paisaje y su estructura, expresadas en el efecto borde que se puede generar en las coberturas y su fragilidad, ya que realiza cálculos sobre la amplitud del ecotono en relación con el hábitat interior.	●Core Area ●Number of Core Areas ●Core Area Index ●Total Core Area ●Core Area Percentage of Landscape ● Number of Disjunct Core Areas ●Disjunct Core Area Density ●Total Core Area ●Number of Disjunct Core Areas ●Disjunct Core Area Density
4	**Índices de distancia, vecindad y conectividad**	Revela el nivel de conectividad física del paisaje y su aislamiento ya que calcula la distancia desde el hábitat de borde y ecotono de un fragmento hasta el parche más próximo al mismo tipo.	●Euclidean Nearest-Neighbor Distance ●Proximity ●Similarity ● Interspersion and Juxtaposition ●Percentage of Like Adjacencies ●Aggregation ●Clumpiness ●Number of Patches ●Patch Density ●Landscape Division ●Splitting ●Effective Mesh Size ●Connectance ●Contagion ●Aggregation
5	**Índices de diversidad del paisaje**	Indica la heterogeneidad del paisaje, ya que aportan información relevante para la comprensión de los paisajes y evolución en el tiempo.	●Patch Richness ●Patch Richness Density ●Relative Patch Richness ●Shannon's Diversity ●Simpson's Diversity ●Modified Simpson's Diversity ●Shannon's Evenness ●Simpson's Evenness ●Modified Simpson's Evenness

Adaptado de: (McGarigal, *et al.*, 2015) y (Vila, *et al.*, 2006).

5.1.4. Modelación de Cambio de Coberturas

La modelación de transiciones de coberturas puede ser obtenida a partir del empleo de datos históricos, con el fin de determinar los cambios sucedidos con anterioridad y las dinámicas que se presentan en las coberturas y usos del suelo. (Iizuka *et al*., 2017) señala que existen diversos métodos del modelado de cambio del uso del suelo, pudiéndose clasificar en seis enfoques: 1. Machine learning (aprendizaje automático) y estadístico, 2. Autómatas celulares, 3. Basados en el sector económico, 4. Desagregación espacial económica, 5. Basado en agentes y 6. Con enfoques híbridos. Siendo el aprendizaje automático con enfoque de redes neuronales y el *Multi-Layer Perceptron*, herramientas poderosas para predecir comportamientos complejos y relaciones entre transiciones terrestres y fuerzas motrices de cambio.

La predicción y simulación de las transiciones de cambio de coberturas vegetales son un insumo útil para la planificación del territorio; el empleo del *Land Change Modeler* para la sostenibilidad ecológica así lo demuestra (Rimal et al., 2017), (Mishra, *et al.*, 2014). Este software puede proporcionar un análisis completo de los cambios en el uso del suelo mediante la generación de mapas y gráficos de las trasformaciones del suelo, transiciones y tendencias de las coberturas vegetales; y ayuda a generar predicciones de cambios e intervenciones de planificación, con escenarios integrados a diversos factores biofísicos. (Jiménez, 2019).

- **Variables de influencia**

Las variables de influencia y el poder determinable de cada una dentro del modelo son expresados mediante una prueba rápida en el LCM, el cual evalúa su potencial explicativo usando la medida de asociación V de Cramer (*Cramer´s V*). (Cortés, 2017) señala esto como un coeficiente de contingencia, siendo una medida de relación estadística basada en X^2 (Chi cuadrado), que compara la distribución observada de los datos con una distribución esperada de los mismos datos; siendo una medida del grado de asociación o relación entre dos o más series de atributos dentro del modelo de transición. Su cálculo esta dado con la siguiente ecuación:

$$V\ Cramer = \sqrt{\frac{X^2}{n\ (\min\{r, c\} - 1)}}$$

Donde:
X^2 chi cuadrado.
n tamaño de la muestra.
min{r,c} es el menor entre ambos valores filas y columnas.

(Eastman, J., 2012) indica que el valor de V de Cramer está en un rango de cero a uno (0-1), presentando menor grado cuando entre las variables no hay relación, con un valor intermedio existe una correlación relativamente intensa y valores iguales a la unidad indican que hay una relación perfecta. En el panel de prueba y selección de variables determinantes del LCM

se obtiene resultados generales y a nivel de clase para cada cobertura; al ser estos 0.15-0.4 se convierten útiles el empleo de la variable seleccionada; superiores a 0.4 una adecuada relación, mientras que rangos inferiores a 0.15 indican que la variable tiene muy poca relación con el cambio y es mejor descartarla y no emplearla.

- **Red Neuronal Artificial: Multi-Layer Perceptrón**

La modelación de las transiciones puede ser realizadas por el perceptrón multicapas (*Multi-Layer Perceptron* – MLP), el cual permite modelar múltiples transiciones al mismo tiempo, su funcionamiento puede ser automático o modificado por los parámetros e índices de aprendizaje a emplear (Clark Labs, 2016). Una red neuronal consiste de un número de nodos interconectados, simulando el funcionamiento del cerebro humano, cada uno de este nodo está interconectado a las capas que le anteceden y le preceden; estas conexiones tienen asociadas pesos (Cortés, 2017). El entrenamiento del MLP requiere muestras de pixeles que hayan cambiado entre en dos fechas de las capas de entrada, como de igual manera necesita muestras de todas las clases persistentes para poder modelar las transiciones. El MLP usa la mitad de la muestra para el entrenamiento y la otra mitad para la validación. (Eastman, J., 2012).

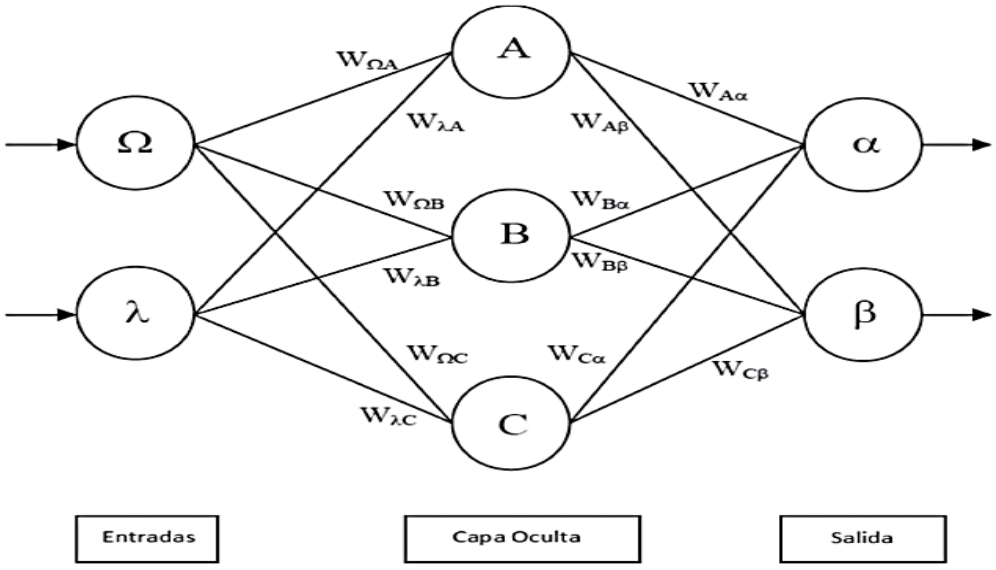


Figura 4. Esquema de funcionamiento de MLP
Fuente: (Mercado, *et al.*, 2015)

El MLP propuesto por Rumelhart como se cita en (Mercado, *et al.*, 2015) es el componente principal de una red neuronal artificial y está formada por una capa de entrada, al menos una capa oculta y una capa de salida; y es capaz de identificar relaciones de naturaleza no lineal. (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2014) mencionan que el empleo de las redes neuronales es útil para la resolución de problemas de búsqueda y reconocimiento de patrones, ya que ayudan a determinar comportamientos a lo largo de secuencias temporales, facilitando la simulación de la dinámicas espacio-temporal que pueden ocurrir por el cambio de uso del suelo a partir de modelos probabilísticos explícitos de las transiciones de coberturas.

- **Predicción de Cambio**

La predicción del cambio de coberturas a futuro se realiza a partir de cadenas de Márkov, el cual como lo señala (Eastman, J., 2012) es un procedimiento combinado de autómata celular y predicción de cambios Márkov, sumando elementos de contigüidad espacial y distribuciones potenciales de las transiciones analizadas. El estado de un sistema en un tiempo *Y*, puede predecirse por el estado del sistema en el tiempo *X* anterior, a partir de una matriz de probabilidades de transición de cada clase de cobertura hacia las otras clases.

Las cadenas de Márkov son un proceso estocástico discreto, donde una serie de sucesos de cambio, ocurren con la probabilidad de que la alteración depende solamente del evento inmediato anterior. (Valbuena, 2011) señala que la transición del estado *i* hacia el estado *j*, se da por la probabilidad de *j* remplace a *i*; y puede darse en tantos *x* pasos como se presenta en la matriz siguiente.

$$P^x = \begin{vmatrix} p_{11}^x & p_{21}^x & . . & p_{1n}^x \\ . & . & . . & . \\ p_{1n}^x & p_{2n}^x & . . & p_{nn}^x \end{vmatrix}$$

Donde:

$P^x=p^x$ donde P es la matriz de transición de una cadena de Márkov y la matriz de transición de *x* pasos, es la *x*-ésima potencia a la que es sometida en él análisis.

Siendo esto una secuencia $x_1, x_2, x_3 \ldots x_n$ variables; el valor de x_n es el estado del proceso en el tiempo n para cada clase.

$$P^i = (Px_2 = X_2, Px_1 = X_1 \ldots Px_n = n, Px_n = X_n)$$

Donde:

Xi es el estado del proceso en el instante *i*.

5.2.Antecedentes

Las transformaciones de las coberturas vegetales en el municipio de Soacha son evidentes, estudios realizados por (Gonzáles, 2010) así lo demuestran mediante un análisis espacio-temporal de cambio desde 1981 hasta el año de 2007 y determinó como la principal fuerza conductora de transformación la expansión urbana tanto del municipio como impulsada por la propia cuidad de Bogotá D.C., lo que genero la conurbación con el distrito capital, esto debido a una mala planeación desbordada por factores socioeconómicos de migraciones de población desplazada, con bajos recursos y en busca de incorporación social; el crecimiento de la población se acento sobre otro tipo de coberturas favoreciendo la expansión del tejido urbano y generando perdida de áreas naturales y productivas. (Cantillo & Murcia, 2015) determinaron el índice de crecimiento urbanístico para las últimas décadas en el municipio de Soacha, para el periodo de 2004 a 2015 la expansión del área urbana es de 140.82%, haciendo una transición de del uso del suelo rural a urbano.

Por otra parte, en referencia a la microcuenca del Río Soacha (Forero, 2015) indica que debido a vertimientos agrícolas, pecuarios, industriales y domiciliarios sobre el Río Soacha, se generan altos índices de contaminación de fósforo, nitrógeno y coliformes, principalmente en la parte media y baja de la subcuenca, exponiendo a múltiples riesgos a pobladores y animales que habitan en el área de influencia. De igual manera, (Medina, 2012) informa que las principales problemáticas asociadas al Río Soacha se deben al crecimiento de la población y la falta de planeación, el desecho directo de las aguas negras y basuras por parte de la comunidad y a factores de riesgo por inundaciones en viviendas aledañas al río.

(Ruiz, J. 2012) señala que se necesita una gestión territorial, ya que la subcuenca del río Soacha y el propio municipio viene siendo sometido a graves y progresivos deterioros ambientales, con lo que se hace necesario reconsiderar el manejo actual que existe.

Actualmente la CAR presenta la resolución 1278 del 09 de junio del 2016, "*Por medio de la cual se determina la zona de protección del Río Soacha*", en esta se hace mención de generar una ronda de protección al río con una franja localizada a 30 m, al lado y lado del cauce, que sirva de conservación, restauración y uso sostenible del recurso hídrico, así como de la protección del paisaje forestal y las coberturas naturales presentes de la zona. (CAR, 2016).

5.2.1. Clasificación Supervisada de Imágenes Satelitales

Múltiples estudios señalan que el algoritmo de clasificación de máxima verosimilitud es uno de los que mejores resultados presenta a la hora de realizar una categorización de coberturas supervisada. (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2018) comparan múltiples algoritmos para el proceso de clasificación de coberturas en el bosque seco de Gaunacaste, Costa Rica; analizando el comportamiento del *Minimum Distance*, *Mahalanobies*, *Maximum Likelihood*, *Neural Network*, *Support Vector Machine* y *Parallelepiped*, para la categorización de cinco clases (bosque tardío, bosque temprano, bosque intermedio, bosque de galería, pastos, manglar), siendo los que mejores resultados presentan el de máxima verosimilitud y la red neuronal frente a los otro cuatro algoritmos.

Un ejemplo del empleo del algoritmo de máxima verosimilitud con adecuados resultados de clasificación lo da (Mata, *et al.*, 2014) en el análisis de la fragmentación de un paisaje en México, mostraron valores altos de exactitud global, siendo estos superiores al 90%, en seis clases de categorías en la zona de Cuchillas de la Zarca y valor de coeficiente Kappa muy similar a la exactitud global.

5.2.2. Evaluación de Dinámicas de Cambio

La evaluación de las dinámicas de cambio de coberturas a partir de información espacial, está sustentado en las consideraciones presentadas por (Leguizamón & Puentes, 2016) quienes resaltan la gran importancia de los estudios multitemporales para la determinación de dinámicas de cambio a escala de paisaje, siendo un factor importante las transformación de

las coberturas vegetales ocasionadas por la actividad humana que pueden inferir en graves implicaciones sobre el medio ambiente y la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos en cualquier zona del planeta.

El estudio realizado por (Valbuena, 2011) maneja elementos similares a los presentados en esta investigación, permitiendo determinar la tendencia de cambio para las coberturas vegetales en la cuenca del Río Cubillos desarrollando esquemas de transición mediante matrices de Márkov, con el fin de caracterizar la distribución espacial, exhibiendo una tendencia de aumento de la matriz de cultivos desplazando la frontera agrícola en áreas de pajonal y bosque.

Los efectos ecológicos del cambio del uso del suelo y la importancia de la ordenación eco-paisajística son respaldados por las tesis doctorales de (Peña, 2007) y (Aguilera, 2008), quienes además de realizan aportes significativos en el análisis espacial de transformaciones, emplean matrices de transición o de concordancia de coberturas de dos fechas distintas, utilizadas tradicionalmente en el análisis de cambio de uso del suelo, las cuales permiten obtener la valoración de cada transición presentada por cada tipo de cobertura y se convierten en un insumo importante para la modelación de dinámicas de cambio a través de procesos Markovianos.

El análisis de patrones espaciales y la cuantificación de la estructura del paisaje puede realizarse por los señalamientos indicados por autores como (McGarigal, *et al.*, 2012) y (McGarigal, *et al.*, 2015), con estudios de ecología del paisaje evaluando las características de su estructura, funcionalidad y temporalidad; con el fin de determinar la heterogeneidad de una matriz del paisaje en tres niveles de evaluación de su estructura: nivel de fragmento o parche, nivel de clase y nivel de paisaje en general.

En un estudio de conectividad estructural y fragmentación para el periodo de 1975 a 2008, realizado por (Correa, *et al.*, 2014), se determinaron diferentes métricas del paisaje en una cuenca de Michoacán en México, como los son: el porcentaje de cobertura, tamaño promedio de fragmentos, índice de fragmento más grande, densidad de fragmentos, índice de proximidad media, conectancia e índice de cohesión. El análisis comparativo y temporal permitió visualizar la fragmentación que tienen las coberturas arbóreas y arbustivas a causa de la presión antrópica, siendo estas las que presentan menor grado de conectividad estructural frente a las cubiertas de origen antrópico que dominan el paisaje.

El análisis de la estructura del paisaje para el distrito capital presentado por (Isaacs-Cubides & Jaimes, 2013), incluye métricas de diversidad a nivel del paisaje, los cuales generan una idea del grado de intervención de la zona; presentando una baja heterogeneidad para el año 2010 de acuerdo al *Shannon's Diversity Index* 1.57% y *Shannon's Evenness Index* 0.65% sin embargo, las coberturas de zonas urbanas, uso agropecuario y áreas quemadas pueden contribuir en la tasa de deforestación presentada en el área. (Ruiz, *et al.*, 2013) integran en su análisis multitemporal del cambio de uso del suelo métricas de forma, con el índice de dimensión fractal promedio de un fragmento y el índice de forma del parche, donde se evidencian formas irregulares y amorfas para el bosque latifoliado denso, mientras que las otras coberturas tienen formas más definidas (pastizales y cultivos); por su parte, el índice de dimensión fractal refleja que todas las categorías presentan formas irregulares. Como puede

apreciarse por los anteriores autores mencionados, las métricas presentan una imagen del paisaje en su nivel estructural, el cual puede ser comparado temporalmente a partir de su análisis y ayuda a entender las diversas dinámicas que ocurren dentro de una matriz del paisaje.

5.2.3. Modelación de Tendencias de Cambio

Las dinámicas espacio-temporales y la simulación del paisaje a futuro se articulan en la planificación y toma de decisiones; (Rimal *et al.*, 2017) sugieren que el uso de imágenes satelitales libres como las Landsat y el empleo de cadenas de Márkov, son las mejores opciones para los análisis a largo plazo, con los cuales se pueden obtener niveles aceptables de predicción y exactitud, como lo presenta en su estudio, donde las tierras agrícolas se ven altamente afectadas por la expansión urbana masiva en la zona de estudio.

Investigaciones realizadas por (Mishra *et al*., 2014) realizan predicciones de los cambios de uso del suelo en Muzaffarpur, India, empleando el modelador de cambios en el paisaje (*Land Change Modeler*), cuyo objetivo se centró en predecir el crecimiento futuro del tejido urbano de la cuidad, con su prospección para los años de 2025 y 2035, con precisiones de 72.28%, siendo las coberturas de las áreas construidas y los paisajes de agricultura los que mayores superficies de incremento presentaran, generando insumos útiles para los órganos administrativos y para la toma de decisiones. Igualmente (Jain, *et al.*, 2017) en un estudio realizado en la India, proyectan la dinámica de transición que puede ocurrir al 2020 y 2025, debido al alto crecimiento demográfico y el rápido aumento de las actividades económicas que generan el cambio de coberturas vegetales en la cuidad de Gurgaon, la cual forma parte de la zona conurbada de Delhi, proceso similar al que se vive en el municipio de Soacha.

(Achicanoy, *et al.*, 2018) en la localidad de Suba, Bogotá; por medio de sensores remotos y sistemas de información geográfica analizaron y proyectaron la expansión urbana y el cambio de coberturas vegetales presente en la zona, evidenciando una tendencia marca con la disminución de coberturas vegetales, e incrementos constantes y densificación de las áreas urbana; con aumentos de 432% para estas zonas y 56% para las cubiertas forestales y arbustales.

6. Área de Estudio

6.1.Localización

La microcuenca del Río Soacha forma parte de la cuenca media del Río Bogotá, se encuentra localizada en el municipio de Soacha, Cundinamarca; limitada en el norte por el mismo municipio de Soacha, al sur con la cuidad de Bogotá D.C., al occidente con el embalse del Muña y al oriente con el Río Tunjuelo. (CAR, 2007).

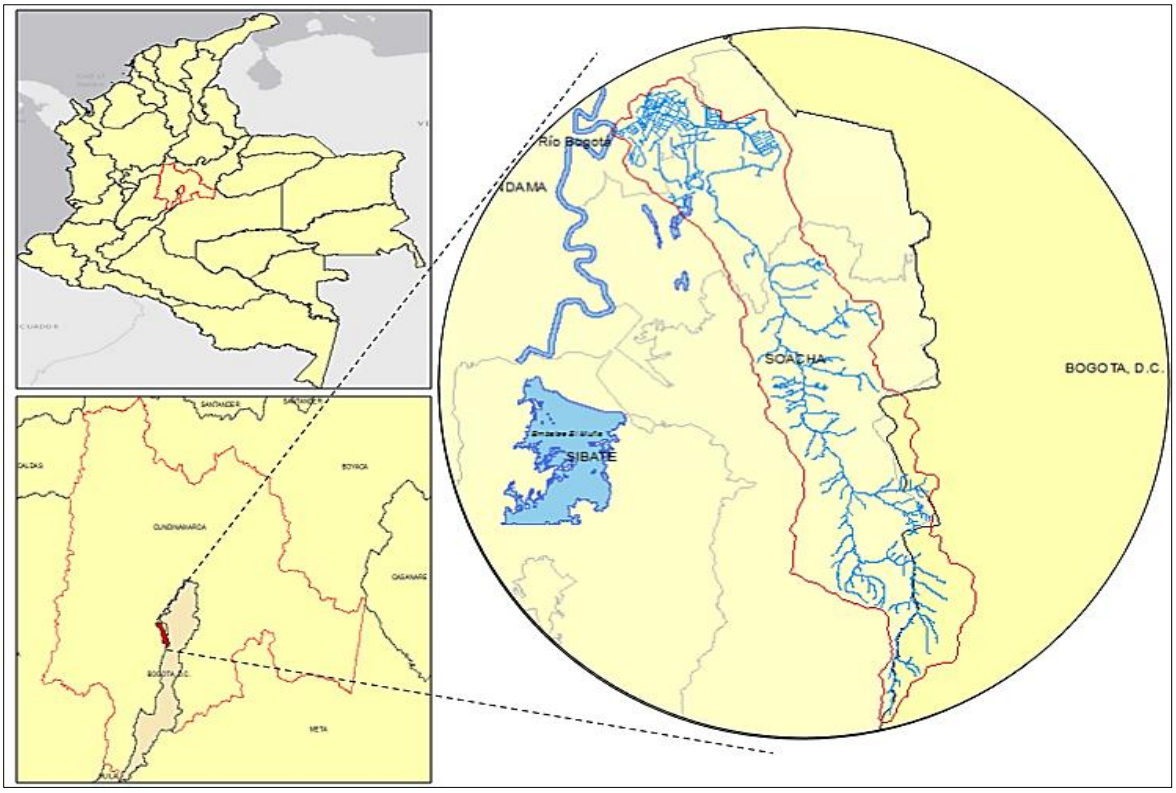


Figura 5. Localización microcuenca Río Soacha
Fuente: Autor (2019)

El área de la microcuenca está conformada por el municipio de Soacha, tanto por su parte urbana como rural, con un 86,05% de representatividad por el municipio y por la cuidad de Bogotá D.C. con un 13.95% del área. La superficie total de la microcuenca del Río Soacha es de 4433.71 ha.

Tabla 2. Distribución de la microcuenca

Municipio	Área	%
➢ Soacha	3815,18 ha	86,05 %
➢ Bogotá D.C.	618,53 ha	13,95 %
Total	**4433,71 ha**	**100 %**

6.2.Clima

Precipitación: Se presenta un régimen de distribución de tipo bimodal, con máximos durante los meses de marzo, abril y mayo, y el otro periodo para los meses de octubre y noviembre. Registrando volúmenes promedio anual de 731 mm en la parte alta de la cuenca y con 548 mm en la parte baja, cerca al caso urbano y a la desembocadura del Río.

De acuerdo a la (Alcaldía Municipal de Soacha, 2018) el primer semestre del año es el más húmedo con valores de precipitación cercanos a los 90 mm en el mes de mayo. En la figura siguiente se presenta el histograma de distribución anual de precipitación para el municipio de Soacha.

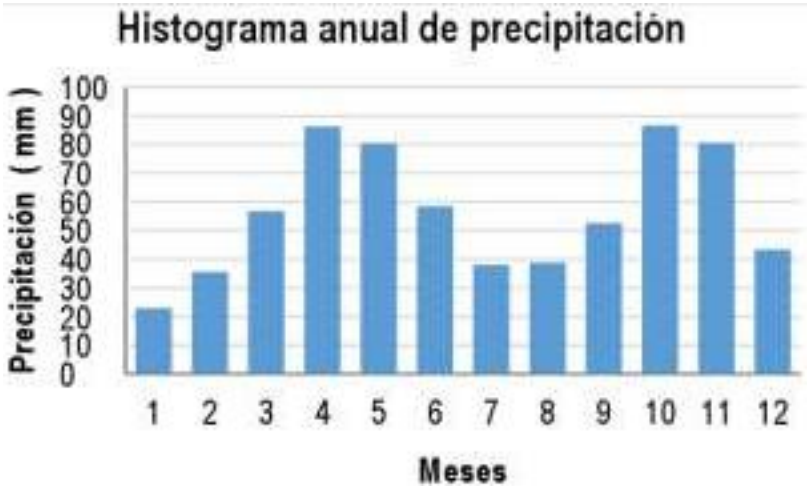


Figura 6. Histograma de precipitación
Fuente: (Alcaldía Municipal de Soacha, 2018)

Temperatura: la microcuenca presenta una tendencia estacional bien marcada, donde se diferencian las épocas secas de las épocas húmedas, la temperatura media fluctúa alrededor de los 9ºC a 12ºC, con los valores más bajos en la parte sur y más altos en la parte norte. La (CAR, 2007) señala un gradiente de variación de 0,6ºC por cada 100 metros de altura y una variación a lo largo del año no superior a los 3ºC.

Humedad Relativa: la media mensual anual presenta un valor de 73,2%; con valores máximos para el mes de mayo cercano al 84.4% y el valor más bajo para los meses de enero y febrero con un 62.2%. (CAR, 2007).

Clasificación climática: basado en el sistema de clasificación Caldas-Lang, se encuentran climas de paramo bajo semihúmedo en la parte alta de la cuenca hidrográfica, frio semiárido en la parte baja y frío árido en la parte cercana a la desembocadura al río Bogotá. (CAR, 2007).

6.3.Hidrografía

La microcuenca del Río Soacha es afluente directo del Río Bogotá, limitando con este en la parte norte en su desembocadura en la cota 2550 msnm; al oriente con el Río Tunjuelo y a

occidente en el embalse del Muña. El río nace en la vereda Hungría sobre la cota 3300 msnm, y recorre las veredas de Fusungá, San Jorge y Panamá y en su parte baja recorre todo el casco urbano del municipio de sur a norte y continua su curso hasta su punto de su desembocadura en la vereda Bosatoma. (Forero, 2015)

6.4.Coberturas Vegetales

La cobertura vegetal de la microcuenca del Río Soacha se caracteriza por presentar diferentes tipos de explotaciones agropecuarias y pecuaria, explotaciones mineras a cielo abierto y áreas urbanas. Por su parte, la (Alcaldía Municipal de Soacha, 2018) señala que existe una porción de cobertura boscosa, que debido a su composición y distribución en el territorio, está representada por pequeñas manchas de bosques naturales alterados o intervenidos, en muchos casos muy degradados, pobres en diversidad, los cuales están combinados con rastrojos altos, arbustales y vegetación en estados de sucesión.

En la tabla siguiente (tabla 3) se presentan las principales coberturas señaladas por el diagnóstico de la subcuenca del Río Soacha descritas por la (CAR, 2007).

Tabla 3. Coberturas vegetales en la cuenca del Río Soacha

Cobertura	Descripción	Especies representativas
Áreas Urbanas	Áreas continuas en su gran mayoría, principalmente localizadas en la parte norte de la microcuenca, ya que ahí encontramos el casco urbano del municipio de Soacha, y representada de igual manera por áreas discontinuas en las veredas, como su vez por una infraestructura mixta dentro del territorio.	-
Pastos	Vegetación herbácea dedicada a la ganadería semi-intensiva y extensiva para pastoreo y levante de ganado lechero; con pastos manejados, naturales y en consociación con rastrojos.	-
Cultivos	Explotación de cultivos de papa y cultivos varios en misceláneos heterogéneos y en consociación con pastos, dedicados a su comercialización y consumo familiar.	-
Bosques	En el área de la microcuenca encontramos bosque andino y algunas áreas de bosques plantados. • Bosques Andinos: principalmente localizados en áreas de laderas de montaña, con árboles de porte alto y medio. • Bosques Plantados: áreas con bosques coetáneos sembrados por el hombre; las primordiales spp. son pinos y eucaliptos.	*Weinmannia tomentosa* *Weinmannia pinnata* *Clusia multiflora* *Escallonia myrtilloides* *Alnus acuminata* *Buddleja americana* *Oreopanax floribundum*
Vegetación de Paramo	Localizada principalmente en la parte alta de la cuenca y caracterizada por la mezcla de pajonal y frailejón.	*Calamagrostis sp.* *Espeletia grandiflora* *Hypericum brathys*
Vegetación Secundaria	Comunidades vegetales en estado sucesional de avance, tras colonización de espacios dedicados a otras actividades, en esta cobertura encontramos bosques naturales secundario, matorrales y rastrojos.	*Morella parvifola* *Myrcianthes leucoxyla* *Miconia ligustrina* *Chusquea scandens*
Explotaciones Mineras	Áreas de explotaciones mineras a cielo abierto dado por canteras y ladrilleras, donde encontramos áreas sin vegetación alguna y las áreas desnudas y degradadas por estos procesos.	-

6.5.Componente Socioeconómico

La microcuenca del Río Soacha se caracteriza por ser una de las subcuencas del Río Bogotá con mayor densidad poblacional, como es descrito por la (CAR, 2006) esta es una de las cuencas de menor tamaño pero con mayor número de habitantes por unidad de superficie dentro de su jurisdicción. Como lo indica la información de la secretaria de planeación de la gobernación y basada en información del DANE sobre los últimos censos a nivel nacional, se observa claramente un incremento poblacional dentro del municipio de Soacha, el cual ha sido constante y creciente de manera acelerada durante los últimos años. (Gobernación de Cundinamarca, 2018). Para el año 2018 se estiman 634.660 habitantes de acuerdo al pre conteo del último censo.

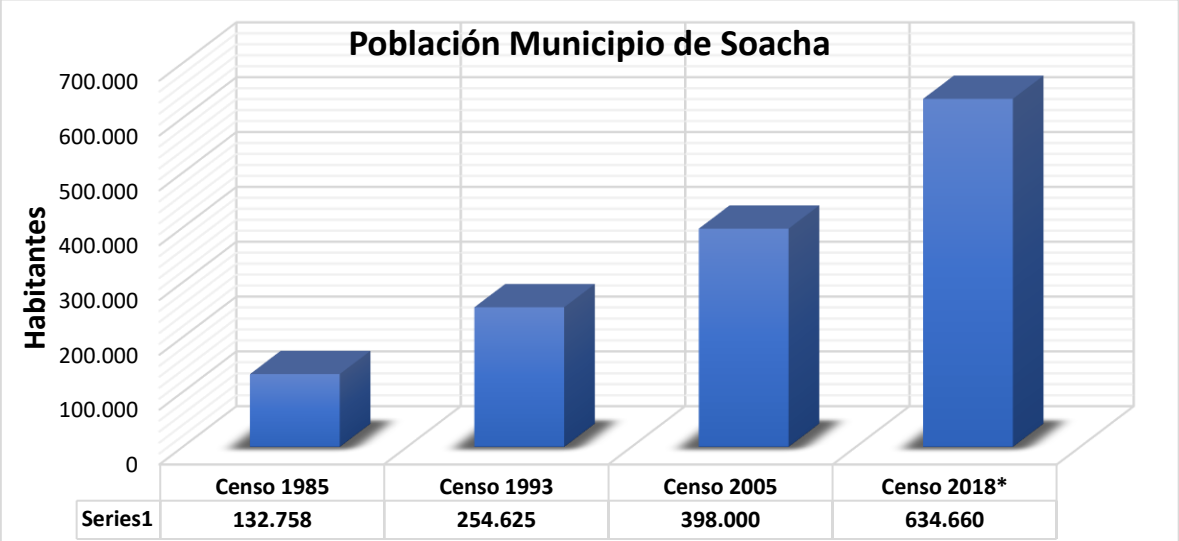


Figura 7. Población del municipio de Soacha
Fuente: Adaptado de Gobernación de Cundinamarca (2018)

Dentro de su producción económica encontramos principalmente actividades asociadas a cultivos transitorios centrados en la producción de arveja y papa; algunos cultivos permanentes centrados a la producción de uchuva y fresa; de igual manera la actividad pecuaria está dirigida a la producción ganadera bovina de leche y lácteos, la agroindustria se concentra en un remanente minúsculo de cultivos de flores de exportación y por último la actividad de minería se fundamenta de materiales de construcción y similares (arcillas y areniscas). (CAR, 2007).

La mala planeación y ordenamiento dentro de la microcuenca del Río Soacha, ha llevado a generar un progresivo deterioro ambiental, como lo menciona (Forero, 2015) estos factores han provocado que el río se transforme en un caño receptor de aguas contaminadas; debió al vertido directo de aguas residuales domiciliarias e industriales específicamente de los sectores agrícola, pecuario y minero que operan en el área de influencia.

7. Metodología

Para la realización del análisis espacial y la modelación de las transformaciones de las coberturas vegetales de la microcuenca del Río Soacha (Cundinamarca) ocurridas desde el periodo de 1999 y proyectadas al año 2040 se tuvieron en cuenta aspectos metodológicos contemplados en cinco fases: *Recopilación de Información, Procesamiento de Información, Verificación en Campo, Análisis de Dinámicas de Cambio* y *Modelación de Tendencias de Cambio*. Estas actividades se describen detalladamente a continuación:

7.1.Fase 1: Recopilación de Información

Se conto con información digital disponible y de libre acceso del portal de búsqueda y descarga de datos satelitales del servicio geológico de los Estados Unidos USGS-EarthExplorer (EE); en el cual se adquirieron imágenes multiespectrales de mediana resolución de dos satélites distintos: Sentinel 2 y Landsat 7 - ETM+; estos datos provienen de diferentes periodos de tiempo, con lo cual se logró la determinación de coberturas de tres años de evaluación.

- **Imágenes Satelitales:**

Las imágenes obtenidas en el portal de Earth Explorer (http://earthexplorer.usgs.gov) fueron de los periodos de 1999, 2009 y 2018. En la tabla siguiente (tabla 4), se presentan las imágenes adquiridas.

Tabla 4. Imágenes satelitales obtenidas del portal EarthExplorer

#	Satélite	Resolución	Fecha de Imagen	Observaciones
1	Landsat 7 ETM+	30 m (Pancromática:15 m)	Noviembre 16 del 1999	Path: 8 Row: 57
2	Landsat 7 ETM+	30 m (Pancromática:15 m)	Diciembre 29 del 2009	Path: 8 Row: 57
3	Sentinel-2A	10 m	Diciembre 25 del 2018	-

De igual manera se contó con un modelo digital de elevación (DEM – por sus siglas en inglés: *Digital Elevation Model*) del portal de datos de sensores remotos del Alaska Satélite Facility – VERTEX de la NASA (https://vertex.daac.asf.alaska.edu/), la información obtenida corresponde al satélite ALOS PALSAR de la agencia Japonesa de exploración espacial (JAXA). Siendo un *hi-res terrain corected* de 12.5 m de resolución espacial, con fecha de febrero 15 del 2011.

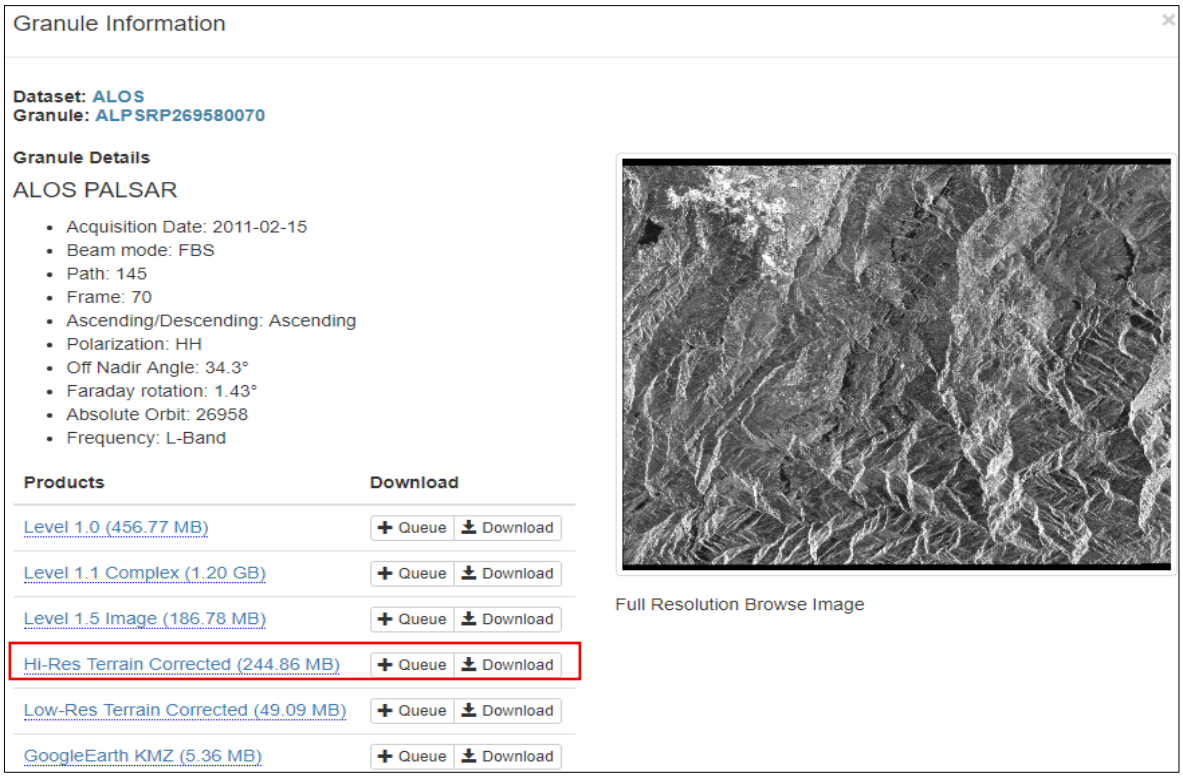


Figura 8. DEM ALOS PALSAR (12.5 m)
Fuente: Portal VERTEX – NASA

Cartografía complementaria:

Como cartografía base y complementaria se contó con datos disponibles del geo-portal del IGAC- Datos Abiertos (https://geoportal.igac.gov.co/es/contenido/datos-abiertos-igac) con cartografía base a escala 1:10.000 del año 2018, con las planchas 227IV-C4; 246II-A2; 246II-A4; 246II-B1; 246II-B3; 246II-D1 y con datos abiertos de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR (http://opendata-carcundinamarca.opendata.arcgis.com/) donde se obtuvo información complementaria sobre cuencas hidrográficas de la corporación para el año 2017.

De igual manera, como apoyo para la clasificación, visualización, identificación y determinación de las coberturas presentes en la microcuenca, se contó con el Geoservicio – OGC del Banco Nacional de Imágenes de Colombia (BNA), a partir de un servicio WMS del IGAC con una ortofotomosaico a escala 1:10.000 del área de estudio correspondiente a las planchas 227 y 246 del año 2011.
(http://bni.gov.co:8080/geoservicios/ortofotomosaicos_escala_10000/wms?).

La ortofotomosaico permitió tener una mejor visualización de la información geográfica ya que la escala permite diferenciar claramente distintas unidades de coberturas presentes en el área como se presenta en la siguiente figura (figura 9).

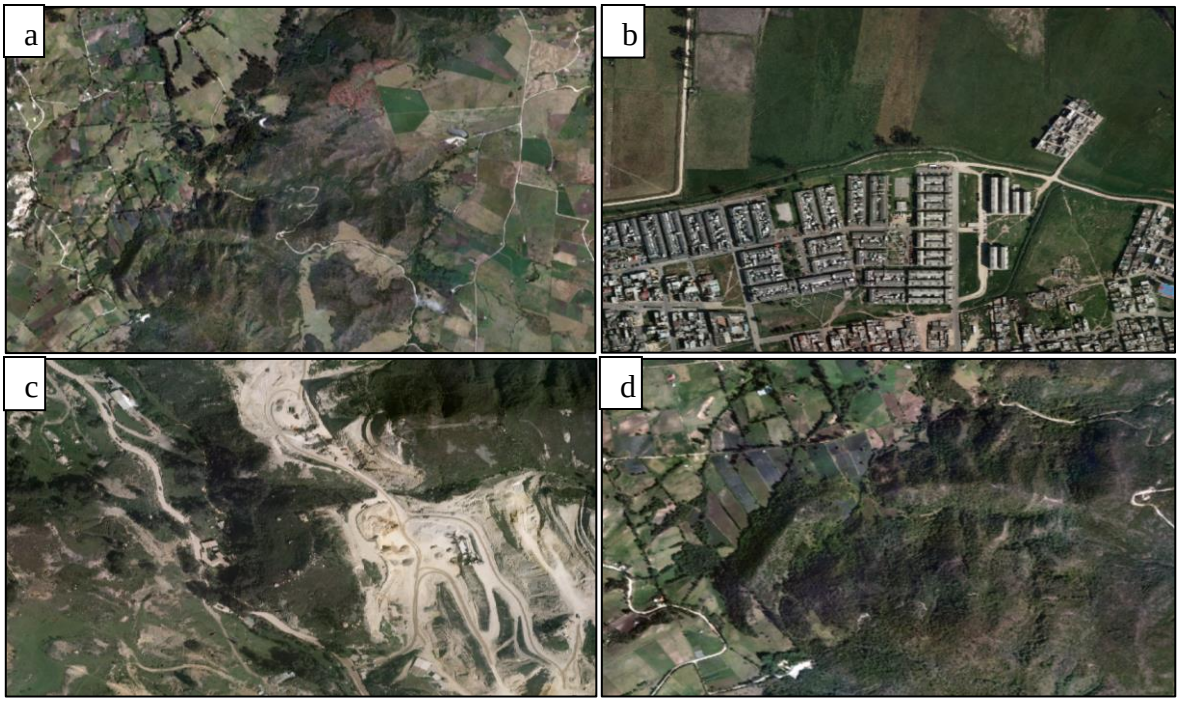


Figura 9. Imágenes de ortofotomosaico escala 1:10.000
a. Paisaje; b. Pastos limpios y Tejido urbano continuo; c. Áreas desnudas y degradadas & d. Bosque fragmentado y Mosaico de pastos y cultivos
Fuente: BNA & IGAC

7.2.Fase 2: Procesamiento de Información

7.2.1. Software Empleados

Para el procesamiento y análisis de la información se contó con los siguientes programas SIG especializados:

- ***ArcGIS 10.5*** (casa matriz ESRI®) – Empleado para la creación de mapas, realización de los análisis espaciales y administrar de los datos geográficos.
- ***ENVI 5.5*** (casa matriz Harris®) – Empleado para el procesamiento digital de imágenes satelitales.
- ***FRAGSTATS 4.2*** (Universidad de Massachusetts - UMASS) – Empleado para el análisis de ecología del paisaje y determinación de métricas.
- ***TERSET 18.21*** (Clark Labs) – Empleado para el modelamiento de predicciones de cambio de coberturas de la tierra, herramienta *Land Change Modeler*.

7.2.2. Delimitación de la microcuenca del Río Soacha

Con apoyo del DEM descargado del portal VERTEX-NASA, se procedió a realizar la respectiva delimitación de la microcuenca del Río Soacha, esto debido a que se presentan

inconsistencias en los datos obtenidos del geo-portal de la CAR y lo presentado en el diagnóstico de la subcuenca (CAR, 2007).

Para la delimitación del área de la microcuenca se siguió el siguiente flujograma de actividades en el software ArcGIS 10.5:

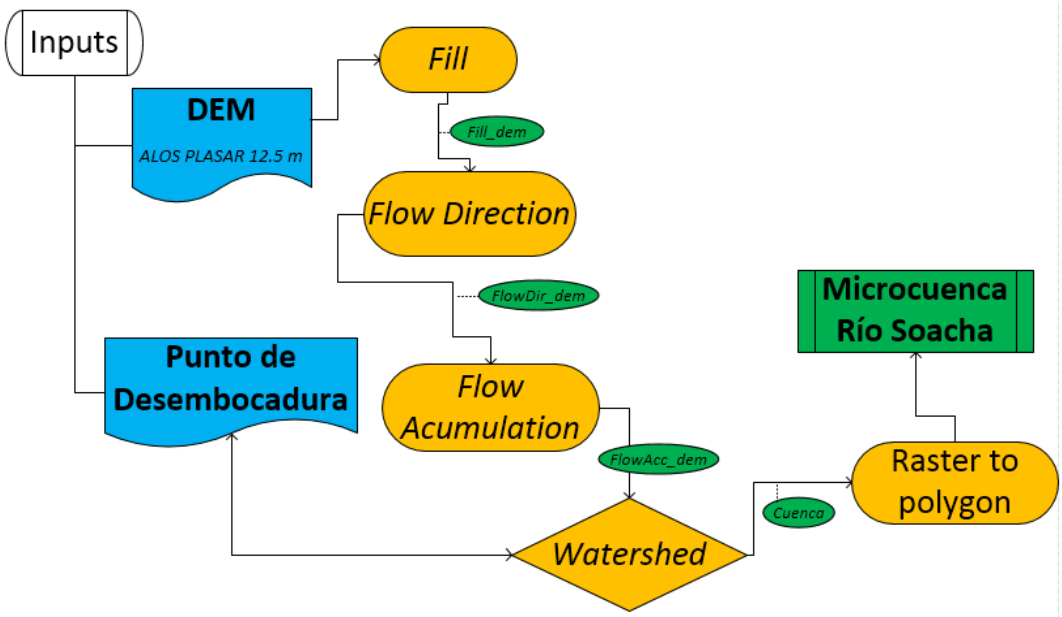


Figura 10. Delimitación de microcuenca
Fuente: Autor (2019)

7.2.3. Clasificación de Coberturas

La clasificación digital de las imágenes satelitales se realizó en el software ENVI 5.5; en 7 pasos, como primera media se realizó un preprocesamiento de la información para poder realizar una clasificación de coberturas con menos ruidos en las imágenes del satélite Landsat-7. Para la clasificación de las coberturas vegetales se siguió la metodología CORINE Land Cover (CLC) adaptada para Colombia de acuerdo a señalamientos presentados por (IDEAM, 2010), con pequeños ajustes.

De acuerdo a la metodología CLC, esta se encuentra de manera estructurada jerárquicamente; para la presente investigación se optó por siete unidades de paisaje llegando al nivel tres de clasificación de acuerdo al sistema empleado, pasando por áreas de territorios artificiales, territorios agrícolas; bosques y áreas seminaturales.

En la tabla siguiente (tabla 5) se presentan cada una de las coberturas del área de estudio de acuerdo a metodología CLC, donde se encuentra siete unidades de paisaje dentro de la microcuenca: *Tejido Urbano*, *Pastos limpios*, *Mosaico de cultivos y pastos*, *Bosque fragmentado; Bosque Plantado*, *Arbustales y Tierras desnudas y degradadas*.

Tabla 5. Leyenda CLC de clasificación

1.	**TERRITORIOS ARTIFICIALES**
1.1	Zonas Urbanizadas
1.1.1	***Tejido urbano* (1)**
2.	**TERRITORIOS AGRÍCOLAS**
2.3	Pastos
2.3.1	***Pastos limpios* (2)**
2.4.	Áreas Agrícolas Heterogéneas
2.4.2.	***Mosaico de cultivos y pastos* (3)**
3.	**BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES**
3.1.	Bosques
3.1.3.	***Bosques Fragmentado* (4)**
3.1.5	***Bosque Plantado* (5)**
3.2.	Áreas con Vegetación Herbácea y/o Arbustiva
3.2.3.	***Arbustales* (6)**
3.3.	Áreas abiertas, sin o con poca Vegetación
3.3.3.	***Tierras desnudas y degradadas* (7)**

Adaptada de (IDEAM, 2010)

Preprocesamiento de clasificación:

1. *Gap fill*
   Para la imagen satelital Landsat 7 ETM+ del año 2009 se procedió a realizar la restauración del bandeado o rayado presentado por la imagen, con el fin de obtener una imagen sin ruido para su procesamiento de clasificación, con áreas homogéneas y sin vacíos, como lo presenta (González-Velázquez, 2018).

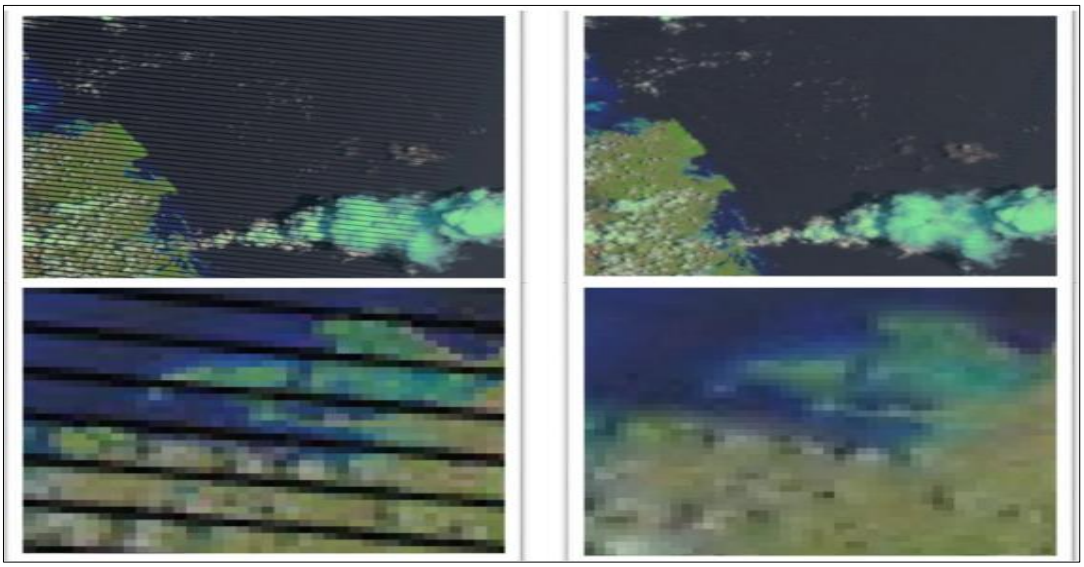


Figura 11. Gap Fill - Restauración de imagen satelital
Fuente: (González-Velázquez, 2018)

2. *Pan Sharpening*
   De igual manera para las imágenes obtenidas del satélite Landsat 7 - ETM+, se procedió a realizar un Pan Sharpening con el fin de poder mejorar la visualización de las imágenes, esto basado en su banda pancromática de 15 m de resolución espacial, con lo cual se obtienen una mayor resolución espacial de las imágenes de este satélite. (PCI Geomatics, 2006).



Figura 12. Pan Sharpening para la mejora de resolución espacial
Fuente: (PCI Geomatics, 2006)

Clasificación de imágenes satelitales:

La clasificación de las imágenes se realizó por un método supervisado, establecida por medio del algoritmo de maxima verosimilitud (***Maximum Likelihood***) y una posterior post - clasificación para la reducción del ruido generado en el proceso y determinando su validación dentro de la categorización de cada cobertura vegetal. Siguiendo el flujo del proceso de clasificación de coberturas se siguieron los siguientes pasos:

3. *Creación de puntos de control o Interest of Regions (ROI): Train y Test*
4. *Mejoramiento de visualización o contraste*
5. *Combinación de Bandas*
6. *Generación del índice NDVI*
7. *Clasificación supervisada*
8. *Post clasificación (Validación y Filtrado)*

7.3.Fase 3: Verificación en Campo

Una vez obtenida la clasificación de coberturas se procedió a realizar tres salidas exploratorias a campo con el fin de realizar el reconocimiento y comprobación *in situ* del área de estudio y obtener los ROI´s de *test* para la validación de la clasificación. Se realizaron recorridos por las diferentes unidades de cobertura, esta fase estuvo apoyada y validada con la clasificación de coberturas para el año 2018, la cartografía base del IGAC y un navegador GPS para la toma de coordenadas de puntos de interés.

Para los recorridos se tuvo en cuenta que se cubrieran cada uno de los tipos de coberturas identificadas en la clasificación y la mayor área posible, esto en base a la posibilidad de acceso a las áreas y vías de tránsito, principalmente siguiendo la red hídrica de la cuenca. Los datos en campo se tomaron con navegador GPS GARMIN OREGON 650.

Con los datos de campo se obtienen los valores verdaderos del terreno (*Ground truth*), convirtiéndose en los ROI´s de *test* para la validación de la clasificación de las coberturas vegetales para el año 2018 por medio de una matriz de confusión. Para años anteriores se asumen áreas cercanas y coberturas claramente diferenciadas para la estimación de los ROI´s de *test* para estos años.

7.4.Fase 4: Análisis de Dinámicas de Cambio

Para la determinación de dinámicas de cambio se realiza un análisis multitemporal con el fin de comprobar cambios a través del tiempo de las transiciones ocurridas en el territorio, para tal fin se emplean matrices de transición y un análisis abordado desde la ecología del paisaje de la microcuenca.

7.4.1. Dinámicas de cambio

El primer paso del análisis multitemporal se establece con la determinación de los cambios a través del tiempo, con la determinación de las superficies para cada cobertura, su valoración porcentual, las ganancias y pérdidas netas durante los dos periodos de evaluación y la distribución espacial de cada cubierta.

7.4.2. Matrices de transición

En segunda medida, se realiza la comprobación de cambios generados a través del tiempo mediante matrices de coincidencia de cambio-persistencia, persistencia de coberturas y se evaluada los escenarios de degradación y recuperación de las coberturas vegetales; con matrices similares a la presentada en la tabla siguiente (tabla 6).

Tabla 6. Matriz de cambio de uso

Matriz de Coincidencia para la Determinación del Cambio de Uso			**Año X_2**						
			Tejido Urbano Discontinuo	***Pastos Limpios***	***Mosaico de Pastos y Cultivos***	***Bosque Fragmentado***	***Plantación Forestal***	***Arbustal***	***Tierras Desnudas y Degradadas***
			1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Año X_1	***Tejido Urbano Discontinuo***	**10**	***11***	12	13	14	15	16	17
	Pastos Limpios	**20**	21	***22***	23	24	25	26	27
	Mosaico de Pastos y Cultivos	**30**	31	32	**33**	34	35	36	37
	Bosque Fragmentado	**40**	41	42	43	**44**	45	46	47
	Plantación Forestal	**50**	51	52	*53*	*54*	***55***	*56*	*57*
	Arbustal	**60**	61	62	*63*	*64*	*65*	***66***	*67*
	Tierras Desnudas y Degradadas	**70**	71	72	*73*	*74*	*75*	*76*	***77***

7.4.3. Análisis de paisaje

Con el fin de determinar la heterogeneidad espacial a través del tiempo se realiza el análisis estructural del paisaje a nivel de clase (correspondiente a cada tipo de cobertura vegetal identificada), basados en su composición, configuración espacial y conectividad del paisaje siguiendo la metodología presentada por (McGarigal, *et al.* 2012) y (Correa, *et al.*, 2014), a partir de aplicación de métricas de paisaje en el software *Fragstats* 4.2., los índices calculados se presentan en la tabla siguiente (tabla 7).

Tabla 7. Métricas de paisaje a evaluar

Métrica				Descripción	Cálculo
Configuración y Composición	Métricas de Área	**Índice del Parche más Grande (%)**	**LPI**	Es el porcentaje que ocupa el parche más grande en el total del tipo de cobertura. Se convierte en una medida de dominio de un tipo de cobertura en él paisaje.	$LPI = \frac{\max_{j=1}^{n}(a_{ij})}{A}(100)$ a_{ij} = Área del parche $_{ij}$ (m^2). A = Área total del paisaje (m^2).
		Media Ponderada por Área Tamaño del Parche	**AM**	Es igual a la suma de todos los parches pertenecientes a una clase y multiplicados de manera proporcional por su área y su abundancia.	$AM = \sum_{j=1}^{n}\left[x_{ij}\left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}\right)\right]$ a_{ij} = Área del parche $_{ij}$ (m^2). x_{ij} = Suma de los parches de una clase $_{ij}$.
		Porcentaje del Paisaje (%)	**PLAND**	Es el % ocupado por un tipo de cobertura en el total del área del paisaje. Los cambios del porcentaje en el tiempo dan información acerca del incremento y el decrecimiento de las coberturas.	$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{A}(100)$ P_i = Porción del paisaje ocupado por un parche. a_{ij} = Área del parche $_{ij}$ (m^2). A = Área total del paisaje (m^2).
	Métricas de Forma	**Forma**	**Shape**	Medida de irregularidad en la forma de los parches en un paisaje. Siendo igual a 1 cuando es circular e incrementando con la irregularidad de su forma.	$SHAPE = \frac{.25\ p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$ p_{ij} = Perímetro del Parche $_{ij}$ (m) a_{ij} = Área del parche $_{ij}$ (m^2).
		Dimensión Fractal del Parche	**Frac AM**	Este índice varía entre 1 para formas euclidianas simples (cuadrados y círculos) y 2 para formas complejas y fractales. Incluye una medida de peso que permite que parches grandes tengan mayor peso que los pequeños.	$FRAC = \frac{2\ \ln\ (.25\ p_{ij})}{\ln\ a_{ij}}$ p_{ij} = Perímetro del Parche $_{ij}$ (m) a_{ij} = Área del parche $_{ij}$ (m^2).

	Métricas de Agregación	**Numero de Parches**	**NP**	Número total de parches por el tipo de clase	$NP = n_i$ n_i = Numero de parches en el paisaje de un tipo de clase.
		Densidad del Parche (#/100ha)	**PD**	Número de parches de un tipo de cobertura en 100 hectáreas.	$PD = \frac{n_i}{A}(10{,}000)(100)$ n_i = Numero de parches en el paisaje de un tipo de clase. A = Área total del paisaje (m^2).
		Conectancia (%)	**CONNECT**	Es la conexión física entre los parches de una clase en el paisaje. Dado por el número de enlaces funcionales entre fragmentos del mismo tipo y basado en un criterio de distancia. Rango de 0 a 100. Es un indicador directo de conectividad espacial.	$CONNECT = \left[\frac{\sum_{j \neq k}^{n} c_{ijk}}{\frac{n_i\,(n_i - 1)}{2}}\right](100)$ c_{ijk} = Unión entre 2 parches, basado en un umbral especifico de distancia. n_i = Numero de parches en el paisaje de un tipo de clase.

		Cohesión	**COHESION**	Es el grado de agregación y la dominancia de las coberturas que conforman un paisaje. Rango de 0 a 100. Es un indicador de la conectividad física de un tipo de cobertura.	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} p_{ij}^{*}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} p_{ij}^{*}\sqrt{a_{ij}^{*}}}\right]\cdot\left[1 - \frac{1}{\sqrt{Z}}\right]^{-1}\cdot(100)$
					p = Perímetro del parche en termino de # de superficies de celdas.
					a = Área del parche en términos de celdas.
					Z = # total de celdas en el paisaje.

Heterogeneidad	Diversidad	**Índice de Diversidad Shannon**	**SHDI**	Es una medida de diversidad de los parches a nivel de paisaje. SHDI Incrementa a medida que aumenta el número de diferentes parches.	$SHDI = -\sum_{i=1}^{m}(P_i * \ln P_i)$ P_i = Porción del paisaje ocupado por un tipo de parche.
		Índice de Uniformidad de Shannon	**SHEI**	Medida la uniformidad del paisaje, basada en su abundancia y distribución de las clases. Es equivalente a (0) cuando la distribución de los parches es baja.	$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^{m}(P_i * \ln P_i)}{\ln m}$ P_i = Porción del paisaje ocupado por un tipo de parche. m= # de tipos de parches presentes en el paisaje.

Fuente: Modificado de (McGarigal, *et al*., 2015): (Correa et al., 2014) y (Isaacs-Cubides & Jaimes, 2013).

7.5.Fase 5: Modelación de Tendencias de Cambio

La generación del modelo de tendencias de cambio a futuro se realizó siguiendo la metodología presentada por (Mishra, *et al.*, 2014) y (Cortés, 2017), con un análisis más amplio que la cuenca, con un área de estudio de 21168 ha, para tal fin se procedió a realizar esta fase empleando *Land Change Modeler* (LCM) para la sostenibilidad ecológica, el cual es un módulo integrado en el software TerrSet 18.21.

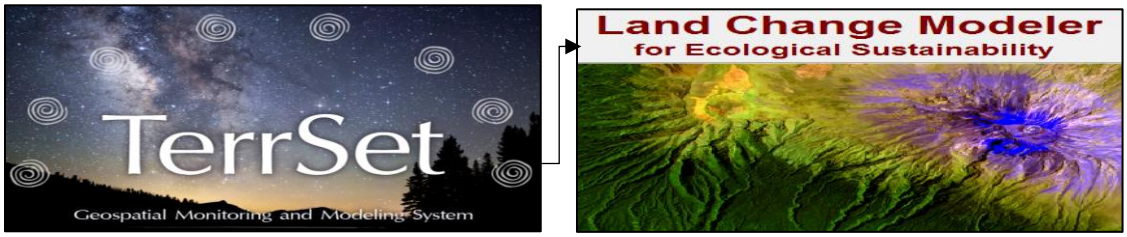


Figura 13. Land Change Modeler - TerrSet 18.21
Fuente: Imágenes Software TerrSet

El LCM permite analizar los datos históricos de las coberturas a evaluar y puede predecir el cambio de cada unidad de cobertura de la tierra a partir del procedimientos de análisis de cambio (*Land Change Analysis*) de los datos obtenidos de dos de las imágenes satelitales empleadas; la generación de potenciales de transición (*Transition Potential Modeling*) a partir del empleo de una red neuronal artificial Muliti-Layer Perceptrón (MLP) con restricciones asociadas a cinco variables de intervención del modelo); y la predicción del cambio a futuro (*Change Prediction*) a partir del empleo de cadenas de Márkov. (Clark Labs, 2016); el proceso finaliza con la validación del modelo empleado.

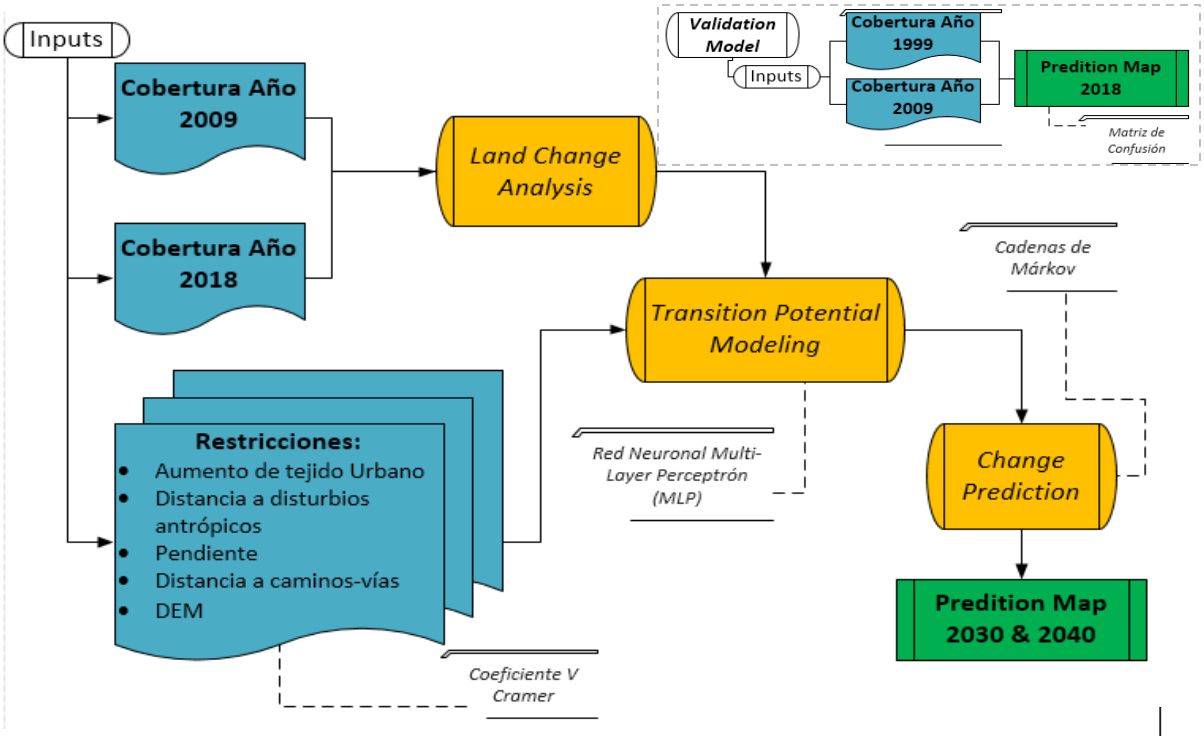


Figura 14. Diagrama de flujo de metodología para LCM
Fuente: autor (2019)

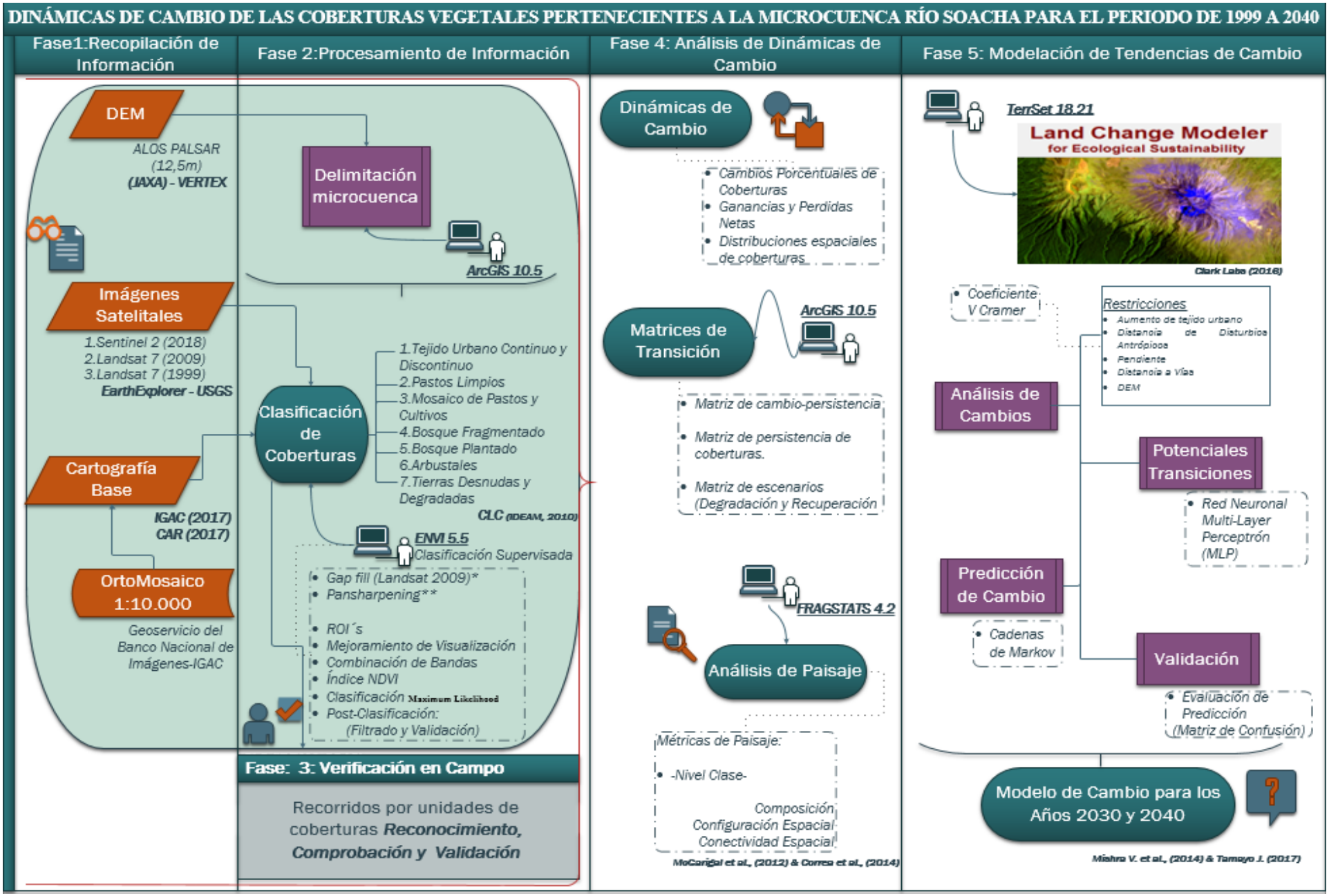


Figura 15. Esquema metodológico empleado para el análisis y modelamiento espacial
Fuente: Autor (2019)

En la figura anterior (figura 15), se sintetiza el esquema metodológico empleado para el análisis y modelamiento espacial de las dinámicas de cambio de las coberturas vegetales pertenecientes a la microcuenca del Río Soacha para el periodo de 1999 al año 2040.

8. Resultados

Los resultados se presentan en cuatro ítems con base a la metodología planteada. En el primero, se realiza la nueva delimitación de la microcuenca del Río Soacha y se efectúa la comparación con la información presentada por el geo-portal de la CAR y el diagnóstico de la subcuenca (CAR, 2007). En el segundo ítem se presenta la clasificación supervisada de las imágenes satelitales para los años 1999, 2009 y 2018 y su validación. En el tercer ítem se realiza el análisis multitemporal de las dinámicas de cambio y se establecen las métricas de paisaje a través de su evaluación en el tiempo; y por último se presenta el modelo de tendencias de cambio desarrollado para la distribución de coberturas en el futuro previsto para los años 2030 y 2040.

8.1.Delimitación de la microcuenca del Río Soacha

De acuerdo con la información secundaria disponible del IGAC y conforme a la verificación en campo, se revela que lo presentado por (CAR, 2007) y Geo-portal CAR (2017), son datos incongruentes sobre la adecuada delimitación de la microcuenca y su respectivo perímetro y área como se observa en la figura siguiente.

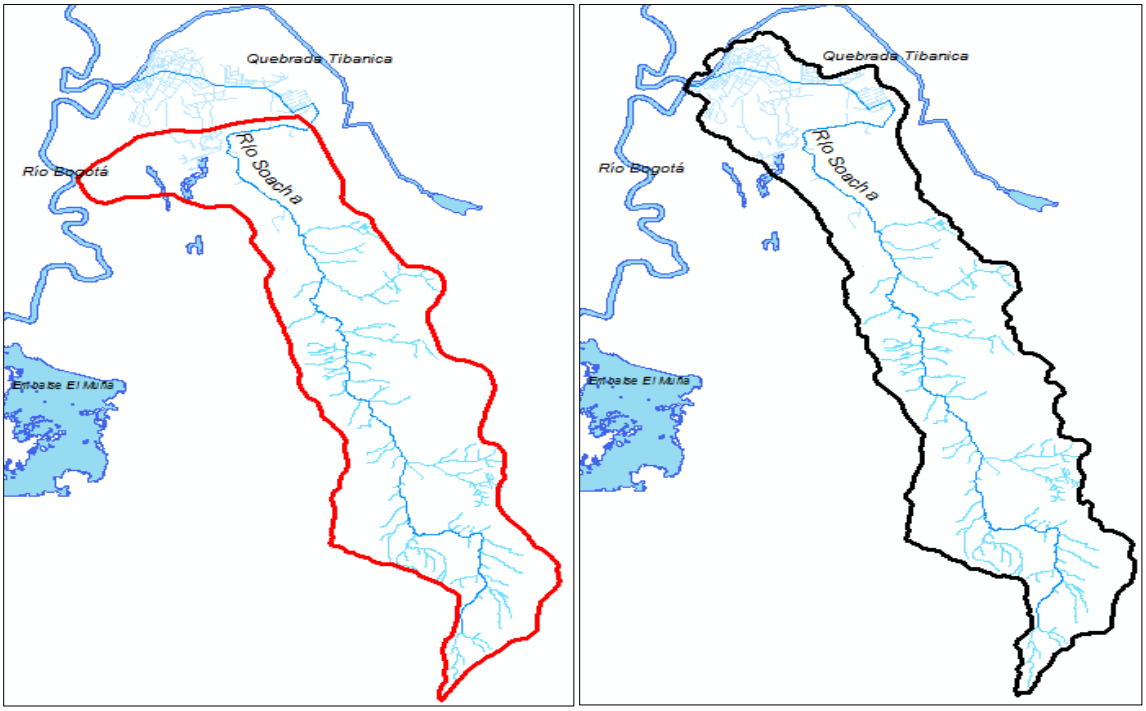


Figura 16. Comparación de microcuenca Río Soacha
Izquierda: Dato Geo-portal CAR (2017); Derecha: Cuenca delimitada con apoyo del DEM (Autor 2019)

El Geo-portal indica un área de la microcuenca de **4030.42 ha**, mientras que el diagnostico presentado por la misma corporación presenta un área de **4051.6 ha**, siendo datos muy diferentes pese a que fueron presentados por la misma entidad. Esto puede obedecer a fallas ocurridas al momento de generar la delimitación de una cuenca hidrográfica, como lo menciona (Geraldi, *et al.* 2010) estos errores se deben principalmente a grandes modificaciones por la acción antrópica en un área específica y en un tiempo dado, cuya modificaciones contribuyen a la generación de errores de delimitación a la hora de procesar datos geoespaciales, en muchos casos se debe a la modificación de los cursos de agua por medio de la construcción de canales, compuertas, entre otras estructuras; de igual manera puede obedecer a una mala manipulación de los datos en su proceso de sistematización y probablemente una de las mayores causas, es que son cuencas de zonas planas en su gran mayoría, lo que dificultad el cierre de perímetro de manera adecuada.

Por tal razón se hizo necesario verificar en campo el área cercana al punto de desembocadura en la vereda Bosatoma hacia el Río Bogotá, contribuyendo a mejorar la delimitación tradicional presentada, ya que esta se apoya en la imagen satelital del DEM ALOS PALSAR descargado desde el portal Vertex de la NASA, mejorando la precisión gracias a su resolución espacial de 12.5 m y a la información de las planchas base del IGAC con escalas de 1:10.000.

En la siguiente figura, se observa la diferencia entre los datos presentados por la CAR (área en rojo) y los resultados obtenidos de la nueva delimitación (área en negro), principalmente en su perímetro generado y el área de desembocadura al rio Bogotá, indicando claramente un mal limite o cierre de la microcuenca por parte de la corporación.

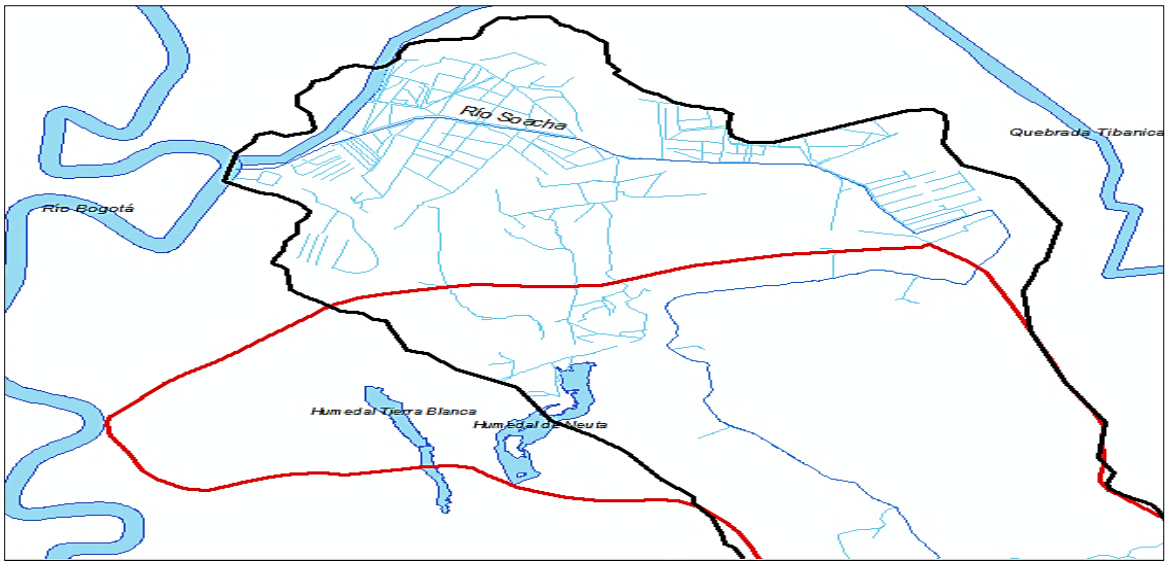


Figura 17. Diferencia de punto de desembocadura del Río Soacha
Fuente: Autor (2019)

La nueva delimitación se realizó por el medio del software ArcGIS 10.5, por un proceso semiautomático apoyado de la información del modelo digital de elevación, el cual se procesó mediante el llenado de datos faltantes (*Fill*), determinando consigo la dirección del flujo de agua y la acumulación del flujo, obteniendo el área de contribución o zona de

captación para la microcuenca (*Watershed*), debatiendo consigo las divisorias o límites de área presentadas el diagnóstico.

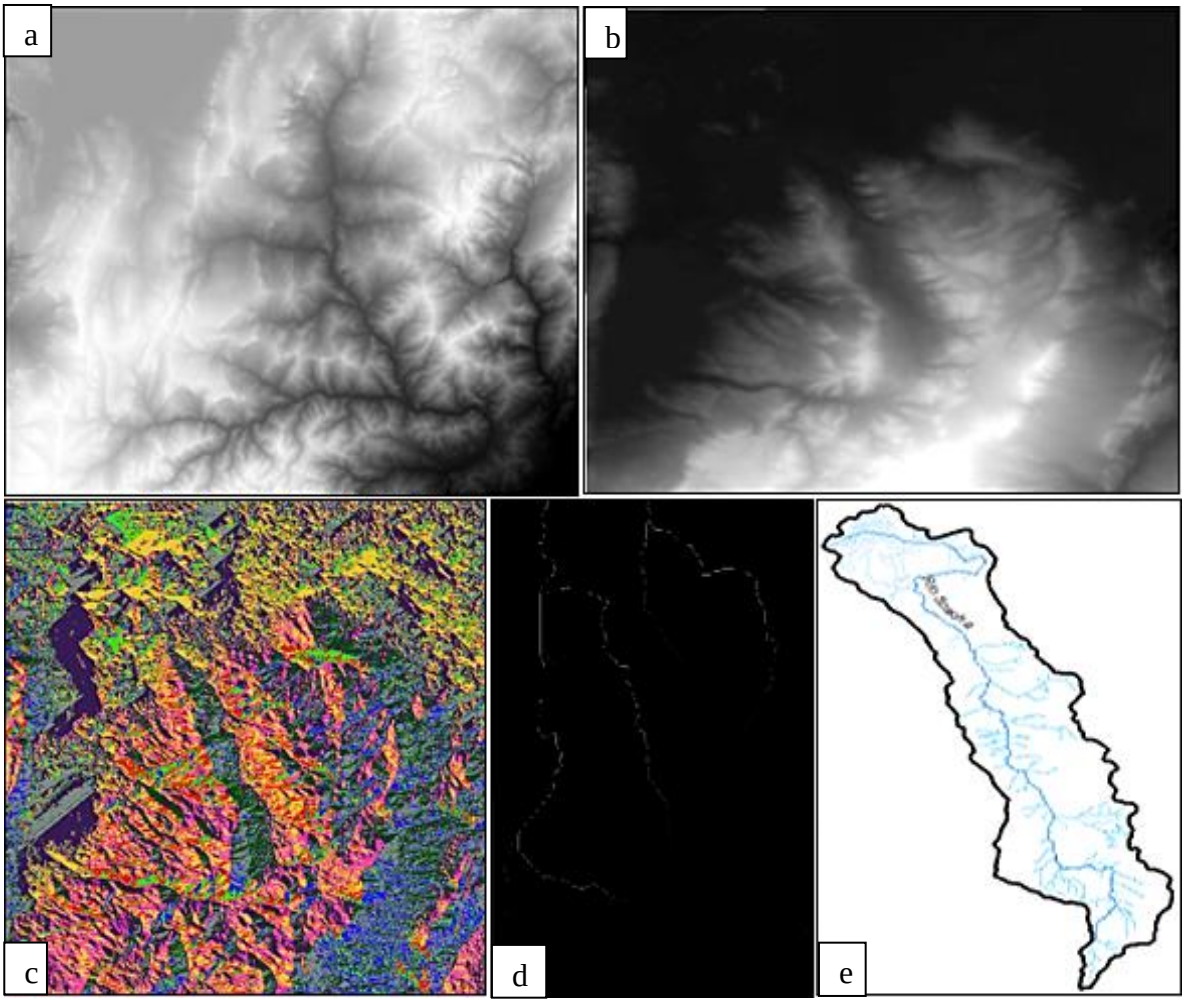


Figura 18. Delimitación microcuenca Río Soacha
a. DEM; b. Fill; C. Flow Direction; D. Flow Accumulation; E. Watershed
Fuente: Autor (2019)

La nueva delimitación de la microcuenca arroja un área de **4433.71 ha**; siendo esta ultima la designada para realizar el análisis y modelamiento espacial de la presente investigación, ya que cubre adecuadamente la ronda hídrica que transcurre dentro del perímetro urbano del municipio de Soacha el cual no fue contemplado por la CAR de acuerdo a su análisis morfométrico, debido a que en la zona plana y parte baja de la microcuenca dentro del casco urbano, el cauce del río ha sido canalizado lo que dificultad configurar el límite de la cuenca y el perímetro de la misma hasta su punto de desembocadura en el Río Bogotá, siendo este distinto de acuerdo al procedimiento realizado para la unidad hidrográfica del Río Soacha.

Tabla 8. Diferencias de área de la microcuenca

Fuente	**Área**
Diagnostico CAR (2007)	4051.60 ha
Geo-portal CAR	4030.42 ha
Presente investigación	**4433.71 ha**

8.2.Clasificación de Coberturas

La clasificación de coberturas se realizó en un proceso de dos fases, iniciando con el preprocesamiento para las imágenes obtenidas del satélite Landsat 7 ETM+ y finalmente la clasificación supervisada de las coberturas siguiendo la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, determinado las coberturas presentes en el área de estudio.

8.2.1. Preprocesamiento de Clasificación

Inicialmente, se procedió a realizar mejoras en las imágenes del Satélite Landsat 7, con un llenado de la información faltante (*Gap-Fill*) y un aumento en su resolución espacial (*Pan Sharpening*).

- **Gap-Fill:**

Como lo señala (Chen, *et al.*, 2011) las imágenes del satélite Landsat 7 desde el 31 de mayo de 2003 presentan una falla en el escáner del corrector de línea de exploración del sensor ETM+ a bordo de este satélite, lo cual genera un fallo permanente en las imágenes a partir de esta fecha, denominado por algunos como "*Bandeado*". Por consiguiente, para la imagen satelital obtenida para el año 2009 se realizó la respectiva corrección, con un relleno de información faltante de la escena, con una transformación lineal que ajusta los valores medios de cada banda como lo presenta (Scaramuzza, *et al.*, 2004) a partir de la extensión **landsat_gapfill**, para el software ENVI.

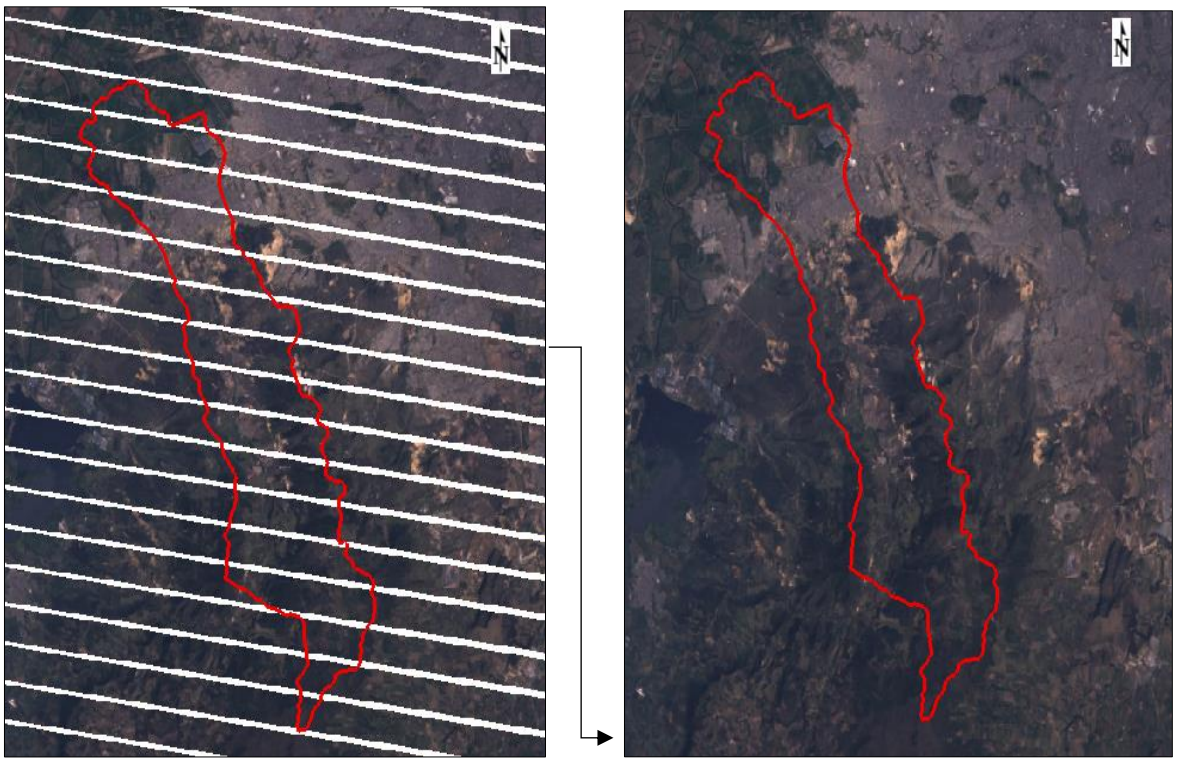


Figura 19. Gap-Fill imagen Landsat 7 2009
Fuente: Autor (2019)

- **Pan Sharpening:**

Para obtener mejoras en la resolución espacial de las imágenes procedentes del satélite Landsat 7, se empleó el algoritmo **Gram-Schmidt Pan Sharpening**, siendo este el más preciso, debido a que utiliza la función de respuesta espectral del satélite con el fin de lograr la estimación de los datos pancromáticos para mejorar la imagen multiespectral. (Laben *et al.*, 2000).

Este proceso logra fundir con una ampliación la imagen multiespectral de baja resolución (30m x30m), con la imagen pancromática de mejor resolución (15m x 15m), obteniendo consigo una imagen de resolución espacial mejorada, con la que podemos obtener una escala de trabajo 1:25.000, lo cual permite afinar su visualización y respectiva interpretación para la clasificación.

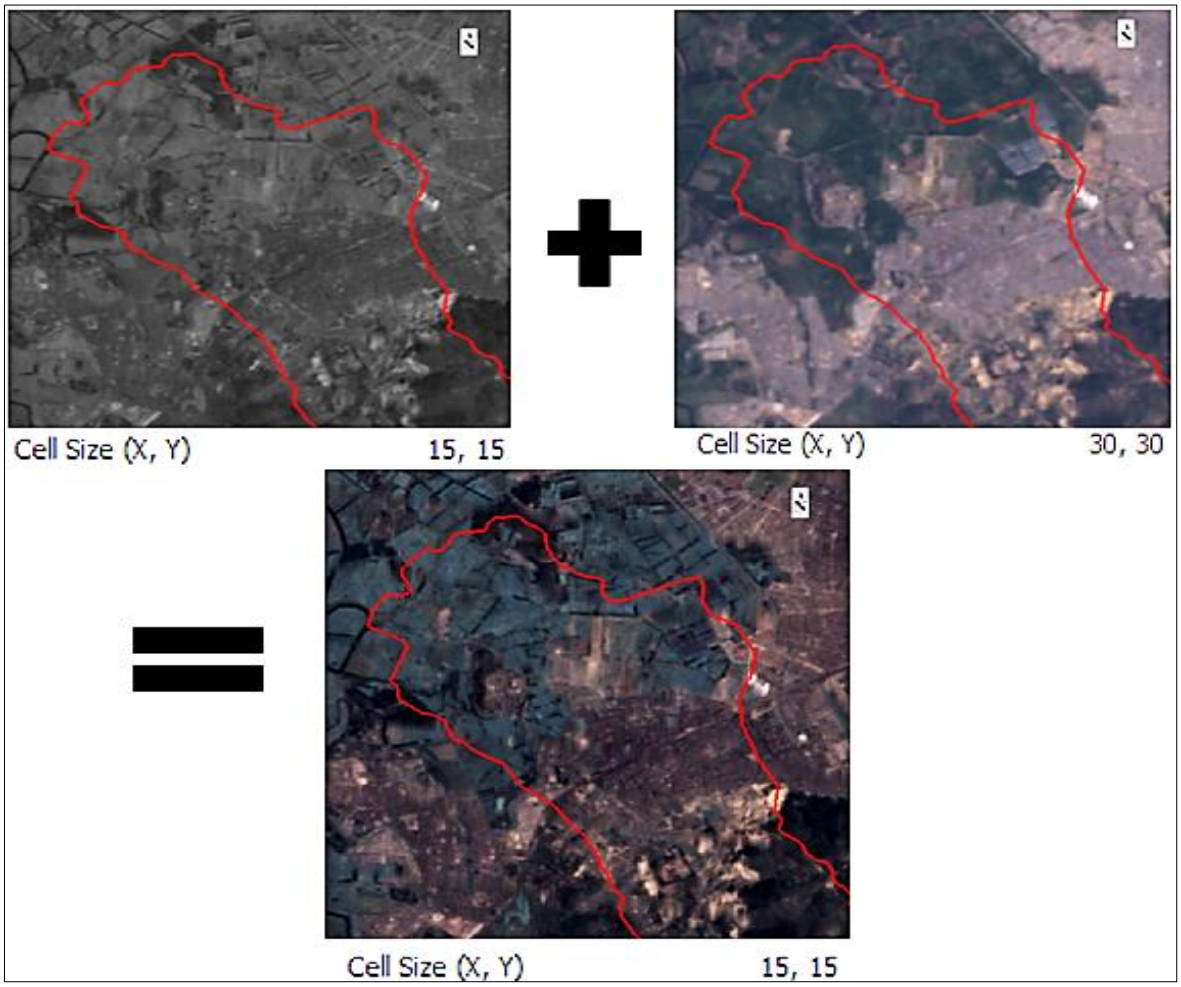


Figura 20. Pan Sharpening imagen Landsat 7 1999
Fuente: Autor (2019)

Con el preprocesamiento de las dos imágenes satelitales Landsat 7 – ETM+ realizado, se procedió a realizar la clasificación supervisada de las 3 imágenes descargadas.

8.2.2. Clasificación Supervisada de Imágenes Satelitales

El procesamiento para la clasificación supervisada de las imágenes satelitales inicio con un mejoramiento de visualización, la combinación de diferentes bandas y el cálculo del índice NDVI, con el fin de tener una mejora en la visualización y la interpretación de coberturas presentes en cada escena.

- **Mejoramiento de Visualización o Contraste:**

Con un contraste lineal al 2% y 5%, podemos observar diferencias marcadas entre las diferentes coberturas presentes en cada imagen satelital, lo cual facilita significativamente el proceso de interpretación para la clasificación digital; con combinación de bandas en color natural. (Sentinel RGB 432 y Landsat 7 RGB 321).

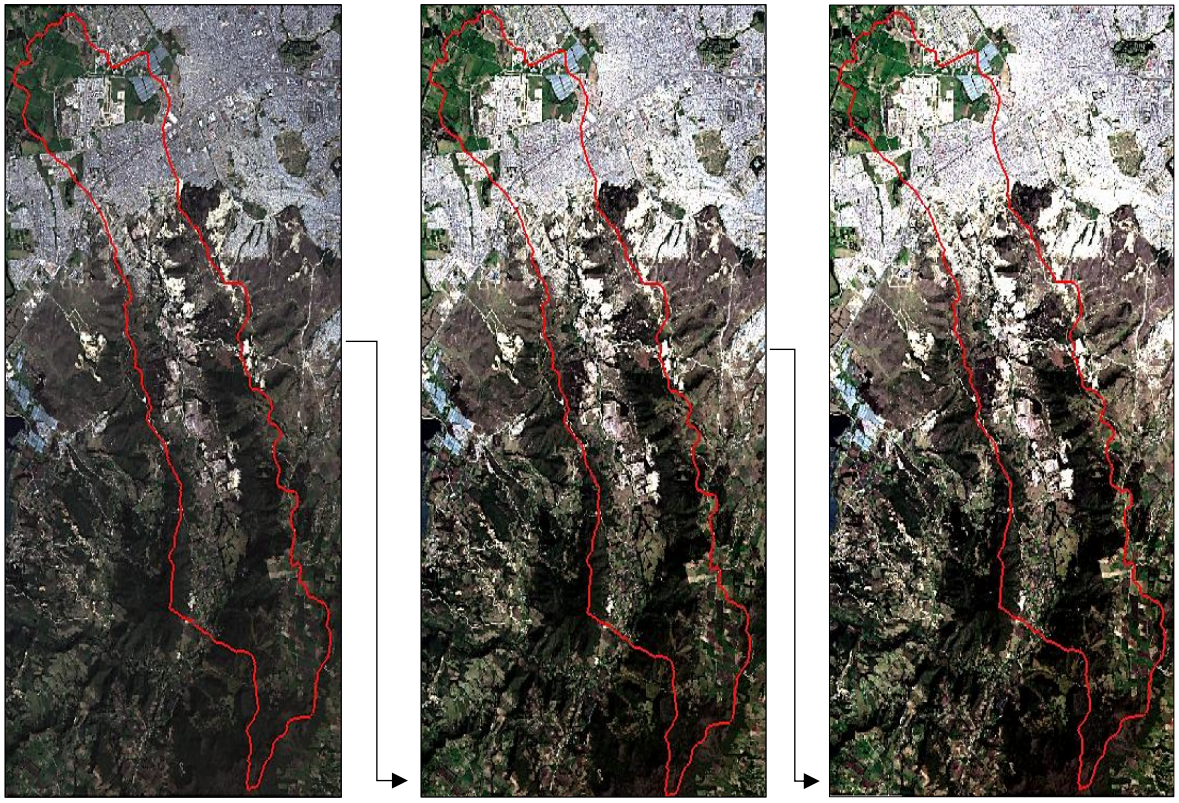


Figura 21. Contraste lineal
Izquierda: Imagen sin mejoramiento de contraste; Centro: Contraste lineal del 2%; Derecha: Contraste lineal del 5%
Fuente: Autor (2019)

- **Combinación de Bandas:**

Se emplearon diferentes combinaciones de bandas para las imágenes satelitales logrando obtener contrastes entre las diversas clases de coberturas presentes, lo cual sirve para determinar tonalidades, patrones y diferencias de cada cobertura. (Moreno, 2015) & (INEGI, 2010). En la siguiente tabla (tabla 9) y figura (figura 22) se presenta la combinación respectiva de bandas empleadas en el análisis espacial de los datos.

Tabla 9. Combinación de bandas

-	Combinación	Satélite	Descripción
1	**432** **321**	Sentinel 2 Landsat 7	Color Natural: Esta combinación presenta una visualización similar al color natural, ya que combina las bandas visibles, permitiendo visualizar la imagen en color original y obteniendo consigo diferentes tonos y patrones de las coberturas.
2	**843** **432**	Sentinel 2 Landsat 7	Infrarrojo: Esta combinación incluye el infrarrojo cercano, el cual es útil para identificar suelo, vegetación y cuerpos de agua. Las áreas urbanas y el suelo desnudo aparecen en tonos azules claros y la vegetación aparece en tonos rojizos, por otro lado, los cuerpos de agua aparecen en tonos de azul oscuro.
3	**451**	Landsat 7	Esta combinación con dos bandas del infrarrojo permite visualizar la vegetación en diferentes tonos de verde y rojizo, que varían en función de cada cobertura (bosque o agrícola). Las áreas urbanas y el suelo desnudo tienen tonos morados y claros.
4	**453**	Landsat 7	En esta combinación resalta la vegetación en diferentes gamas de colores y se diferencia claramente las áreas urbanas. La vegetación se presenta en tonos oscuros-verdes y las áreas agrícolas en tono naranjas, las áreas urbanizadas presentan tonos grisáceos oscuros a claros en las áreas degradadas.

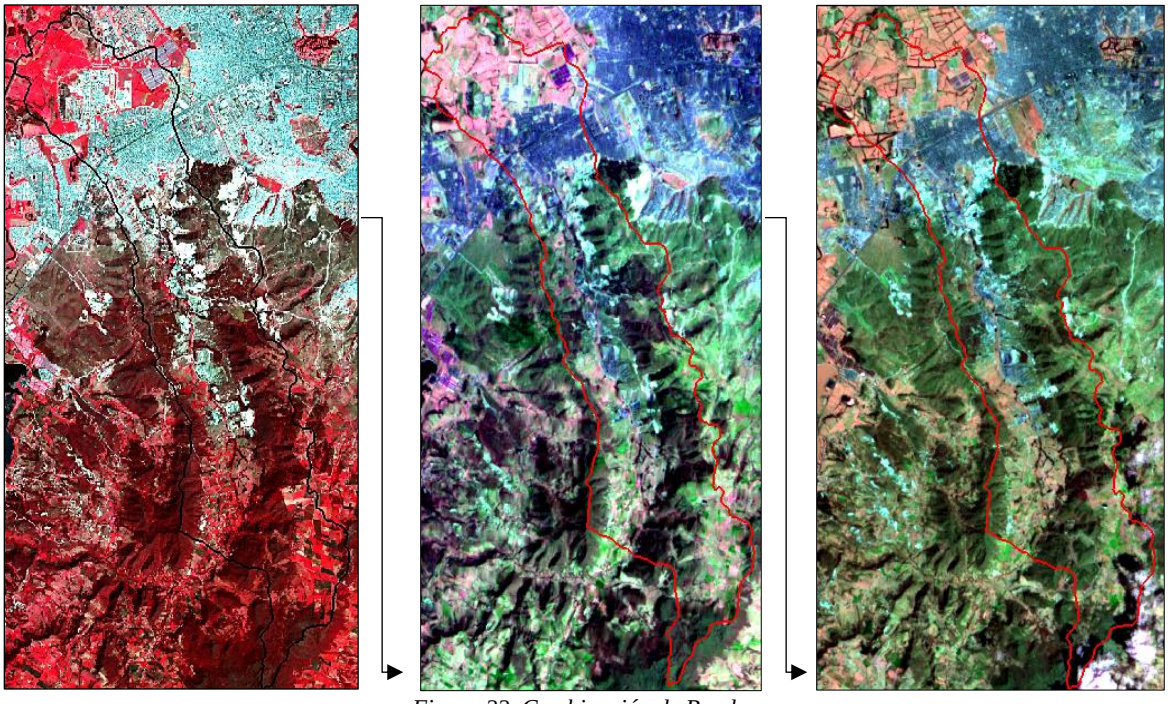


Figura 22. Combinación de Bandas
Izquierda: Falso Color RGB432 (Sentinel 2018); Centro: RGB451 (Landsat 7 2009); Derecha: RGB453 (Landsat 7 1999)
Fuente: Autor (2019)

- **Índice NDVI:**

El índice de vegetación de diferencia normalizado "NDVI" resulto útil para determinar y diferenciar la vegetación presente en el área de estudio, ya que está basado en su respuesta espectral, establecida en la banda roja e infrarroja de un sensor satelital. Como lo indica (Franco & Rodríguez, 2004) la vegetación es particularmente reflectiva en el infrarrojo cercano, permitiendo obtener contraste de vegetación, agua, zonas erosionadas y superficies urbanizadas.
El cálculo del NDVI se realiza a partir de la evaluación de la banda roja e infrarrojo cercando, como se presenta en la siguiente tabla para cada tipo de satélite.

Tabla 10. Calculo NDVI

NDVI = (IR-R) / (IR+R)	(4-3) / (4+3)	(8-4) / (8+4)
	Bandas Landsat 7	**Bandas Sentinel 2**

IR: Infrarrojo cercano; R: Banda roja

Con el NDVI se obtiene una imagen en tonalidades grises en escalas de 1 a -1, para su interpretación se decide cambiar a una paleta de color. Se logra obtener diferenciación de otros tipos de cobertura a diferencia de la vegetación que presenta gamas de color similar, los cuerpos de agua presentan tonos oscuros y verdes, las áreas urbanizadas y degradadas presentan tonalidades oscuras en matrices grises y claras en la paleta de color, y las áreas agrícolas presentan tonalidades claras y rojizas respectivamente en el tipo de paleta evaluado.

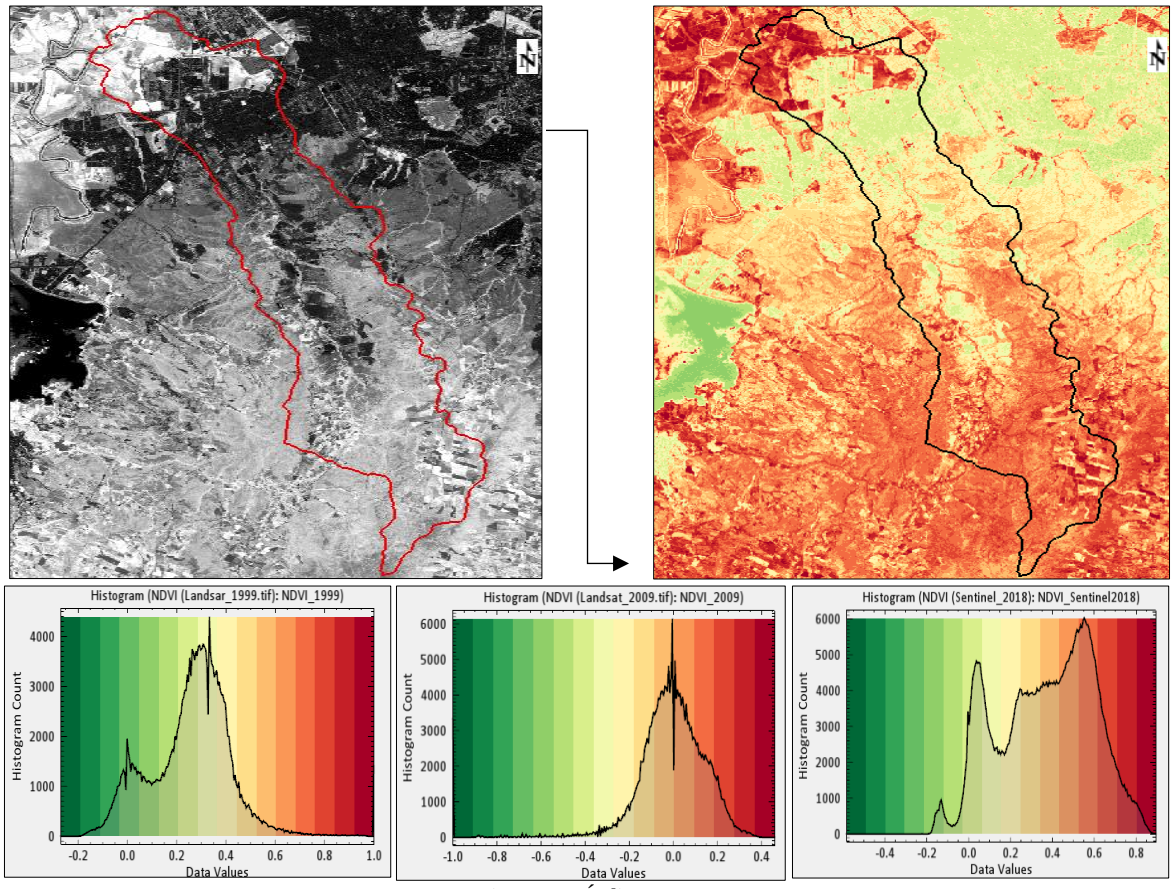


Figura 23. Índice NDVI
Fuente: Autor (2019)

- **Clasificación Supervisada (Algoritmo *Maximum Likelihood*):**

Como método de determinación de las coberturas presentes en la microcuenca se optó por una clasificación supervisada basada en la técnica del algoritmo de máxima verosimilitud, (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2018) indican que este algoritmo se constituye como uno de los presentan mejores resultados a la hora de la clasificación de coberturas vegetales y es ampliamente utilizado en la teledetección por su facilidad de implementación.

Para tal fin, se generaron puntos de control o regiones de interés (Region of interst ROI´s) en cada imagen de forma aleatoria y proporcional a cada categoría, asegurando cubrir todas las coberturas sin importar su tamaño, generando muestras para cada clase. Se tuvo en cuenta ROI´s para ***train*** y ***test***, estos últimos empleados para la validación de la clasificación de las coberturas, basados en datos obtenidos en campo.

Seguido, se generaron ***scatter plots*** de los ROI´s de entrenamiento para observar la separabilidad espectral de cada una de las clases de coberturas en las tres imágenes, esto basado en las bandas del infrarrojo cercano y la banda roja. Este proceso proyecto datos bien caracterizados, donde se presenta separabilidad entre cada categoría y baja correlación de los diferentes tipos de coberturas presentes en el área.

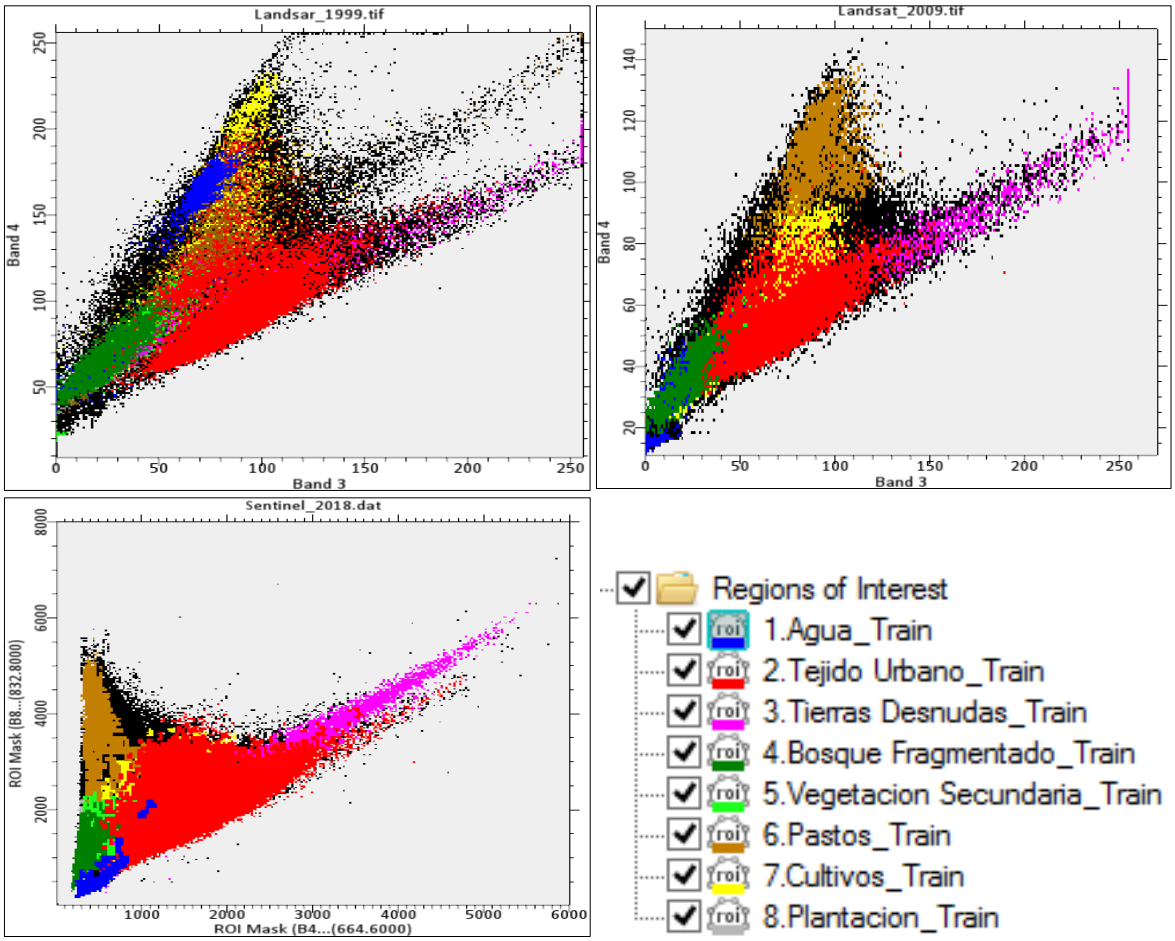


Figura 24. Gráficos de dispersión de ROI´s
Fuente: Autor (2019)

Sin embargo, la categoría de mosaicos de pastos y cultivos presentan baja separabilidad entre las otras clases, más no se constituye un error grave para la clasificación, ya que la validación del proceso así lo confirma. Una vez alcanzada la separabilidad espectral de cada tipo de cobertura, se procede a correr el algoritmo en el software ENVI 5.5, generando una imagen ráster con algún grado de ruido en ella, para tal fin se procede a realizar la post-clasificación de cada imagen.

8.2.3. Validación de la clasificación

Con las imágenes clasificadas se procedió a realizar la respectiva validación de la clasificación de cada imagen, determinado la calidad de la clasificación con una matriz de confusión, la cual presenta valores significativamente altos, aceptando y comprobando una adecuada clasificación de cada imagen satelital.

En campo se obtuvieron más de 35 puntos de muestreo distribuidos aleatoriamente en el área de la microcuenca, y repartidos uniformemente sobre cada clase de estudio, correspondiendo 5 ROI´s para cada clase de cobertura.

En la tabla siguiente (tabla 11) se presenta los valores de precisión global de clasificación (*Overall Accuracy*) y el coeficiente Kappa para cada imagen.

Tabla 11. Validación de clasificación de imágenes satelitales

Imagen Satelital	**Overall Accuracy**		**Kappa Coefficient**
	Pixeles	Porcentaje	
Sentinel 2018	(8914/9185)	97.0495%	0.9616
Landsat 7 2009	(4560/4710)	96.8153%	0.9596
Landsat 7 1999	(2186/2330)	93.8197%	0.9237

El Overall Accuracy es el total de pixeles bien clasificados frente al total de pixeles en las imágenes satelitales. Este presenta valores superiores al 90% en todas las imágenes, siendo estos de 97.05%; 96.81% y 93.82% para las imágenes Sentinel 2018, Landsat 7 2009 y 1999 respectivamente, indicando una apropiada clasificación.

Por otro lado, como lo indica (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2018) el coeficiente de Kappa presenta los valores de concordancia o precisión de los ROI´s con valores *ground truth* del terreno, en rangos de 0 a 1.

El Kappa obtenido está por encima del 0.92, exhibiendo una alta relación entre los ROI´s de *Train* y *Test* durante la clasificación, siendo esta una calidad alta de confiabilidad durante la categorización de las coberturas. Para la imagen del 2018 se obtiene el valor más alto con un 0.9616, seguido de la imagen del 2009 con 0.9596 y para la del año 1999 un valor de 0.9237.

Dicha validación estuvo apoyada de los datos obtenidos en campo (*Ground truth*), en la siguiente tabla (tabla 12) se presentan algunos de los datos recopilados en el área de estudio durante la semana tercera del mes de abril del 2019 y las tablas de las matrices de confusión para la validación de la clasificación.

Tabla 12. Verificación en campo

	Coord. N.	Coord. E.	Altitud	Imagen del área
Tejido Urbano	04°35´02.9´´ 04°34´49.9´´ 04°34´48.1´´	74°12´44.1´´ 74°13´09.4´´ 74°13´13.7´´	2604 msnm 2615 msnm 2608 msnm	
Mosaico de Cultivos y Pastos	04°28´10.4´´ 04°30´06.9´´ 04°29´17.8´´	74°12´44.5´´ 74°11´47.6´´ 74°11´53.6´´	3220 msnm 3091 msnm 2930 msnm	
Pastos Limpios	04°29´54.3´´ 04°30´51.7´´	74°11´56.5´´ 74°11´43.7´´	3037 msnm 2860 msnm	

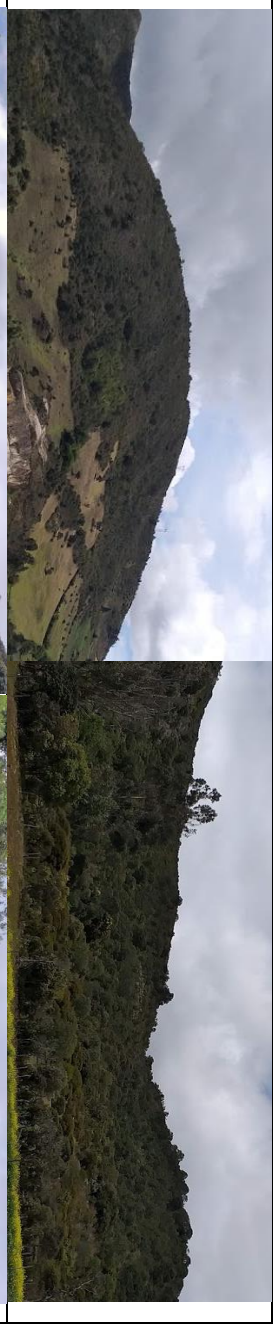
Tierra Des. y Degradada	Bosque Plantado	Arbustales	Bosque Fragmentado
04°35´02.9´´ 04°34´49.9´´ 04°34´48.1´´	04°30´38.7´´ 04°29´38.4´´	04°29´38.4´´ 04°28´44.8´´	04°´30´.069´´ 04°28´26.9´´
74°12´44.1´´ 74°13´09.4´´ 74°13´13.7´´	74°06´24.4´´ 74°11´51.2´´	74°11´51.2´´ 74°12´10.9´´	74°11´55.1´´ 74°12´17.9´´
2604 msnm 2615 msnm 2608 msnm	2761 msnm 3072 msnm	3072 msnm 3079 msnm	3012 msnm 3116 msnm
			

Tabla 13. Matriz de Confusión para la validación

2018 Matriz de Confusión (Pixeles)								
Clase	**Mosaico Cultivos y Pastos**	**Pastos Limpios**	**Arbustales**	**Bosque Fragmentado**	**Tierras Desnudas**	**Tejido Urbano**	**Cuerpos de Agua**	**Total**
Mosaico Cultivos y Pastos	**366**	0	39	0	0	32	3	**440**
Pastos Limpios	0	**633**	0	0	0	0	0	**633**
Arbustales	0	0	**1074**	0	0	4	0	**1078**
Bosque Fragmentado	0	0	0	**1127**	0	0	2	**1129**
Tierras Desnudas y Degradadas	0	0	0	0	**235**	33	0	**268**
Tejido Urbano	12	0	5	0	0	**3566**	37	**3620**
Cuerpos de Agua	0	0	0	0	0	0	**1394**	**1394**
Total	**378**	**633**	**1118**	**1127**	**235**	**3635**	**1436**	**8562**

2009 Matriz de Confusión (Pixeles)								
Clase	**Mosaico Cultivos y Pastos**	**Pastos Limpios**	**Arbustales**	**Tierras Desnudas**	**Bosque Fragmentado**	**Tejido Urbano**	**Cuerpos de Agua**	**Total**
Mosaico Cultivos y Pastos	**345**	0	31	5	30	18	0	**429**
Pastos Limpios	0	**283**	0	0	0	0	0	**283**
Arbustales	18	0	**459**	0	0	2	0	**479**
Tierras Desnudas y Degradadas	3	0	6	**347**	2	27	0	**385**
Bosque Fragmentado	0	0	0	0	**404**	0	4	**408**
Tejido Urbano	1	0	0	0	0	**1620**	3	**1624**
Cuerpos de Agua	0	0	0	0	0	0	**1102**	**1102**
Total	**367**	**283**	**496**	**352**	**436**	**1667**	**1109**	**4710**

1999 Matriz de Confusión (Pixeles)								
Clase	**Mosaico Cultivos y Pastos**	**Pastos Limpios**	**Arbustales**	**Tierras Desnudas**	**Bosque Fragmentado**	**Tejido Urbano**	**Cuerpos de Agua**	**Total**
Mosaico Cultivos y Pastos	**315**	0	0	0	0	0	0	**315**
Pastos Limpios	0	**228**	0	0	0	0	0	**228**
Arbustales	0	0	**223**	0	4	0	0	**227**
Bosque Fragmentado	5	0	0	**244**	0	0	3	**252**
Tierras Desnudas y Degradadas	0	0	0	0	**643**	9	82	**734**
Tejido Urbano	0	0	0	0	41	**68**	0	**109**
Cuerpos de Agua	0	0	0	0	0	0	**465**	**465**
Total	**320**	**228**	**223**	**244**	**688**	**77**	**550**	**2230**

Se obtuvo una calidad alta de la clasificación de las imágenes satelitales, en la tabla anterior (tabla 13), se muestran los valores obtenidos durante la evaluación de la categorización de las coberturas. Estando representando los valores verdaderos del terreno obtenidos en campo para el año 2018 y estimados para los anteriores, por medio de las columnas, y representando los ROI´s de *Train* seleccionados en el proceso por medio de las filas; en diagonal se exteriorizan los pixeles bien clasificados, en las otras celdas se observan los errores cometidos de clasificación, siendo estos muy bajos para todos los tipos de coberturas ya que se obtiene un *Overall Accuracy* muy alto.

Los errores comisión que están representados por los valores asignados en las imágenes satelitales, nos indican cual fue la cantidad de pixeles o el porcentaje que pertenece a una clase y fue asignada a otra por medio del algoritmo; por otra parte, el error de omisión, está representado por el valor verdadero en campo, el cual describe de igual manera la clasificación truncada de una clase con otra, en la siguiente tabla se presentan los errores de comisión y omisión, exhibidos en valores porcentuales y pixeles, de igual manera, se presenta la valoración de exactitud obtenida por el usuario y el productor.

Tabla 14. Matriz de errores y exactitud de la clasificación

2018 **Errores de Comisión y Omisión**				
Clase	**Commission (%)**	**Omission (%)**	**Commission (Píxel)**	**Omission ((Píxel).)**
Mosaico Cultivos y Pastos	16,82	3,17	74/440	12/378
Pastos Limpios	0,00	0,00	0/633	0/633
Arbustales	0,37	3,94	4/1078	44/1118
Bosque Fragmentado	0,18	0,00	2/1129	0/1127
Tierras Desnudas y Degradadas	12,31	0,00	33/268	0/235
Tejido Urbano	1,49	1,9	54/3620	69/3635
Cuerpos de Agua	0,00	2,92	0/1394	42/1436
Exactitud Usuario y Exactitud Productor				
Clase	**Produ. Acc. (%)**	**User Acc. (%)**	**Produ. Acc. (Píxel)**	**User Acc. (Píxel)**
Mosaico Cultivos y Pastos	96,83	83,18	336/378	366/440
Pastos Limpios	100,00	100,00	633/633	633/633
Arbustales	96,06	99,63	1047/1118	1047/1078
Bosque Fragmentado	100	99,82	1127/1127	1127/1129
Tierras Desnudas y Degradadas	100	87,69	235/235	235/268
Tejido Urbano	98,1	98,51	3566/3635	3566/3620
Cuerpos de Agua	97,08	100	1394/1436	1394/1394

2009 **Errores de Comisión y Omisión**				
Clase	**Commission (%)**	**Omission (%)**	**Commission (Píxel)**	**Omission (Píxel)**
Mosaico Cultivos y Pastos	19,58	5,99	84/429	22/367
Pastos Limpios	0,00	0,00	0/283	0/283
Arbustales	4,18	7,46	20/479	37/496
Bosque Fragmentado	0,978	7,34	4/408	32/436
Tierras Desnudas y Degradadas	9,87	1,42	38/385	5/352
Tejido Urbano	0,25	2,82	4/1624	47/1667
Cuerpos de Agua	0,00	0,63	0/1102	7/1109
Exactitud Usuario y Exactitud Productor				
Clase	**Produ. Acc. (%)**	**User Acc. (%)**	**Prod. Acc. (Píxel)**	**User Acc. (Píxel)**
Mosaico Cultivos y Pastos	94,01	80,42	345/367	345/429
Pastos Limpios	100,00	100,00	283/283	283/283

Arbustales	92,54	95,82	459/496	459/479
Bosque Fragmentado	92,66	99,02	404/436	404/408
Tierras Desnudas y Degradadas	98,58	90,13	347/352	347/385
Tejido Urbano	97,18	99,75	1620/1667	1620/1624
Cuerpos de Agua	99,37	100	1102/1109	1102/1102

1999				
Errores de Comisión y Omisión				
Clase	**Commission (%)**	**Omission (%)**	**Commission (Píxel)**	**Omission (Píxel)**
Mosaico Cultivos y Pastos	0	1,56	0/315	5/320
Pastos Limpios	0,00	0,00	0/228	0/228
Arbustales	1,76	0	4/227	0/223
Bosque Fragmentado	3,17	0,00	8/252	0/244
Tierras Desnudas y Degradadas	12,4	6,54	91/734	45/688
Tejido Urbano	37,61	11,69	41/109	09/77
Cuerpos de Agua	0,00	15,45	0/465	85/550
Exactitud Usuario y Exactitud Productor				
Clase	**Produ. Acc. (%)**	**User Acc. (%)**	**Produ. Acc. (Píxel)**	**User Acc. (Píxel)**
Mosaico Cultivos y Pastos	98,44	100	315/320	315/315
Pastos Limpios	100,00	100,00	228/228	228/228
Arbustales	100	98,24	223/223	223/227
Bosque Fragmentado	100	96,83	244/244	244/252
Tierras Desnudas y Degradadas	93,46	87,60	643/688	643/743
Tejido Urbano	88,31	62,39	68/77	68/109
Cuerpos de Agua	84,55	100	465/550	465/465

La exactitudes tanto del usuario y el productor inidca valores por encima del 82% para todas las clases del 2018 y superior al 80% para el año 2009, en la primera imagen del satelite Landsat se observa un valor 62,39% de *User Accuracy*, sin embargo, no representa mayor error ya que esta exactitud obtuvo 68 pixeles bien clasificados frente al total de la clase de 109.

Los resultados obtenidos de la clasificación por medio del algoritmo *Maximum Likelihood* son muy precisos para el proceso realizado y confirman lo presentado por (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2018) quienes indican que es el tipo de algoritmo de clasificación que mejores rendimientos presenta durante el proceso de una clasificación supervisada frente a otros algoritmos de clasificación.

- **Post - clasificación:**

Una vez determinada la adecuada validación de la clasificación de las imágenes satelitales se procedió a realizar un filtro de generalización o suavizado “sal y pimienta”, con el fin de reducir el ruido generado.

Suavizado

La clasifiación generó clases con áreas de tamaño muy pequeño dentro de otras categorias, para eliminar este ruido en las imágenes se utilizo la herramienta ***Majority Filter***, estableciendo un peso central del pixel en 1 y una tamaño de kernel de 3x3, con lo que se obteiene áreas con mayor grado de homogenidad y menor ruido por pixeles aislados en las imagenes satelitales.

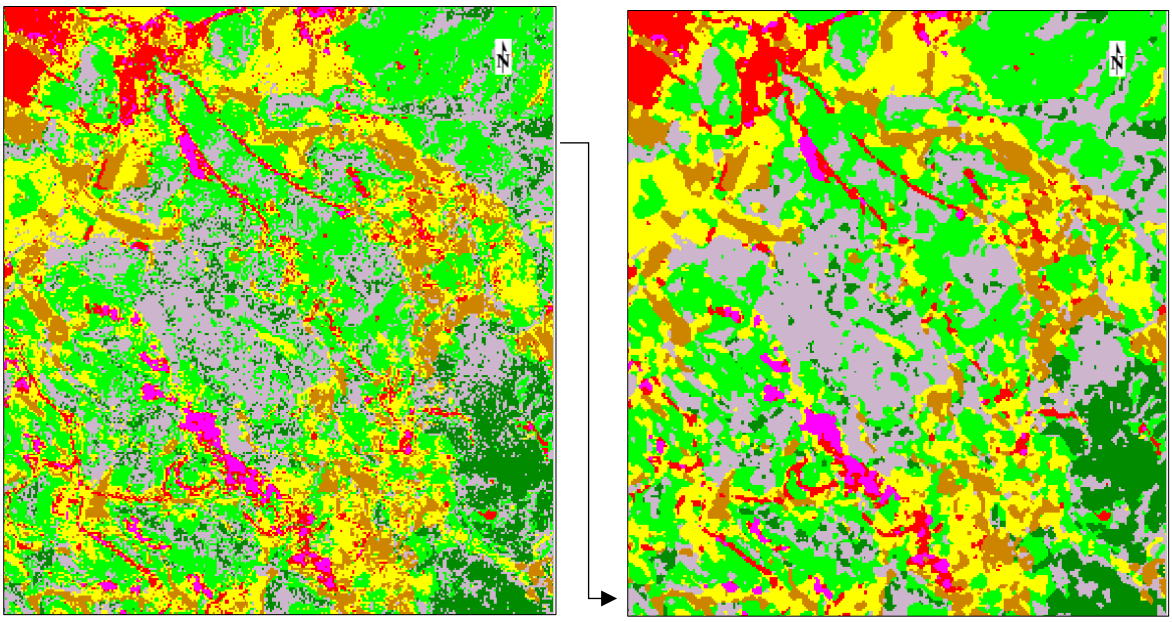
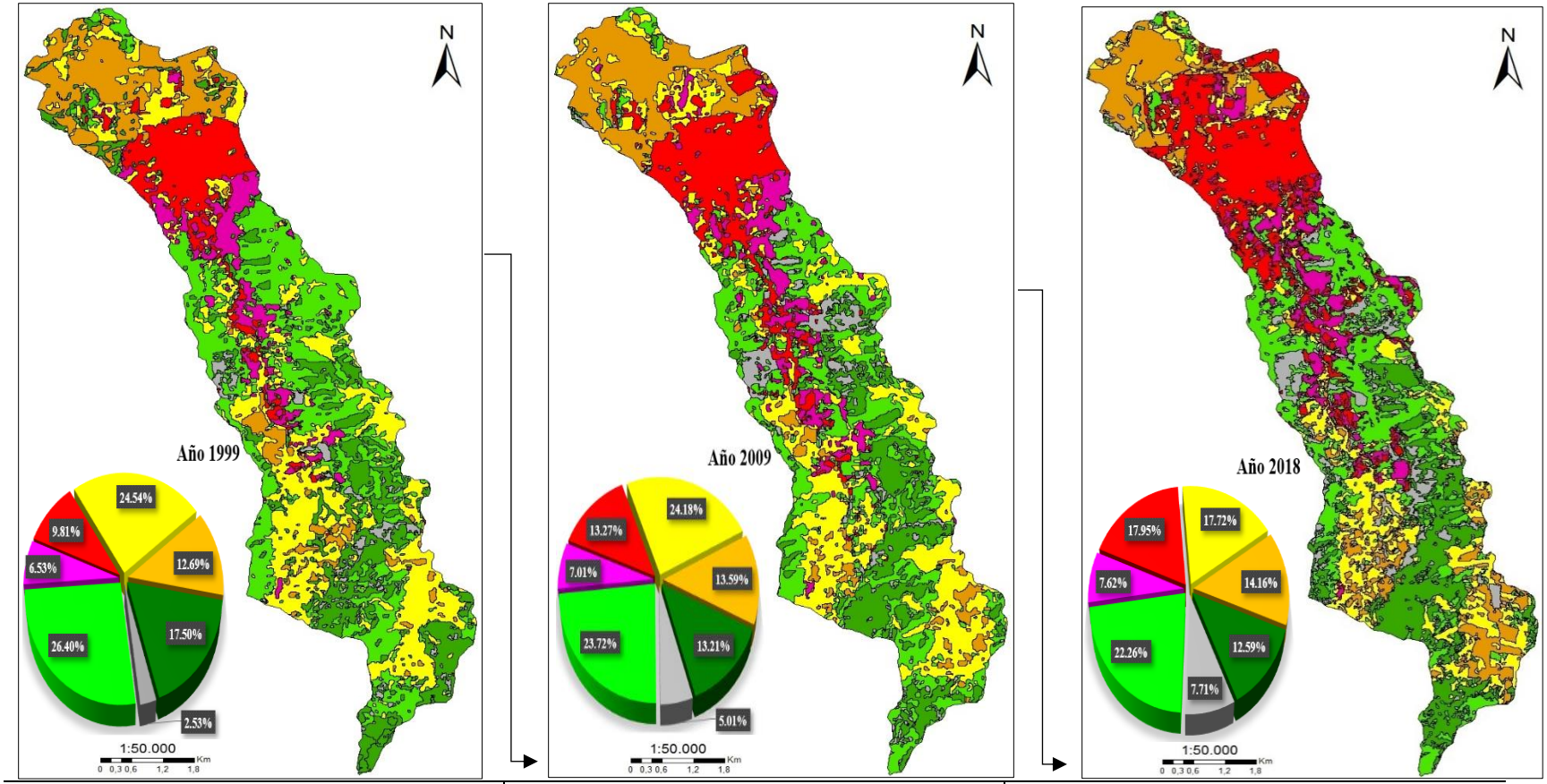


Figura 25. Suavizado en la clasificación
Izquierda: Imagen clasificada; Derecha: Imagen suavizada 3X3
Fuente: Autor (2019)

En la siguiente figura (figura 26) se presenta la clasificación obtenida y las áreas respectivas para cada una de las imágenes satelitales procesadas durante los tres periodos de evaluación.

Los respectivos mapas de las coberturas vegetales de la microcuenca del Río Soacha para los años de 1999, 2009 y 2018 se presentan en los **Anexo 1, Anexo 2** y **Anexo 3**.



Año 1999			Año 2009			Año 2018		
Cobertura	**Área ha**	**%**	**Cobertura**	**Área ha**	**%**	**Cobertura**	**Área ha**	**%**
Tejido Urbano	435,03	9,81	***Tejido Urbano***	588,44	13,27	***Tejido Urbano***	795,90	17,95
Pastos Limpios	1087,85	24,54	***Pastos Limpios***	1072,11	24,18	***Pastos Limpios***	785,51	17,72
Mosaico de Cultivos y Pastos	562,60	12,69	***Mosaico de Cultivos y Pastos***	602,67	13,59	***Mosaico de Cultivos y Pastos***	627,54	14,15
Bosque Fragmentado	775,73	17,50	***Bosque Fragmentado***	585,66	13,21	***Bosque Fragmentado***	558,20	12,59
Bosque Plantado	112,33	2,53	***Bosque Plantado***	222,25	5,01	***Bosque Plantado***	341,94	7,71
Arbustales	1170,43	26,40	***Arbustales***	1051,59	23,72	***Arbustales***	986,77	22,26
Tierras Desnudas y Degradadas	289,72	6,53	***Tierras Desnudas y Degradadas***	311,00	7,01	***Tierras Desnudas y Degradadas***	337,84	7,62
Total	4433,71	100	**Total**	4433,71	100	**Total**	4433,71	100

Figura 26. Clasificación de coberturas
Fuente: Autor (2019)

8.3. Análisis de Dinámicas de Cambio

Las dinámicas de cambio de las coberturas vegetales de la microcuenca del Río Soacha se presentan a partir de un análisis multitemporal de las transformaciones ocurridas para cada clase en un periodo de 10 y 9 años, de igual manera se muestra la configuración espacial a nivel estructural del paisaje de la microcuenca.

8.3.1. Dinámica de las coberturas vegetales través del tiempo

En términos generales la cobertura predominante en la microcuenca del Río Soacha son los arbustales involucrados en la vegetación secundaria de transición ocupando un porcentaje de área del 22,26% el cual es un indicador de la alta intervención antrópica en el área de estudio, seguidas por un fuerte incremento transicional del tejido urbano alcanzando un 17,95% para el año 2018 debido a la alta expansión del crecimiento poblacional en el municipio.

En la tabla siguiente se observa las dinámicas de cambio de coberturas vegetales de la cuenca durante las últimas dos décadas, observando incrementos en coberturas como el tejido urbano, los mosaicos de cultivos y pastos, y las tierras desnudas y degradadas; por su parte coberturas productivas como los pastos limpios y coberturas naturales y seminaturales como el bosque fragmentado y los arbustales presentan disminuciones en su superficie durante el periodo evaluado.

Tabla 15. Dinámica de cambio de coberturas

Cobertura	Área ha			Área %			**
	1999	2009	2018	1999	2009	2018	
Tejido Urbano	435,03	588,44	795,89	9,81	13,27	17,95	↑
Pastos Limpios	1087,85	1072,11	785,50	24,54	24,18	17,72	↓
Mosaico de Cultivos y Pastos	562,60	602,67	627,59	12,69	13,59	14,16	↑
Bosque Fragmentado	775,73	585,66	558,21	17,50	13,21	12,59	↓
Bosque Plantado	112,33	222,25	341,92	2,53	5,01	7,71	↑
Arbustales	1170,43	1051,59	986,79	26,40	23,72	22,26	↓
Tierras Desnudas y Degradadas	289,72	311,00	337,80	6,53	7,01	7,62	↑
Total	**4433,71 ha**			**100%**			

**Las flechas en negro indican incremento en las coberturas, mientras las flechas en rojo indican la disminución de área.

El patrón de cambio en la microcuenca es continuó en el tiempo tanto para las coberturas que incrementan su área como para las que disminuyen. Es notable el gran incremento porcentual que presenta el tejido urbano en el área de estudio pasando de una etapa inicial en el año de 1999 con un área de 435.03 ha (9.81%) a asumir un 17,95% con 795.89 ha, siendo casi el doble por ciento en un periodo de 19 años de evaluación.

Por otro lado, territorios agrícolas y pecuarios como lo son los mosaicos de cultivos y pastos, y de igual manera el bosque fragmentado y territorios seminaturales como los arbustales presentan gran disminución de su área de acuerdo a la dinámica de cambio de la microcuenca, indicando explícitamente que esta reducción de área es por el crecimiento poblacional el cual incentiva el incremento de la superficie del tejido urbano.

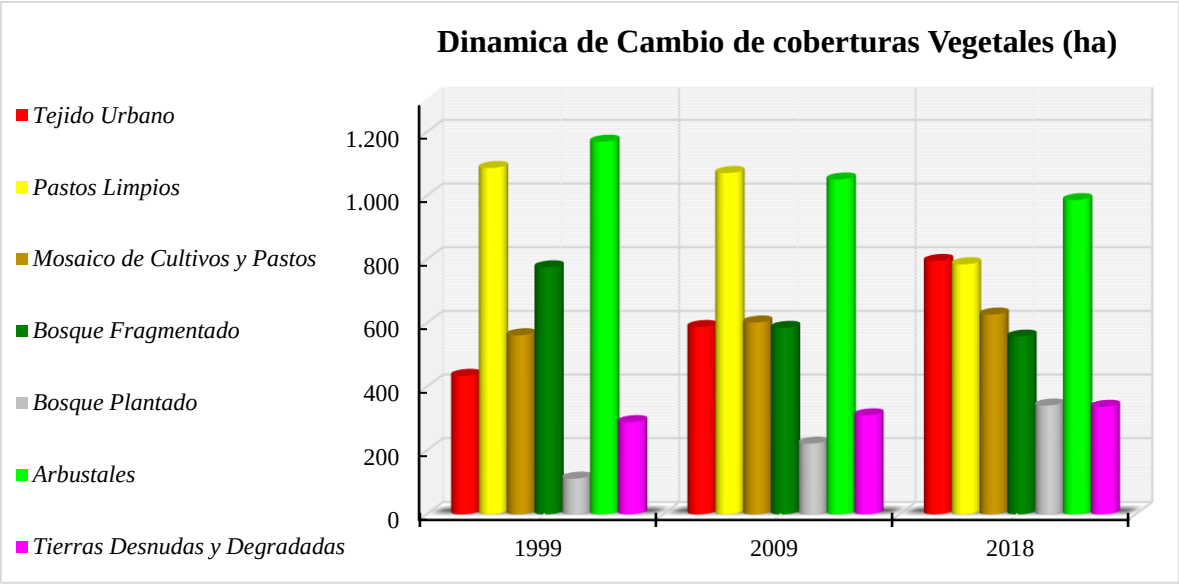


Figura 27. Dinámica de cambio de coberturas
Fuente: Autor (2019)

La figura anterior nos indica la variación de cada cobertura a través de su análisis multitemporal, la cual expresa claramente que es una microcuenca con altos grados y procesos de transformación y alteración, estos cambios están dados para todas las clases de coberturas.

Los cambios porcentuales de las distintas coberturas vegetales de la cuenca del rio Soacha se presentan en la siguiente figura (figura 28), exhibiendo aumentos en el tejido urbano, mosaico de cultivos y pastos, el bosque plantado y las tierras desnudas y degradadas. De igual manera, se presentan las coberturas que tienen dinámica de perdida porcentual en el tiempo como los pastos limpios, el bosque fragmentado y los arbustales.

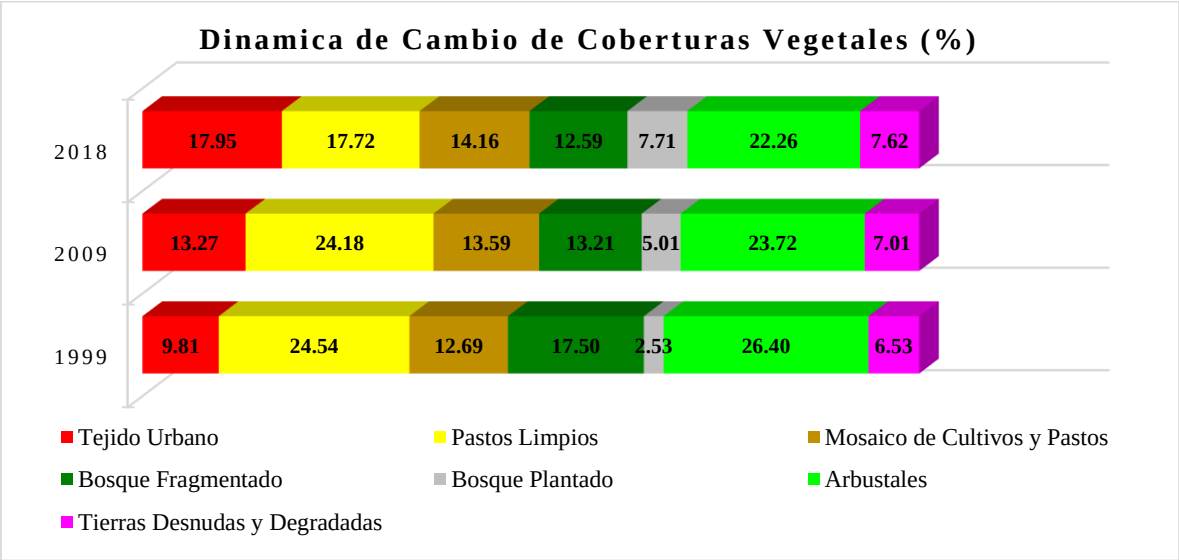


Figura 28. Cambio porcentual de la dinámica de cambio
Fuente: Autor (2019)

8.3.2. Perdida y Ganancia Neta de Coberturas

Como dinámica de cambio, podemos obtener el valor neto de cambio tanto de ganancia y perdida para cada clase de cobertura vegetal presente en la microcuenca como se observa en la figura siguiente de acuerdo a los dos periodos analizados.

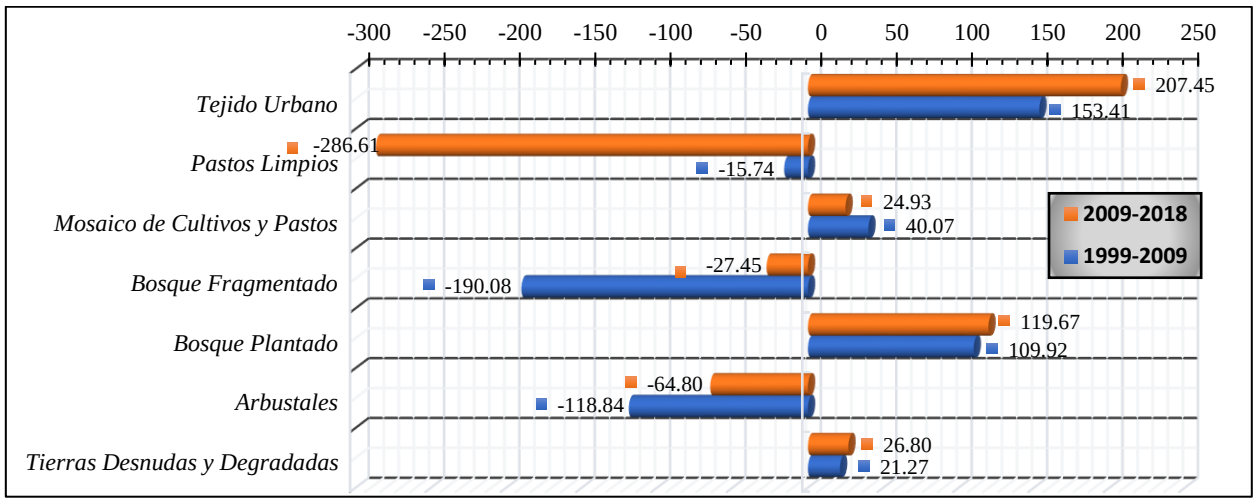


Figura 29. Pérdidas y ganancias en el tiempo
Fuente: Autor (2019)

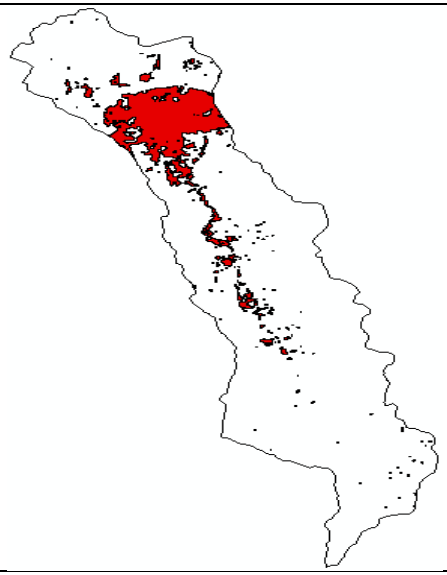
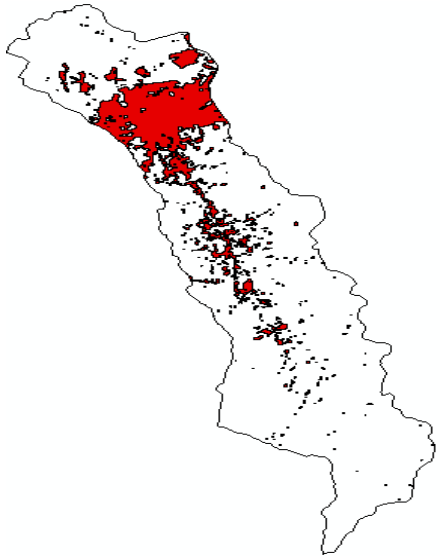
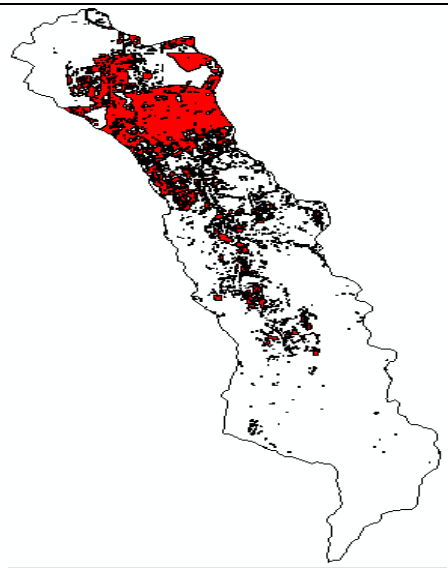
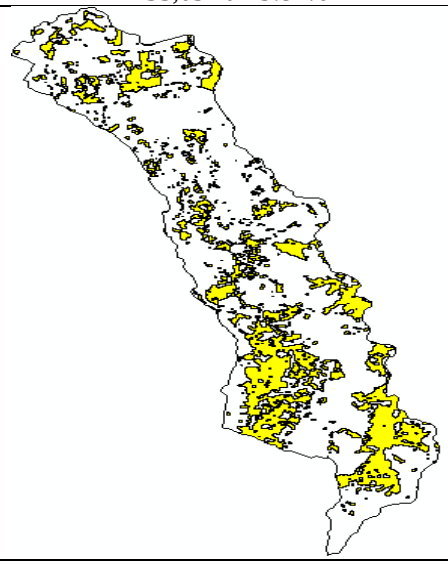
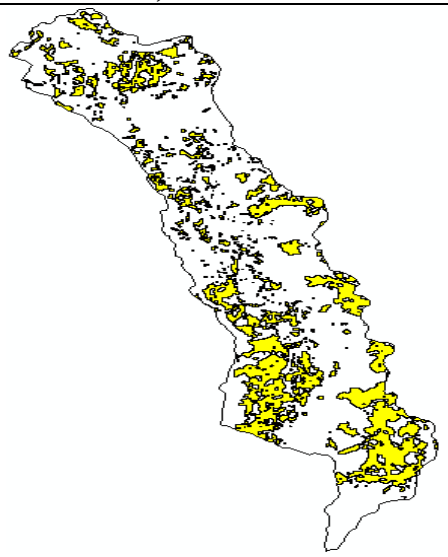
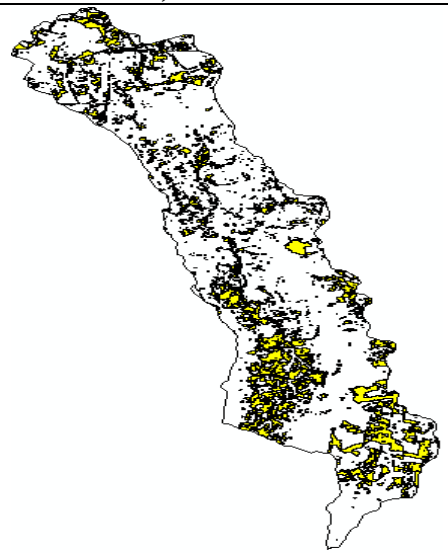
Las mayores tasas de incremento a través del tiempo se ven reflejadas en el aumentó y ganancia del tejido urbano dentro de la microcuenca siendo de +153.41 ha y +207.45 ha para cada periodo evaluado, y retomando los datos que presenta la (Gobernación de Cundinamarca, 2018) esto obedece explícitamente al alto grado de crecimiento poblacional que vive el municipio de Soacha, con una estimación de 634.660 habitantes de acuerdo al último censo.

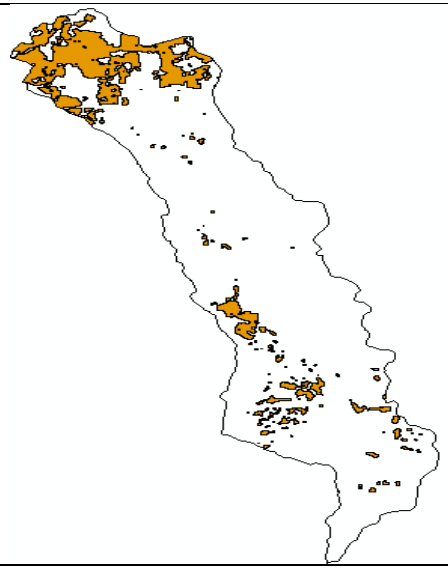
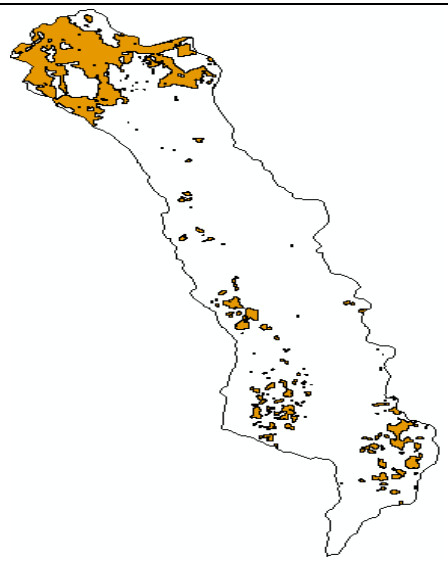
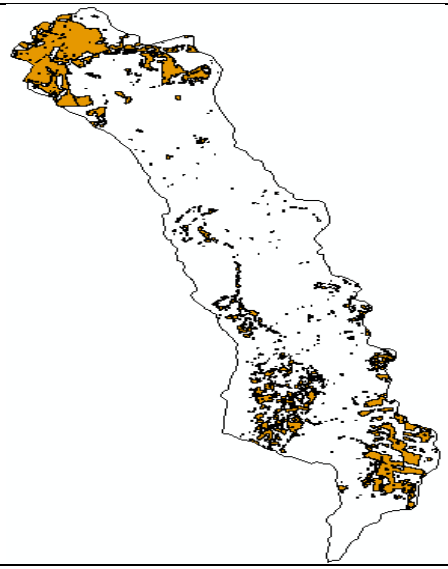
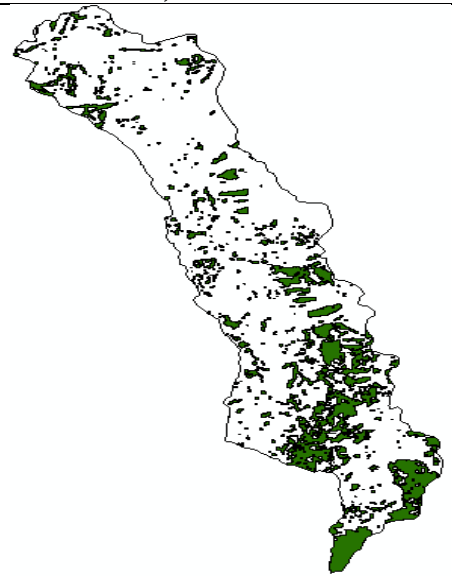
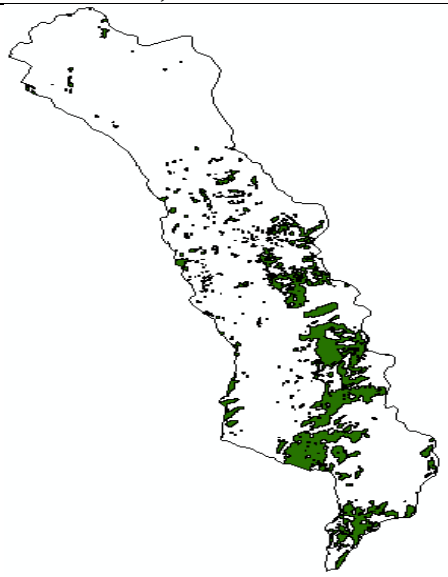
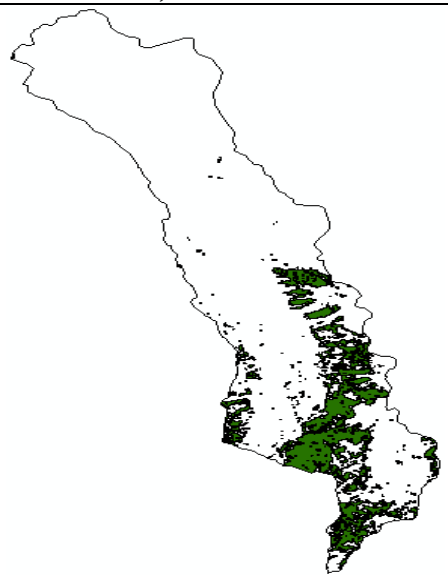
En el periodo inicial de evaluación (1999 a 2009) se observan pérdidas considerables en áreas naturales como los son el bosque fragmentado con -190.08 ha y los arbustales con -118.84 ha, y para el posterior periodo de análisis la cobertura que presenta mayor pérdida de área son las áreas agrícolas con presencia de pastos limpios, con una cifra de -286.61 ha, la más alta perdida de un tipo de cobertura para toda la microcuenca.

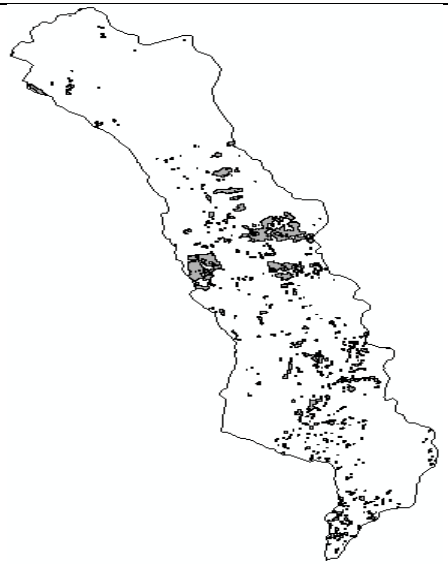
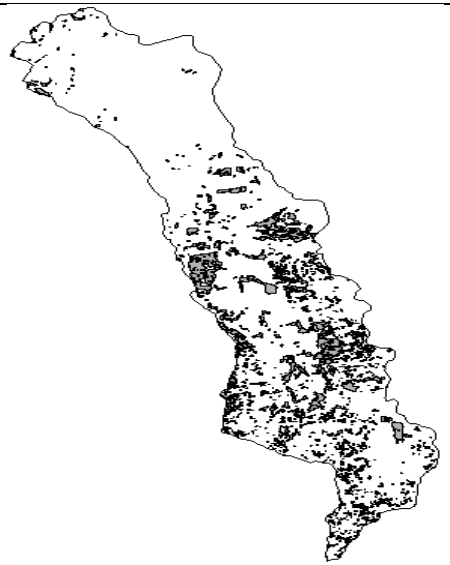
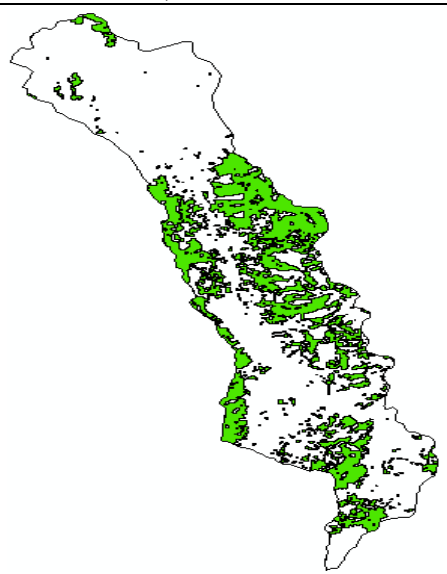
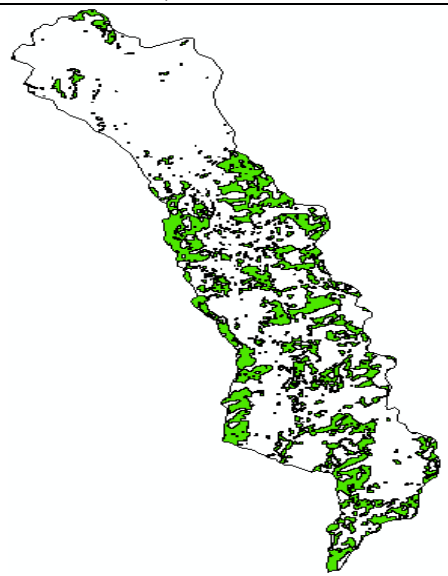
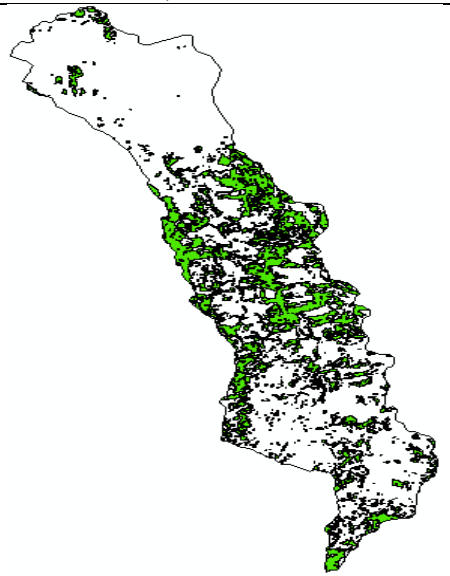
Áreas como las tierras desnudas y degradas presentan un aumento constante para los dos periodos de +21.27 ha y +26.80 ha, seguido de los mosaicos de cultivos y pastos con +40.07 ha para el periodo inicial y en menor medida para el siguiente con +24.93 ha. Los bosques plantados han obtenido ganancias de área superiores a 100 ha durante las dos últimas décadas.

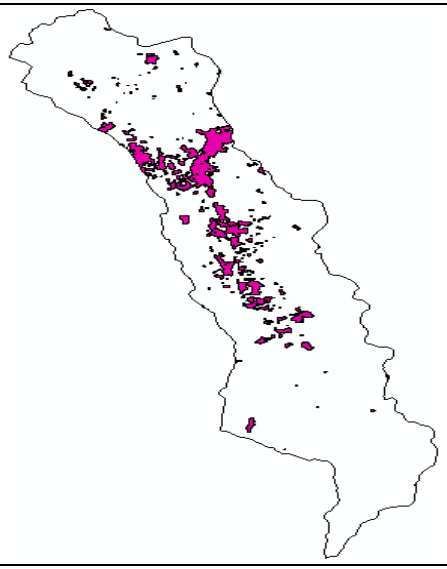
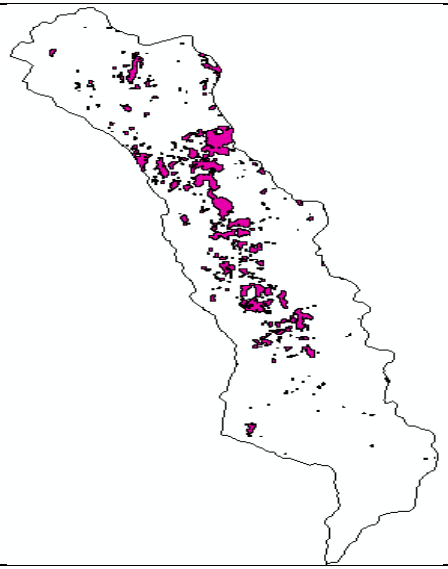
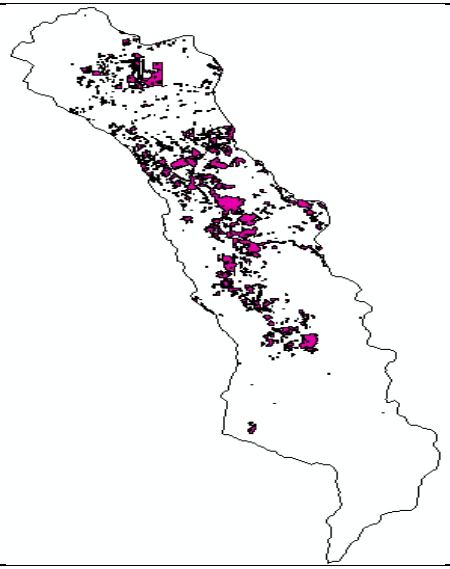
A continuación, se presenta la distribución espacial de cada tipo de cobertura vegetal perteneciente a la microcuenca del Río Soacha y su variación a través del tiempo.

Tabla 16. Distribución geográfica de cambio de coberturas

-	1999	2009	2018
Tejido Urbano			
	435,03 ha - 9.81%	588,44 ha – 13.27%	795,89 ha – 17.95%
Pastos Limpios			
	1087,85 ha – 24.54%	1072,11 ha – 24.18%	785,50 ha – 17.72%

-	1999	2009	2018
Mosaico de Cultivos y Pastos			
	562,60 ha – 12.69%	602,67 ha – 13.59%	627,59 ha – 14.16%
Bosque Fragmentado			
	775,73 ha - 17.50%	585,66 ha – 13.21%	558,21 ha – 12.59%

-	1999	2009	2018
Bosque Plantado			
	112,33 ha – 2.53%	222,25 ha – 5.01%	341,92 ha – 7.71%
Arbustales			
	1170,43 ha – 26.40%	1051,59 ha – 23.72%	986,79 ha – 22.26%

-	1999	2009	2018
Tierras Desnudas y Degradadas			
	289,72 ha – 6.53%	311,00 ha – 7.01%	337,80 ha – 7.62%

8.3.3. Matrices de Transiciones de Cambio de Coberturas

- Matriz de transición:

A continuación, se presenta la dinámica de cambio de las coberturas vegetales a partir del empleo de distintas matrices de coincidencia para la determinación de cambios de uso, como lo son la matriz de cambio-persistencia; la matriz persistencia en cada tipo de cobertura y una matriz que evalúa los procesos de degradación de las coberturas vegetales y algunos procesos de recuperación.

Como lo menciona (Aguilera, 2008) el empleo de las matrices de comparación se aborda en el estudio y cuantificación detallada de los principales cambios y transiciones ocurridas entre dos coberturas o uso del suelo en un periodo de análisis de dos fechas distintas, lo que permite la comparación por pares de coberturas generando una información global para la interpretación de los cambios ocurridos en el tiempo. En la tabla siguiente (tabla 17) se presenta las distintas matrices de coincidencia para la evaluación de 1999 a 2009, 2009 a 2018 y una evaluación total del cambio del periodo de análisis de 1999 a 2018.

Tabla 17. Matrices de transición

Matriz de Coincidencia		Año 2009						
		Tejido Urbano	*Pastos Limpios*	*Mosaico de Cultivos*	*Bosque Fragmentado*	*Bosque Plantado*	*Arbustal*	*Tierras Des. Degradadas*
Año 1999	*Tejido Urbano*	**392,87**	8,40	2,57	2,41	3,56	3,53	21,88
	Pastos Limpios	62,65	**658,04**	135,98	4,59	3,60	174,80	48,34
	Mosaico de Cultivos y Pastos	12,80	143,21	**392,65**	0,14	0,29	4,34	9,77
	Bosque Fragmentado	30,73	92,64	61,64	**319,22**	103,16	159,55	7,95
	Bosque Fragmentado	1,07	11,77	1,76	46,90	**34,53**	11,62	3,71
	Arbustales	21,39	126,58	4,82	211,68	74,26	**683,49**	48,93
	Tierras Desnudas y Degradadas	66,48	31,85	3,71	0,77	1,89	14,63	**170,58**

Matriz de Coincidencia		Año 2018						
		Tejido Urbano	*Pastos Limpios*	*Mosaico de Cultivos*	*Bosque Fragmentado*	*Bosque Plantado*	*Arbustal*	*Tierras Des. Degradadas*
Año 2009	*Tejido Urbano*	**435,04**	41,83	12,53	0,82	11,14	30,54	56,89
	Pastos Limpios	110,62	**445,41**	233,59	16,04	34,46	168,20	63,92
	Mosaico de Cultivos y Pastos	96,78	139,30	**328,37**	0,69	11,39	10,93	14,91
	Bosque Fragmentado	6,54	10,53	6,47	**341,87**	96,29	118,22	5,04
	Bosque Fragmentado	6,36	7,28	5,42	43,70	**99,65**	52,02	6,93
	Arbustales	44,70	109,47	39,51	156,10	78,78	**572,05**	52,66
	Tierras Desnudas y Degradadas	95,51	30,66	1,97	0,00	7,65	37,24	**137,69**

Matriz de Coincidencia		Año 2018						
		Tejido Urbano	*Pastos Limpios*	*Mosaico de Cultivos*	*Bosque Fragmentado*	*Bosque Plantado*	*Arbustal*	*Tierras Des. Degradadas*
Año 1999	*Tejido Urbano*	**357,41**	20,68	4,82	0,00	4,55	12,08	34,74
	Pastos Limpios	109,23	**437,62**	221,82	22,16	37,80	187,66	72,99
	Mosaico de Cultivos y Pastos	105,37	131,12	**285,70**	0,93	7,09	9,56	22,67
	Bosque Fragmentado	38,65	82,42	94,25	**314,02**	129,10	106,95	9,74
	Bosque Fragmentado	1,09	3,48	4,78	45,94	**43,45**	10,09	1,81
	Arbustales	75,29	77,35	11,67	177,52	114,10	**629,32**	87,55
	Tierras Desnudas y Degradadas	110,03	31,17	4,42	0,00	3,22	32,35	**107,97**

Los cambios y transiciones ocurridas de acuerdo a las dinámicas de transformación de las coberturas vegetales de la cuenca del Río Soacha, fueron elaborados a partir del análisis espacial de comparación de valores de pixel a pixel con una matriz de coincidencia de las diferentes categorías de clases de coberturas de dos imágenes satelitales.

De acuerdo a (Franco, 2016) con las estadísticas de cambio de los periodos evaluados se podrá realizar estudios más complejos de tipo Markoviano que relaciona las pérdidas y ganancias en la coberturas y pueden discernir tendencias de cambio a futuro, siendo este el referente para realizar la modelación de las trasformaciones de la coberturas vegetales en la microcuenca del Río Soacha a futuro, como se presenta más adelante a partir de un enfoque más amplio de ecología del paisaje.

- **Matriz de Cambio**

La matriz de cambio indica las áreas de transformación de las coberturas y las zonas donde existen una persistencia a partir de la evaluación de dos fechas distintas, tal como se presenta en la tabla siguiente, observándose en la diagonal las coberturas que permanecen estáticas a través del tiempo y en el resto de celdas, todas las áreas donde se producen los cambios y alteraciones.

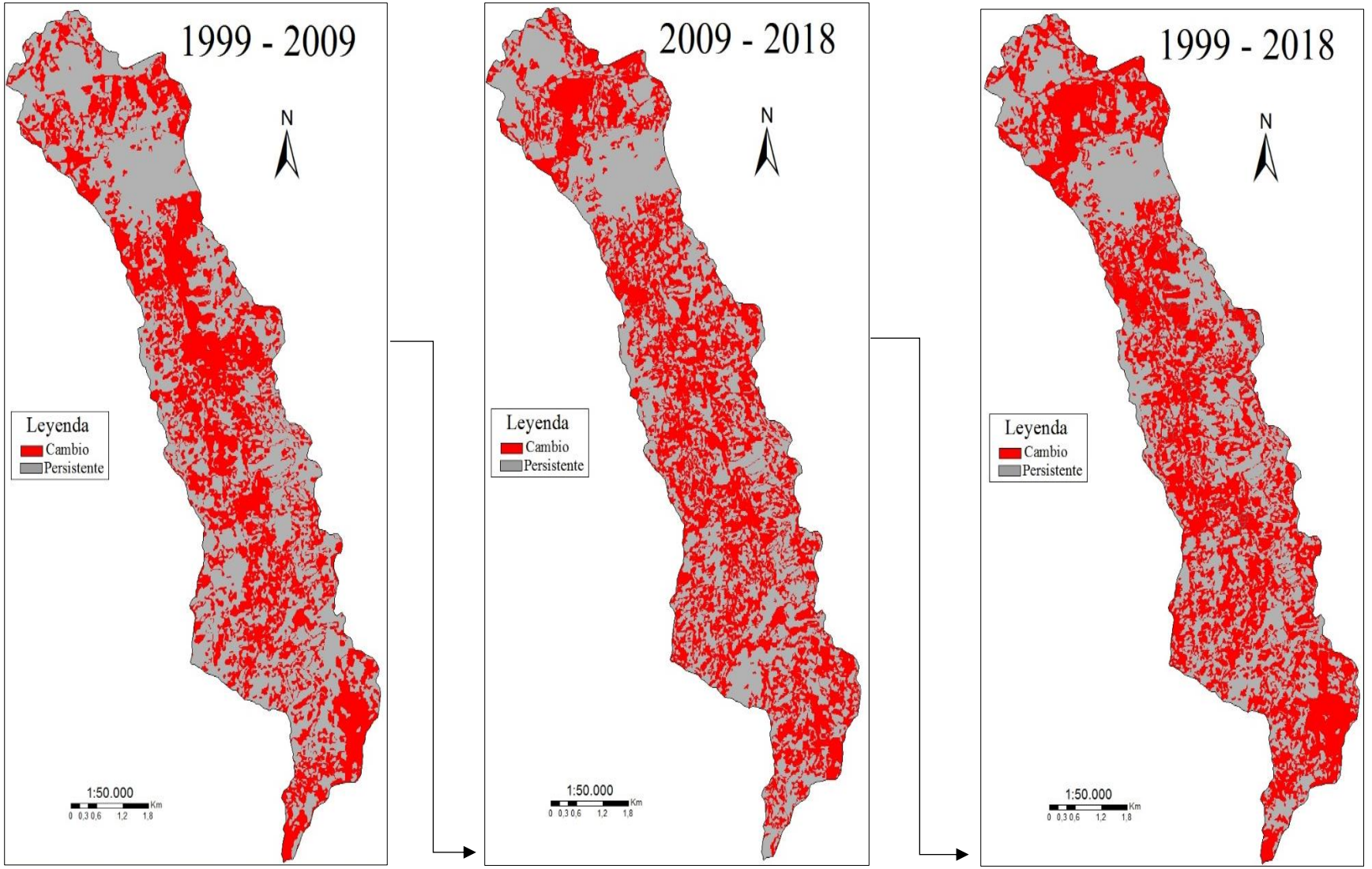
Tabla 18. Matriz de Cambio-Persistencia

Matriz de Coincidencia		**Año X_2**						
		Tejido Urbano	***Pastos Limpios***	***Mosaico de Cultivos y Pastos***	***Bosque Fragmentado***	***Bosque Plantado***	***Arbustales***	***Tierras Degradadas***
Año X_1	***Tejido Urbano***	***Persistente***	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio
	Pastos Limpios	Cambio	***Persistente***	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio
	Mosaico de Cultivos y Pastos	Cambio	Cambio	***Persistente***	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio
	Bosque Fragmentado	Cambio	Cambio	Cambio	***Persistente***	Cambio	Cambio	Cambio
	Bosque Plantado	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	***Persistente***	Cambio	Cambio
	Arbustales	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	***Persistente***	Cambio
	Tierras Degradadas	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	***Persistente***

Este tipo de matriz nos indica claramente la alteración y transformación de las coberturas en la microcuenca, obteniéndose transiciones fuertemente incidentes de cambio, superiores al 40.20% (1782.35 ha) y 46.77% (2073.65 ha) para los dos periodos analizados respectivamente y un global de 50.93% (2258.09 ha) en el análisis general de los 19 años de evaluación, el cual se convierte en el principal indicador de la alta alteración que se presenta en la cuenca en estudio, frente al 49.07% (2175.62 ha) de persistencia que tienen las coberturas vegetales en el área.

La persistencia de coberturas para el periodo inicial es de 59.80% (2651.36 ha) y 53,23% (2360.06 ha) para el siguiente periodo, siendo estos valores significativamente bajos frente a la alta tasa de cambio que se presenta en la microcuenca.

En la figura siguiente (figura 30) se observan las dinámicas de cambios y persistencias de las coberturas para los periodos analizados en el estudio.



Matriz de 1999 - 2009		Matriz de 2009 - 2018		Matriz de 1999 - 2018	
Cambio	**Persistente**	**Cambio**	**Persistente**	**Cambio**	**Persistente**
40,20 % - (1782.35 ha)	59,80% (2651.36 ha)	46,77% - (2073.65 ha)	53,23% (2360.06 ha)	50,93% (2258.09 ha)	49,07% (2175.62 ha)

Figura 30. Transición de cambio y persistencia
Fuente: Autor (2019)

- **Matriz Estacionaria**

Por otro lado, la matriz de persistencia o estacionaria permite obtener la valoración de las transiciones ocurridas por cada tipo de cobertura, adquiriendo un valor porcentual del área de permanencia del periodo inicial de evaluación frente al valor obtenido al siguiente año para cada tipo de cobertura valorada y que permanece estable en los periodos analizados.

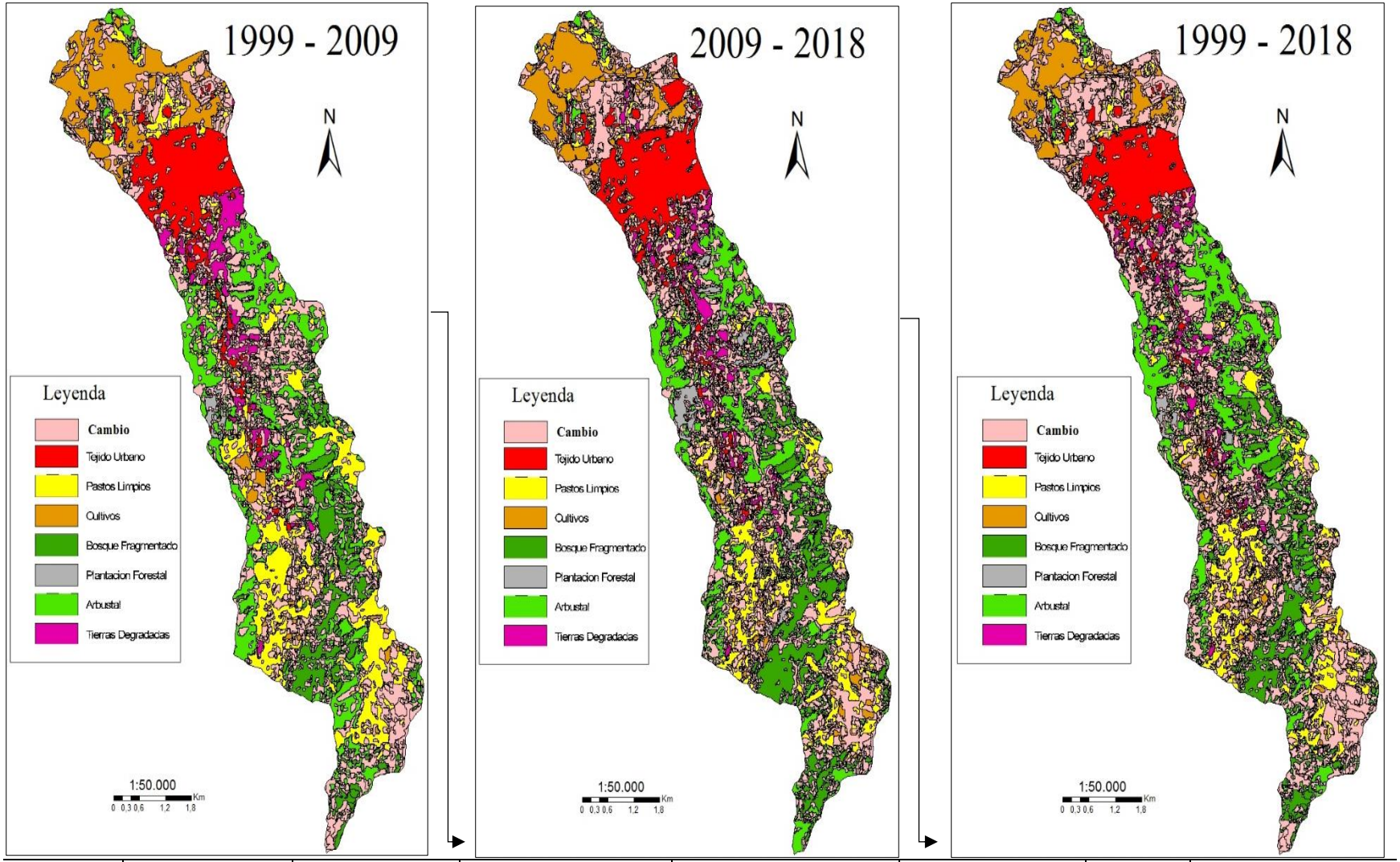
Tabla 19. Matriz de cambio de Coberturas

Matriz de Coincidencia		**Año X_2**						
		Tejido Urbano	***Pastos Limpios***	***Mosaico de Cultivos y Pastos***	***Bosque Fragmentado***	***Bosque Plantado***	***Arbustales***	***Tierras Degradadas***
Año X_1	***Tejido Urbano***	***Tejido Urbano***	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio
	Pastos Limpios	Cambio	***Pastos Limpios***	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio
	Mosaico de Cultivos y Pastos	Cambio	Cambio	***Mosaico de Cultivos***	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio
	Bosque Fragmentado	Cambio	Cambio	Cambio	***Bosque Fragmentado***	Cambio	Cambio	Cambio
	Bosque Plantado	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	***Plantación Forestal***	Cambio	Cambio
	Arbustales	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	***Arbustal***	Cambio
	Tierras Degradadas	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	Cambio	***Tierras Degradadas***

Sobre la base de las consideraciones anteriores, la matriz de persistencia nos presenta como consecuencia de las trasformaciones de la microcuenca las dinámicas de cambio que tiene cada clase de cobertura en los dos diferentes periodos. Con esto podemos considerar las inestabilidades internas que se ven enmascaradas en el valor global de cambio para cada tipo de cobertura. (Peña, 2007).

Significativamente el valor más alto presentado ocurre para el periodo inicial de 1999 a 2009 para la cobertura de tejido urbano siendo este de 66.77% revelando que, una vez transformada una cobertura a este tipo, ya no cambian a otro uso; mientras que el valor menor se observa en el bosque plantado con un 15.54% lo que refleja que a pesar de que el tipo de cobertura aumenta con el tiempo, estas plantaciones de bosques con especies exóticas e introducidas no se realiza en las mismas áreas, por eso su valor es tan bajo.

Las dinámicas de cambio estacionaria para cada cobertura dentro de la microcuenca del Río Soacha se presentan en la siguiente figura (figura 31).



Periodo	Tejido Urbano	Pastos Limpios	Mosaico de Cultivos	Bosque Fragmentado	Bosque Plantado	Arbustal	Tierras Degradadas
1999-2009	66.77%	61.38%	65.12%	54.51%	15.54%	65.00%	54.85%
2009-2018	54.66%	56.70%	52.32%	61.24%	29.14%	57.91%	40.76%
1999-2018	44.91%	55.71%	45.52%	56.25%	12.71%	63.77%	31.96%

Figura 31. Transición de cambio de coberturas
Fuente: Autor (2019)

- **Matriz Carácter de Cambio**

La matriz de carácter de cambio evalúa dos escenarios de transición, por un lado, se presentan todos los procesos que generan degradación por el cambio de cobertura, como lo son las transiciones de áreas naturales a zonas con procesos antrópicos y por el otro lado se presenta la evaluación de las posibles recuperaciones ambientales y productivas que se generan de las transformaciones de las coberturas vegetales. (Peña, 2007) Indica que el carácter de cambio hace énfasis en si la conversión de transformación es positiva o negativa en términos de sostenibilidad ecológica.

Tabla 20. Matriz de carácter de cambio

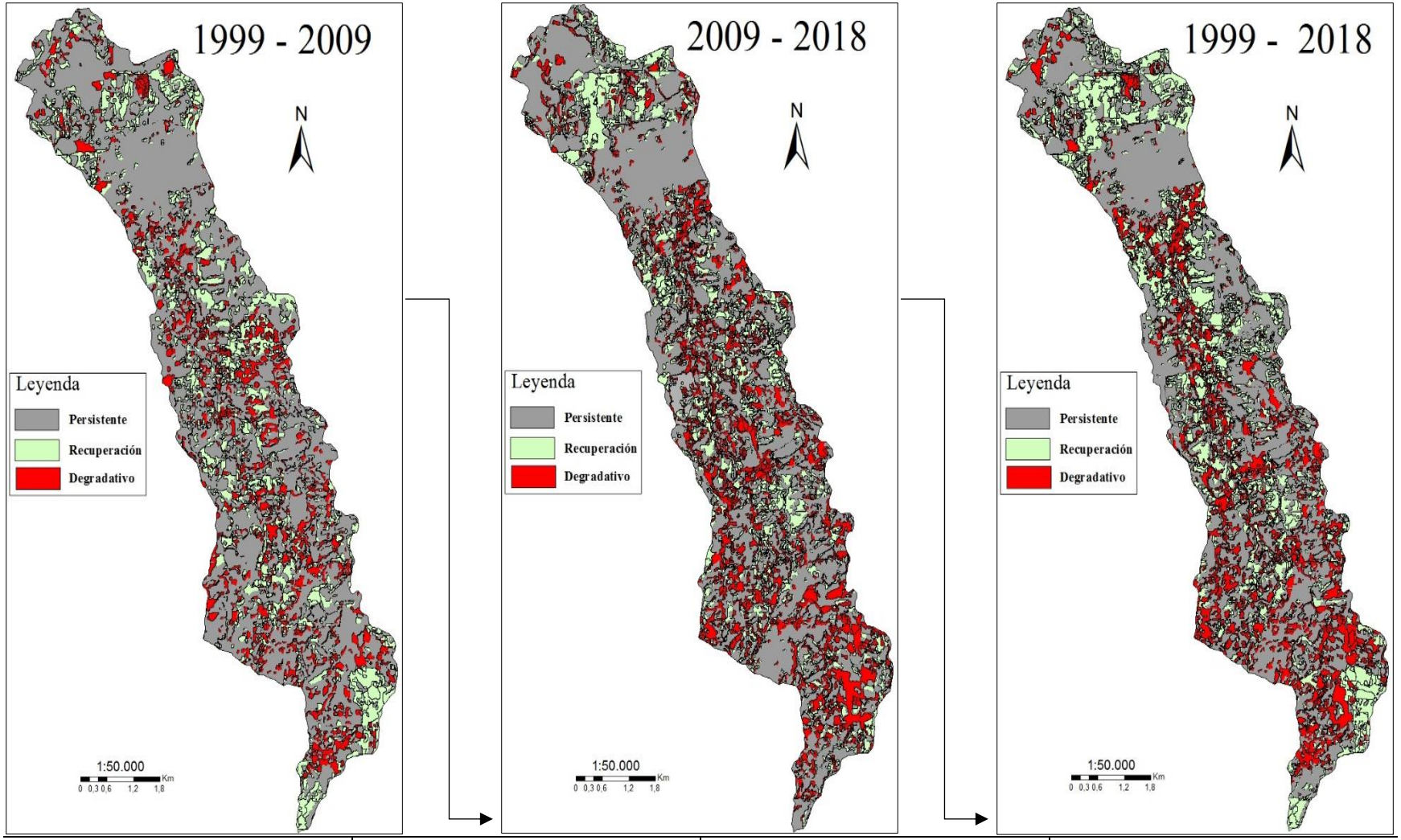
Matriz de Coincidencia		**Año X_2**						
		Tejido Urbano	***Pastos Limpios***	***Mosaico de Cultivos y Pastos***	***Bosque Fragmentado***	***Bosque Plantado***	***Arbustales***	***Tierras Degradadas***
Año X_1	***Tejido Urbano***	***Persistente***	*Recuperación**	*Recuperación**	*Recuperación**	*Recuperación**	*Recuperación**	Degradativo
	Pastos Limpios	Degradativo	***Persistente***	Recuperación	Recuperación	Recuperación	Recuperación	Degradativo
	Mosaico de Cultivos	Degradativo	Degradativo	***Persistente***	Recuperación	Recuperación	Recuperación	Degradativo
	Bosque Fragmento	Degradativo	Degradativo	Degradativo	***Persistente***	Degradativo	Degradativo	Degradativo
	Bosque Plantado	Degradativo	Degradativo	Degradativo	Recuperación	***Persistente***	Recuperación	Degradativo
	Arbustal	Degradativo	Degradativo	Degradativo	Recuperación	Degradativo	***Persistente***	Degradativo
	Tierra Degradada	Recuperación	*Recuperación**	*Recuperación**	*Recuperación**	Recuperación	Recuperación	***Persistente***

*Escenario modelado, poco influyente, no representado

En el escenario de degradación se contemplaron todas las transiciones de cambio ocurridas hacia tierras desnudas y degradadas, de igual manera hacia el aumento del tejido urbano, al mismo tiempo, se presentan las alteraciones ocurridas en las coberturas naturales y seminaturales hacia otras áreas productivas y antrópicas. Los procesos degradativos para los cambios evaluados fueron del 23,65% (1048.57 ha) y 24,28% (1076.50 ha) para los dos periodos de evaluación y una representación global para los 19 años de análisis de 29.64% (1314.15 ha).

El escenario de recuperación indica principalmente la regeneración o procesos que llevan consigo una recuperación ambiental en el área estudio, siendo estas las transiciones de cambio de las coberturas por zonas naturales y seminaturales que contribuyen a la protección y producción de múltiples servicios ecosistémicos. En este contexto, en el periodo inicial solamente el 16.55% (733.78 ha) presentaron una recuperación, aumentando de manera plausible a un grado de 22.49% (997.14 ha) para el periodo de 2009 a 2018.

El grado de persistencia de las coberturas, fue el indicado anteriormente en la primera matriz de coincidencia realizada, siendo respectivamente el 59.80% (2651.36 ha) y 53.23% (2360.06 ha) para los dos cambios de análisis contempladas en el estudio.



Periodo	Persistente	Recuperación	Degradativo
1999-2009	59.80%	16.55%	23.65%
2009-2018	53.23%	22.49%	24.28%
1999-2018	49.07%	21.29%	29.64%

Figura 32. Transición de carácter de cambio
Fuente: Autor (2019)

8.3.4. Métricas de Paisaje

Con el fin de realizar un análisis ecológico del paisaje de la microcuenca del Río Soacha, se emplearon índices a nivel de clase (cobertura vegetal) a partir de su configuración y composición espacial, con métricas de área, forma y agregación, de igual manera se determinó la heterogeneidad estructural a nivel de paisaje con métricas de diversidad como los índices de diversidad Shannon y de uniformidad de Shannon.

- **Composición y Configuración Espacial**

La composición del paisaje esta dado por índices como el número de parches (NP), Densidad del parche (PD), Media ponderada del área del parche (AM) e Índice del parche más grande (LPI), por otro lado, la configuración espacial estructural del paisaje está dada por métricas como el Porcentaje del paisaje (PLAND), Forma (Shape) y Dimensión fractal del parche (Frac_AM). En la tabla siguiente se presenta la dinámica a través del tiempo de la evolución del comportamiento de cada índice en la microcuenca del Río Soacha para los años 1999, 2009 y 2018.

Tabla 21. Métricas del paisaje

Año 1999							
Clase	**NP**	**PD**	**AM**	**LPI**	**PLAND**	**Shape**	**Frac AM**
Tejido Urbano	71	1.60	283.91	7.92	9.82	1.36	1.18
Pastos Limpios	210	4.74	151.39	6.87	24.55	1.49	1.21
Mosaico de Cultivos y Pastos	79	1.78	303.49	9.27	12.71	1.34	1.21
Bosque Fragmentado	280	6.32	55.70	3.34	17.49	1.37	1.17
Bosque Plantado	94	2.12	6.03	0.35	2.57	1.34	1.12
Arbustales	140	3.16	252.96	10.84	26.33	1.53	1.25
Tierras Degradadas	95	2.14	39.74	2.08	6.53	1.38	1.15

Año 2009							
Clase	**NP**	**PD**	**AM**	**LPI**	**PLAND**	**Shape**	**Frac AM**
Tejido Urbano	↑109	↑2.46	↓283.62	↑9.13	↑ 13.26	↑ 1.38	↑1.19
Pastos Limpios	↓199	↑4.49	↓126.99	↓5.51	↓ 24.23	↑ 1.50	↑1.20
Mosaico de Cultivos y Pastos	↑ 87	↑1.96	↑329.62	↑10.04	↑ 13.64	↓ 1.31	↓1.19
Bosque Fragmentado	↓151	↓3.41	↑ 86.75	↑4.14	↓ 13.19	↑ 1.40	↓1.19
Bosque Plantado	↑163	↑3.68	↑ 18.94	↑1.06	↑ 4.98	↓ 1.31	↑1.14
Arbustales	↑206	↑4.65	↓ 53.24	↓2.72	↓ 23.67	↑ 1.57	↓1.20
Tierras Degradadas	↑129	↑2.91	↓ 33.25	=2.08	↑ 7.04	↓ 1.33	↓1.14

Año 2018							
Clase	**NP**	**PD**	**AM**	**LPI**	**PLAND**	**Shape**	**Frac AM**
Tejido Urbano	↑211	↑4.76	↑ 421.06	↑13.01	↑ 17.93	↓ 1.36	↑1.24
Pastos Limpios	↑309	↑6.97	↓ 57.54	↓ 4.25	↓ 17.71	↑ 1.51	↑1.21
Mosaico de Cultivos y Pastos	↑157	↑3.54	↓ 153.69	↓ 6.55	↑ 14.16	↑ 1.48	↑1.20
Bosque Fragmentado	↓ 93	↓2.10	↑ 174.45	↑ 6.63	↓ 12.57	↑ 1.51	↑1.23
Bosque Plantado	↑259	↑5.84	↓ 12.71	↓ 0.97	↑ 7.71	↑ 1.37	↑1.15
Arbustales	↑274	↑6.18	↑ 158.52	↑ 8.36	↓ 22.32	↑ 1.52	↑1.23
Tierras Degradadas	↑154	↑3.47	↓ 16.52	↓ 1.02	↑ 7.60	↑ 1.51	↑1.18

*Flechas Negras Indican Aumento, Flechas Rojas Disminución

El NP presenta variaciones a través del tiempo para cada fragmento de cada clase exhibiendo una disminución constante para el bosque fragmentado, lo que indica la perdida de hábitat ya que para el último año apenas 93 parches persisten frente a los 280 que existían en una etapa inicial; por otro lado, los parches de los pastos limpios fluctúan en el tiempo, en la primera transición el proceso es de disminución, mientras que en el periodo siguiente refleja un aumento por encima del dato inicial, siendo esta diferencia de 309 y 210 respectivamente, los demás parches de las otras clases incrementan en el tiempo, indicando un proceso de fragmentación para los arbustales mientras que para el tejido urbano un crecimiento desordenado en el espacio.

La densidad media de los parches de acuerdo a la dinámica presentada para las coberturas es de constante aumento para clases como son el tejido urbano, los territorios agrícolas de pastos limpios y mosaicos de cultivos y pastos, de la misma manera sucede en el bosque plantado con una PD para el último año de 5.84, la tercera más grande antes de los arbustales y los pastos limpios; siendo esta métrica solamente distinta para el bosque fragmentado, que presenta un disminución notable para ambos periodos analizados.

Con respecto a la media ponderada por área de cada parche y asociando esto al índice del parche más grande se puede apreciar tasas de fluctuación para estas dos métricas, algunas en aumento y otras en perdida. (Correa *et al.*, 2014) indican que el LPI está dado en tasas porcentuales de 0% a 100%, siendo mayor cuando el total del paisaje consiste de un solo fragmento que ocupa el 100% del área; los datos obtenidos en la microcuenca indican porcentajes de rangos muy bajos para los dos periodos de análisis, siendo inferiores al 15% para todas las coberturas; para el periodo final el parche más grande está representado por el tejido urbano, mientras que el inferior es representado por el bosque plantado con un 0.97%.

El bosque natural es el que mayor afectación tiene en el número de parches y su densidad media, muy baja frente a las otras coberturas, siendo esta de tan solo 2.10 en 100 ha, sin embargo, al tener en cuenta que este tipo de coberturas se encuentran en la parte norte de la microcuenca y en zonas de pendiente altas, el tamaño del parche por su media ponderada de área, va aumentando a través del tiempo, lo que refleja una concentración del bosque natural en áreas específicas de acuerdo a su ubicación espacial pero con reduciendo en su área total y hábitat; el porcentaje del paisaje perteneciente a esta clase disminuyó durante los 19 años de evaluación.

El tejido urbano que es la cobertura que mayor incremento presenta dentro de la microcuenca aumenta en todos sus índices de composición y configuración espacial, siendo esto significativamente alto para cada métrica, especialmente en el tamaño medio del fragmento de acuerdo a su área. La cobertura de arbustales conformada de igual manera por alguna vegetación secundaria en transición, es la más dominante en el área de estudio de la cuenca del rio Soacha y presentan un comportamiento totalmente contrario al de los bosques naturales, siendo este un proceso de fragmentación para esta cobertura natural y seminatural, ya que el número de parches aumenta de 140 a 206 y finaliza en el último año con 274, mientras que su tamaño medio disminuye con el tiempo.

En la figura siguiente (figura 33) se presenta las variaciones de los índices de NP versus el DP, y los cambios presentados en el tiempo por el LPI y PLAND.

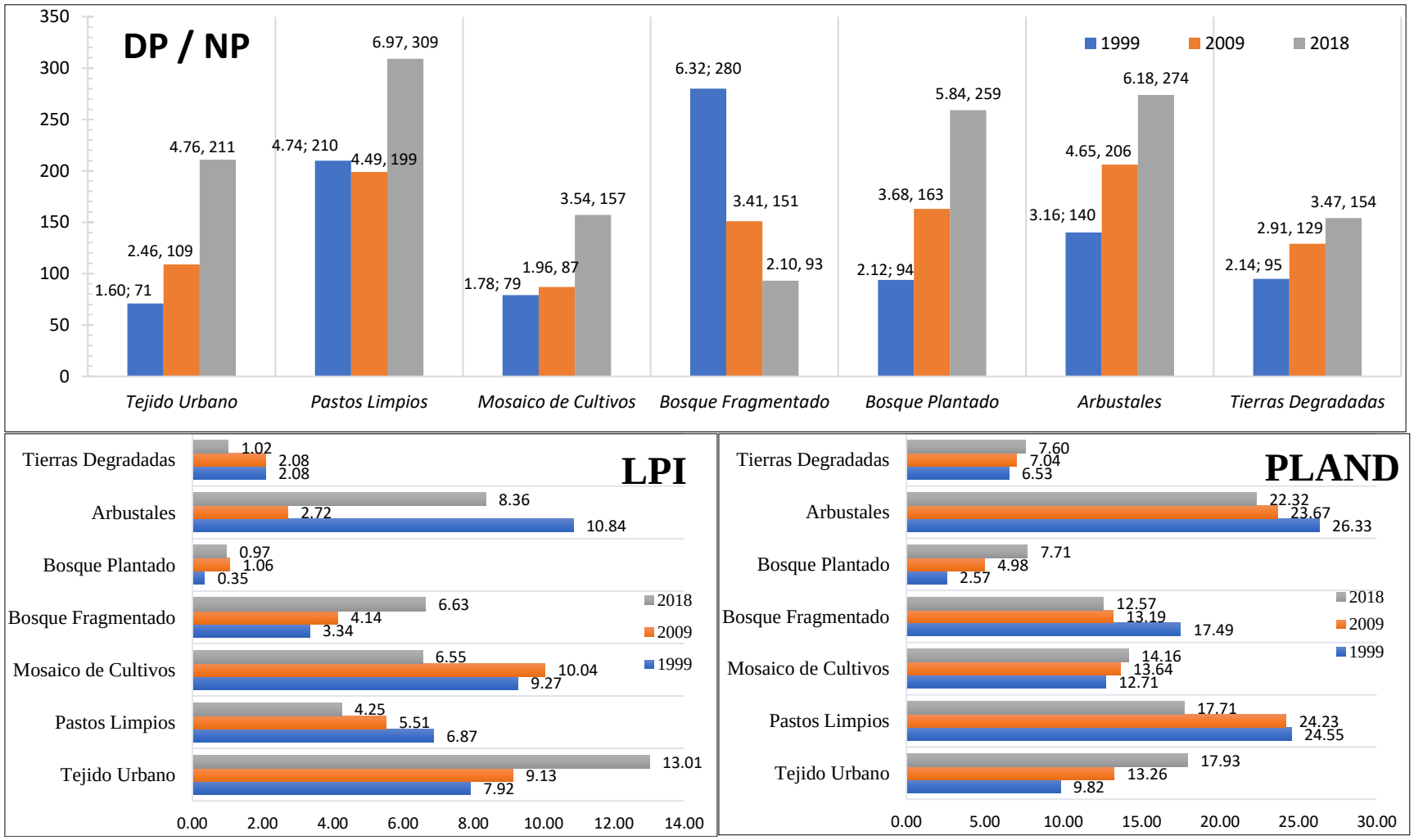


Figura 33. Composición y configuración espacial
Fuente: Autor (2019)

En relación al índice PLAND, que manifiesta los cambios en el tiempo acerca de los incrementos y decrecimientos de las áreas de cada clase de cobertura se observa una dinámica continua de disminución para los arbustales y el bosque fragmentado, del mismo modo que sucede para los pastos limpios; mientras que las áreas con porcentajes creciente pertenecen a coberturas como tierras desnudas y degradadas, bosque plantados, mosaicos de cultivos y pastos y el tejido urbano, siendo este último el que presenta mayor tasa de ampliaciones de áreas convirtiéndose en la segunda cobertura con mayor dominio en la microcuenca del Río Soacha para 2018.

La forma de parche (*Shape*), expresa la irregularidad de la representación de cada fragmento de un tipo de cobertura en el paisaje, siendo igual a uno cuando es circular e incrementado su valor con el grado de alteración en su forma (Ruiz et al., 2013). Este índice revela la configuración espacial de la matriz del paisaje, como vamos a ver en la figura de más adelante (figura 34). Las coberturas como los mosaicos de cultivos y pastos presentan mayor grado de estabilidad en su forma ya que su patrón en el espacio es agregado y más homogéneo, seguido de coberturas para un periodo inicial como el bosque plantado que en campo está dispuesto en cercas vivas y en algunos parches como plantaciones de compensación cercanas a zonas de explotaciones mineras, por otro lado, las tierras desnudas y degradas en su inicio presentaban un forma más regular, la cual se ve truncada para el año 2018, convirtiéndose en irregular. Los demás tipos de coberturas presentan formas más complejas y amorfas en el espacio con muy poca fluctuación en el tiempo.

La dimensión fractal del parche o fragmento para este análisis se le incluyo una medida de peso que permite que parches grandes tengan mayor peso que los pequeños, este índice expresa en uno las formas euclidianas simples (como los son cuadrados y círculos) y en grados mayores de 1.001 a 2 las formas que tienen más complejidad y se vuelven análogas a objetos de tipo fractales.

Las variaciones del *Frac_AM*, son mínimas en el tiempo, para el último año de análisis todas las coberturas presentan incrementos de complejidad e irregularidad en su forma, pero para el periodo que se antecede, existe fluctuación en la dinámica de cambio, disminuyendo para cuatro tipos de coberturas (Mosaico de Cultivos y Pastos; Bosque Fragmentado; Arbustales y Tierras Degradadas) para luego incrementar, sin embrago es de aclarar que los cambios presentados en las dimensiones fractales de los parches no superan el orden de 0.06, siendo este en su gran mayoría estable en el tiempo a diferencia de los arbustales, tierras degradadas y el tejido urbano; para esta última clase se podría decir que el crecimiento poblacional que se presenta el municipio de Soacha y dentro del área de la microcuenca, no es del todo regular, ya que los parches presentan un configuración más compleja en el espacio geográfico y muchas veces los asentamientos humanos terminan siendo de tipo subnormal y de invasión como lo menciona (Preciado, Leal, & Almanza, 2005), como se evidencio en campo, donde existen asentamiento en zonas de laderas y en las cotas superiores donde existen explotaciones mineras.

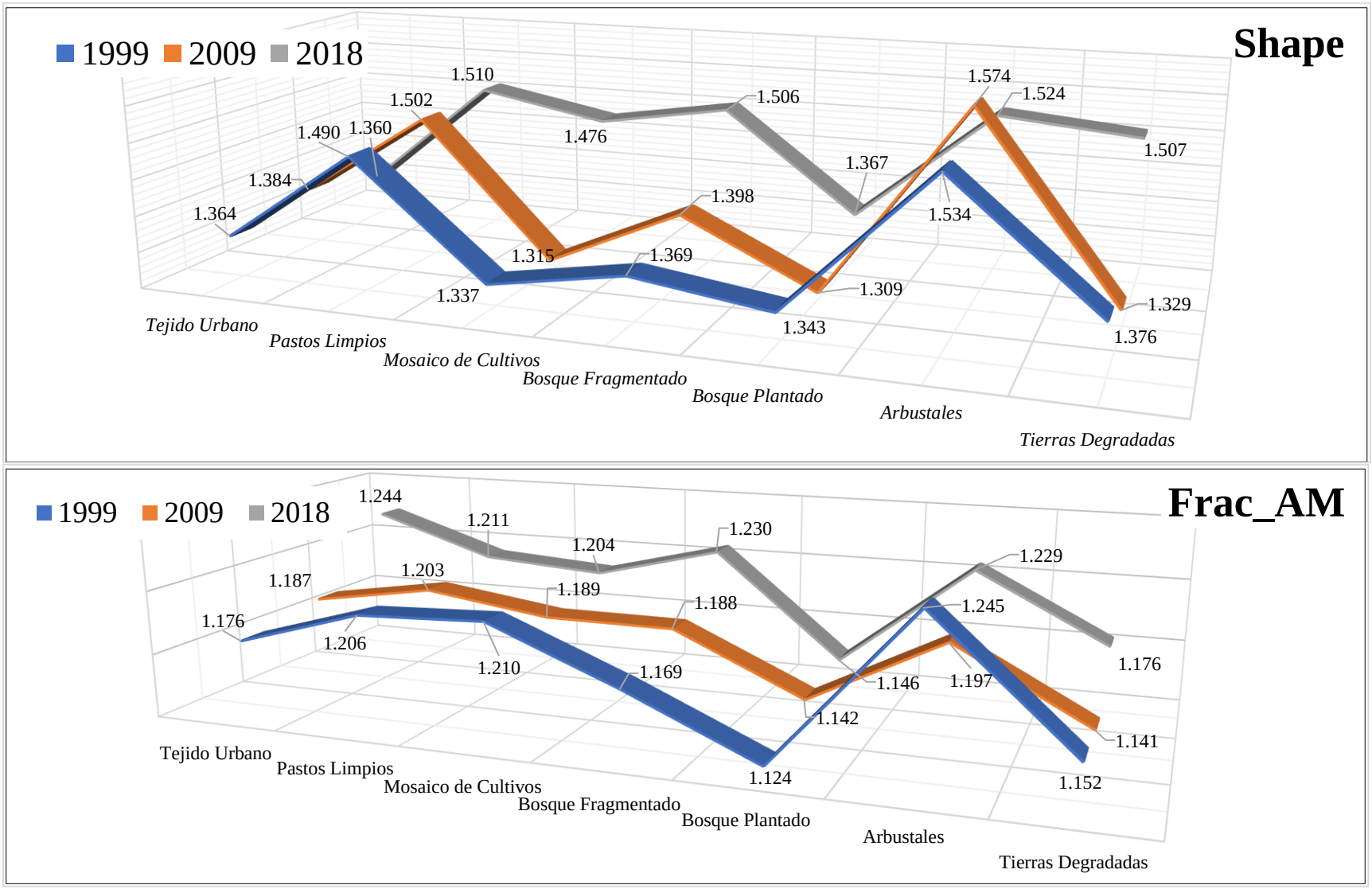


Figura 34. Índice de forma
Fuente: Autor (2019)

- **Conectividad Espacial**

En lo que se refiere a conectividad estructural espacial física del paisaje, esta se calculó a través de la serie espacio-tiempo con tres criterios de distancia de 100 m, 500 m y 1000 m para todas las clases de coberturas, siendo este indicador más relevante para áreas naturales y seminaturales; del mismo modo se determinó su grado de cohesión entre los parches de cada clase, evaluando su dinámica para el periodo de los 19 años de análisis. En la tabla y figura siguiente se presenta el comportamiento de las métricas de conectividad espacial.

Tabla 22. Conectividad espacial

	Clase	Tejido Urbano	Pastos Limpios	Mosaico de Cultivos y Pastos	Bosque Fragmentado	Bosque Plantado	Arbustales	Tierras Desnudas y Degradadas
Año 1999	**CONNECT (100 m)**	1,6901	0,5195	0,8763	0,3661	0,7092	0,9147	0,8959
	CONNECT (500 m)	6,1142	3,3128	6,1142	2,8674	5,3077	5,3135	6,1142
	CONNECT (1000 m)	15,7746	8,0428	12,7881	7,5755	12,1025	11,2847	13,1019
	COHESION	97,10	96,43	97,81	93,71	82,49	97,79	92,43
	Clase	**Tejido Urbano**	**Pastos Limpios**	**Mosaico de Cultivos y Pastos**	**Bosque Fragmentado**	**Bosque Plantado**	**Arbustales**	**Tierras Desnudas y Degradadas**
Año 2009	**CONNECT (100 m)**	0,8665	0,5228	0,7485	0,5828	0,3863	0,7104	0,7994
	CONNECT (500 m)	5,3177	3,6394	5,8273	3,3819	3,9006	4,2008	5,3900
	CONNECT (1000 m)	12,9460	9,4818	13,0446	8,9801	10,3916	9,9124	12,8755
	COHESION	↓ 96,91	↓ 96,23	↓ 97,60	↑ 95,32	↑ 87,67	↓ 94,78	↓ 90,98
	Clase	**Tejido Urbano**	**Pastos Limpios**	**Mosaico de Cultivos y Pastos**	**Bosque Fragmentado**	**Bosque Plantado**	**Arbustales**	**Tierras Desnudas y Degradadas**
Año 2018	**CONNECT (100 m)**	0,7899	0,4371	0,8738	1,6830	0,3981	0,5695	0,8658
	CONNECT (500 m)	5,4435	2,8601	4,3279	6,4516	3,1397	3,3769	4,8383
	CONNECT (1000 m)	14,4392	7,6934	9,6195	12,6695	8,7666	8,4463	11,9599
	COHESION	↑ 97,89	↓ 94,03	↓ 95,85	↑ 97,09	↓ 86,28	↑ 96,36	↓ 89,91

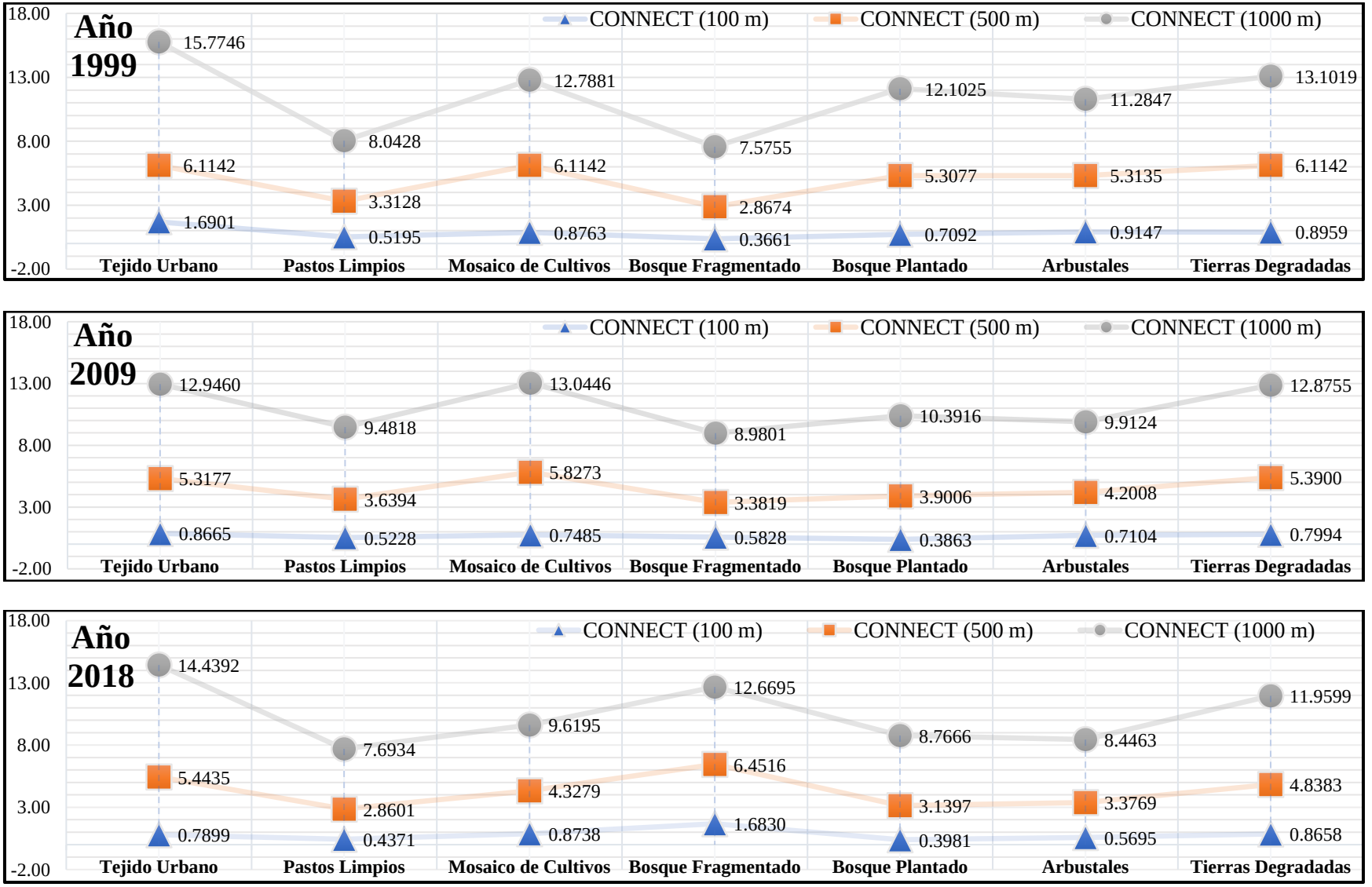


Figura 35- Conectividad espacial
Fuente: Autor (2019)

La conectividad aumenta en el tiempo, pero este proceso solo es dado si se aumentan el escenario de distancia, dado que entre mayor sea este rango, proporcionalmente la conectividad crece. La métrica *CONNECT* indica el grado de conectividad física funcional que puede presentarse para cada cobertura en términos porcentuales, para el caso puntual de las coberturas naturales de bosques fragmentados y arbustales, no sería un adecuado escenario de manejo y gestión generar conectividad física de los fragmentos de estos tipos de cobertura, ya que esto reflejaría la dinámica actual que presenta el bosque principalmente, el cual manifiesta mayor grado de conectividad pero reducción notable de su hábitat natural.

Por su parte, la cohesión es el indicador de la conectividad física para cada una de las clases de coberturas, indicando la agregación y dominancia de los parches en la matriz del paisaje de estudio. Observamos un incremento de 3.38 grados para los bosques fragmentados, con una variación de 93.71 a 97.09; si bien es cierto que refleja un valor alto, no es un indicador adecuado de recuperación de los bosques, ya que lo que refleja la dinámica de esta métrica es una concentración de la mayoría de los parches de la clase en una zona específica generando la agregación de los pocos parches que aún se mantienen, porque recordemos que este tipo de cobertura es la que mayor grado de afectación ha presentado en el tiempo, debido a la disminución de su área por transformación a otros usos por la deforestación y perdidas de áreas naturales.

Los bosques plantados presentan menor grado de cohesión en el paisaje, ya que la agregación y conectividad física de esta cobertura es inducida por la mano del hombre, al igual que sucede con las tierras desnudas y degradadas, estando estas dos clases por debajo del 90; muchos de los bosques plantados están asociados o en área aledañas a zonas de antigua explotación minera, sosteniendo personalmente que esto se debe a proceso de rehabilitación de los suelos por parte de las compañías, con lo que la agregación para estas dos coberturas es la de menor grado ya que se requiere una intervención antrópica para que se genere mayor conectividad física de los parches.

Las mayores tasas de cohesión están dadas para las coberturas de tejido urbano y los arbustales con cifras de 97.89 y 96.36 respectivamente, reflejando su alto grado de dominancia en el paisaje de estos tipos de clase.

- **Heterogeneidad del Paisaje**

La heterogeneidad fue evaluada en una escala más amplia, a nivel de paisaje ya que esta contempla la complejidad de la matriz completa de la microcuenca, incluyendo todas las coberturas, esto realizado a partir del índice de diversidad Shannon e índice de equidad de Shannon; en la tabla siguiente se presenta los resultados obtenido de las dos métricas.

Tabla 23. Heterogeneidad del paisaje

Métrica / Año		1999	2009	2018
Índice de Diversidad Shannon	SHDI	1,7634	↑ 1,8275	↑ 1,8804
Índice de Equidad Shannon	SHEI	0,9062	↑ 0,9392	↑ 0,9663

*La flecha indica incremento para el índice.

La complejidad del paisaje de la cuenca del Río Socha es alta e incrementa con el tiempo, se presenta una alta heterogeneidad derivada de las altas transformaciones que se presentan en el área, la diversidad Shannon aumenta en el tiempo pasando de una etapa inicial de análisis de 1.76 a 1.88 para el último periodo contemplado, esto refleja la presión antrópica existente principalmente con los aumentos de coberturas del tejido urbano, las tierras desnudas y degradadas y el aumento de territorios agrícolas de mosaicos de cultivos. Estos grados de incremento en el tiempo se deben de igual modo a los grados de fragmentación que existe para todas las clases, ya que el NP aumenta en el tiempo.

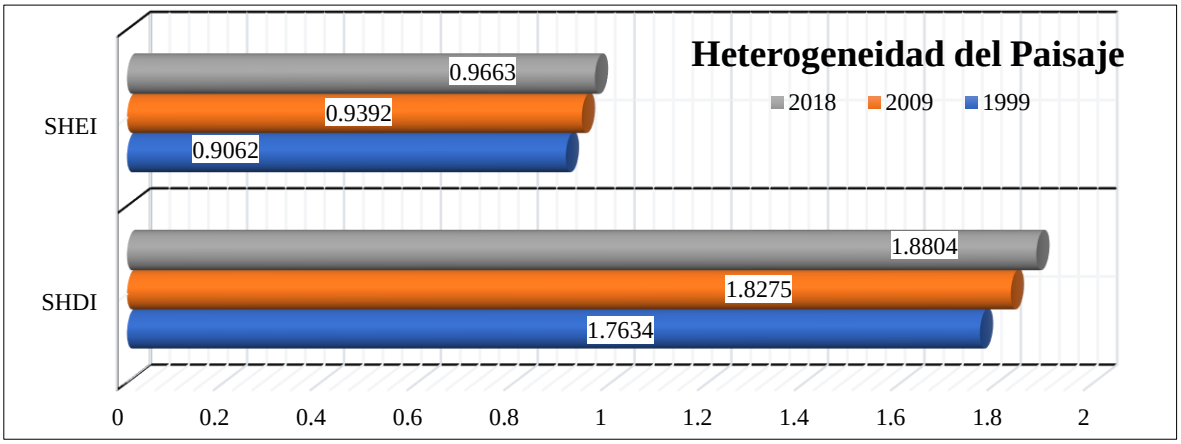


Figura 36. Heterogeneidad del paisaje
Fuente: Autor (2019)

La distribución y abundancia de los parches de todas las clases de coberturas perteneciente a la cuenca aumenta de igual manera en el tiempo, como se expresa por medio del índice de equidad de Shannon, siendo este constante y con dinámica creciente en el tiempo, con valores de 1.76 (1999), 1.83 (2009) y 1.88 (2018) lo que indica que su distribución es alta y con el paso de los años se vuelve más compleja como se presenta en la figura anterior (figura 36).

8.4. Modelamiento de Tendencia de Cambio

El modelamiento de las tendencias de cambio a futuro de las coberturas vegetales de la microcuenca del Río Soacha, se realizó a partir de un análisis más amplio que el área de la cuenca, debido a que los procesos no se restriegue solamente al área de la divisoria de aguas, sino que la cuenca es un sistema abierto, que en la práctica está fuertemente condicionada a las funciones territoriales del paisaje; con lo cual se seleccionó un área general de estudio de 21168 ha, la cual logra abarcar la microcuenca y permite realizar el análisis del paisaje en su contexto. Para tal fin se emplean como insumos las coberturas presentes para los años 2009 y 2018, el modelo digital de elevación y un mapa de vías, obtenido de información de cartografía base del IGAC, solo considerando las vías principales y secundarias para el análisis.

Con el *Land Change Modeler* se obtuvo el análisis de cambios, los potenciales de transición y la predicción de tendencias de transformación a futuro. En la figura siguiente se observa los insumos empleados dentro del software TerrSet para el modelamiento de las coberturas vegetales.

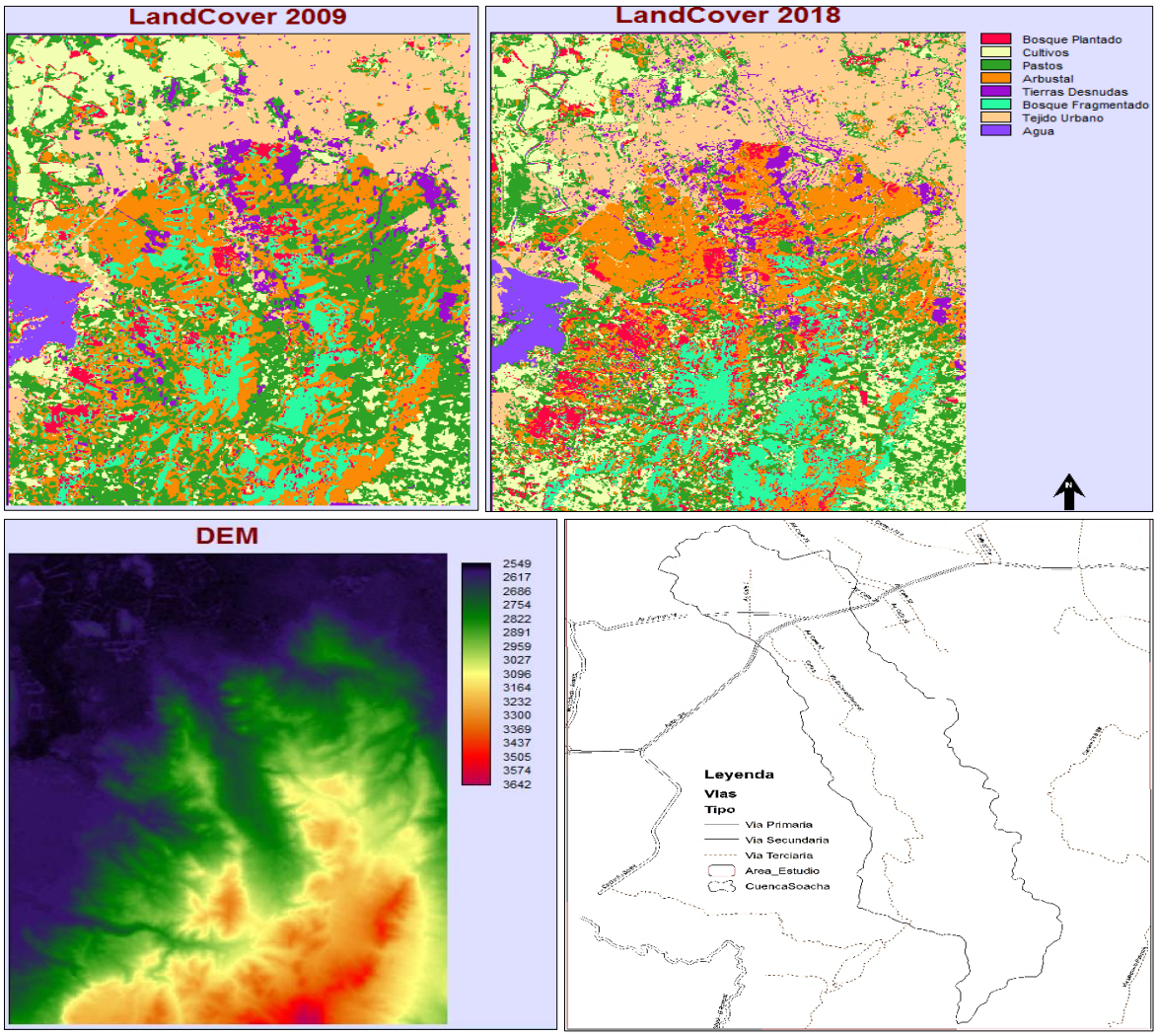


Figura 37. Insumos LCM
Fuente: Autor (2019)

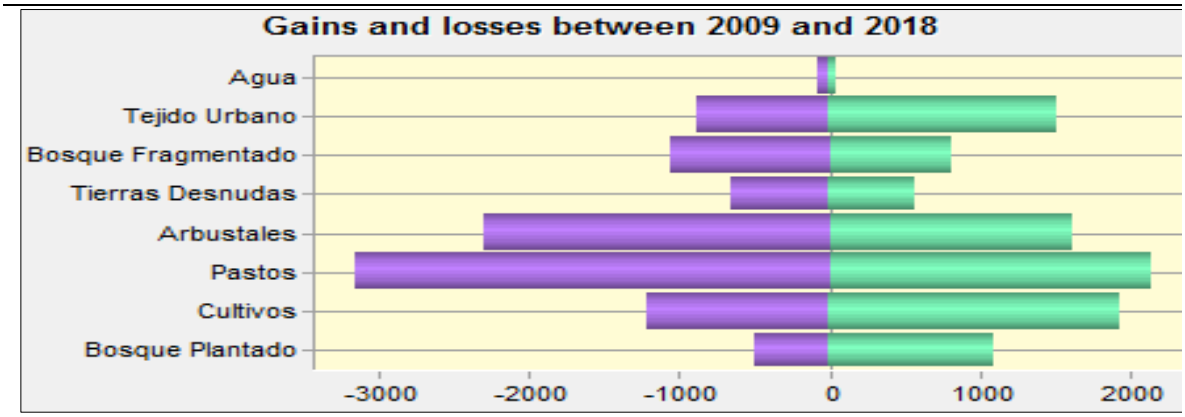
8.4.1. Análisis de Cambios (*Change Analysis*)

Como medida inicial para el *Land Change Modeler*, se realizó el análisis de cambios presentados durante el periodo evaluado, determinando las ganancias y pérdidas ocurridas para cada clase de cobertura, el cambio neto generado durante los años de evaluación, generando consigo un mapa de persistencia, mapas de ganancias y pérdidas para las coberturas naturales y productivas, y un mapa de transición de cambio de todas las coberturas por el crecimiento y expansión del tejido urbano.

- **Ganancias y perdidas**

Durante el periodo de 2009 a 2018, los tipos de cobertura que presenta mayor dinámica de cambio en toda el área general de estudio del paisaje son las áreas de territorios agrícolas de pastos limpios, seguidas de los arbustales, mosaicos de cultivos y la expansión del tejido urbano. Las coberturas que presentan mayores tasas de pérdidas son los pastos y las áreas naturales de arbustales y el bosque fragmentado, mientras que las áreas de mayores ganancias están dadas por el tejido urbano, los mosaicos de cultivos y el bosque plantado. Como puede constatarse en el caso de los pastizales, que perdieron en total 3150 ha, sin embargo, su ganancia fue de 2136 ha, muy inferior a su dinámica de perdida debido a los altos procesos de intervención en sus áreas, como sucede de igual manera en los arbustales y el bosque natural con pérdidas de 2295 ha y 1050 ha respectivamente y ganancias mínimas de 1622 ha y 809 ha para estas dos coberturas.

En la figura siguiente se observa la dinámica dentro del área de estudio general de las ganancias y pérdidas ocurridas para cada tipo de cobertura entre el año de 2009 hasta el periodo del 2018.

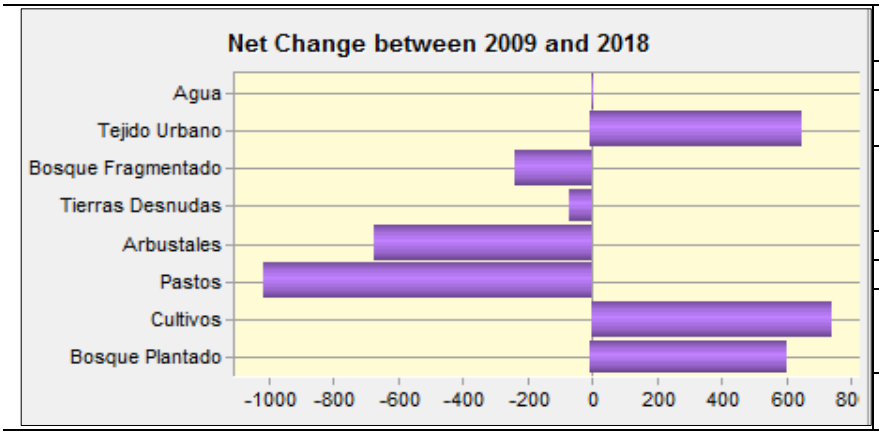


Cuerpos de Agua	-	-
Tejido Urbano	-879 ha	+1533 ha
Bosque Fragmentado	-1050 ha	+809 ha
Tierras Desnudas y Degradadas	-653 ha	+583 ha
Arbustales	-2295 ha	+1622 ha
Pastos Limpios	-3150 ha	+2136 ha
Mosaico de Culticos y Pastos	-1216 ha	+1954 ha
Bosque Plantado	-495 ha	+1105 ha

Figura 38. Ganancias y pérdidas de coberturas
Fuente: Autor (2019)

- **Cambio Neto**

El cambio neto de cobertura se obtiene a realizar el cálculo de las áreas de superficie terrestre de cada cobertura anterior, agregar las ganancias obtenidas al siguiente año de evaluación y luego sustraer las perdidas ocurridas durante un periodo de tiempo dado (Eastman, J., 2012). En la siguiente figura se observa el cambio neto para todas las coberturas del área de estudio.



Cuerpos de Agua	-
Tejido Urbano	654 ha ↑
Bosque Fragmentado	241 ha ↓
Tierras Desnudas y Degradadas	70 ha ↓
Arbustales	673 ha ↓
Pastos Limpios	1014 ha ↓
Mosaico de Culticos y Pastos	739 ha ↑
Bosque Plantado	609 ha ↑

Figura 39. Cambio neto de coberturas
Fuente: Autor (2019)

Con base en lo anterior, en el área de estudio analizada se presentan disminuciones considerables para los pastos (1014 ha) y arbustales (673 ha), seguidos de un descenso considerable de la cubierta del bosque fragmentado (241 ha). En otro orden de ideas las coberturas con mayores ganancias respectivas son los mosaicos de cultivos y pastos (739 ha), el incremento del tejido urbano (654 ha) y áreas con bosques plantados (609 ha), lo que exhibe las altas alteraciones, presiones y transformaciones que se presentan no solamente dentro de la microcuenca, sino en el contexto más amplio de la matriz del paisaje en general del área de estudio.

- **Persistencia de coberturas vegetales**

Con relación a la persistencia de coberturas vegetales dentro del área de estudio es evidente la alta presión y alteración que existe en el territorio, con una persistencia aproximada del 46.8% de las coberturas del periodo inicial y una transformación del 53.2%; las mayores alteraciones como se presentó anteriormente, ocurren por un aumento del tejido urbano consecuente al incremento acelerado de los últimos años de la población que hábitat en la zona, lo que lleva a la pérdida del bosque fragmentado y arbustales, y a generar transiciones de áreas agrícolas y productivas por espacios antrópicos, siendo la principal fuerza conductora del cambio de coberturas la expansión del borde urbano en el municipio de Soacha.

En la figura siguiente (figura 40) se presenta el mapa de persistencia de coberturas para el periodo analizado, el cual ignora las transiciones menores a 10 ha, con el fin de generar un ajuste que permita en el modelo de cambio a futuro obtener mejores resultados de precisión.

(Las áreas de color negro indican los cambios de coberturas ocurridos en la matriz del paisaje).

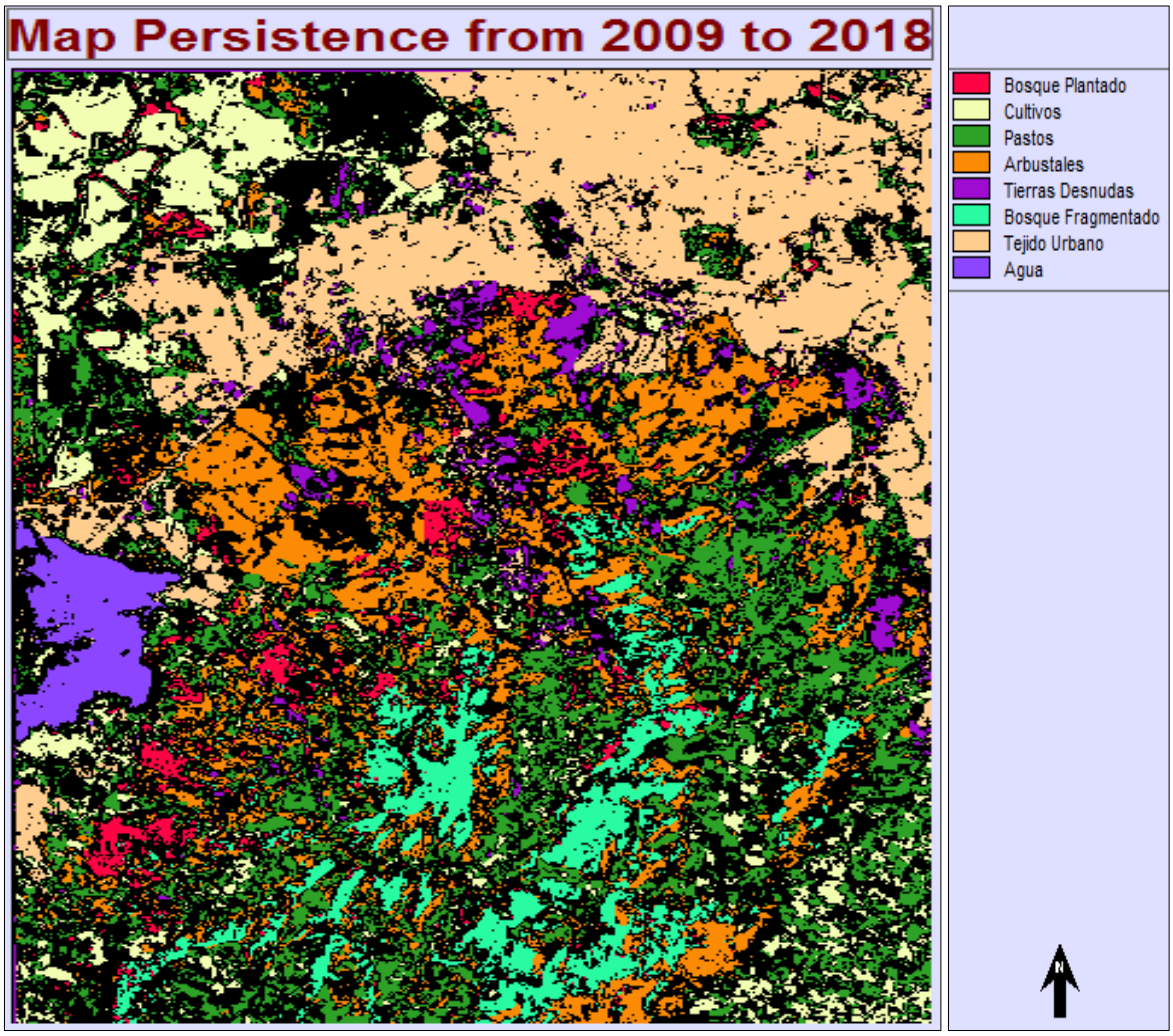
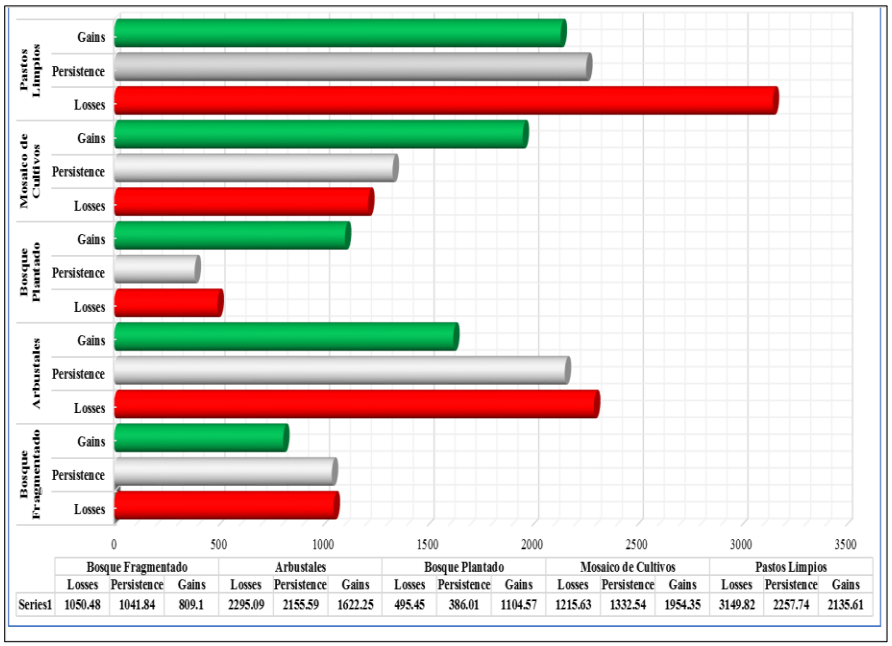


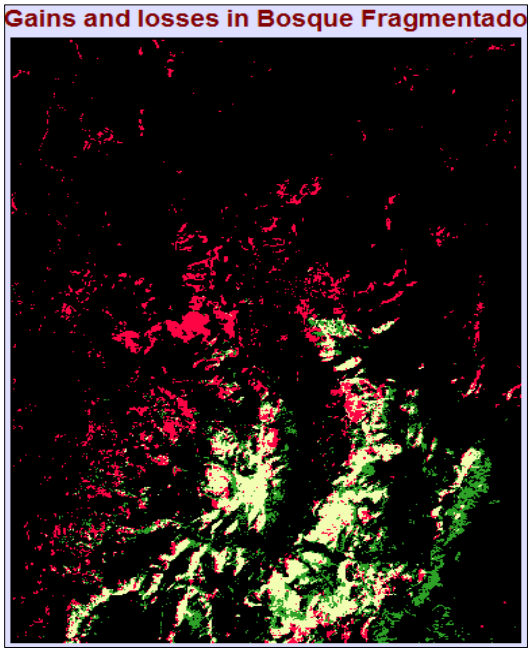
Figura 40. Mapa de persistencia de coberturas
Fuente: Autor (2019)

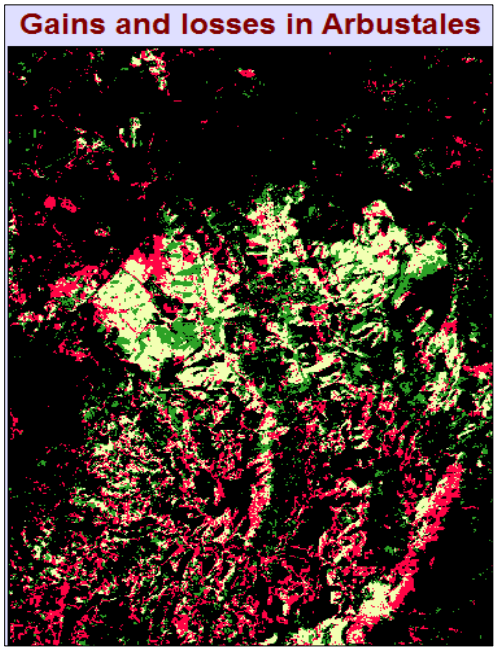
- **Ganancias y pérdidas de coberturas**

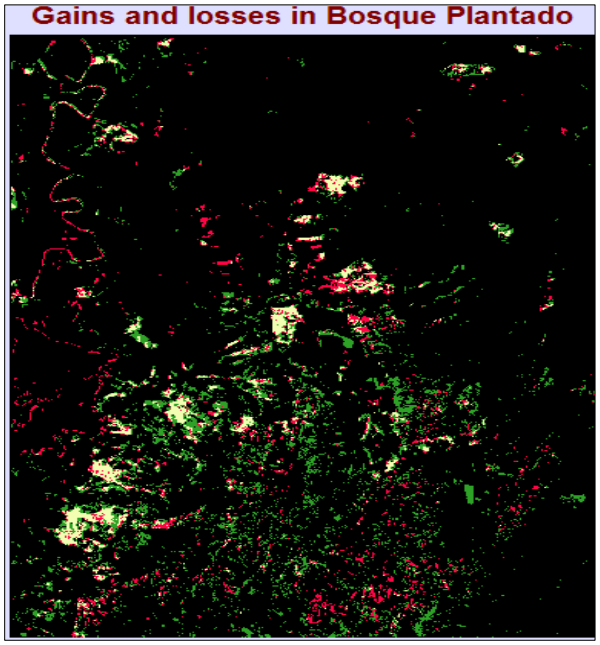
Las tendencias espaciales de las ganancias, persistencias y perdidas de coberturas que se presentan en el área de estudio se detallan en la figura de a continuación (figura 41), donde se aprecia las zonas donde ocurren los procesos de transformación para cada clase de cobertura analizada. Para ilustrar este proceso, el programa permite realizar los mapas de ganancias y pérdidas generados durante el periodo evaluado, percibiéndose mayores tasas de pérdidas para las coberturas naturales del bosque fragmentado y los arbustales, superando su tasa de persistencia en la matriz de paisaje, con pérdidas de 1050.48 ha y 2295.09 ha para cada una de las coberturas. De manera semejante, las áreas de cultivos en mosaicos y el bosque plantado muestra un proceso de ganancia de área de sus coberturas, siendo este de 1954.35 ha y 1104.57 ha, con lo cual logra superar su perdida y grado de persistencia en el tiempo. La cobertura que mayor dinámica de transiciones presenta son los pastos limpios con mayor grado de perdida, ganancia y persistencia.

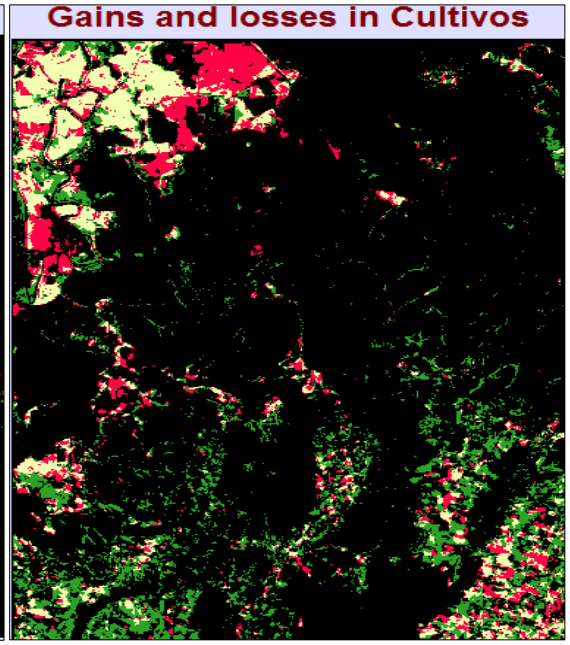


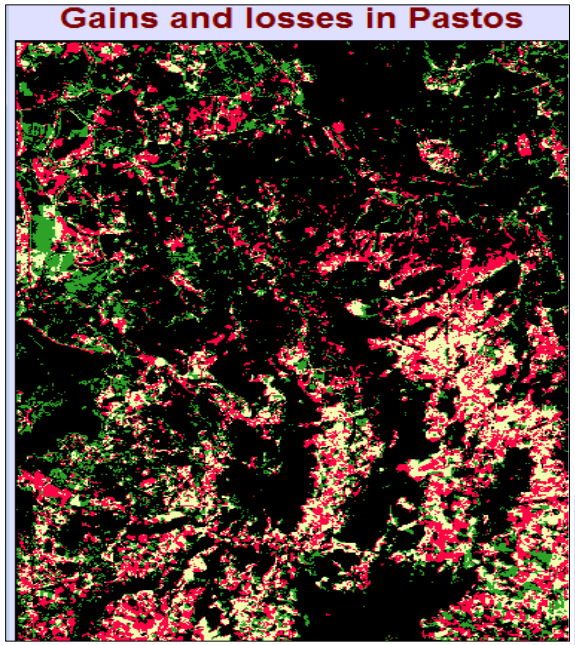
	Bosque Fragmentado			Arbustales			Bosque Plantado			Mosaico de Cultivos			Pastos Limpios		
	Losses	Persistence	Gains	Losses	Persistence	Gains	Losses	Persistence	Gains	Losses	Persistence	Gains	Losses	Persistence	Gains
Series1	1050.48	1041.84	809.1	2295.09	2155.59	1622.25	495.45	386.01	1104.57	1215.63	1332.54	1954.35	3149.82	2257.74	2135.61











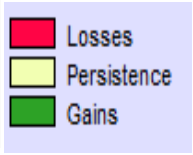


Figura 41. Áreas de pérdidas y ganancias de coberturas
Fuente: Autor (2019)

8.4.2. Potenciales de Transición (*Trasition Potentials*)

Como resultado del análisis de cambio fueron identificadas treinta (30) transiciones de transformación de coberturas vegetales con áreas superiores a 10 ha. Los potenciales de transición a partir de la red neuronal artificial *Multi-Layer Perceptrón* fueron realizados bajo ciertas variables que tienen influencia en los modelos de cambio como lo indican (Cortés, 2017) & (Tuesta, 2018).

- **Variables de influencia**

Se seleccionaron cinco (5) variables determinantes en la prospección de dinámicas de cambio de coberturas a futuro:

- Probabilidad de zonas a incremento urbano
- Distancia a centros poblados
- Pendiente
- Distancia a vías
- DEM

La probabilidad de zonas a incremento urbano fue construida en el software con las zonas que presentaban probabilidad empírica de transición de una cobertura hacia el tejido urbano; de manera semejante la distancia a centros poblados y distancia a vías se calculó por medio de su distancia euclidiana y por último la pendiente fue determinan en grado por el análisis espacial en el programa.

Con el fin de conocer la fuerza explicativa de cada variable, se realizó la validación de las variables que influyen en las dinámicas de cambio de coberturas, mediante el panel de *test* del software; la prueba realizada es V Cramer, la cual permite obtener de manera rápida el valor del potencial de la variable dentro del modelo y su pertinencia al mismo.

Tabla 24. Valores de V Cramer

Cramer`s V:	Aumento de Tejido Urbano	Distancia a Centros poblados	Pendiente	Distancia a Vías	DEM
Overall V	**0.5298**	**0.3089**	**0.2453**	**0.1866**	**0.0846**
Tejido Urbano	0.6826	0.6372	0.3317	0.2807	0.0391
Mosaico de Cultivos y Pastos	0.4612	0.2125	0.1668	0.1734	0.0256
Pastos Limpios	0.3519	0.182	0.1508	0.1649	0.0271
Bosque Fragmentado	0.4973	0.4269	0.3919	0.2322	0.0211
Arbustales	0.4427	0.4269	0.2606	0.2066	0.0317
Bosque Plantado	0.3282	0.1887	0.1802	0.0948	0.0185
Tierras Desnudas y Degradadas	0.3819	0.1564	0.0496	0.1001	0.2202
Cuerpos de Agua	0.848	0.2395	0.2608	0.1868	0.0103

Como lo indica (Eastman, J., 2012), la V Cramer revela un valor explicativo potencial de la variable empleada, siendo un buen indicador del empleo o descarte de dicha variable, mencionando que valores superiores a 0.15 son útiles. En la tabla anterior (tabla 24) se presenta la comprobación de la validación de las variables.

Como resultado de V Cramer, se obtienen adecuados desempeños de las variables en términos generales y en asocio a cada cobertura, siendo el aumento de tejido urbano (0.5298), la distancia a centros poblados (0.3089), la pendiente (0.2453) y la distancia a vías (0.1866) las variables empleadas en el MLP, mientras que el DEM (0.0816), es descartado para el modelo ya que su influencia es de menor grado tanto a nivel general como para cada tipo de cobertura.

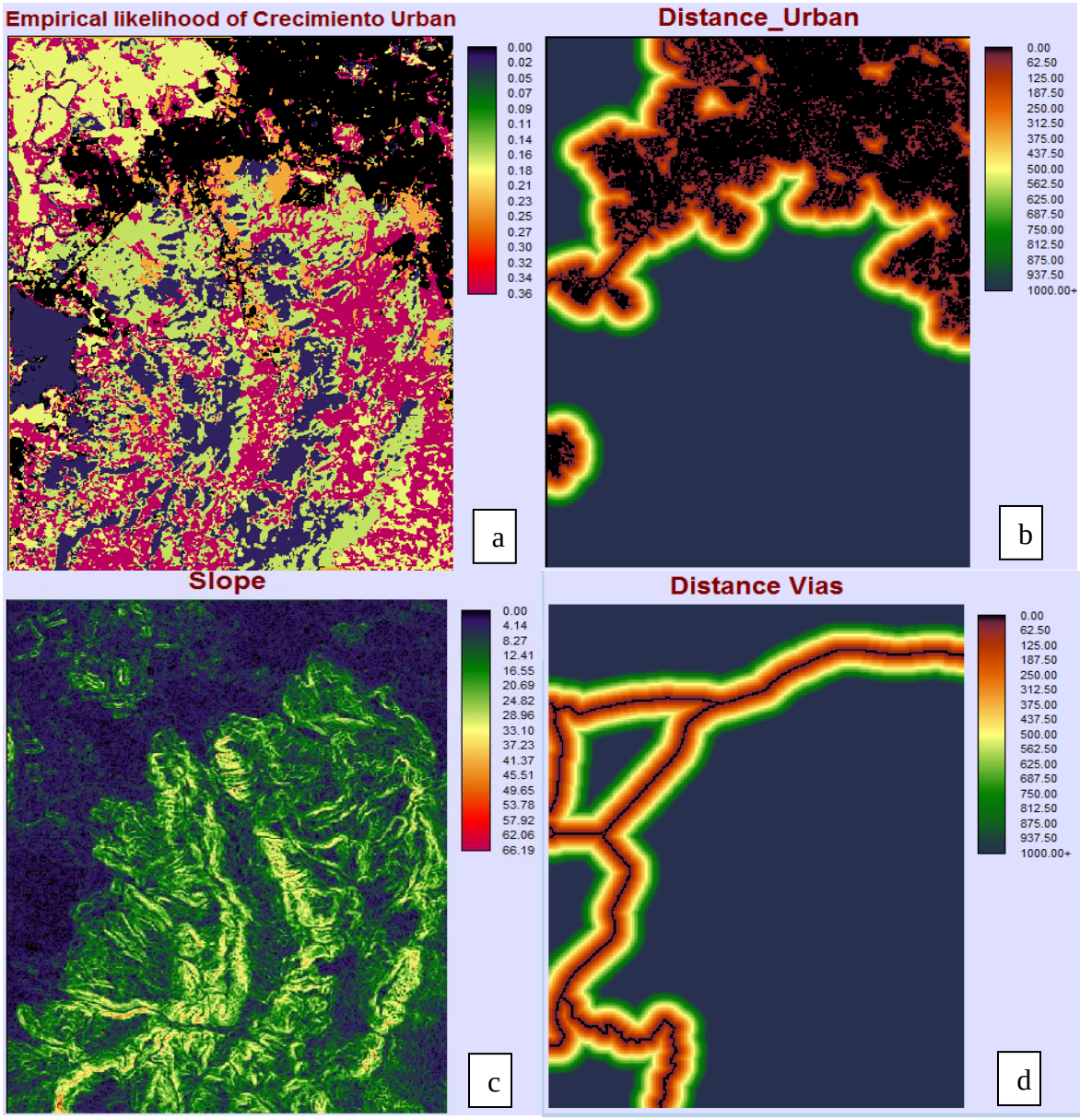


Figura 42. Variables del modelo
Variables: a. Probabilidad de zonas a incremento urbano; b. Distancia a zonas urbanas; c. Pendiente y d. Distancia a vías.
Fuente: Autor (2019)

Las variables probabilidad de zonas a incremento urbano, distancia a centros poblados y distancia a vías fueron ingresas al modelo como compontes de tipo dinámico, ya que su valor cambia en el tiempo y son recalculadas en el transcurso de la predicción de cambios de las coberturas a futuro; de la misma manera la pendiente fue agregada al modelo, pero en este caso como componente estático, ya que es considera que no presenta variación en el tiempo.

- **Modelación de Potenciales de Transición**

Las 30 transiciones de cambio de coberturas fueron modeladas bajo la red neuronal de perceptrones de multicapa (MLP), usando un entrenamiento de modo automático, el cual puede monitorear y modificar el índice de aprendizaje inicial y final a partir del procesamiento dinámicos de los datos. (Eastman, J., 2012).

Fueron procesados un total de 10000 interacciones para cada submodelo (transiciones), basado en una tasa de presión del 100%, con un error medio cuadrático (RMS) con significancia de 0.01; con lo que se puede obtener para cada una de las transiciones un mapa de los potenciales de transformación para cada cobertura, con tasa de precisión y medidas de habilidad adecuados para la modelación a futuro.

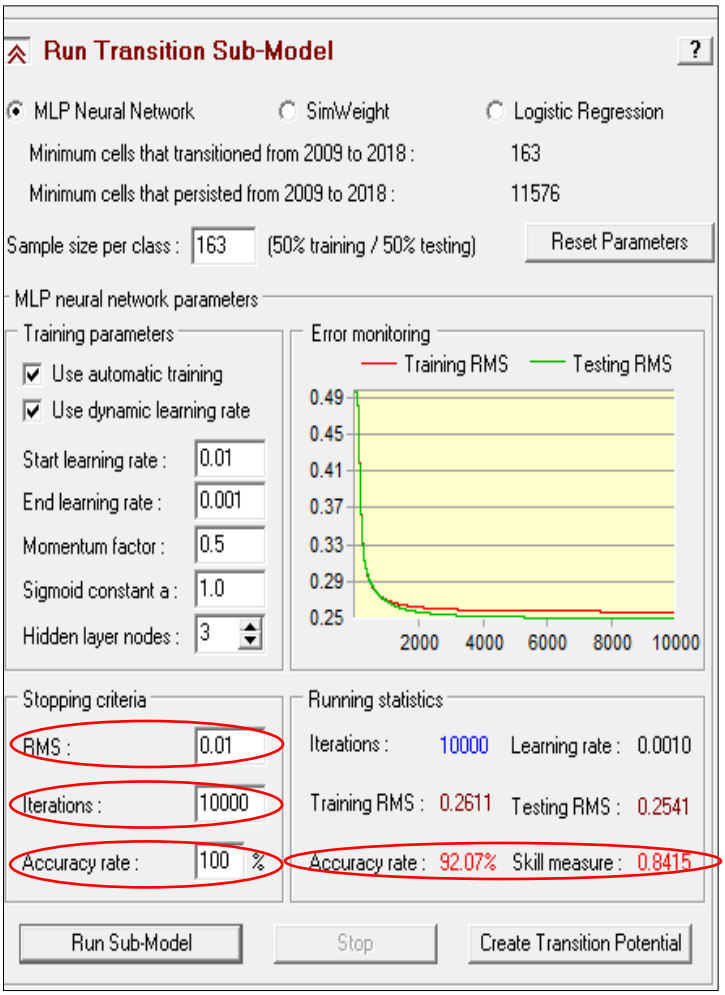
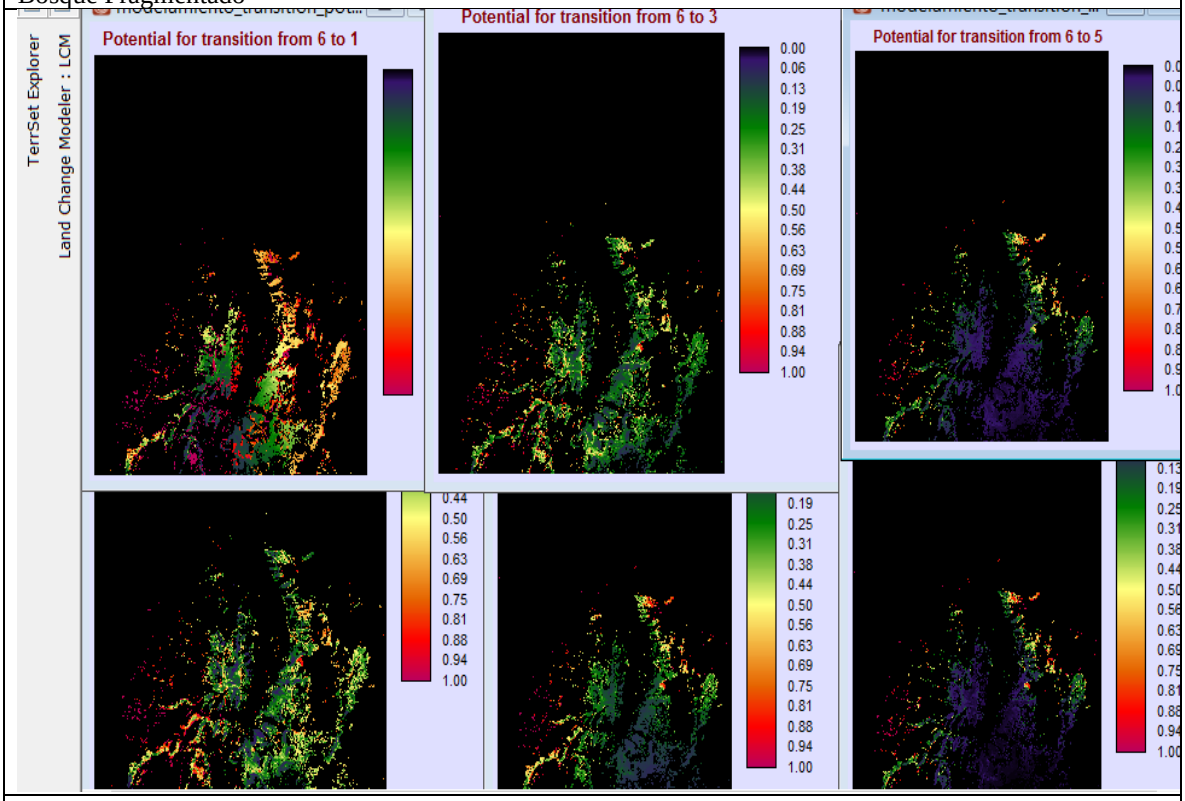


Figura 43. Panel de activación de submodelos de transición
Fuente: Imágenes Software TerrSet

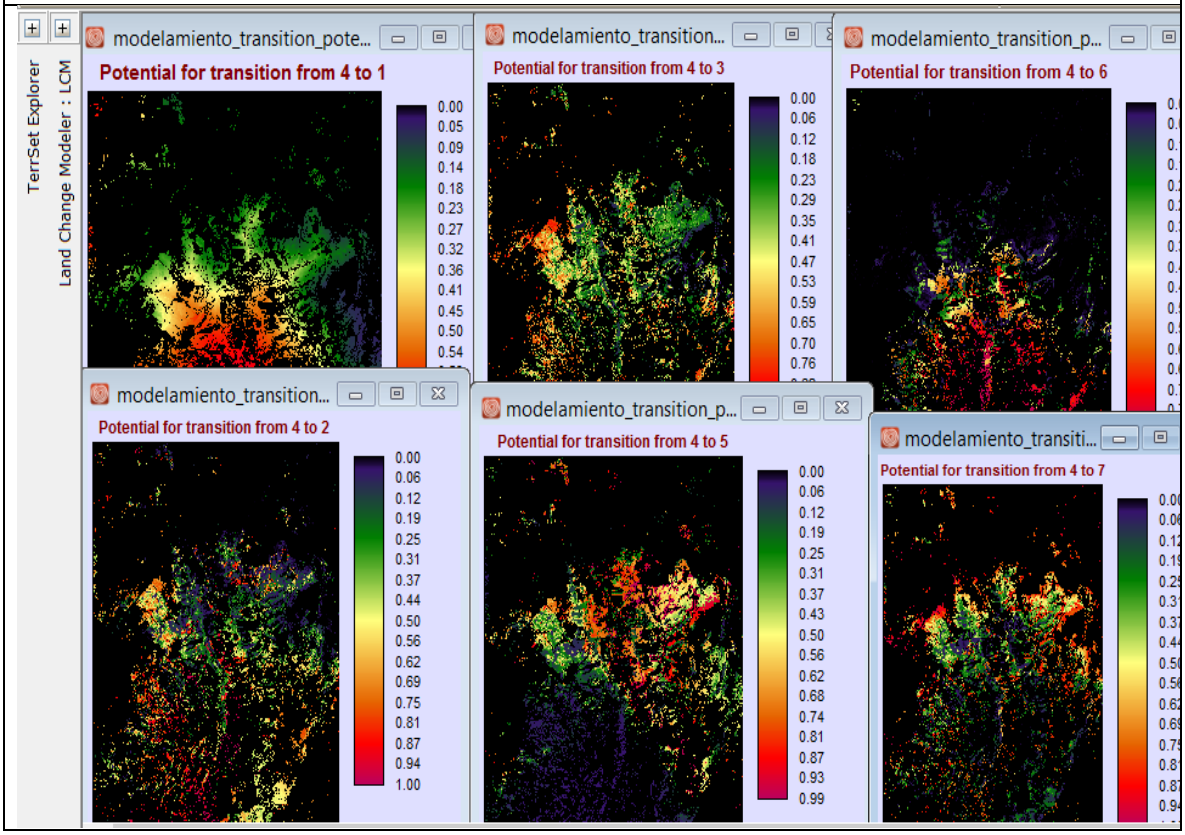
La creación de la predicción del MLP de los potenciales de transición para cada tipo de cobertura se presenta en la tabla siguiente, donde se observa las zonas que presentan mayor grado de vulnerabilidad de cambio a otro tipo de cobertura en una escala de 0 a 1, siendo las de mayor grado las áreas más susceptibles de una transformación a futuro.

Tabla 25. Potenciales de transición de cambio de coberturas

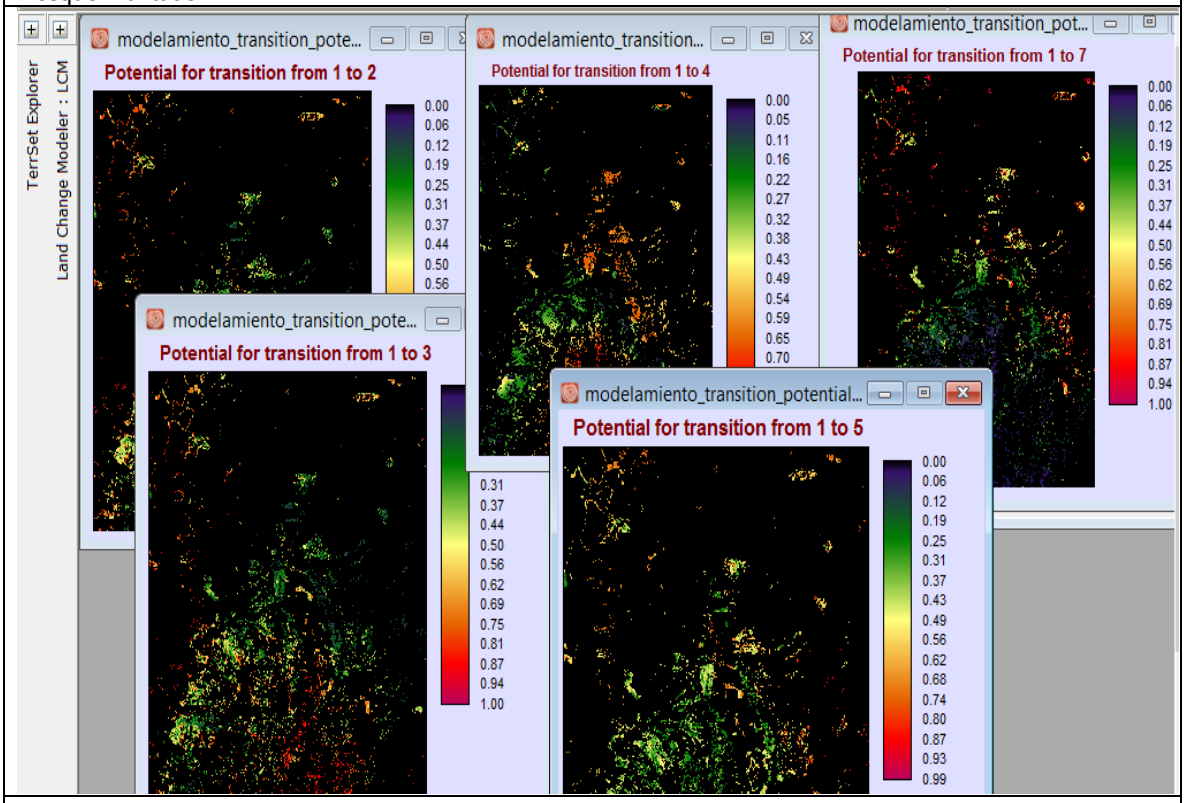
Bosque Fragmentado



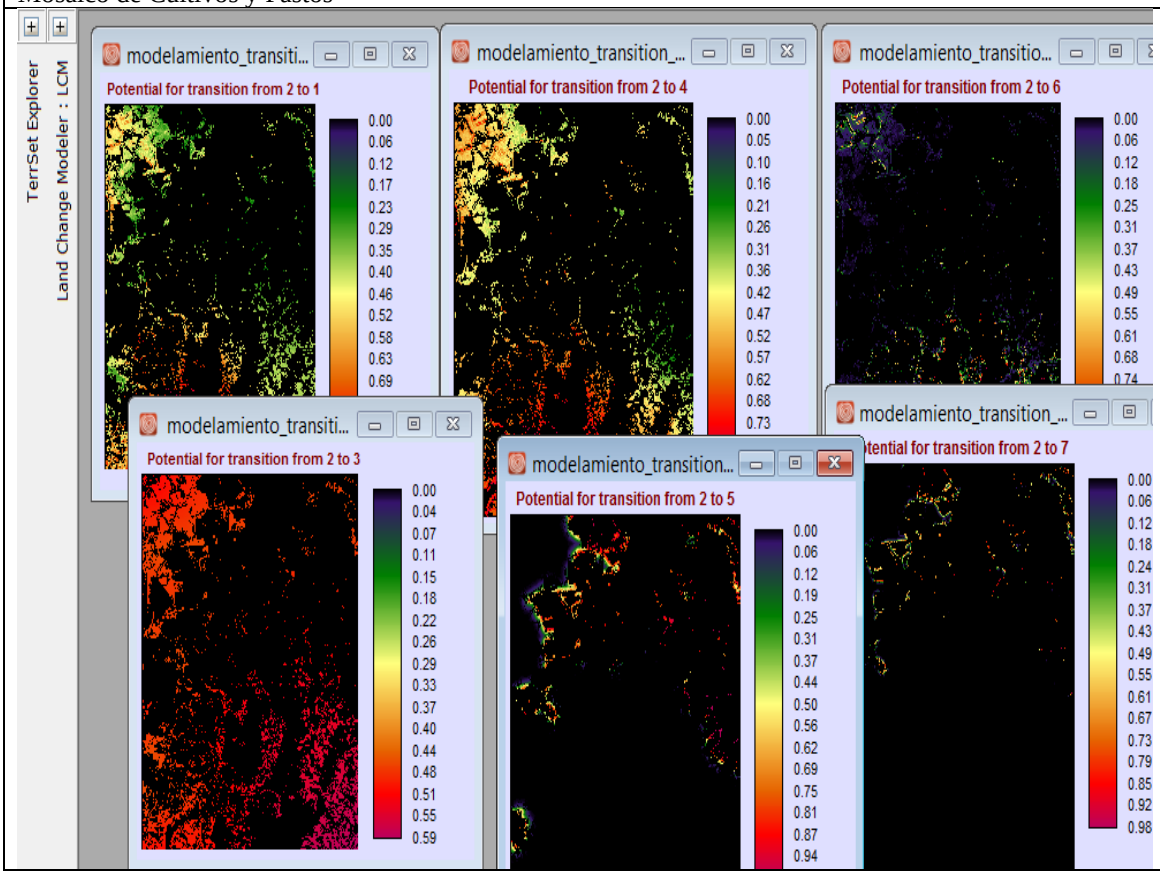
Arbustales



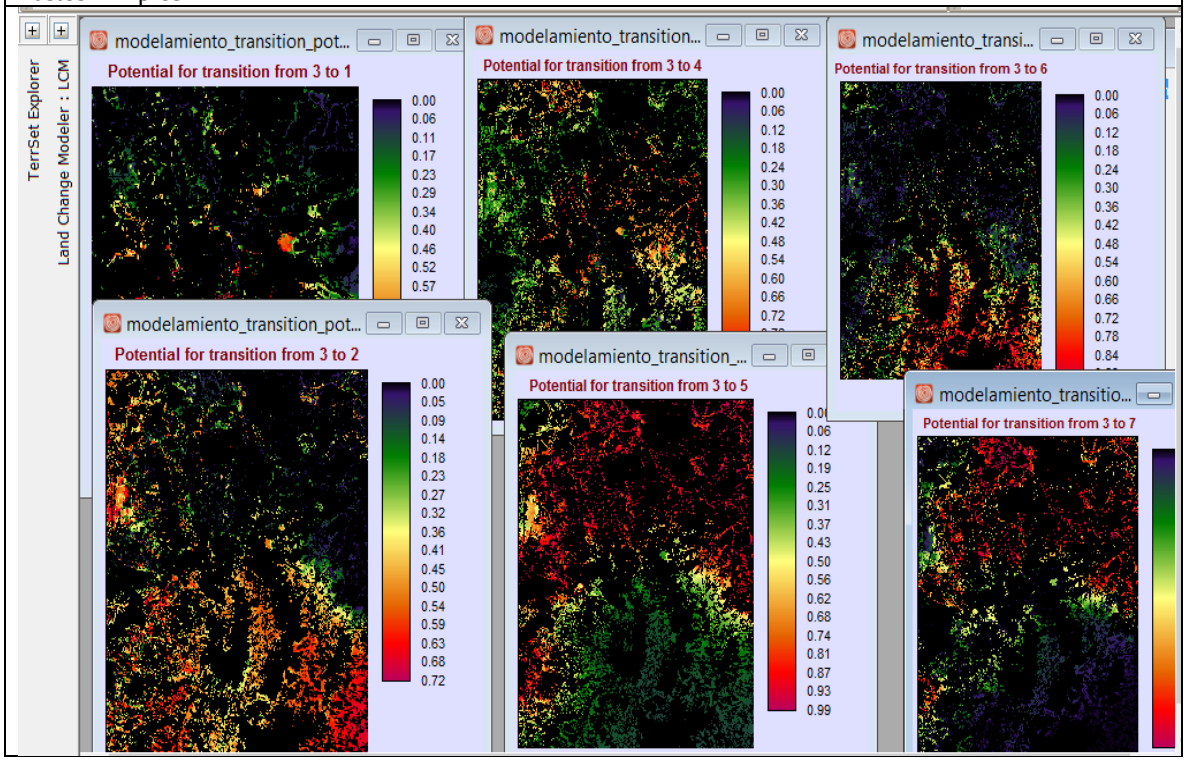
Bosque Plantado



Mosaico de Cultivos y Pastos



Pastos Limpios



- **Tasa de Precisión**

Los treinta potenciales de transiciones de cambio de las coberturas vegetales se presentan en tres escenarios (Degradación, Recuperación y Manejo), entendiendo que la degradación ocurre cuando existe alguna alteración de coberturas naturales o áreas de producción agrícola y pecuaria y sufren una alteración de tipo antrópico, las zonas de recuperación se presentan cuando existe un proceso de rehabilitación natural o artificial que contribuyen a la sostenibilidad ecológica; y finalmente tres transiciones de manejo de las coberturas.

El escenario de degradación presenta altas tasas de precisión, todas están superiores al rango del 64%, con medidas de habilidad por encima de 0.29, en algunos casos muy superiores a este valor. Las transiciones de coberturas que mejor se ajustan al modelo están dadas por las transformaciones que pueden ocurrir en el bosque fragmentando con un *Accuracy Rate* de 92.73% y un *Skill Measure* de 0.85 siendo este el valor más alto de las transiciones del escenarios, lo que indica un ajuste adecuado del modelo, sustentado en su potencial y probabilidad de transición y no es debió al azar; aun cuando el menor rango de desempeño se presenta en los posibles cambios del bosque plantado a los mosaicos de cultivos y pastos con valores de 64.52%; 0.2903 respectivamente, siendo esta la transición menos probable de ocurrir, ya que para que esto pase se requiere una total intervención y cambio del uso del suelo por parte del hombre.

En relación con el escenario de recuperación, se presenta un proceso similar al anterior, pero con estadísticos de confiabilidad un poco más bajos, siendo el más alto para la transición de arbustales hacia el bosque fragmentado con una tasa de precisión de 81.01% y una habilidad

media de la red neural de 0.62, lo cual sería un indicador de un posible proceso restauración natural del ecosistema; por su parte el menor grado de desempeño se presenta en la transición de los mosaicos de cultivos hacia arbustales con valores de 51.97% y 0.0394.

La tasa de precisión (*Accuracy Rate*) y la medida de habilidad (*Skill Measure*) de la red neuronal artificial del multi-layer perceptrón tuvo valores significativamente altos para cada transición modelada como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 26. Tasa de precisión del MLP

Transición de Coberturas				*Accuracy Rate*	*Skill measure*
Degradación	*Bosque Fragmentado*	a	*Tejido Urbano*	92.73	0.8545
	Bosque Fragmentado	a	*Tierras Desnudas y Degradadas*	92.07	0.8415
	Bosque Fragmentado	a	*Arbustales*	83.63	0.6726
	Bosque Fragmentado	a	*Pastos Limpios*	84.78	0.6956
	Bosque Fragmentado	a	*Mosaico de Cultivos y Pastos*	78.31	0.5662
	Bosque Fragmentado	a	*Bosque Plantado*	71.89	0.4378
	Arbustales	a	*Tejido Urbano*	74.46	0.4892
	Arbustales	a	*Tierras Desnudas y Degradadas*	71.33	0.4266
	Arbustales	a	*Pastos Limpios*	68.29	0.3657
	Arbustales	a	*Mosaico de Cultivos y Pastos*	72.01	0.4403
	Bosque Plantado	a	*Tejido Urbano*	74.44	0.4889
	Bosque Plantado	a	*Tierras Desnudas y Degradadas*	71.22	0.4245
	Bosque Plantado	a	*Pastos Limpios*	71.89	0.4379
	Bosque Plantado	a	*Mosaico de Cultivos y Pastos*	64.52	0.2903
	Mosaico de Cultivos y Pastos	a	*Tejido Urbano*	89.57	0.7915
	Mosaico de Cultivos y Pastos	a	*Tierras Desnudas y Degradadas*	64.71	0.2941
	Pastos Limpios	a	*Tejido Urbano*	77.94	0.5587
	Pastos Limpios	a	*Tierras Desnudas y Degradadas*	72.62	0.4524
Recuperación	*Arbustales*	a	*Bosque Fragmentado*	81.01	0.6203
	Bosque Plantado	a	*Arbustales*	63.75	0.2749
	Tierras Desnudas y Degradadas	a	*Arbustales*	61.01	0.2201
	Pastos Limpios	a	*Bosque Fragmentado*	74.78	0.4957
	Pastos Limpios	a	*Arbustales*	67.53	0.3506
	Pastos Limpios	a	*Bosque Plantado*	65.16	0.3032
	Mosaico de Cultivos y Pastos	a	*Bosque Fragmentado*	88.18	0.7636
	Mosaico de Cultivos y Pastos	a	*Arbustales*	51.97	0.0394
	Mosaico de Cultivos y Pastos	a	*Bosque Plantado*	62.04	0.2408
Manejo	*Pastos Limpios*	a	*Mosaico de Cultivos y Pastos*	60.2	0.204
	Mosaico de Cultivos y Pastos	a	*Pastos Limpios*	54.41	0.0883
	Arbustales	a	*Bosque Plantado*	68.37	0.3673

A pesar de tener valores de tasas de precisión por debajo del 70%, la gran mayoría de las transiciones están muy por encima de este rango, de igual modo como sucede con la medida de habilidad del MLP, el cual tiene generalmente valores por encima del 0.45 y considerando que se están modelando un numero significativamente alto de transiciones (30), los submodelos se ajustan para poder predecir el cambio de las coberturas para los años 2030 y 2040.

8.4.3. Predicción de Tendencias de Cambio (*Change Prediction*)

Con los mapas de potenciales de transición se predice el cambio de coberturas que pueda ocurrir para los años 2030 y 2040; este modelo se realizó mediante cadenas de Márkov, introduciendo las 30 transiciones potenciales de cambio.

Las matrices indican la probabilidad de cambio, observándose en las diagonales las persistencias de las coberturas y en las demás celdas las posibles alteraciones que pueden ocurrir en el paisaje, a preciándose claramente las susceptibilidades que presenta el bosque fragmentado, los arbustales y los pastos limpios a su transformación a otro tipo de cobertura.

A continuación, se presenta las matrices de transición predichas del modelamiento para los años 2030 y 2040, con las probabilidades de cambio de un tipo de cobertura hacia otro distinto, seguidamente los mapas de potenciales de transición del área de estudio (modelo de predicción blanda) los cuales indican las áreas con mayor grado de vulnerabilidad para cambiar hacia las diferentes transiciones seleccionadas, y finalmente la predicción dura, la cual refleja las áreas de coberturas que pueden existir en el futuro.

Predicción Blanda

La predicción blanda del cambio de las coberturas refleja todas las áreas susceptibles de cambio hacia las treinta transiciones modeladas de transformación, siendo las de mayor grado de vulnerabilidad al cambio las áreas cercanas a zonas con actividades antrópicas, cascos urbanos, zonas de explotación productiva agrícola, pecuaria y áreas naturales.

Tabla 27. Matriz de transición para el año 2030

Año 2030	*Bosque Plantado*	*Mosaico de Cultivos y Pastos*	*Pastos Limpios*	*Arbustales*	*Tierras Desnudas y Degradadas*	*Bosque Fragmentado*	*Tejido Urbano*	*Cuerpos de Agua*
Bosque Plantado	***0.3219***	0.0537	0.1031	0.1823	0.0181	0.2509	0.0492	0.0208
Mosaico de Cultivos y Pastos	0.0295	***0.4305***	0.3288	0.0434	0.0247	0.0054	0.1346	0.0031
Pastos Limpios	0.0396	0.2849	***0.3319***	0.1483	0.0384	0.0217	0.1335	0.0017
Arbustales	0.0396	0.1033	0.1745	***0.3719***	0.0287	0.1387	0.0734	0.0012
Tierras Desnudas y Degradadas	0.1082	0.0482	0.1528	0.1073	***0.2581***	0.0103	0.3976	0.0065
Bosque Fragmentado	0.2202	0.0272	0.0604	0.2612	0.0105	***0.3933***	0.0237	0.0036
Tejido Urbano	0.0177	0.0318	0.1031	0.0403	0.0609	0.0029	***0.7346***	0.0087
Cuerpos de Agua	0.0019	0.0025	0.0453	0.0029	0.0316	0	0.1141	***0.8016***

Tabla 28. Matriz de transición para el año 2040

Año 2040	*Bosque Plantado*	*Mosaico de Cultivos y Pastos*	*Pastos Limpios*	*Arbustales*	*Tierras Desnudas y Degradadas*	*Bosque Fragmentado*	*Tejido Urbano*	*Cuerpos de Agua*
Bosque Plantado	***0.2056***	0.0908	0.1346	0.2088	0.0258	0.216	0.0937	0.0247
Mosaico de Cultivos y Pastos	0.0417	***0.3123***	0.2888	0.0894	0.0373	0.0222	0.2024	0.0058
Pastos Limpios	0.0552	0.2497	***0.2656***	0.1411	0.0424	0.0442	0.1972	0.0047
Arbustales	0.1162	0.1391	0.1866	***0.2522***	0.0343	0.1387	0.1281	0.0049
Tierras Desnudas y Degradadas	0.0361	0.0929	0.1665	0.1142	***0.1252***	0.0276	0.427	0.0105
Bosque Fragmentado	0.1956	0.0707	0.1146	0.2546	0.0208	***0.2697***	0.0654	0.0086
Tejido Urbano	0.028	0.0676	0.1335	0.0667	0.0661	0.0142	***0.6105***	0.0135
Cuerpos de Agua	0.0061	0.0185	0.0657	0.016	0.0407	0.002	0.1818	***0.6691***

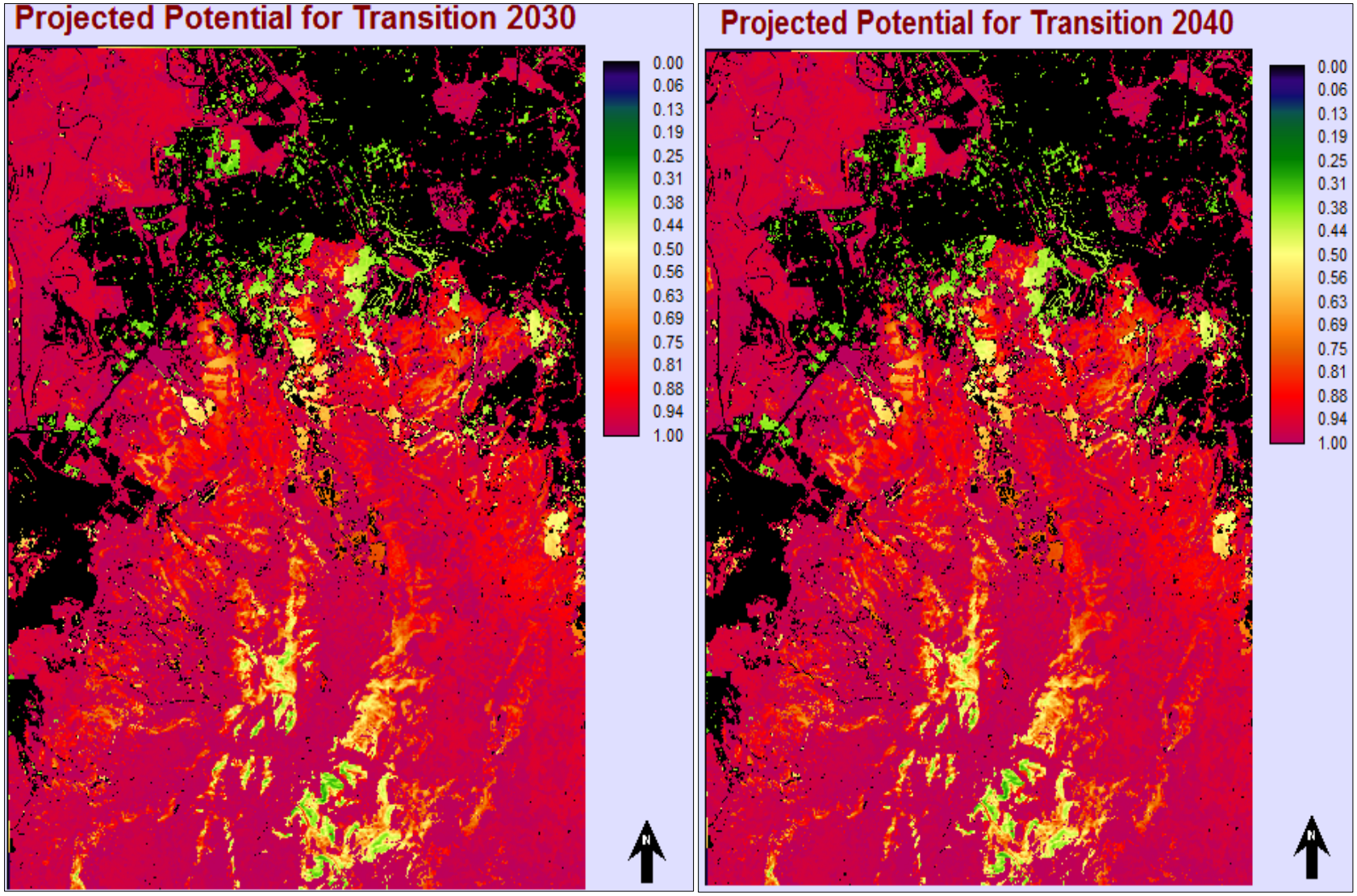


Figura 44. Potencial de transición
Fuente: Autor (2019)

Predicción Dura

- **Proyección de dinámica de cambio para el área de estudio general**

La proyección de la dinámica de cambio de las coberturas para los dos años posteriores indica un crecimiento continuo para el tejido urbano y las tierras desnudas y degradadas, continuando con un incremento del área de los bosques plantados en el año 2030 para su posterior disminución en el 2040; en otro orden de ideas las coberturas de pastos limpios, mosaico de cultivos, bosque fragmentado y arbustales continúan con su notorio descenso del tamaño de sus áreas. En la tabla siguiente se presenta la dinámica de cambio de las coberturas para el área general de estudio para el periodo de evaluación de 41 años.

Tabla 29. Dinámica de cambio de coberturas en el área de estudio

Cobertura	Área ha				
	1999	2009	2018	2030	2040
Tejido Urbano	3088.39	↑4237.87	↑4894.82	↑5603.49	↑6030.00
Pastos Limpios	5853.08	↓5403.15	↓4373.11	↓3932.19	↓3823.47
Mosaico de Cultivos y Pastos	3224.13	↓2546.93	↑3294.11	↓3242.16	↓3110.85
Bosque Fragmentado	3779.82	↓2085.73	↓1851.74	↓1611.27	↓1578.60
Bosque Plantado	318.19	↑879.95	↑1488.3	↑1731.33	↓1668.24
Arbustales	3820.36	↑4444.49	↓3787.21	↓3422.52	↓3279.96
Tierras Desnudas y Degradadas	969.34	↑1052.80	↓981.37	↑1155.60	↑1207.44
Cuerpos de Agua	70.58	472.99	467.95	469.44	469.44
Total	**21168 ha**				

*Flechas Negras Indican Aumento, Flechas Rojas Disminución

Para el año 2018 la matriz del paisaje ya estaba dominada por el tejido urbano con un porcentaje del 23.12% (4894.28 ha), habiendo estado en una tapa inicial con un valor de tan solo el 14.59% (3088.39 ha) del área total y para finales de la evaluación se proyecta una tasa de incremento que podría alcanzar el 28.49% (6030 ha) del total del área de la matriz del paisaje. Por su lado las tierras desnudas y degradadas principalmente por actividades de explotación minera alcanzarán incrementos a nivel superficial de sus áreas llegan a valores de 1155.60 ha (5.46%) y 120.44 ha (5.70%) para los años de 2030 y 2040.

Las coberturas que mayor deterioro presentan en la dinámica de cambio en el paisaje son los bosques fragmentados y los arbustales con un descenso constante de su cubierta a través del tiempo. Los bosques naturales pueden perder hasta más del 10% de su superficie al 2040 de acuerdo al periodo inicial, siendo estos valores de 3779.82 ha (17.86%) y 1578.60 ha (7.46%) respectivamente; de igual forma sucede con coberturas de tipo productivo como los mosaicos de cultivos y pastizales, cuyas áreas disminuyen de manera constante para los años de 2030 y 2040, con lo cual, a juicio personal se debe al incremento progresivo de la mancha urbana o aumento del tejido urbano consecuente de alto grado de crecimiento poblacional de la zona, las cuales reclamaban de manera continua la expansión del borde urbano y consigo una transformación de las coberturas naturales, seminaturales y productivas.

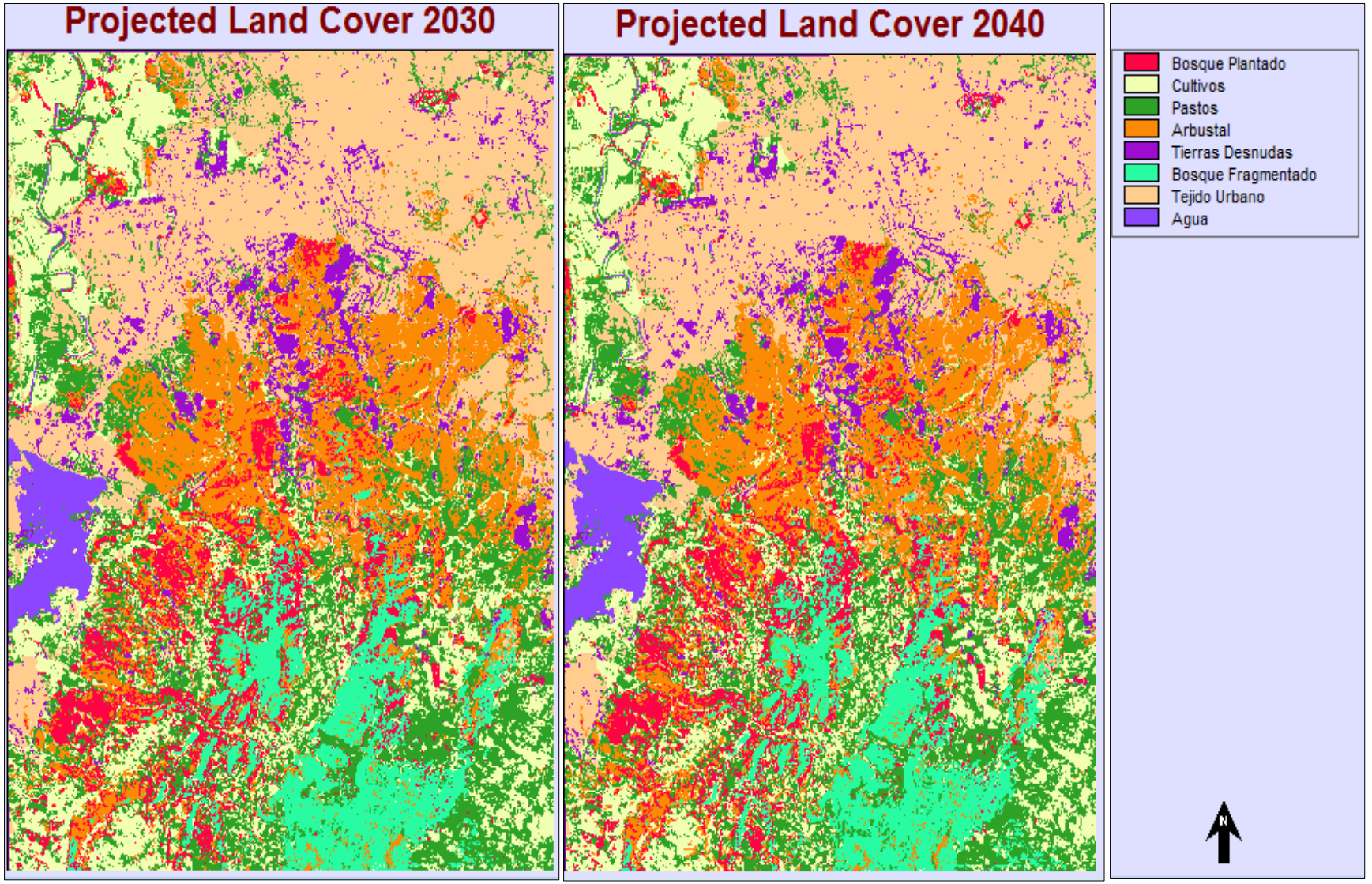


Figura 45. Proyección de coberturas vegetales
Fuente: Autor (2019)

- **Proyección de dinámica de cambio para la microcuenca del Río Soacha**

Las proyecciones de dinámica de cambio y transformación de las coberturas pertenecientes a la microcuenca del Río Soacha, siguen el patrón presentado a nivel del paisaje en su conjunto, con el aumento progresivo del tejido urbano, las tierras desnudas y degradadas, la fluctuación del bosque plantado y el deterioro o perdida del bosque fragmentado, los arbustales, los pastos limpios y los mosaicos de cultivos y pastos. En la tabla siguiente se presenta la suma de las coberturas vegetales para el análisis de los 41 años de evaluación.

Tabla 30. Proyección de dinámica de cambio para la microcuenca del Río Soacha

Cobertura	Área ha				
	1999	2009	2018	2030	2040
Tejido Urbano	435,03	588,44 ↑	795,89 ↑	945.96 ↑	1036.97 ↑
Pastos Limpios	1087,85	1072,11 ↓	785,50 ↓	720.12 ↓	705.67 ↓
Mosaico de Cultivos y Pastos	562,60	602,67 ↑	627,59 ↑	591.48 ↓	582.71 ↓
Bosque Fragmentado	775,73	585,66 ↓	558,21 ↓	506.96 ↓	474.88 ↓
Bosque Plantado	112,33	222,25 ↑	341,92 ↑	420.70 ↑	399.18 ↓
Arbustales	1170,43	1051,59 ↓	986,79 ↓	899.99 ↓	870.03 ↓
Tierras Desnudas y Degradadas	289,72	311,00 ↑	337,80 ↑	348.51 ↑	364.26 ↑
Total	**4433,71 ha**				

*Flechas Negras Indican Aumento, Flechas Rojas Disminución

La cubierta del tejido urbano se convierte desde el 2030 en la dominante dentro de la microcuenca del Río Soacha, remplazando las áreas naturales de los arbustales en este predominio, con un incremento proyectado de 945.96 ha (21.34%) y 1036.97 ha (23.39%) para los años consiguientes, frente al 9.81% (435.03 ha) que presentaba en su etapa inicial del año 1999, siendo el incremento prospectivo del 13.58% para los años de análisis.

Por su parte el bosque fragmentado sufre el deterioro progresivo de su superficie, con una dinámica de perdida continua y prolongada durante los periodos de evaluación, proyectando su área al 2030 con 506.96 ha (11.43%) y 474.88 ha (10.71%); caso similar al proceso que ocurre en los arbustales con su transformación y descenso de espacio, con superficies de 899.99 ha (203.30%) y 870.03 ha (19.62%) para los dos años posteriores respectivamente. En oposición, el bosque plantado presenta una dinámica interesante durante el análisis con un incremento constante durante el periodo inicial hasta el año 2030, pero para la última década de proyección sucede todo lo contrario, y las áreas se contraen, alcanzando una superficie de 399.18 ha, representando el 9.0% del área total de la microcuenca.

Las tierras desnudas y degradadas continúan con un incremento bajo (1.69% proyectado), pero entendiendo que en su mayoría son áreas con procesos extractivos de minería a cielo abierto que tiene grandes implicaciones ambientales, puede significar procesos inadecuados de gestión y planificación en el territorio, conllevando a un deterioro en la calidad ambiental dentro de la microcuenca del Río Soacha, para el año 2040 se manifiesta un aumento de su área, alcanzando una superficie de 364.26 ha, el 8.22% del área total de la microcuenca.

En la figura siguiente (figura 46) se presentan las dinámicas de incrementos y perdidas de las coberturas vegetales de la microcuenca del Río Soacha para los años 2030 y 2040.

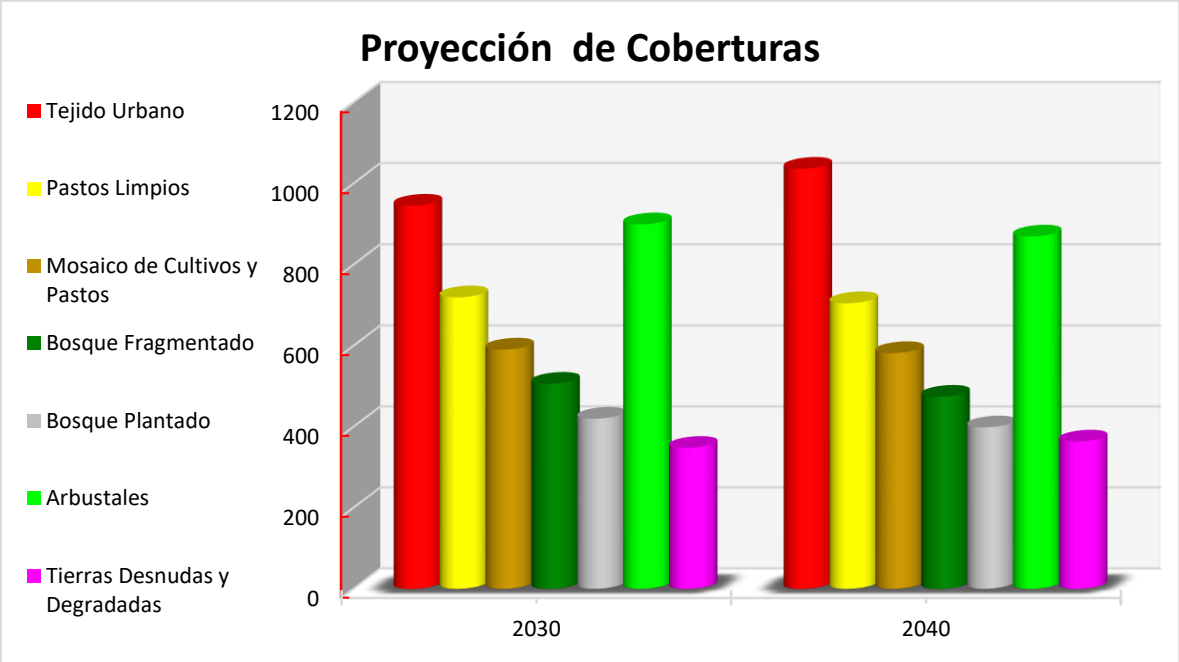


Figura 46. Proyección de dinámica de cambio para la microcuenca
Fuente: Autor (2019)

En relación a los territorios agrícolas de pastos limpios y mosaicos de cultivos y pastos, para los años consiguientes se presentará una disminución continua de su área, en primera instancia los cultivos indicaron un incremento de su superficie hasta el 2018, pero para las dos décadas proyectadas su espacio disminuye, consiguiendo áreas de 591.48 ha (13.34%) y 582.71 ha (13.14%) respetivamente. En el caso de los pastos limpios su decrecimiento si es constante durante todos los periodos de evaluación, llegando a una superficie proyectada de 705.67 ha (15.92%).

De acuerdo a mi juicio personal, recalco que la dinámica de las transformaciones dentro de la microcuenca del Río Soacha, está dada por el crecimiento poblacional y alta densificación del municipio de Soacha, como puede apreciarse en las cubiertas que presentaron incrementos en los periodos iniciales de evaluación como el bosque plantado y los mosaicos de cultivos y pastos, pero que en su proyección disminuyen, ya que se requieren mayores áreas para la expansión del tejido urbano.

Los respectivos mapas de las coberturas vegetales de la microcuenca del Río Soacha para los años de 2030 y 2040 se presentan en los **Anexo 4** y **Anexo 5**.

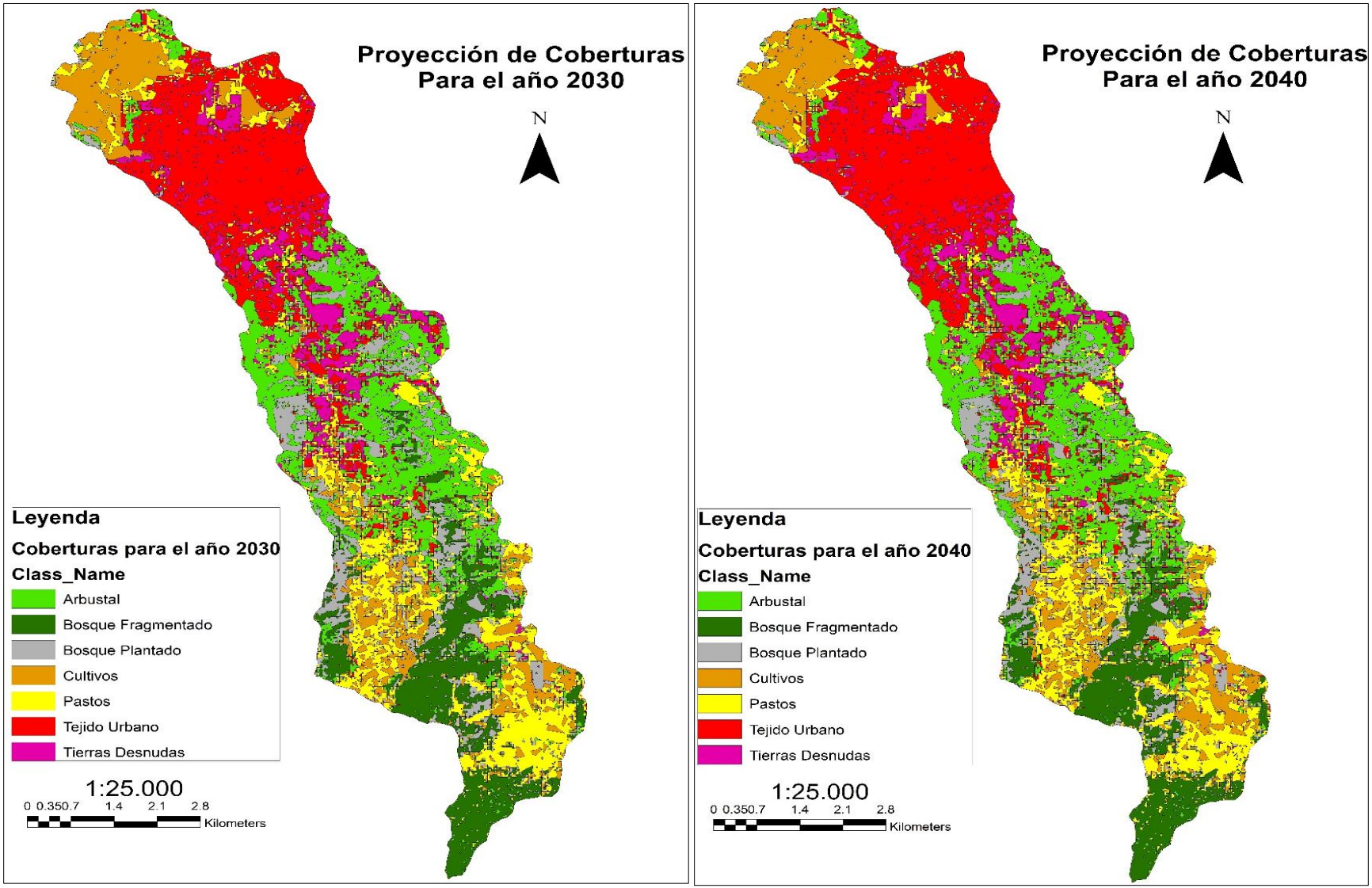


Figura 47. Proyecciones de cambio de coberturas
Fuente: Autor (2019)

8.4.4. Validación

La validación del modelo de tendencias de cambio, se realizó mediante la predicción para el año 2018 empleando las coberturas de 1999 y 2009, siguiendo el mismo proceso descripto anteriormente para la modelación de los años futuros, utilizando de igual manera las variables de influencia y las treinta transiciones potenciales de cambio por medio del MLP, ya que no es posible validar los modelos de los años 2030 y 2040, sino que estos se ajustan a la probabilidad estadística presentada de sus potenciales de transición como se describió anteriormente.

El resultado de la predicción para el año 2018 fue transformado a un archivo compatible con el software ENVI, para su posterior análisis mediante matriz de confusión con los puntos obtenidos en campo (*ground truth*) de manera similar al proceso de la validación de la clasificación de las imágenes satelitales.

La precisión general de la predicción de las coberturas para el año 2018 fue de 71.63% (*Overall Accuracy* (356/497)), con un valor de coeficiente de Kappa de 0.6673, un rango inferior al presentado en la clasificación de las imágenes satelitales, pero admisible para la predicción de las coberturas, ya que se ajusta al modelo de transformación de las dinámicas de cambio, ya que el resultado indica una clasificación (para este caso predicción) dentro del rango aceptable.

La matriz de confusión, los errores de comisión y omisión, y en última instancia la exactitud del usuario y el productor para la predicción de las coberturas del año 2018 para su validación, se presentan en la tabla siguiente (tabla 31).

Tabla 31. Validación del modelo

Matriz de Confusión (P%)									
Clase	**Bosque Plantado**	**Mosaico de Cultivos y Pastos**	**Pastos Limpios**	**Arbustales**	**Tierras Desnudas y Degradadas**	**Bosque Fragmentado**	**Tejido Urbano**	**Cuerpos de Agua**	**Total**
Bosque Plantado	53.57	0	0	0	0	18.87	0.77	9.23	6.44
Mosaico de Cultivos y Pastos	0	70.73	83.33	6.02	2.33	1.89	0	1.54	16.50
Pastos Limpios	3.57	29.27	16.67	27.71	6.98	5.66	0.77	1.54	10.66
Arbustales	17.86	0	0	54.22	0	1.89	0	0	10.26
Tierras Desnudas y Degradadas	10.71	0	0	4.82	90.7	1.89	1.54	0	9.86
Bosque Fragmentado	0	0	0	7.23	0	69.81	0	0	8.65
Tejido Urbano	14.29	0	0	0	0	0	96.92	1.54	26.36
Cuerpos de Agua	0	0	0	0	0	0	0	86.15	11.27
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Errores de Comisión y Omisión				
Clase	**Commission (%)**	**Omission (%)**	**Commission (Píxel)**	**Omission ((Píxel).)**
Bosque Plantado	53.13	46.43	17/32	13/28
Mosaico de Cultivos y Pastos	64.63	29.27	53/82	12/41
Pastos Limpios	83.02	83.33	44/53	45/54
Arbustales	11.76	45.78	6/51	38/83
Tierras Desnudas y Degradadas	20.41	9.3	10/49	4/43
Bosque Fragmentado	13.95	30.19	6/43	16/53
Tejido Urbano	3.82	3.08	5/131	4/130
Cuerpos de Agua	0	13.85	0/56	9/65

Exactitud Usuario y Exactitud Productor				
Clase	**Produ. Acc. (%)**	**User Acc. (%)**	**Produ. Acc. (Píxel)**	**User Acc. (Píxel)**
Bosque Plantado	53.57	46.88	15/28	15/32
Mosaico de Cultivos y Pastos	70.73	35.37	29/41	29/82
Pastos Limpios	16.67	16.98	9/54	9/53
Arbustales	54.22	88.24	45/83	45/51
Tierras Desnudas y Degradadas	90.7	79.59	39/43	39/49
Bosque Fragmentado	69.81	86.05	37/53	37/43
Tejido Urbano	96.92	96.18	126/130	126/131
Cuerpos de Agua	86.15	100	56/65	56/56

9. Discusión

Los resultados incluidos en la presente investigación contribuyen a determinar las dinámicas de cambio de las coberturas vegetales y su proyección dentro de la microcuenca del Río Soacha, lo que genera pautas que apoyan la consolidación de una gestión y planificación territorial del municipio de Soacha como lo señala (Ruiz, J. 2012) y (Bautista & Pérez, 2018), evidenciándose en el análisis espacio-temporal los graves y progresivos deterioros ambientales que se manifestaron de acuerdo a las dinámicas de transición de las coberturas; lo que conlleva al replanteamiento del manejo actual de los recursos naturales y productivos en el área. La resolución 1278 del 2016 de la CAR, puede verse apoyada por el estudio realizado, ya que se requiere el establecimiento de la zona protectora del cauce del Río Soacha.

La nueva delimitación de la unidad hidrográfica de la cuenca del Río Soacha frente a lo presentado por el diagnostico base de la (CAR, 2007), formula una nueva perspectiva en cuanto a su perímetro y área, siendo esta investigación la que aborda de manera integral el espacio físico de la microcuenca, ya que involucra el transcurso de su cauce hasta el punto de desembocadura de manera adecuada. Un manual de manejo de cuencas presentado por (World Vision, 2004) indica de manera explícita la dificultades que se generan al establecer el límite de las cuencas en zonas planas o de llanura, y cuyo proceso debe ser determinado por medio de topográfica con curvas de nivel de menor equidistancia.

Retomando lo especificado anteriormente por (Geraldi, *et al.* 2010), algunos errores de delimitación de cuencas obedecen de cierta manera a las grandes modificaciones por la acción antrópica que han sufrido los cauces; hoy en día como lo plantea la (CEPAL, 2013) el apoyo con sistemas de información geográfica e imágenes satelitales de alta resolución, contribuyen a obtener mejores precisiones en el proceso de la zonificación y ordenamiento de cuencas; llegando inclusive a procedimientos semiautomáticos y automáticos según (Ruíz & Torres, 2008).

9.1.Clasificación de Imágenes Satelitales

El *Gap-Fill* realizado en el preprocesamiento de la imagen satelital del 2009, permitió obtener resultados con alto grado de confiabilidad de clasificación, relacionándose a lo descripto por (Chen, *et al.*, 2011), ya que a pesar de que el área de estudio es un paisaje heterogéneo en el espacio, se cumple el supuesto de que los píxeles vecinos de la misma clase alrededor de los píxeles que no fueron escaneado por el satélite, tienen características espectrales similares, permitiendo corregir los errores en la imagen.

La clasificación supervisada de las imágenes satelitales presenta rangos altos de confianza, superiores al 90% en precisión global y coeficiente Kappa; en el estudio realizado por (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2018) se tienen valores de 81.11% y 0.77 para estos indicies con el empleo del algoritmo *Maximum Likelihood*, siendo inferiores a los presentados en este análisis; cabe decir que ellos emplean un número mayor de clases (10), superior a la presentes en nuestra área de estudio lo que dificulta en cierto grado la

identificación de categorías, pero en términos generales, se convalida el respaldo del algoritmo para la teledetección por sus buenos resultados y fácil implementación.

La clasificación por maxima verosimilitud expone adecuados niveles de exactitud, a pesar de ser un clasificador convencional según (Toro Espín *et al*., 2015), este presenta resultados bastantes consistentes, y pueden ser mejorados en su fase de entrenamiento para perfeccionar la clasificación y aumentar su confiabilidad para realizar análisis espaciales.

9.2.Dinámicas de Cambio

El tejido urbano dentro de la microcuenca del Río Soacha presenta el mayor incremento de superficie frente a las otras coberturas, lo que indica una asociación similar con los estudios por parte de (Gonzáles, 2010) que señala que la conurbación del municipio ocurrida desde 1981 y articulada al eje vial de la autopista sur, es la fuerza conductora para que el borde urbano del municipio de Soacha se expanda de manera desordenada, esto debido a factores socioeconómicos de la población y de acuerdo a otro autores como (Cantillo & Murcia, 2015) y (Dureau & Gouëset, 2011) va de la mano al crecimiento demográfico acelerado de las últimas décadas, transformando elementos naturales como humedales y productivos por la expansión del tejido urbano.

(León, 2012) ha caracterizado algunos conflictos ambientales que suceden en el municipio de Soacha, principalmente abordando el tema de la minera a cielo abierto de materiales para construcción, y aclarando en esta investigación se incluyeron tierras desnudas y degradas las cuales fueron asociadas principalmente a los procesos de explotación minera, fue evidente el escenario propuesto por este autor, el cual indica una expansión de la minería desorbitada, ya que dentro de la microcuenca para el año de 1999 el área para esta cobertura era de tan solo 289.72 ha, pasando a 337.80 ha para el 2018 y proyectándose en el futuro a 364.26 ha.

Las coberturas que mayores presiones sufren son las naturales, así lo comprueba el estudio de (Valbuena, 2011) que alude al establecimiento y expansión de la frontera agrícola como el principal motor de afectación, mientras que en Soacha el proceso está dado por el crecimiento demográfico que reclama espacios geográficos para su consolidación, afectando inclusive los territorios agrícolas y productivos de la misma manera que las coberturas vegetales.

Con el empleo de diferentes matrices de transición se comprobó la alta transformación a la que ha sido sometida las coberturas de la cuenca durante los últimos años, comprobando los postulados que realizan (Farfán Gutiérrez *et al*., 2016) sobre el análisis espacial por este método, el cual permite de manera cuantitativa estimar los cambios en tres niveles de orden: intervalo de tiempo, categoría y transición. Siendo la transformación mayor al 50% para el periodo de análisis y mayoritariamente asociada a un proceso de degradación.

La configuración espacial presento altos grados de intervención dentro de la microcuenca del Río Soacha. (Mata *et al.*, 2014) realiza un análisis de fragmentación empleando métricas similares, el cual releja un proceso gradual que confirma la fragmentación en su zona de estudio por acción antrópica de los pastizales introducidos en la zona, caso similar es el

estudio de (Correa *et al.*, 2014) que si incluye asentamientos humanos en su análisis de composición y configuración espacial, el cual refleja un proceso análogo al presentado en esta investigación, en donde las coberturas vegetales sufren las mayores alteraciones en contraste con las coberturas de origen antrópico, que en muchos casos se ven favorecidas en el tiempo frente a las naturales.

El porcentaje del paisaje con mayor predominio en la microcuenca del río Soacha son los arbustales, seguida para el año 2018 por el tejido urbano el cual experimento un crecimiento considerable. De acuerdo a (Ruiz *et al*., 2013) la forma de los parches tiene importancia ecológica, ya que puede indicar patrones históricos de fragmentación, para el área de estudio se presentan formas principalmente irregulares del paisaje pudiese decir que es un indicador de cierto grado de intervención. Por medio de la dimensión fractal promedio de los parches se observó que en el año de 2018 el tejido urbano incrementa su complejidad y retomando lo indicado por (Preciado *et al.*, 2005) puede deberse a los asentamiento de tipo subnormal y de invasión que se presentan en el área.

La conectividad espacial se calculó para todas las clase, pero su análisis se realizó hacia las coberturas vegetales, (Vila *et al*., 2006) recalca la importancia de los corredores biológicos y como estos generan conexión de un fragmento hasta el fragmento más próximo del mismo tipo de cobertura. Los resultados de conectividad física de la microcuenca reflejaron un proceso de fragmentación para los arbustales mientras que los bosques fragmentados exhiben perdida de hábitat natural; el análisis espacio-temporal de la conectividad comprobó lo señalado por (Correa *et al.*, 2014) quienes indica que este índice puede describir los patrones de cambio en la configuración estructural de los elementos del paisaje, mientras que la cohesión señala resultados similares a los obtenidos por los autores, siendo mayores para áreas antrópicas y menores para coberturas naturales.

La heterogeneidad en el paisaje aumenta con el tiempo, de acuerdo al estudio de (McGarigal *et al.*, 2002) citado por (Isaacs-Cubides & Jaimes, 2013) ya que los índices de diversidad *Shannon* así lo reflejaron, dando una idea del grado de intervención de la zona cuando esta se asocia a las coberturas antrópicas dentro de la microcuenca.

9.3.Modelación de Transformaciones

La modelación de las trasformaciones de las coberturas de la microcuenca del Río Socha continua con el patrón de dinámica de cambio de los últimos años, siendo la expansión del tejido urbano y las tierras desnudas y degradadas la que se incrementan en el tiempo, mientras las demás coberturas se ven afectadas y decrecen, en el estudio realizado por (Muñoz, 2017) en Nariño, Colombia, los resultados indicaron que las transformaciones más importantes o de mayor peso ocurren en los bosque naturales, siendo el crecimiento poblacional una variable de influencia trascendente.

(Achicanoy *et al*., 2018) proyectan en su análisis de cambio de las coberturas vegetales de la localidad de Suba, Bogotá; un patrón similar al que ocurre en la microcuenca del Río Soacha, dado este por una tendencia hacia la disminución constante de coberturas vegetales, mientras se presenta un incremento y densificación de las áreas urbanas.

La ciudad de Gurgaon en la India, presenta una evolución similar al municipio de Soacha, con su conurbación con la metrópolis, el estudio realizado por (Jain *et al.*, 2017) indico que la gran explosión demográfica y el aumento de diversas actividades económicas en la región pueden seguir contribuyendo al cambio de uso del suelo conllevando a problemas muy críticos que afectan a la biodiversidad y la perdida gradual de recursos naturales y forestales en el área.

El empleo de redes neuronales y en su conjunto el *marchine learning*, tienen un papel preponderante en los sistemas de información geográfica actuales y próximos, así lo menciona (Kanevski, Pozdnoukhov, & Timonin, 2008) ya que tiene mejores capacidades para resolver problemas espaciales, constituyéndose en un complemento importante de técnicas tradicionales como la geoestadística. Por su parte (Mercado *et al.*, 2015) realizaron una comparación de redes neuronales artificiales, empleando el perceptrón multicapa (MLP) en su análisis obteniendo tasa de precios y medidas de habilidad muy altas, por encima de las presentadas en esta investigación a partir de una predicción de series de tiempo en comparación a nuestro análisis de potenciales de transición de coberturas.

En un estudio similar que modela cambios de uso de suelo urbano realizado por (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2014) se analizan dos software que emplean redes neuronales para predecir los potenciales de transición de las coberturas vegetales, estos son *Land Transformation Modeler (*LTM) de la Universidad de Purdue (LTM) y *Land Change Modeler* (LCM), siendo este último el empleado en esta investigación. El resultado arrojo mejores resultados para LCM, la validación del modelo así lo confirma con un Kappa de 0.966 superior al 71.63% de este estudio.

Finalmente, esta investigación busca articularse en la gestión de la biodiversidad y los territorios en sendas a la actual propuesta de (Andrade *et al.*, 2018) con transiciones socio-ecológicas hacia la sostenibilidad, como medida de gestión a los procesos de cambio de uso de la tierra en Colombia, apuntado principalmente a tres de ellas: Relación de centros urbanos e integración en sistemas regionales; Conformación de enclaves de desarrollo minero y Rehabilitación y restauración ecológica de paisajes degradados.

10. Conclusiones

Se incluye una nueva delimitación de la microcuenca del Río Soacha, con un área específica de 4433.71 ha, la cual abarca toda su parte baja localizada en el casco urbano del municipio de Soacha hasta su punto de desembocadura en la vereda Bosatoma hacia el Río Bogotá, lo que contribuye a un manejo integral y genera la reconsideración de esta, como uno de los recursos naturales más importantes para el municipio.

La confiabilidad de la clasificación de las imágenes satelitales es alta de acuerdo a su evaluación de exactitud apoyada en los puntos de control del terreno, lo que permite tener una visión clara de las coberturas vegetales pertenecientes para la microcuenca en los periodos de 1999, 2009 y 2018.

Son diversos los cambios que se presentan en la microcuenca del Río Soacha, en términos generales existe un factor creciente del tejido urbano, el cual se debe al incremento demográfico casi de tipo exponencial que ha vivido el municipio de Soacha durante las últimas décadas, como de igual manera es asociado a factores socioeconómicos de la población y a la conurbación con el distrito capital.

Durante los primeros periodos de evaluación se observan un incrementos en el tejido urbano, las tierras desnudas y degradadas, el bosque plantado y en menor medida en los mosaicos de cultivos y pastos, mientras que las cobertura naturales del bosque fragmentado y los arbustales son las más afectadas por la pérdida de su superficie con el paso de los años; de manera similar sucede en áreas productivas para pastos limpios, los cuales decrecen en el tiempo, siendo más impactante el proceso de cambio para el periodo de 2009 a 2018.

Las transformaciones en el área de la microcuenca para el periodo de análisis superan el orden del 50%, indicando poca persistencia de las coberturas, principalmente naturales las cuales cambian por necesidades creciente de la sociedad, donde la reclamación de espacio físico para los asentamientos humanos es evidente según su dinámica espacial, el escenario que explica este proceso es dado por una dinámica de degradación de coberturas cercana al 29.64%, mientras que su recuperación es más baja y su persistencia es de tan solo el 49.07%.

Se observa claramente un proceso de intervención antrópica en el paisaje, conllevando a aumentar su complejidad en el tiempo, indicando claramente un proceso de fragmentación para todas las clases, con mayores preocupaciones para coberturas naturales como los arbustales; mientras que contradictoriamente el bosque fragmentado vive un proceso de pérdida neta de hábitat, pero aumenta su conectividad ya que su distribución espacial es reducida a zonas específicas exhibiendo un patrón de agregación pero con pérdida de su superficie de manera considerable.

Las coberturas dominantes en la cuenca son los arbustales y el tejido urbano, el paisaje exhibe formas irregulares y complejas, coberturas como los cultivos, pastos y plantaciones presentan un patrón más estable, mientras que las naturales tienen un comportamiento más amorfo. El tejido urbano sorprendió con su estructuración para el 2018, indicando el proceso

desordenando y poco planificado que se dada en el área debido a su expansión y crecimiento durante la última década.

Efectivamente existe una cohesión de las coberturas antrópicas, la conectividad crece mientras se aumente su rango de búsqueda para todas las coberturas, por otro lado, la heterogeneidad espacial del paisaje aumenta con el tiempo de acuerdo a los resultados obtenidos, la cual está ampliamente influencia a la presión antrópica que vive el territorio, generando que la matriz del paisaje se intensifique con el paso de los años.

Los análisis de cambio de las coberturas a nivel de paisaje presentan el mismo comportamiento que tiene las clases en el área de la microcuenca, las variables de influencia seleccionadas para la simulación se ajustan al modelo, a pesar de tener más de 30 potencial de transición de cambio de coberturas la red neuronal artificial indico altos grados de precisión y habilidad media en el proceso.

La predicción blanda contempla un escenario que indica las área o zonas de mayor vulnerabilidad para que exista alguna transición de las treinta modeladas a partir de las cadenas de Márkov, mientras que la predicción dura indica específicamente la superficie que abarcara cada clase de cobertura en los periodos de 2030 y 2040.

La proyección de coberturas para las siguientes décadas dentro de la microcuenca del Río Soacha sigue manteniendo el patrón continuo del crecimiento urbano y de las tierras desnudas y degradadas, mientras que para años siguientes el bosque plantado y los mosaicos de cultivos y pastos cambian su dinámica y pierden superficie; las coberturas vegetales continúan con su proceso degradativo, viéndose afectado los bosques naturales y los arbustales de acuerdo a las probabilidades del pronóstico.

La validación del modelo con la proyección de una cobertura para el año 2018 tuvo un valor de 71.63%, siendo este un grado inferior al presentado en la clasificación supervisada con el algoritmo *Maximum Likelihood*, pero aceptable permitiendo obtener un modelo de predicción a futuro con cierto grado de confiabilidad.

En términos generales, a partir del análisis generado de las diversas dinámicas del cambio de las coberturas vegetales a través del espacio-tiempo, se pueden tener orientaciones que se articulen a la gestión y planificación territorial de la microcuenca y el municipio de Soacha, con el fin de generar transiciones socio-ecológicas con sendas hacia la sostenibilidad.

11. Recomendaciones

La dinámica de las coberturas dentro de la microcuenca del Río Soacha exhibe un patrón claro de incremento urbano y perdida de coberturas naturales y seminaturales. En el marco de las observaciones anteriores, se debe de articular trabajos participativos en el área, con entidades territoriales, comunidad local, gremios empresariales y organizaciones no gubernamentales para la protección de los ecosistemas estratégicos y recursos biológicos, llevando a cabo la estipulación de la resolución 1278 del 2016 de la CAR e instaurando los regímenes de usos principales, compatibles, condicionados y prohibidos en la zona.

La cuenca hidrográfica como unidad básica de planificación, puede orientar los esquemas de ordenamiento territorial en prospección para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémico para el hábitat natural y las personas, vinculando para tal fin autoridades de nivel local del municipio de Soacha (alcaldía y juntas de acción comunal) con autoridades regionales de la zona, que tomen a consideración la dinámica espacio-temporal que se evidencia en la matriz del paisaje de la microcuenca.

Se requieren realizar investigaciones que aborden dinámicas de funcionalidad a partir de la ecología del paisaje, identificado los efectos ecológicos que conllevan el cambio de coberturas y uso del suelo, para poder señalar las fuerzas conductoras de transformación que las originan.

Realizar la caracterización florística e inventario de la biodiversidad para comprender los verdaderos efectos conducidos por factores antrópicos de perturbación, llenar vacíos técnicos de información y poder realizar evaluaciones, seguimientos y monitoreos.

Este estudio abordo el *Marchine Learning* a partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales y la predicción de transacciones de coberturas, pero se requiere indagar y explorar más investigaciones que involucren análisis de geo-inteligencia artificial y SIG aplicado a recursos naturales con el empleo de redes neuronales y algoritmos genéticos, que simulen y modelen diversos escenarios de cambio y planificación de intervención para la sustentabilidad ecológica.

Y finalmente se deben de articular los resultados con las transiciones socio-ecológicas que vive Colombia, en busca de la sostenibilidad y el equilibrio de la balanza de las necesidades crecientes de una sociedad frente a la naturaleza. Principalmente orientadas en transiciones como creación de centros urbanos e integración en sistemas regionales, conformación de enclaves de desarrollo minero y rehabilitación y restauración ecológica de paisajes degradados.

Agradecimientos

A la prestigiosa Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por brindarme la formación profesional; a mi amado proyecto curricular de Ingeniería Forestal por contribuir y darme las bases en el conocimiento e importancia de la biodiversidad en su conjunto, pero con especial énfasis en el manejo de bosques para lograr un desarrollo sostenible para la sociedad y el país.

A toda mi familia, a mis amados abuelos por criarme y guiarme en el camino, a mis hermanos, a mis compañeros y amigos de la universidad, a quienes cumplimos este sueño tan anhelado de ser ingenieros forestales.

A todos los profesores de la universidad por ser guías y orientadores en sus áreas, al profesor Fernando Ortiz por su acompañamiento para la realización del trabajo, al profesor Rodolfo Franco por su asesoramiento y evaluación.

Y a todas las personas que han y siguen acompañándome en la vida.

Gracias totales.

12. Bibliografía

Achicanoy, J. A., Rojas-Robles, R., Sánchez, J. E., & Sánchez, J. E. (2018). Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la localidad de Suba, Bogotá-Colombia. *Gestión y Ambiente*, *21*(1), 41–58. https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.68285

Aguilera, F. (2008). *Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la aglomeración urbana de Granada. Tesis doctoral: Programa de doctorando en urbanismo, ordenación del territorio y planificación ambiental* (Editorial de la Universidad de Granada). Retrieved from https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=69465

Alcaldía Municipal de Soacha. (2018). *Plan de Ordenamiento Territorial - Soacha*. Retrieved from http://alcaldiasoacha.gov.co/secretaria/secretaria-de-planeacion-y-ordenamiento-territorial/pot/file/4394-documento-diagnostico-final-2018

Andrade, G., Chaves, M., Corzo, G., & Tapia, C. (2018). *Transiciones socioecológicas hacia la sostenibilidad: Gestión de la biodiversidad en los procesos de cambio de uso de la tierra en el territorio colombiano*. Retrieved from http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35145

Bautista, A., & Pérez, L. (2018). *Diagnostico base oara el análisis historico ambiental en el municipio de Soacha* (Universidad Distrital Francisco José de Caldas). Retrieved from http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13068/1/PérezVásquezLuisAugusto2018.pdf

Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, *48*(1), 55–66. https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133

Camacho-Sanabria, J. M., Juan Pérez, J. I., Pineda Jaimes, N. B., Cadena Vargas, E. G., Bravo Peña, L. C., & Marcela, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, *21*(1), 93–112. https://doi.org/10.21829/myb.2015.211435

Cantillo, D., & Murcia, J. (2015). *Determinar el Índice de Crecimiento Urbanístico del Municipio de Soacha en las Ultimas dos Décadas* (Universidad Distrital Francisco José de Caldas). https://doi.org/http://hdl.handle.net/11349/4275

CAR. (2006). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá*. Retrieved from http://institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Estudio_Prevencion_Desastres_CAR/Anexo_5-Soporte_POMCA_Rio_Bogota.pdf

CAR. (2007). *Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá - Subcuenca del río Soacha*. Retrieved from https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac259f1505fa.pdf

CAR. (2016). *Resolución 1278 del 09 de junio del 2016. "Por medio de la cual se determina la zona de protección del Río Soacha."* Retrieved from https://www.car.gov.co/uploads/files/5ae23a95948d1.pdf

CEPAL. (2013). Análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial. In *Subsecretaría de Desarrollo REgional y Administrativo*. Chile.

Chen, J., Zhu, X., Vogelmann, J. E., Gao, F., & Jin, S. (2011). A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*, *115*(4), 1053–1064. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2010.12.010

Clark Labs. (2016). *TerrSet - Geospatial Monitoring and Modeling System*. Retrieved from http://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/03/TerrSet18-2_Brochure_WEB.pdf

Correa, C. A., Mendoza, M. E., & López, E. (2014). Análisis del cambio en la conectividad estructural del paisaje (1975-2008) de la cuenca del lago Cuitzeo, Michoacán, México. *Revista de Geografía Norte Grande*, *59*(59), 7–23. https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000300002

Cortés, T. (2017). *Análisis y modelación del cambio de cobertura y uso del suelo en el sur de la Ciudad de México de 1990 al 2030* (CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA - CENTROGEO). Retrieved from http://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/242

Díaz-Pacheco, J., & Hewitt, R. (2014). Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, *14*(1), 1–22. Retrieved from http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/298

Dureau, F., & Gouëset, V. (2011). Formas de poblamiento y desigualdades en los desplazamientos. La evolución de la movilidad cotidiana en dos periferias populares de Bogotá: Soacha y Madrid (1993-2009). *Territorios*, *25*(1), 65–94. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=35720830004

Eastman, J., R. (2012). IDRISI Selva, Gía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Manual Version 17. In J. Santa, E. Abril, R. Gleiser, & M. Grilli (Eds.), *Clark Labs*. Retrieved from https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf

Farfán Gutiérrez, M., Rodríguez-Tapia, G., & Mas, J.-F. (2016). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, *2016*(90), 89–104. https://doi.org/10.14350/RIG.48600

Forero, G. (2015). Caracterización físico-química y microbiológica del agua del río Soacha, Cundinamarca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *6*(2), 119. https://doi.org/10.22490/21456453.1410

Franco, R. (2016). *Análisis multitemporal vectorial en ARCGis - Mini-guía de caso-*. Retrieved from https://mixdyr.files.wordpress.com/2016/07/analisis_multitemporal_vectorial_arcgisdesktop.pdf

Franco, R., & Rodríguez, J. M. (2004). Análisis multitemporal satelital de los bosques del Carare - Opon, mediante imágenes landsat de 1991 Y 2002. *Colombia Forestal*, *9*(18), 157–167. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2005.1.a12

Geraldi, A. M., Piccolo, C., & Perillo, G. M. E. (2010). Delimitación y estuduio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, *52*(1), 215–225. https://doi.org/http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17621220008

Gobernación de Cundinamarca. (2018). Municipio de Soacha-CundiData. Retrieved from Secretaría de Planeación website: http://saga.cundinamarca.gov.co/apps/cundidata/

Gonzáles, J. (2010). *Cambios de la cobertura (1981 - 2007) y fuerzas conductoras en el borde urbano del municipio de Soacha (Cundinamarca, Colombia)* (Pontificia Universidad Javeriana). https://doi.org/http://hdl.handle.net/10554/9860

González-Velázquez, A. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos*

(gapfilling) de imágenes satelitales Landsat 7 ETM + (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente). Retrieved from http://hdl.handle.net/11117/5723%0AEste

IDEAM. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000* (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, Ed.). https://doi.org/10.1002/14651858.CD001168.pub2

Iizuka, K., Johnson, B. A., Onishi, A., Magcale-Macandog, D. B., Endo, I., Bragais, M., … Bragais, M. (2017). Modeling Future Urban Sprawl and Landscape Change in the Laguna de Bay Area, Philippines. *Land*, *6*(2), 26. https://doi.org/10.3390/land6020026

INEGI. (2010). *ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS IMÁGENES LANDSAT*. México: INEGI. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.

Isaacs-Cubides, P., & Jaimes, V. I. (2013). *Análisis multitemporal de la estructura del paisaje en el Distrito Capital años 1991-2012*. Bogotá D.C., Colombia: Jardín Botánico José Celestino Mutis.

Jain, R. K., Jain, K., & Ali, S. R. (2017). Modeling Urban Land Cover Growth Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) Using Remote Sensing : A Case Study of Gurgaon , India. *Advances in Computational Sciences and Technology*, *10*(10), 2947–2961. Retrieved from https://www.ripublication.com/acst17/acstv10n10_03.pdf

Jiménez, E. (2019). *Dinámica y modelamiento fuuro de cambios y fragmentación en la cobertura y uso del suelo en la hoya de Loja en el periodo 2001-2016*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

Kanevski, M., Pozdnoukhov, A., & Timonin, V. (2008). Machine learning algorithms for geo spatial data. Applications and software tools. *Proc. IEMSs 4th Biennial Meeting - Int. Congress on Environmental Modelling and Software: Integrating Sciences and Information Technology for Environmental Assessment and Decision Making, IEMSs*, *1*, 320–327.

Laben, C. A., & Bernard V., B. (2000). *Patent No. 6,011,875*. Retrieved from https://patentimages.storage.googleapis.com/f9/72/45/c9f1fffe687d30/US6011875.pdf

Leguizamón, P. A. G., & Puentes, M. E. M. (2016). Información espacial, herramientas de análisis en la transformación de las coberturas vegetales. *Ingeniería e Innovación*, *4*(2). https://doi.org/10.21897/23460466.1176

León, N. (2012). *Identificación y caracterización del conflicto ambiental generado por la minería de materiales que se desarrolla en el municipio de Soacha - Cundinamarca*. Bogotá D.C., Colombia.

Mas, J. F., Reyes Díaz Gallegos, J., & Pérez Vega, A. (2012). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas*, *51*(51), 53–72. https://doi.org/10.14350/rig.30414

Mata, G. D. de L., Álvarez, A. P., & Guerrero, J. H. M. (2014). Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, *2014*(84), 42–53. https://doi.org/10.14350/RIG.36568

McGarigal, K., Marks, B. J. (1994). *Spatial pattern analysis program for quantifying landcape structure FRAGSTAT*. Oregon.

McGarigal, K., SA Cushman, Ene, E. (2012). FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Retrieved from

http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html
McGarigal, K., Cushman, S., Neel, M., & Ene., E. (2015). *FRAGSTATS Help*. Retrieved from https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf
Medina, M. (2012). *Cartografía social para evaluar y proponer una solución a los problemas de contaminación del río Soacha* (Universidad Militar Nueva Granada). https://doi.org/http://hdl.handle.net/10654/7190
Mendoza, G. E., & García, K. P. (2011). Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo en el Municipio de Manaure– Guajira-Colombia, Implementando imágenes Landsat. *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, 6442–6449. Curitiba, Brasil.
Mercado, D., Pedraza, L., & Martínez, E. (2015). Comparación de Redes Neuronales aplicadas a la predicción de Series de Tiempo. *Prospectiva*, *13*(2), 88–95. https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.491
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
Morales-Hernández, J. C., Carrillo-González, F. M., Farfán-Molina, L. M., & Cornejo-López, V. M. (2016). Cambio de cobertura vegetal en la regiòn de Bahía de Banderas, México. *Caldasia*, *38*(1), 17–29. https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57831
Moreno, H. F. (2015). *ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT PARA IDENTIFICACION DE ZONAS DEGRADADAS EN EL AREA BOYACA* (Universidad Militar Nueva Granada). Retrieved from http://hdl.handle.net/10654/13524
Muñoz, D. A. (2017). Transformaciones y prospectiva del paisaje en el Páramo de Paja Blanca, Nariño, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, *22*(2), 47–66. https://doi.org/10.19053/01233769.7598
PCI Geomatics. (2006). *Pan Sharpening en Geomática*. Santiago de Chile.
Peña, J. (2007). *Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos del suelo en la marina Baixa (Alicante) . Tesis de Doctorado: Programa Doctorado en Biología*. Universidad de Alicante.
Preciado, J., Leal, R., & Almanza, C. (2005). *HISTORIA AMBIENTAL DE BOGOTÁ, SIGLO XX: ELEMENTOS HISTÓRICOS PARA LA FORMULACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE URBANO*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Riaño, O. (2002). Consideraciones y metodos para la detecciòn de cambios empleando imagenes de satelite en el municipio de Paipa. *Revista Colombia Forestal*, *15*(1), 41–62. https://doi.org/10.14483/2256201X.3306
Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Wang, N., Lin, Y., Rimal, B., … Lin, Y. (2017). Monitoring and Modeling of Spatiotemporal Urban Expansion and Land-Use/Land-Cover Change Using Integrated Markov Chain Cellular Automata Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *6*(9), 288. https://doi.org/10.3390/ijgi6090288
Ruíz, J. (2012). *La gestión territorial del municipio de Soacha (Colombia), como iniciativa frente al cambio global* (Universidad Internacional de Andalucía). Retrieved from http://hdl.handle.net/10334/1786
Ruíz, R., & Torres, H. (2008). Manual De Procedimientos De Delimitación Y Codificación De Unidades Hidrográficas. In *UICN Sur*. Perú.
Ruiz, V., Savé, R., & Herrera, A. (2013). Multitemporal analysis of land use change in the

Terrestrial Protected Landscape Miraflor Moropotente Nicaragua, 1993-2011. *Ecosistemas*, *22*(3), 117–123. https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.16

Scaramuzza, P., Micijevic, E., & Chander, G. (2004). *SLC Gap-Filled Products Phase One Methodology - USGS*. United States.

Toro Espín, N. del, Gomariz-Castillo, F., Cánovas-García, F., & Alonso-Sarría, F. (2015). Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del río Argos (Región de Murcia). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, *67*(1), 327–347. https://doi.org/10.21138/bage.1828

Torres, M., Magana, O., & Moreno, F. (2016). Predicción del cambio de uso/cobertura arbolada en México a través de probabilidades de transición. *Agrociencia*, *50*(6), 769–785. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30247467009

Tuesta, E. (2018). Prospectiva del cambio de uso de suelo en el distrito de Iberia, Tahuamanu - Madre de Dios, Periodo 2004-2030 (Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios). Retrieved from http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/UNAMAD/315

Valbuena, D. (2011). *Formulación De Un Modelo Para Determinar Las Tendencias De Cambio De La Cobertura Vegetal En La Cuenca Del Rio Cubillos*. Universidad distrital Francisco José de Caldas.

Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2018). Sistema multi-algoritmo para la clasificación de coberturas de la tierra en el bosque seco tropical del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, *31*(1), 58–69. https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3497

Vila, J., Varga, D., Llausás, A., & Ribas, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology)una interpretación desde la Geografía. *Documents d'anàlisi Geogràfica*, *48*(1), 151–166. Retrieved from https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2328164

World Vision. (2004). Manual de manejo de cuencas. In *World Vision*. El Salvador.