

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL EN LOS CAMBIOS DE COBERTURA, UN ESTUDIO  
DE CASO MUNICIPIOS DE CORRALES Y TOPAGÁ – DEPARTAMENTO DE  
BOYACÁ ENTRE 1990 Y 2016**



Universidad Antonio Nariño.  
Julio de 2020  
Bogotá D.C

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL EN LOS CAMBIOS DE COBERTURA, UN ESTUDIO  
DE CASO MUNICIPIOS DE CORRALES Y TOPAGÁ – DEPARTAMENTO DE  
BOYACÁ ENTRE 1990 Y 2016**

Elaborado Por:

Oscar Armando Gavidia Albarracín  
Ingeniero geólogo

Código Estudiantil  
11791922871

Presentado a:  
Universidad Antonio Nariño

Modalidad  
Monografía.  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Director:  
MSc. David Doncell Ballén

Universidad Antonio Nariño.  
Julio de 2020  
Bogotá D.C

## **Agradecimientos**

*A mi querida tía (mamá) por su apoyo incondicional durante el tiempo de ejecución, mi mejor compañía en el día a día esto es para ti.*

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>VIII</b>
Planteamiento del problema .....	IX
Justificación.....	IX
Pregunta de investigación.....	X
Método aplicado .....	X
Alcances y limitaciones.....	XI
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>XII</b>
Objetivo General.....	XII
Objetivos Específicos .....	XII
Delimitación del área de interés .....	XIII
Actores de interés .....	XV
<b>1 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>1</b>
1.1 La geografía cuantitativa como alternativa de análisis.....	1
1.2 Concepto de escala y resolución espacial.....	2
1.3 Técnicas de procesamiento digital .....	3
1.4 Aplicaciones de análisis espacial .....	7
1.5 Estado del arte .....	10
<b>2 METODOLOGÍA .....</b>	<b>13</b>
2.1 Método .....	13
2.1.1 Adquisición.....	14
2.1.2 Proyecto fotogramétrico.....	14
2.1.3 Cartografía temática.....	15
2.1.4 Análisis espacial.....	16
2.2 Inventario de información adquirida .....	17
2.2.1 Cartografía base IGAC .....	17
2.2.2 Aerofotografías .....	18
2.2.3 Imagen de referencia horizontal orthofotomosaicos.....	18
2.2.4 Modelos digitales de elevación.....	19
2.2.5 Imágenes de satelitales.....	20
2.3 Fotogrametría digital.....	21
2.3.1 Parámetros de la cámara .....	22
2.3.2 Cargue y parámetros de la cámara.....	23
2.3.3 Medición de los puntos de control y sus tipos .....	24
2.3.4 Modelo de triangulación.....	25
2.3.5 Obtención de orto fotos, DTM y mosaico.....	26
2.3.6 Orto fotos .....	26
2.3.7 Creación del mosaico.....	27
2.4 Procesamiento digital .....	31

2.4.1	Preparación de la imagen .....	31
2.4.2	Pre procesamiento.....	32
2.5	Clasificación supervisada.....	34
2.6	Corine land Cover .....	37
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y OBTENCIÓN DE ÍNDICES.....</b>	<b>43</b>
3.1	Calculo de los índices de Braimoh (Ganancia, perdida y persistencia) .....	43
3.2	Análisis de resultados.....	49
3.2.1	Descripción de cambios. ....	50
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>1</b>
<b>5</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>3</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>4</b>
<b>7</b>	<b>TRABAJOS CITADOS.....</b>	<b>5</b>

### LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1	Localización Área de Estudio.....	XIV
Figura 2	Distribución de títulos mineros en área de interés.....	XVI
Figura 3	Distribución de los pozos de exploración de hidrocarburos en el área de interés .....	XVII
Figura 4	Metodología sistemática – deductiva propuesta.....	14
Figura 5	construcción de un proyecto fotogramétrico .....	15
Figura 6	Captura de información .....	16
Figura 7	Distribución de planchas IGAC a escala 1:10.000 .....	17
Figura 8	Aerofotografías IGAC .....	19
Figura 9	Ortofotomosaico de referencia .....	19
Figura 10	Modelo digital del terreno de referencia .....	20
Figura 11	Imagen derecha Landsat, Izquierda Rapideye.....	21
Figura 12	Barra de herramientas dentro del proyecto fotogramétrico .....	22
Figura 13	Obtención de GCP desde las imágenes de referencia .....	25
Figura 14	Muestra de una imagen orto rectificadas. ....	28
Figura 15	Mosaico de referencia creado. ....	29
Figura 16	Resultado de la coincidencia de histograma.....	30
Figura 17	Estructura usada la obtención de imágenes de trabajo .....	32
Figura 18	Muestra de la preparación de imágenes.....	34
Figura 19	Etapas de la clasificación supervisada.....	35
Figura 20	Comparación visual clasificación supervisada e imagen capturada.....	36
Figura 21	Modelación para el cálculo de indicadores geo estadísticos .....	43
Figura 22	Distribución de pérdidas y ganancias categorías de análisis en ha. ....	44
Figura 23	Distribución de los cambios con relación las perdidas, ganancias y persistencia. ....	49
Figura 24	Análisis visual cambios vereda Modeca.....	51
Figura 25	Análisis visual cambios vereda San Juan Nepomuceno.....	52
Figura 26	Análisis visual cambios vereda San Juan Nepomuceno (sector la mesa) .....	53

### LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1 Distribución de la titulación minería para el año 2017 .....	XV
Tabla 2 Numero de combinaciones posibles sensor Rapideye .....	4
Tabla 3 Matriz de correlación teórica .....	5
Tabla 4 Matriz de transición para dos capas de tiempos diferentes.....	8
Tabla 5 Listado de planchas cartográficas recopiladas.....	17
Tabla 6 Listado de aerofotografías .....	18
Tabla 7 Identificación de imágenes analizadas.....	20
Tabla 8 Descripción de las etapas .....	23
Tabla 9 Matriz de Covarianza.....	33
Tabla 10 Matriz de Correlación .....	33
Tabla 11 Calculo del Factor de índice optimo .....	33
Tabla 12 Unidades de cobertura vegetal identificadas .....	37
Tabla 13 Evidencias de campo análisis de categorías de cobertura.....	39
Tabla 14 Calculo de pérdidas y ganancias en distribución veredal .....	45
Tabla 15 Matriz de transferencia Años 1992-2016.....	45
Tabla 16 Matriz de datos, ganancia, perdida y persistencia en hectáreas.....	47
Tabla 17 Cambios de las coberturas en términos de porcentajes (%).....	48

## Resumen

El presente documento propone un análisis y determinación de cambios en la cobertura de suelo a través del análisis multitemporal. Para esto se aplicaron una serie de indicadores espaciales los cuales detectan los cambios más significativos en la zona, se destaca que las unidades cartográficas con mayor variación o crecimiento corresponden a la actividad de extracción minería, los acopios y las áreas de exploración de hidrocarburos. Con indicadores cercanos al 32% en pérdida - ganancia e intercambios del 35% y un cambio total del 61% al interior del área de estudio localizada en los municipios de Topagá y Corrales departamento de Boyacá.

**Palabras clave:** Multitemporal, análisis espacial, fotogrametría, OIF, Índices de Braimonh

## Abstract

This document proposes an analysis and determination of changes in land cover through multi time analysis. For this, a series of spatial indicators were applied which detect the most significant changes in the area. It is stressed that cartographic units with the greatest variation or growth correspond to the mining extraction activity, the stockpiles and the hydrocarbon exploration areas. With indicators close to 32% in loss - gain and swap of 35% and a total change of 61% within the study area located in the municipalities of Topagá and Corrales, department of Boyacá.

Key words: Multitemporal, spatial analysis, photogrammetry, OIF, Braimonh index

## Introducción

Las dinámicas espaciales entorno a crecimientos geográficos en comparación a dos periodos de tiempo es comúnmente utilizada con la finalidad de establecer valores de cambio asociados desde la foto interpretación de las imágenes aportadas por lo sensores remotos, el uso es extendido ampliamente dentro de los estudios académicos y de investigación, no obstante, la limitación esta en rigor de la resolución y escala cartográfica de sus productos.

Ante el auge de la producción de cartografías temáticas de buena escala, nuevos sensores remotos y la liberación de información se ha suplido de forma progresiva la limitante en los análisis de tipo geográfico. El resultado es la generación de cartografía temáticas de mayor resolución y por ende una mayor fiabilidad de los resultados.

De forma altera las herramientas de análisis espacial se insertan procedimentalmente en el desarrollo de software. Es común encontrar el mismo tipo de desarrollos en licencias de tipo comercial o de acceso libre. En tal caso el uso no es exclusivo para alguno de ellos, sino la utilización de las ventajas que cada uno propone.

Todas estas alternativas se presentan como insumos técnicos útiles en la producción de nuevos contenidos cartográficos en selección u aplicabilidad de algún tipo de enfoque geográfico. Para el caso en particular se recurre a la estadística espacial presentando una alta correlación con el objetivo propuesto en cual se busca establecer indicadores de cambio desde el uso de análisis espacial, técnicas de fotointerpretación y sensores remotos.

El desarrollo propuesto es sistemático deductivo que parte de la descripción de insumos y aplicabilidad procedimental para la obtención de nuevas variables de análisis, el procesamiento previo y específico en la obtención de unidades cartográficas de trabajo y concluir con el análisis espacial desde la comparación de cambios observables y medibles durante el periodo de análisis entre 1992 y 2016 para un área de interés particular con dinámicas geográficas identificables. Lo anterior en alusión a la temporalidad de las imágenes que para el caso 1992 corresponde al ortofotomosaico construido desde la fotogrametría digital y el mosaico del año 2016 obtenido desde la restitución cartográfica en obtención de cartografía base IGAC escala 1:10.000

## **Planteamiento del problema**

En el análisis cualitativo u cuantitativo de espacios rurales, un sin número de variables interactúan en un espacio geográfico consolidando cotidianidades de las poblaciones que las ocupan, las relaciones son diversas y obedecen a dinámicas propias del lugar, esta última en alusión a las características propias de espacios fisiográficos entre los cuales diversas disciplinas describen desde una perspectiva geo-histórica la evolución de los medios abióticos, bióticos y socioeconómicos.

Por lo anterior, una interacción directa entre suelo, flora, fauna y subsuelo condicionan el uso y aprovechamiento de los recursos. De allí la presencia de actividades de agricultura, turismo, ganadería, recreación, vivienda, minería e industria, se presentan en mayor o menor medida a razón de diversas condiciones; geopolíticas, territoriales y geoespaciales.

La geo localización se refiere a una condición que incide directamente en el impacto u presión que se ejercen en territorio; a esta se atañen condiciones recreadas socialmente con el fin de magnificar la exploración y explotación de recursos con la instalación de infraestructuras asociadas al transporte y comercialización en una sincronía entre la oferta y demanda de bienes y servicios provistos desde áreas rurales.

Por tal razón el dilucidar estas particularidades alude a la necesidad de establecer un contexto teórico técnico soportado metodológicamente de herramientas de análisis espacial en la cual se cuantifiquen los cambios a lo largo de una línea de tiempo permitiendo así dar paso a alguna perspectiva geográficas que ahonden en la magnitud de los cambios en el área de interés objeto de estudio.

## **Justificación**

A través de la actualización de cartografía base liderada por el IGAC y el auge de los sistemas de información geográfica SIG, así como de los sistemas de percepción remota PRC, las autoridades de índole nacional se han visto abocadas en la necesidad de actualizar referentes cartográficos y temáticos.

De tal forma la adquisición de información geográfica crece y pone de manifiesto la actualización de datos, parámetros, cartografía, indicadores y demás alternativas que trae tener consigo amplios volúmenes de información entre las que se encuentran; cartografía base en

formato digital (GDB), aerofotografías a color, orthofotomosaicos de alta resolución (50cm), modelos digitales de elevación e imágenes de satélite de buena (5m) a alta resolución (1m).

Así como la calidad de la información aumenta la oferta y disponibilidad de software es amplia y diversa encontrándose desde software libre y licenciado que incluyen la mejora de procesos e inclusión de herramientas analíticas en concordancia al desarrollo científico y teórico que respalda el análisis y obtención de nuevos resultados cartográficos ya sean preliminares o productos procesados.

Ante tal diversidad de información las opciones de uso se integran a estudios de índole científico, investigativo, aplicado y académico, con la generación de nuevo conocimiento y contenidos cartográficos.

Ahora bien, las particularidades espaciales y geográficas se circunscriben a condiciones medio ambientales en territorios donde el crecimiento, cambios, dinámicas y transformaciones le hacen acreedores a establecer desde alguna perspectiva geográfica un caso de estudio y con ello dar un significado mayor al uso y utilización de las herramientas, información y técnicas de procesamiento digital con el soporte y salidas cartográficas desde los SIG

Por lo anterior se pone de manifiesto generar nuevos contenidos desde el alcance de información técnica disponible en un espacio geográfico en el que se presenten categorías de cobertura vegetal que le impriman un objeto de estudio y aplicabilidad de herramientas SIG.

### **Pregunta de investigación.**

¿Cuál es la magnitud de los cambios de cobertura asociada a las dinámicas económicas de la explotación de materiales de construcción cercanas a la urbe del municipio de Sogamoso?

### **Método aplicado**

El método utilizado se enmarca en un enfoque geográfico cualitativo sistemático deductivo, desde la recopilación, construcción de orthofotomosaicos en aplicación de conceptos de fotogrametría digital, procesamiento de imágenes y la captura vectorial de unidades cartográficas en uso del modelo Corine Land Cover para su identificación y posteriormente llegar a la determinación de los indicadores en relación al cambio de las coberturas de suelo propuestos por (Braimoh, 2006) y la analítica de los resultados.

**Alcances y limitaciones.**

El análisis ha de permitir establecer con apoyo de estadística espacial, los cambios en la cobertura en una fracción del territorio a escala 1:10.000, en tal efecto serán construidas mínimo dos capas temáticas como indicadores de referencia que describen atemporalmente cambios dentro de una perspectiva cualitativa racional en relación al uso de espacios rurales.

La limitante prevista está en función de la escala y los insumos necesarios para la construcción de las capas temáticas, por demás esta se limita a un espacio geográfico en donde las actividades, cercanía y características paisajísticas son directamente observables.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Aplicar el método de análisis multitemporal para detectar el cambio de coberturas de suelo para el periodo de 1992 a 2016 en los municipios de Corrales y Topagá departamento de Boyacá.

### **Objetivos Específicos**

Interpretar imágenes satelitales mediante técnicas de procesamiento digital y la construcción de orthofotomosaicos con aerofotografías.

Identificar y catalogar las unidades cartográficas presentes en los dos momentos de análisis necesarias en el análisis multitemporal para el periodo de 1992 a 2016.

Construir indicadores de variación espacial que detecten los cambios de cobertura para el periodo de 1992 a 2016.

### **Delimitación del área de interés**

El área de interés se encuentra localizada hacia la margen oriental del Colombia, cordillera Oriental en jurisdicción del departamento de Boyacá, sobre el plano Cundiboyacacense dista a 80km de la capital del departamento de Tunja. Territorialmente hace parte de las provincias de Sugamuxi y Tundama dentro de los municipios de Topagá y Corrales. Siendo de interés de trabajo las veredas de Corrales y Modeca (municipio de corrales) y veredas San José, La Esperanza y San Juan de Nepomuceno (municipio de Topagá).

La temperatura promedio oscila entre los 10° - 25° grados centígrados, de precipitación promedio entre 1976-2005 mm anuales. Geológicamente se enmarca en un diseño estructural de rocas sedimentarias plegadas, localizadas en la cordillera central con dirección preferencial SW-NE, con rocas de edades desde el devónico inferior, triásico, jurásico, cretáceo y rocas jóvenes del paleógeno hasta el neógeno.

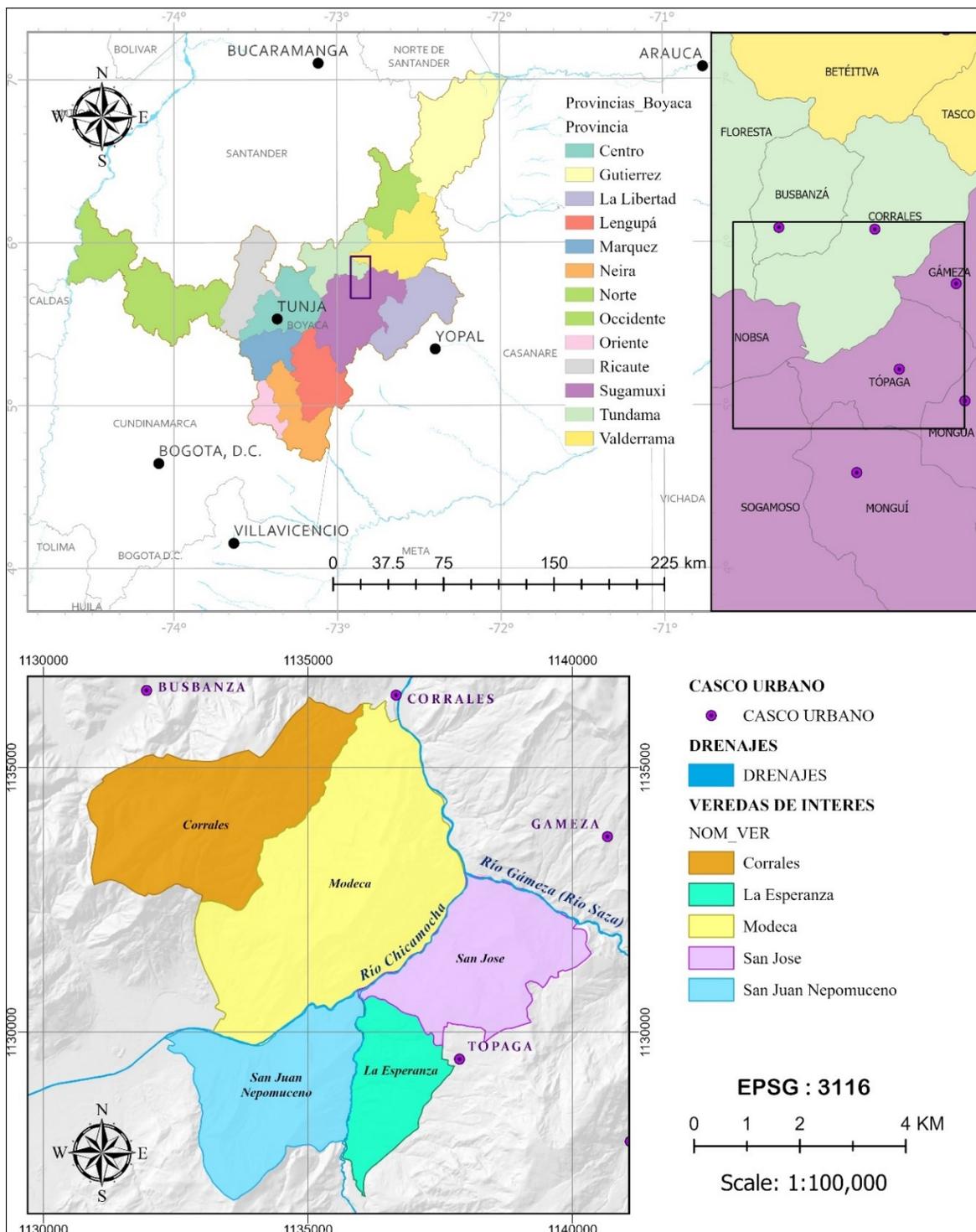
Los afloramientos rocosos son diversos y está directamente relacionada a los eventos transgresivos y regresivos presentados en la acreción de la cordillera oriental durante el cretáceo. Las litologías aflorantes van desde arcillas, arenas, calizas, Cher, lutitas, conglomerados consolidados del jurásico (Formación Girón) y afloramientos de carbón y fosforita.

El paisaje se asocia a su genética de origen estructural con la exposición de lomeríos plegados laderas, valles disectados, terrazas de origen aluvial y glacial en las cuales se desarrollan actividades productivas de ganadería y agricultura.

Por lo anterior en territorio se localizan actividades de explotación para tres tipos de minería de interés a mencionar; la explotación de arenas para la construcción, caliza utilizada por la industria cementera y explotación de carbón térmico para hidroeléctricas.

La geo localización de los depósitos sedimentarios junto a condiciones fisiográficas ha favorecido el asentamiento de industrias minero extractivas desde los años 50 siendo referentes la siderurgia de Votorantim (anteriormente Acerías paz del rio), cementos Holcim, Argos y el crecimiento asociado a la urbe de Sogamoso que se extiende a los límites de los municipios de Corrales y Topagá. Con todas y cada una de las particularidades de actividades industriales, provisión de servicios, comercio, educación y transporte.

Figura 1 Localización Área de Estudio



Fuente: Autor

## Actores de interés

En revisión realizada a la información aportada dentro del catastro minero colombiano del 27 de septiembre de 2017, el interés de área para la explotación de yacimientos minerales es diverso alcanzando un total de 50 títulos mineros para el área de estudio. Estos bajo análisis de superposición con relación a las veredas de interés deja consigo 61 polígonos en el área.

El mineral de mayor interés en el área corresponde a carbón metalúrgico alcanzando así un 67% de títulos mineros otorgados, en menores proporciones se encuentran: materiales de construcción con un 10%, arenas 11%, Caliza 5%, Arcilla 5% hasta el cobre con tan solo alrededor de un 2%.

Tabla 1 Distribución de la titulación minería para el año 2017

Material	Corrales	La Esperanza	Modeca	San José	San Juan Nepomuceno	Total general
Arcilla				1	2	3
Arena		1	2	1	3	7
Caliza	3					3
Carbón		8	4	18	11	41
Cobre			1			1
Materiales de construcción			1	1	4	6
<b>Total general</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>21</b>	<b>20</b>	<b>61</b>

Fuente: ANM Catastro minero del 25 de septiembre de 2017.

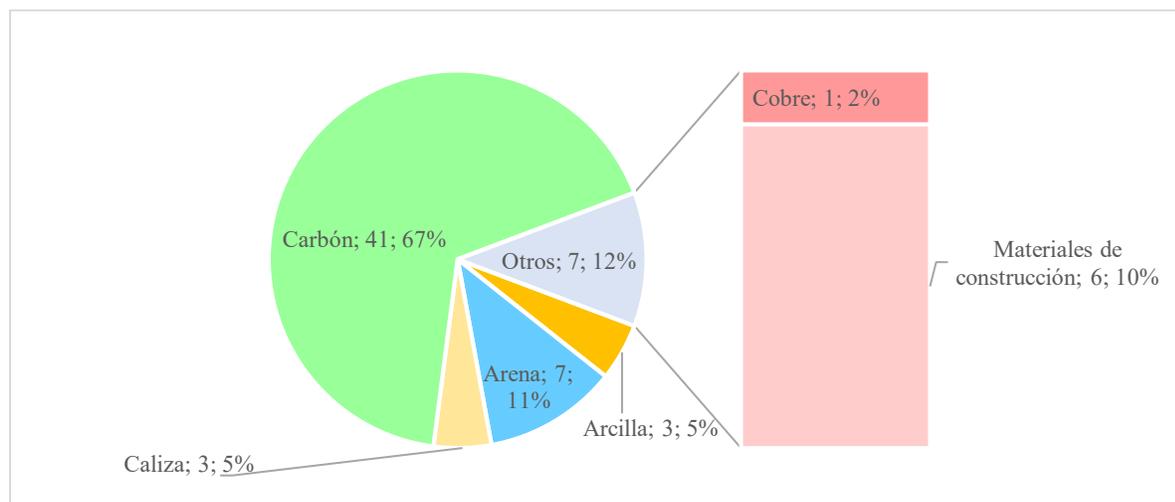
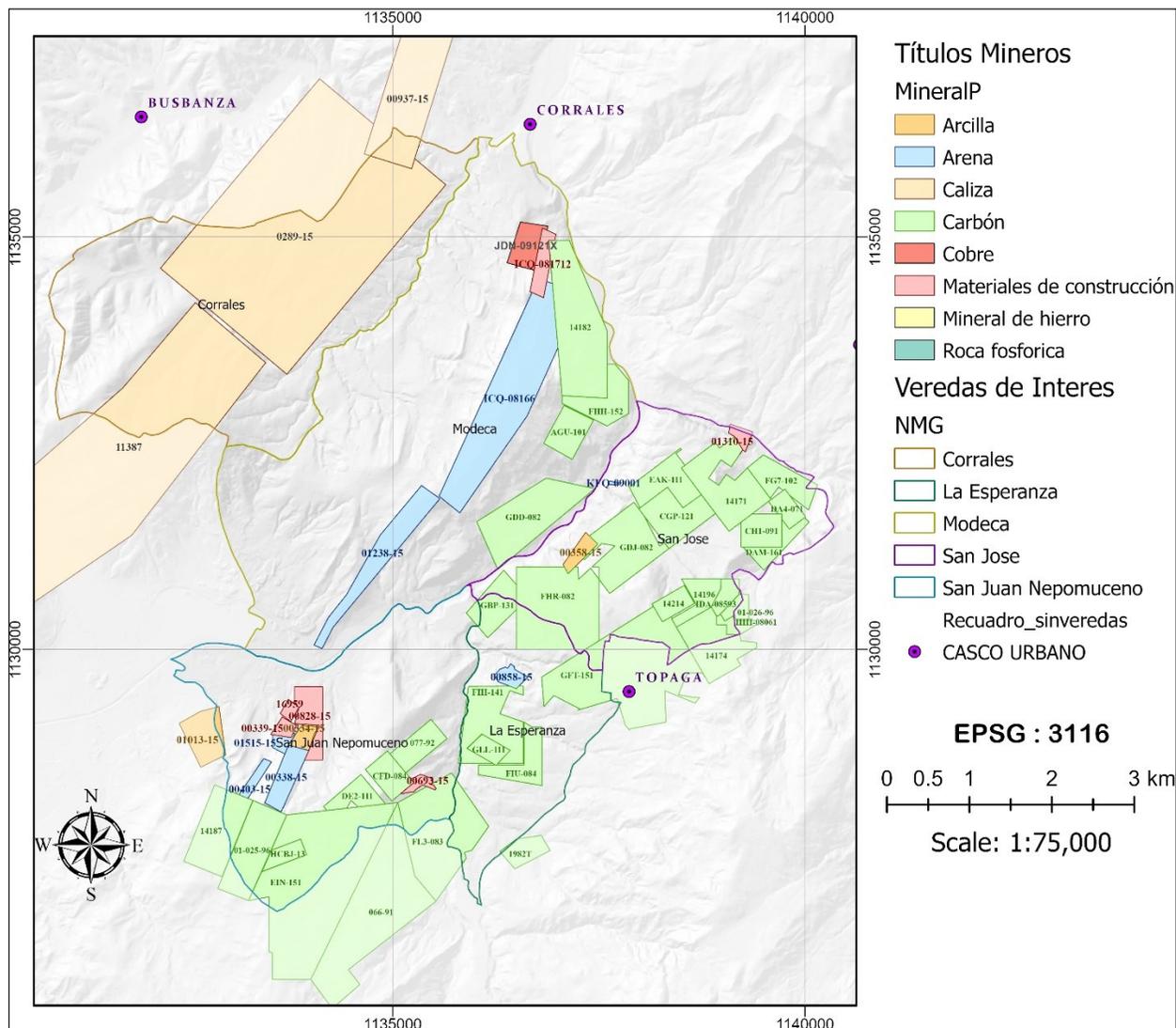


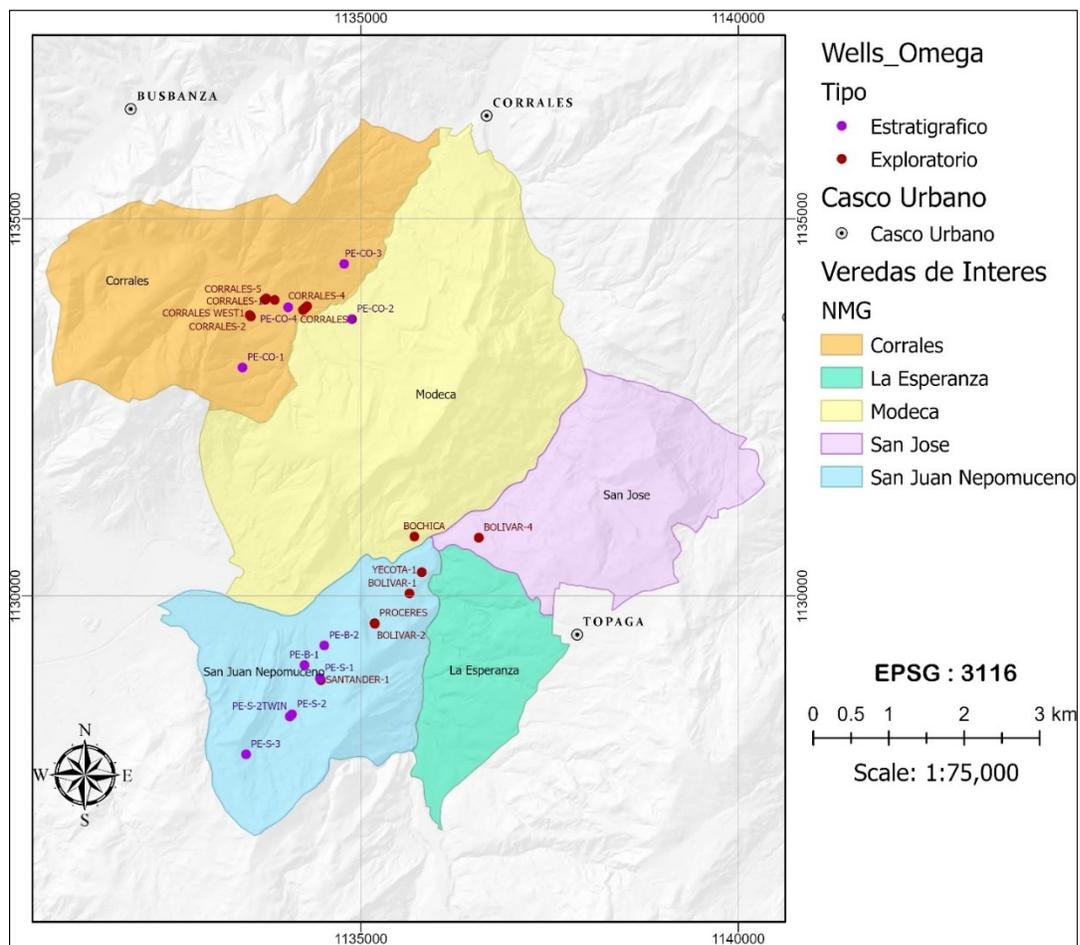
Figura 2 Distribución de títulos mineros en área de interés



Fuente: Autor

Análogo al interés de recursos minerales en superficie, en el área de estudio se cuenta con el inventario de 7 pozos de exploración exploratoria para hidrocarburos, los cuales se han distribuido en 3 de las 5 veredas objeto de estudio.

Figura 3 Distribución de los pozos de exploración de hidrocarburos en el área de interés



Fuente: Autor

## **1 Marco teórico**

Esbozar y presentar alternativas en el manejo y procesamiento digital de imágenes alude al entendimiento de bondades, cualidades, requerimientos, calidad de la información temática a obtener, escala de trabajo e información técnica disponible en función de los objetivos de la investigación o aplicación de herramientas de manejo en utilización de software especializado desde los sistemas de información geográfica.

A continuación, se describen de forma concatenada principios, conceptos y alternativas utilizadas en el manejo y análisis multitemporal dentro del estudio de caso. (Chuvieco, 1995) plantea una dualidad en la cual, el análisis, interpretación y tratamiento de imágenes satelitales va en dos líneas. La primera centrada en la obtención de parámetros y la segunda desde su aplicabilidad, siendo de especial atención esta última.

### **1.1 La geografía cuantitativa como alternativa de análisis.**

Ahora bien, el tratamiento conjunto de los datos de una imagen multispectral recurre al aporte de los sistemas de información geográfica, integrados en un nivel focal de análisis desde la geografía automatizada que se acompaña de la geografía cuantitativa en un análisis estratificado como aporte al entendimiento de la realidad geográfica. (Buzai, Cacace, Humacata, & Lanzeloti, 2015). Dicho en otras palabras, se hace necesario la conceptualización que aporta la geografía cuantitativa y el soporte técnico que se ha desarrollado desde los sistemas de información geográfica como herramienta en la obtención de parámetros e indicadores en uso de diversas técnicas y líneas metodológicas desde la analítica espacial.

Si se observa a mayor detalle el enfoque de la geografía cuantitativa esta surge desde el empirismo acudiendo al realismo para explicar ontológicamente las relaciones entre el sujeto y el objeto derivando en la aplicabilidad de fundamentos y objetivos soportados en datos cuantitativos desde una metodología inductiva controlada (Montes Galbán, 2015).

La decantación conceptual y metodológica busca establecer generalidades en territorio con el fin de determinar y predecir indicadores a partir del estudio de fenómenos recurriendo a multiplicidad de alternativas procedimentales posibles (reclasificación, modelación, evaluación multi criterio, análisis de evolución temporal, la clasificación supervisada y la auto correlación espacial) entre otras (Baxendale, 2015).

## 1.2 Concepto de escala y resolución espacial.

Lo anterior se refiere a lo planteado por Anderson et al, 1976 y Campbell, 1987, citados por (Chuvieco, 1995) en relación a la mínima unidad cartografiable (MIC) en un mapa a considerarse corresponde a  $4 \text{ mm}^2$ . Su aplicabilidad limita así los objetivos de los estudios de caso a través de la investigación pues limita a que estos sean de tipo nomotéticos (generales) u ideográficos (singulares).

Bajo este criterio la primera revisión se centra en la verificación de resolución espacial y demás características que ofrecen cada una de las imágenes multiespectrales. (Jensen, 2015) presenta esboza y compara diversos sensores remotos multiespectrales siendo algunos de estos y su respectiva resolución espacial; Landsat TM 4 (30m), Landsat 8 (30m -15m, imagen pancromática), Spot 1,2 y 3 HVR (20m -10 m pancromática), spot 5 (10m – 2.5m, pancromática), Digital Globe worldView-2 (1.85m – 0.46m pancromática).

Corolario a lo anterior (Lopez-Vizoso 1989) citado en (Chuvieco, 1995) plantea el uso ideal por sensor multiespectral y sus respectivas escalas cartográficas;

Tabla 2 Referencia de Escala para Imágenes y sensores satelitales

Sensor	Escala
NOAA – AVHRR	1:20000.000
Landsat MSS	1:200.000
Landsat TM	1:100.000
Spot HVR	1:50.000

Fuente: (Lopez-Vizoso 1989) citado en (Chuvieco, 1995)

(Jensen, 2015) por demás indica que los productos orto rectificadas del satélite Rapideye de 5 bandas y 5 metros de resolución espacial es útil en la obtención de cartografías escala 1:25.000

Con respecto a las imágenes de tipo óptico estas capturan pequeñas extensiones más aun así gozan de moderada a altas resoluciones espaciales obtenibles en formato análogo y digital.

Ejemplo extendido del uso de este tipo de imágenes lo conforma la realización de cartografía base obtenida del post procesamiento digital y desarrollos de fotogrametría mediante restitución cartográfica.

Otros tipos de conceptos que se atañen a las características de las imágenes multispectrales y ópticas, lo son la resolución espectral, resolución radiométrica, e incluso la denominada resolución temporal. (Randall, 2012, pág. 12) define a “la resolución espectral de un sistema de teledetección como su capacidad para distinguir diferentes partes del rango de longitudes de onda medidas.” (en traducción) lo que representa la conformación de las bandas dentro de las imágenes espectrales de allí sensores con 1, 2, 3, 5...n bandas estas últimas mejor conocidas como hiper espectrales.

Por otro lado, la resolución radiométrica es definida como la subdivisión de los niveles de energía entrantes al sensor en valores discretos registrados en números enteros a lo que (Labrador Garcia & Evora Brondo, 2012) señala como niveles digitales. Conceptualmente parte de una expresión física que mide radiancia en el sensor, como el diferencial entre la temperatura y la reflectancia cuantificada a través del número de bits. (Calle & Salvador, 2012).

Desde un concepto informático los bits representan la disposición de sistemas binarios de 1 y 0 donde la unidad de base es 2, siendo un bit  $2^1$ , en un arreglo tonal de un bit el uno (1) corresponde al color negro y el cero (0) al color blanco, si el exponencial cambia se crean combinaciones a escalas de grises en arreglos de  $2^2$ ,  $2^3$ ,  $2^4$  ...  $2^n$  mejormente denotas como imágenes de 2 bits, 8 bits, u 16bits. Una imagen de 8bits representa una distribución tonal de 256 colores que bajo arreglo cromático conforman imágenes a color (Costa Campos & Fenandez Bozal, 2005).

Para el caso de la resolución temporal esta es considerada como la retoma u transito del sensor sobre un mismo lugar, característica que obedece propiamente al diseño del sensor y la órbita alrededor de la superficie terrestre.

### **1.3 Técnicas de procesamiento digital**

El procesamiento digital de imágenes captadas por sensores remotos, busca mejorar, producir o resaltar diversos rasgos temáticos desde el tratamiento de los niveles digitales o conversión de los mismos desde el realce de imágenes, transformaciones de contraste y la obtención de información asociada en estadística de los valores radiométricos.

Ejemplo de la aplicabilidad en el análisis de las estadísticas multibanda lo es el denominado factor de índice optimo OIF donde se estima la relación entre la varianza de los datos y la suma de las desviaciones estándar en un arreglo de tres combinaciones de banda (Chavez Jr, 1982). Para su cálculo se hace necesario la estimación estadística de los niveles digitales de la imagen y posteriormente la estimación del número combinaciones posibles entre bandas para los cañones.

RGB (Hernandez Menco, 2017). Expresados matemáticamente según Ecuación 1-1. Estimación de combinaciones posibles.

$$C_n^p = \binom{n}{p} \frac{n!}{(n-p)!*p!} \quad (1.1)$$

Donde n corresponde al número de bandas y p al número de cañones en una imagen RGB (3). Si se toma como referencia las 5 bandas del sensor Rapideye el resultado de estas corresponderá a 10 combinaciones.

Tabla 3 Número de combinaciones posibles sensor Rapideye

ID	R	G	B
1	1	2	3
2	1	2	4
3	1	2	5
4	1	3	4
5	1	3	5
6	1	4	5
7	2	3	4
8	2	3	5
9	2	4	5
10	3	4	5

El cálculo de OIF es realizado dentro de las diez combinaciones presentadas en la Tabla 3, donde se busca establecer el arreglo RGB que presente la mayor separación espectral en relación a las bandas, matemáticamente se expresa por la siguiente Ecuación 1-2.

**Ecuación 1-2** Obtención del factor de índice óptimo

$$OIF_{klj} = \frac{\sum \delta k + \delta l + \delta j}{|\sum \varphi k + \varphi l + \varphi j|} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Donde  $\delta$  corresponde a la desviación estándar de la banda k localizada en el cañón del rojo. Dentro de las composiciones RGB disponibles y  $\varphi$  al coeficiente de correlación para las tres bandas en valor absoluto de los resultados.

La matriz de correlación corresponde a una relación entre la matriz de covarianza y las desviaciones estándar, según la Sumatoria de los niveles digitales en la posición ij de los pixeles en la imagen

$\mu$  = media de los datos en la banda

n = número de bandas analizadas.

k y l corresponden a las combinaciones entre bandas. Cuando k = l el valor de la diagonal corresponde a 1.

Tabla 4 Matriz de correlación teórica

	B1	B2	B3	B4
B1	$\varphi_{11}$			
B2	$\varphi_{21}$	$\varphi_{22}$		
B3	$\varphi_{31}$	$\varphi_{32}$	$\varphi_{33}$	
B4	$\varphi_{41}$	$\varphi_{42}$	$\varphi_{43}$	$\varphi_{44}$

$$\text{Correlacion } r = \frac{\text{Covarianza } \varphi_{kl}}{\text{Desviacion } \delta k * \delta l} \quad 1-3$$

(Jensen, 2015, pág. 143) señala que “Un coeficiente de correlación de + 1 indica una relación positiva y perfecta entre los valores de brillo en dos de las bandas, a medida que los píxeles de una banda aumentan de valor, los valores de la otra banda también aumentan de manera sistemática. Por el contrario, un coeficiente de correlación de -1 indica que las dos bandas están perfectamente e inversamente relacionadas (es decir, a medida que aumentan los valores de brillo en una banda, los píxeles correspondientes en la otra banda disminuyen sistemáticamente en valor)”. (en traducción).

Mientras que los valores cercanos a cero se entienden como un grado de no asociación es decir disimiles.

El cálculo de la covarianza =  $\varphi$  está dado por la 1-4

$$\text{Covarianza } \varphi = \sum \frac{(ND_k - \mu) * (ND_l - \mu)}{n - 1} \quad 1-4$$

Donde:

$ND_k$  = Sumatoria de los niveles digitales en la posición ij de los píxeles en la imagen

$\mu$  = media de los datos en la banda

n = número de bandas analizadas.

Obtenido el factor de índice óptimo, el objetivo ahora se centra en obtener la imagen modifica dentro de sus niveles digitales a fin de realizar análisis y conversión a niveles discretos desde la reclasificación u agrupación de características homogéneas, metodológicamente el procesamiento digital ofrece diversas alternativas entre las que se encuentran las transformaciones de contraste, relaces espaciales, transformaciones de color y la corrección atmosférica.

Como lo señala (Soca Flores, 2017), las imágenes satelitales “se encuentran contaminadas por la luz sola dispersa hacia el sensor por las moléculas atmosféricas, los aerosoles y las nubes en suspensión”. la corrección radiométrica y atmosférica permite la conversión de los niveles digitales en la imagen a “niveles de reflectancia captados por el sensor al tope de la atmosfera”. TOA (Cabrera, Vargas , Garcia, & Ordonez, 2011)

Las correcciones se realizan mediante la aplicación de formulaciones matemáticas, y parámetros al momento de la captura “posición del sensor y el sol con respecto a la superficie observada”. (Aguilar et. al, 2014)

Entre los modelos de corrección atmosférica se hayen el SMAC, FLAASH y ATCOR. Software en sistemas de información geográfica integran e herramientas principios físicos y matemáticos para el cálculo y corrección de parámetros con apoyo del metadato asociado la fecha, hora, altitud y demás características del sensor.

Ejemplo de ellos lo es ENVI; el cual integra el módulo FLAASH para el cálculo y obtención de la reflectancia mediante la remoción de la dispersión atmosférica y la compensación de las disposiciones por aerosol (Aguilar et al, 2014). ERDAS usa el algoritmo de ATCOR como opción a ser instala y basada en ATCOR3 el cual “permite una corrección atmosférica y topográfica tridimensional incluyendo el uso del DEM” (Soca Flores, 2017, pág. 56).

La obtención de una imagen corregida contribuye significativamente en la obtención de mejores resultados en la transformación de niveles digitales continuos a categorías discretas a través de la extrapolación de valores radiométricos desde la captura de muestras de entrenamiento.

Las clases o patrones se inscriben metodológicamente a propuestas de agrupación o diferenciación donde cada clase corresponde a una cobertura o uso del suelo en interpretación de los niveles digitales obtenidos por el sensor.

CORINE LAND COVER (CLC) es una iniciativa cuyos inicios se dieron en los años 90 en Europa, posteriormente es adaptada e implementada en Colombia, (IGAC, 2009). A través de la celebración de convenios interadministrativos entre el IGAC, IDEAM y las Corporaciones Autónomas Regionales, se implementa la metodología en la búsqueda y obtención de cartografías a escala de referencia 1:100.000 (IDEAM, IGAC Y CORMAGDALENA, 2008)

Para el caso de escalas de nivel medio (1:100.000) se tomaron como fuente de información imágenes del sensor Landsat y fotografías aéreas IGAC. Estudios de mayor escala se desarrollan de forma paralela en Quindío (IGAC, 2009), Los resultados proceden de un ortofotomosiaco de

fotografías registradas con una cámara Ultracam-D aerotransportada de 4 bandas con longitudes de onda hasta el infrarrojo (IR) y resoluciones espaciales hasta los 50 cm y salidas cartográficas a escala 1:10.000.

El método de unificación es sistemático basado en una jerarquía de tipo creciente desde los niveles o de menor detalle o generalizados hasta la especificidad de los niveles superiores. Permite de tal modo una flexibilización a la hora de captura y/o el ingreso de un nuevo nivel de ser necesario. Accediendo así a la creación de capas cartográficas atemporales como un retrato de los usos de suelo en concordancia con la fecha de observación del sensor.

#### **1.4 Aplicaciones de análisis espacial**

Las alternativas de análisis espacial son diversas y se encuentran ligadas directamente al enfoque epistemológico y filosófico que respaldan tanto su concepción científica y teórica como aporte a las ciencias sociales y la geografía. (Sánchez D. , 2017)

Al optar por un enfoque cuyos métodos parten de lo abstracto, lógico, matemático, u objetivo, el estudio y análisis del espacio geográfico acude a la técnica que a grandes rasgos o grupos lo son del tipo cualitativo, cuantitativo, los SIG y las representaciones gráficas. (Madrid Soto & Lopez Ortiz , 2005).

El espacio como objeto central de estudio geográfico se atañe a conceptos para describir u presentar las realidades sociales y geográficas. Acude a métodos, procedimientos, instrumentos, y herramientas, lo que permiten cumplir con diversas funciones. (Ebdon 1982, citado en (Madrid Soto & Lopez Ortiz , 2005) indica; que en técnicas de tipo cuantitativo la función a la que esta responde los son ; la descripción, inferencia significación y predicción.

En cuanto al uso de métodos estos se articulan a atributos de cantidad, temporalidad, individualidad y variables de análisis desde los datos (continuos, discretos, puntuales y/o generales) recopilados a partir de muestras representativas u estadísticas. (Sánchez D. C., 2012)

Ahora bien, todo método geográfico de tipo cuantitativo incurre en acciones procedimentales sistemáticas inmersas en instrumentos y herramientas de medición desde la agrupación y subsecuente generalización de unidades espaciales. (Humacata, 2014)

La unidad espacial, que se integra dentro de los Sistemas de Información Geográfica corresponde a las geometrías y alternativas de análisis (polígonos, líneas, puntos e imágenes clasificadas “raster”). El análisis es del tipo matemático (cuantitativo) basa así sus criterios de

análisis en relaciones espaciales con respecto a la posición, área, perímetro y posteriormente derivar en un análisis de tipo espacial que busca establecer cambios a partir de indicadores.

Matemáticamente diversos autores presentan el análisis de cambios en unidades de cobertura y usos de suelo a partir del cálculo de indicadores con relación a los cambios extraídos en analítica espacial y así señalar aquellas categorías de cobertura con mayor tendencia al cambio. (Braimoh, 2006), (Pontius Jr, et. al, 2004), (Sanabria, et. al, 2017).

En análisis parte de la matriz de transición (Tabla 5Tabla 16) para los dos tiempos, se obtiene desde la aplicación de herramientas espaciales y la analítica de datos. A este sentido los autores anteriormente mencionados han aportado en la obtención de 8 indicadores denotados como: (G = Ganancia, L= Perdidas, D= Cambio neto, S= Intercambios, C= Cambio total, Gp= Índice de ganancias, Gl=Índice de pérdidas y Np = índice de cambio neto a persistencia) Ecuación 1-5 a Ecuación 1-13

Tabla 5 Matriz de transición para dos capas de tiempos diferentes

	Time 2				Total time 1	Loss
	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4		
<b>Time 1</b>						
Category 1	P11	P12	P13	P14	P1+	P1+ - P11
Category 2	P21	P22	P23	P24	P2+	P2+ - P22
Category 3	P31	P32	P33	P34	P3+	P3+ - P33
Category 4	P41	P42	P43	P44	P4+	P4+ - P44
<b>Total time 2</b>	P+1	P+2	P+3	P+4	<b>1</b>	
<b>Gain</b>	P+1 - P11	P+2 - P22	P+3 - P33	P+1 - P44		

Fuente: (Braimoh, 2006, pág. 252)

La ganancia (**G**) corresponde al área de las categorías 1...n evaluadas que aumentan con relación al tiempo 2, de la forma (P+1...P+n) menos los valores de la persistencia de área para los tiempos 1 y 2 (P11 .... Pnn) diagonal de la Tabla 5

$$\text{Ecuación 1-5} \quad \text{Ganancia (gain)} \quad G (\text{Gain}) = P_{+1} - P_{11}$$

Las pérdidas (**L**) corresponde al área de las categorías 1...n evaluadas en el tiempo 1, que decrecen en relación al tiempo 2. Y está dada por la suma (filas) de las categorías en el tiempo 1 (P1+ ...Pn+) menos el valor de persistencia por cada una de las categorías de análisis Ecuación 1-6.

$$\text{Ecuación 1-6} \quad \text{Perdidas (loss)} \quad L (\text{loss}) = P_{1+} - P_{11}$$

(Sanabria, et. al, 2017) define al cambio neto (**D**) como la diferencia entre las perdidas y las ganancias para cada categoría de análisis.

$$\text{Ecuación 1-7} \quad \text{Cambio neto (D)} \quad D_j = L_{ij} - G_{ij}$$

Los intercambios (**S**) (swap) según (Braimoh, 2006) y (Pontius Jr, Shusas, & McEachern, 2004), corresponden a las ganancias y pérdidas simultaneas para cada categoría de análisis, esto en alusión a que una categoría del tiempo 1 tiene la posibilidad de ganar o perder sobre una a mas categorías en relación al tiempo 2. Correspondiendo a los valores p+1 y p1+ observables en la matriz de transición Tabla 5, su cálculo está dado por la Ecuación 1-8. La cual corresponde a 2 veces el valor mínimo registrado en la matriz de cambios para las categorías de análisis presentado como el mínimo de las pérdidas o el mínimo de las ganancias.

La expresión de la ecuación 1-8 alude a la posición del valor mínimo entre los registros que señalan el intercambio dentro de la matriz de transición.

$$\text{Ecuación 1-8} \quad \text{Intercambios (swap)} \quad S_j = 2 \min(P_{+1} - P_{11}, P_{1+} - P_{11})$$

“El Cambio total (**C**) para cada categoría esta expresado como la suma del cambio neto (**Sj**) y los intercambios (**Dj**)”, (Pontius et. al, 2004, pag.257) a lo que (Sanabria, et. al, 2017, pag.45) menciona “como la suma de las ganancias (Gij) y las perdidas (Lij)”. (Pontius et. al, 2004) deja al cambio total en términos de la Ecuación 1-9 la cual corresponde a la máxima pérdida dentro de una categoría (n) y la suma de la mínima ganancia para esa categoría.

$$\text{Ecuación 1-9} \quad \text{Cambio total} \quad C_j = D_j + S_j$$

$$\text{Ecuación 1-10} \quad \text{Cambio total (2)} \quad C_j = D_j + S_j = \max(P_{+1} - P_{11}, P_{1+} - P_{11}) + \min(P_{1+} - P_{11}, P_{1+} - P_{11})$$

(Braimoh, 2006) establece las relaciones entre las perdidas, ganancias y la persistencia a través de indicadores en términos de la Ecuación 1-11 y Ecuación 1-12

$$\text{Ecuación 1-11} \quad G_p = \frac{G}{P} \quad \text{Ecuación 1-12} \quad L_p = \frac{L}{P}$$

Para lo cual señala que; “valores mayores a 1, indican una alta tendencia de la cobertura en transición hacia otras clases de cobertura que persisten”. (Braumoh, 2006, pág. 260), en traducción.

Ahora el indicador entre el cambio neto hacia la persistencia este dado por la ecuación 1-13.

$$\text{Ecuación 1-13} \quad n_p = g_p - l_p$$

De acuerdo con (Braumoh, 2006), este corresponde a la diferencia presentada entre los índices de ganancia y persistencia. los valores negativos representan las categorías de mayor rotación entre los dos periodos de análisis. Un valor positivo mayor a 1 corresponde a las categorías que más ganan y los valores cercanos a 1 aquellas que tienen a persistir.

## 1.5 Estado del arte

El abordaje temático, en el cual se encasillan tanto los estudios multitemporales, análisis de cobertura y usos del suelo es diverso. Su desarrollo es soporte técnico en la construcción de estudios de tipo investigativo y el desarrollo de la técnica en estudios de caso.

En alusión a la técnica, esta se centra en análisis de tipo cuantitativo con enfoque descriptivo. Entre los cuales se localizan: Estudios medio ambientales (análisis de incendios, inundaciones, riesgos, cambio climático, licenciamiento ambiental), eco sistémicos, antrópicos (minería, hidrocarburos) geográficos (urbanos, radicales y estudios de paisaje).

La particularidad de los mismos alude al uso de software aportados por los SIG para el análisis, captura, procesamiento y estadística espacial, desde la recopilación y uso de imágenes nativas o crudas (sin procesamiento) o en su defecto procesadas (orto rectificadas)

La diversidad de sensores que aportan en la recopilación y adquisición de imágenes es amplia, pero a su vez limitada al grado de detalle y escala de trabajo. Los estudios de índice nacional o departamental acuden a sensores como Landsat para el manejo de escalas 1:100.000, a nivel regional o municipal spot, Rapideye y Sentinel son una buena opción dado a su rango de resolución espacial y espectral que para el primer caso alcanzan resoluciones en pixel de 5 metros y 5 bandas multiespectrales.

En estudios de mayor escala 1:10.000 las aerofotografías orto rectificadas aportan resoluciones espaciales menores al metro, de tipo pancromáticas y a color. En Colombia el Instituto geográfico Agustín Codazzi, cuenta con un amplio barrido a nivel nación de aerofotografías pancromáticas en registro histórico desde los años 60. Bordeando el año 2005 se migro a imágenes a color con

un rango espectral de 4 bandas en formatos de salida RGB las cuales son el insumo en la restitución cartográfica oficial a escala 1:10.000.

Referencias del uso y obtención de cartografía temática mediante análisis multitemporales de índole local se tienen: “El análisis multitemporal del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy en los departamentos de Boyacá y Arauca entre los años 1992, 2003 y 2014”. (Peña Suárez, 2015, pág. 1). Mediante el uso de software se obtienen capas temáticas del post procesamiento de imágenes satelitales Landsat a partir de técnicas de clasificación supervisada con el fin de comparar el retroceso del glaciar en estadística de los datos vector obtenidos. (Peña Suárez, 2015).

En el caso de estudios medio ambientales tres casos homólogos buscas establecer mediante analítica de imágenes la desecación de cuerpos de agua, el primero de ellos corresponde al Análisis multitemporal de la detección de cambios en el desecamiento de la laguna de Fúquene a través de imágenes de radar. (Neuta Tunjo, 2018), allí se acude al uso de imágenes de radar del sensor Sentinel-1, áreas de entrenamiento dentro de una clasificación supervisada verificada mediante uso de la matriz de confusión y cálculo del coeficiente Kappa.

“Análisis multitemporales mediante imágenes Landsat del cambio de la Cobertura vegetal y su impacto en la desecación del espejo de agua en la laguna de Tota para el periodo de 1991 al 2017” (Rojas Paez, 2018, pág. 1), presenta a partir del procesamiento semiautomático digital de 3 imágenes satelitales, se obtienen capas temáticas de la cobertura vegetal con el uso metodológico Corine land cover que con el apoyo de estadística espacial se establecen indicadores de cambio por cobertura analizada. (Rojas Paez, 2018).

El tercer documento consultado corresponde al “Análisis de la Cobertura vegetal, uso del suelo y su impacto en la desecación del lago de Tota” (Mateus, 2014, pág. 1), en disimilitud allí se utilizan tres imágenes de referencia en la construcción de capas de forma semiautomática; dos desde la captura visual en interpretación de datos para un ortofotomosiaco a color de referencia y una imagen construida desde la orto rectificación de fotografía áreas y el tercero correspondiente a imagen multiespectral spot. (Mateus, 2014).

La determinación, impacto, crecimiento y dinámica asociada en áreas mineras a cielo abierto acuden procesamiento digital de imágenes con el fin de establecer indicadores espaciales de cambio equiparables como los siguientes; “Análisis multitemporal de la zona de explotación minera cielo abierto en el municipio de Duitama a partir de imágenes Landsat 7 y Sentinel 2<sup>a</sup>” (Pérez Umaña, 2018, pág. 1), para ello y mediante el procesamiento digital de imágenes se obtuvo

la cobertura de dos periodos de análisis metodológicamente soportados desde clasificaciones supervisadas y el cálculo de índices de vegetación normalizado (Pérez Umaña, 2018).

“Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia” (Flórez Yepes, et. al., 2017, pág. 95). En analítica de cambios desde los sistemas productivos en análisis de la cobertura, tomando como fuente de datos la captura vectorial en foto interpretación de fotografías aéreas y servicios web y una capa vectorial temática obtenida de una fuente oficial que bajo el apoyo de estadística espacial se realiza una descripción cualitativa y cuantitativa en relación a los cambios de la cobertura vegetal. (Flórez Yepes, et. al., 2017)

“Análisis multitemporal del impacto generado por la explotación minera en el medio geomorfológico de la Isla de Toas, Estado de Zulia” (Montiel A. & Villarreal, 2004, pág. 55). La metodología empleada para este caso corresponde a la creación de capas temáticas desde la foto interpretación de pares estereoscópicos, controles de campo y análisis del cambio volumétrico con el uso de modelos digitales de elevación en dos periodos de análisis. (Montiel A. & Villarreal, 2004)

Lo anteriormente presentado esboza tácitamente diversas alternativas en el uso de la técnica con el fin de extraer indicadores de comparación a escala media o de bajo detalle.

A escala mayor y en ejemplo de ello el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, en el año 2009, presenta el resultado del convenio de cooperación interinstitucional celebrado entre la Gobernación, Corporación Autónoma Regional de Quindío la cartografía de las coberturas y usos de la tierra a escala 1:10.000, metodológicamente obtenida desde la captura vectorial en interpretación visual de imágenes correspondientes a Aero fotografías orto rectificadas procesadas en orthofotomosaicos junto a la presentación de un modelo lógico para el almacenamiento de resultados GDB (IGAC, 2009) siendo de referencia metodológica el uso del Corine Land Cover.

Existe un sin número de aplicaciones de análisis espacial para datos georreferenciados desde la comparación de capas temáticas, entre las cuales se encuentran la evaluación multi criterio (ECM), y los análisis de tipo booleano, (Loya Carrillo, et. al, 2015) plantean un modelo de simulación a partir de autómatas celulares que se haya dentro de las herramientas de software Idrisi Taiga del módulo Ca\_Markov el cual predice la probabilidad del cambio.

Matrices de comparación entorno al crecimiento u cambios de las coberturas son normalmente utilizadas donde la evaluación es un arreglo matricial de filas y columnas aludiendo a conceptos

de persistencia (ningún cambio) perdida u ganancia para indicar conceptos de tipo ambiental favorabilidad u impacto (Lamprea Avellaneda, 2017).

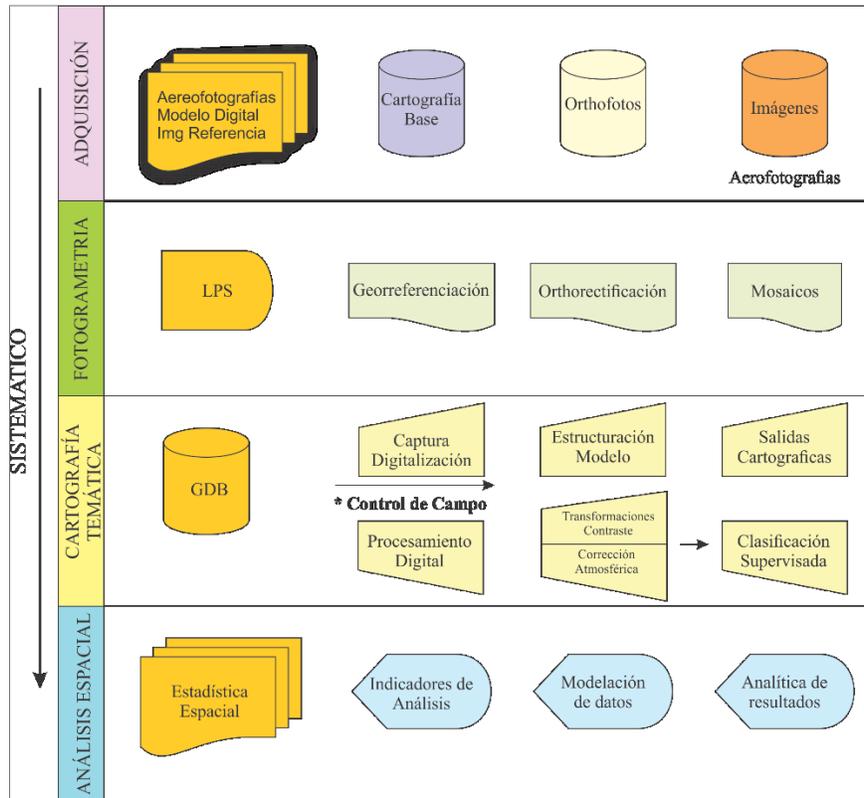
## **2 Metodología**

### **2.1 Método**

La metodología implementada es sistemática-deductiva, se apoya de la estadística espacial en descripción procedimental, argumental con un enfoque hacia la geográfica cuantitativa soportada en procesamientos geospaciales desde los Sistema de Información Geográfica a través de uso de herramientas, procedimientos y funciones con el fin de establecer indicadores u tendencias desde el análisis espacial de las denominadas unidades cartográficas.

El desarrollo se integra a 4 etapas a mencionar a) Adquisición; en el cual se recopila información del tipo cartográfico, b) fotogrametría; para recrear un ortofotomosaico de referencia al primer periodo de análisis (1992), c) Elaboración de cartografía temática; mediante la construcción de unidades cartográficas tipo polígono para los dos periodos de análisis (1992-2016) a esta se incluye el procesamiento digital de imágenes, d) análisis espacial; en el cual se describen los principales resultados desde una analítica geoespacial basada en indicadores.

Figura 4 Metodología sistemática – deductiva propuesta.



Fuente: Autor.

### 2.1.1 Adquisición

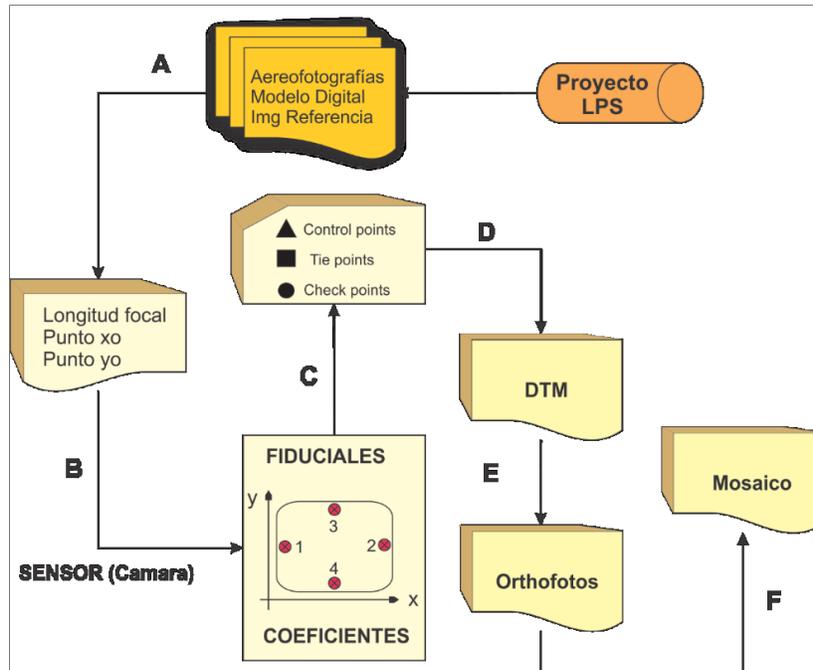
La primera fase propuesta corresponde la recopilación de material de tipo cartográfico y temático, y de allí realizar el análisis y tipo de procesamiento digital con el que cuenta la información en relación a esta se redistribuye en la adquisición de cartografía base IGAC en formatos análogos y digital, recopilación de aerofotografías, orto fotos e imágenes de satélite modelos digitales de elevación, puntos de control y la metadada asociada a los datos con especial atención a la obtención de los parámetros de la cámara previo a la construcción de un proceso fotogramétrico a desarrollar en una segunda fase.

### 2.1.2 Proyecto fotogramétrico

El proyecto fotogramétrico procede a la adquisición y recopilación de fotografías aéreas en formato digital y cuyo nivel de procesamiento es nulo “crudas”. De acuerdo a lo planteado en la, Figura 5, la construcción de un proyecto fotogramétrico completo se conforma de 7 fases intermedias A,B,C,...F, En cada una de estas se hace uso de la información recopilada en la

primera etapa “adquisición”. Siendo de especial atención la fase C la cual corresponde a la aéreo triangulación y determinación de los puntos de control. Así como la creación del mosaico.

Figura 5 construcción de un proyecto fotogramétrico



Fuente: Autor

### 2.1.3 Cartografía temática

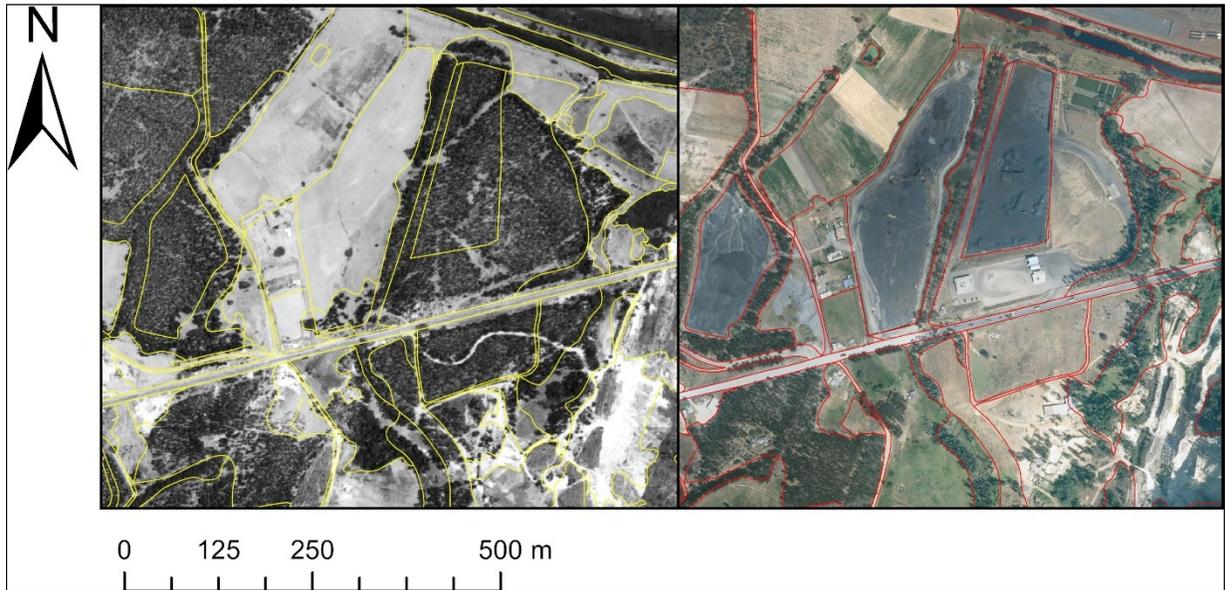
La cartografía temática va en vía de dos alternativas metodológicas a referenciar. La primera de ellas corresponde al tratamiento de imágenes satelitales multispectrales en la conversión de los niveles digitales a valores discretos a partir de la obtención de índices u imágenes de mayor contraste posteriores al cálculo del factor de índice óptimo OIF y post procesamientos como las transformaciones de contraste, color o la corrección atmosférica de los niveles digitales y culminar con una clasificación supervisada en desarrollo procedimental en los que se incluye la segmentación de imágenes, le creación de categorías y las muestras de entrenamiento.

La segunda alternativa posible la constituye la captura de polígonos homogéneos mediante técnicas de foto interpretación de vectores y codificación de los mismos desde la imagen de referencia y el mosaico pancromático obtenido en el desarrollo del proyecto fotogramétrico.

Dentro de la captura vectorial diversos softwares pueden ser utilizados en la construcción de polígonos homogéneos que representan las unidades de cobertura para los tiempos de interés.

Los más utilizados corresponde a Autocadmap, ArcGis, ArcGIS PRO o una utilización combinada.

Figura 6 Captura de información



Fuente: Autor

La principal característica para su uso o selección corresponden al manejo de los mismos en reconocimiento de sus potencialidades siendo de mayor relevancia la optimización del tiempo en captura de los datos. Tiempos de referencia en la conversión de una base cartográfica escala 1:10.000 de formato análogo a digital esta alrededor de los 20 días. El tiempo de la captura de la capa temática es así indeterminado donde la principal variable de cambio es la calidad de los datos y el nivel de detalle buscado, así como la escala de referencia a ser usada bajo una correcta aplicabilidad de la mínima unidad cartografiada (MIC).

#### 2.1.4 Análisis espacial

La quinta y última etapa del procesamiento está dada por la extracción de indicadores, variables, cifras, tendencias u estadísticas desde la comparación de los cambios realizados a las unidades cartográficas de cobertura. Viene acompañada de la modelación de variables según las necesidades de análisis, los enfoques son diversos y están dados por la línea teórica que aporta al entendimiento de los cambios sin desviarse de la técnica.

## 2.2 Inventario de información adquirida

### 2.2.1 Cartografía base IGAC

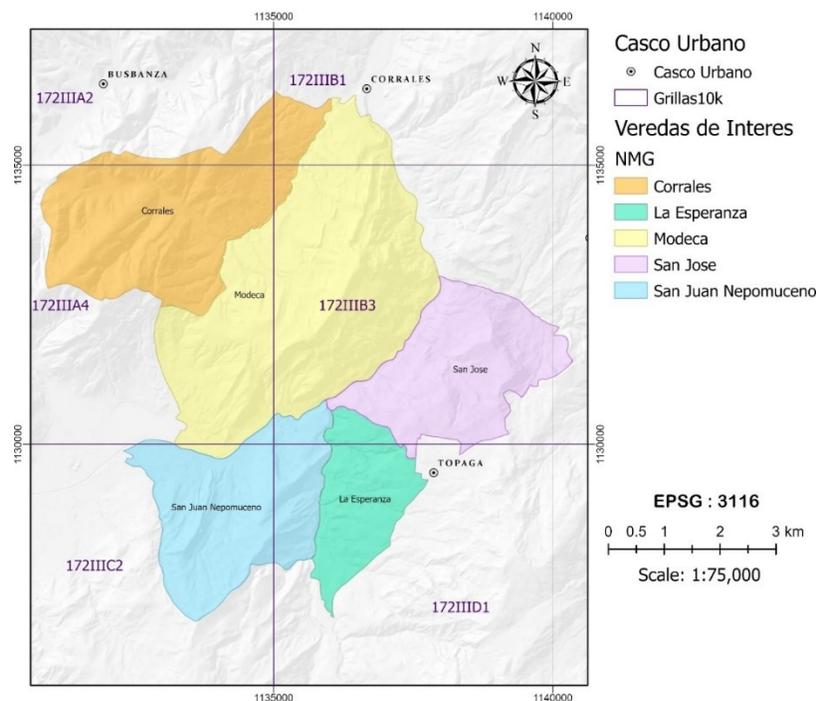
La recopilación de bases cartográficas y en análisis del estado de procesamiento de las mismas permite así establecer una primera aproximación con relación a cambios tales como densificación, crecimiento u expansión de indicadores espaciales tales como la apertura de nuevas vías, construcción de viviendas, dinámica hídrica, toponimia y demás factores de análisis tales como referentes geográficos asociados a actividades productivas de minería, entre otros.

Tabla 6 Listado de planchas cartográficas recopiladas

PLANCHA	AÑO	FORMATO	AÑO	FORMATO
172-III-A-2	1980	Análogo	2016	Digital GDB
172-III-B-1	1980	Análogo	2016	Digital GDB
172-III-A-4	1980	Análogo	2016	Digital GDB
172-III-B-3	1980	Análogo	2016	Digital GDB
172-III-C-2	1980	Análogo	2016	Digital GDB
172-III-D-1	1980	Análogo	2016	Digital GDB

Fuente: Autor

Figura 7 Distribución de planchas IGAC a escala 1:10.000



Fuente: Autor.

Por demás en esta primera etapa se realiza la conversión de formatos análogos a formato digital con la inclusión de un modelo cartográfico estandarizando, así como los niveles de información, datos, atributos, dominios y corrección topológica.

### 2.2.2 Aerofotografías

Las fotografías aéreas son el insumo base en la construcción de un ortofotomosaico georreferenciado que deriva en la foto interpretación del tiempo cero dentro del análisis multitemporal. Las imágenes se recopilan en un formato digital de 15 micrones. Previo al procesamiento digital dentro del proyecto fotogramétrico es necesario la identificación del tipo y características de la cámara fotográfica ver Tabla 7.

Tabla 7 Listado de aerofotografías

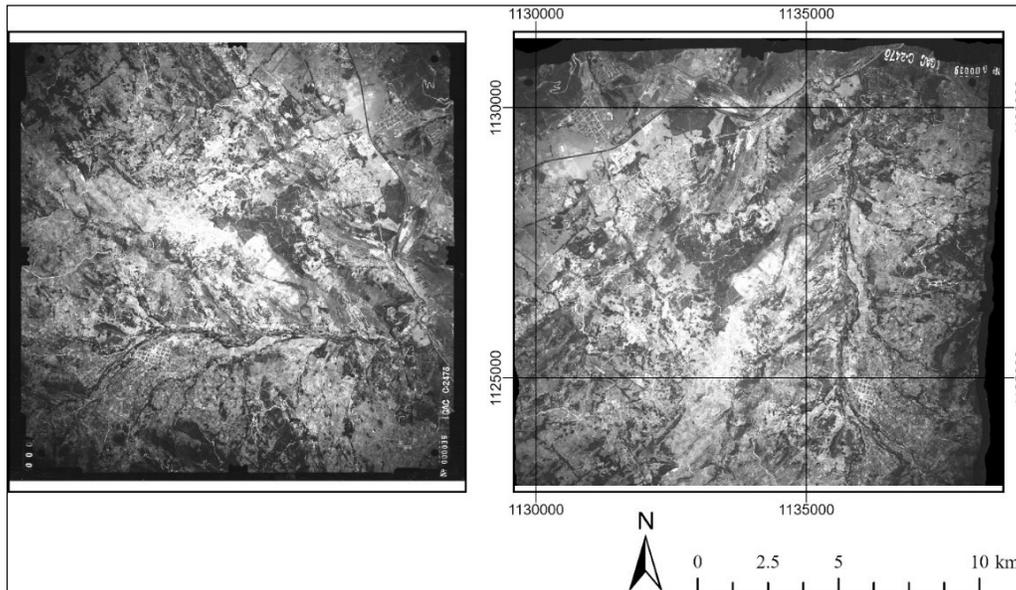
<b>Número Sobre</b>	36306	36572
<b>Vuelo</b>	C-2476	C-2505
<b>Escala</b>	38900	37800
<b>Fecha Vuelo</b>	8-04-1992	19-12-1992
<b>Cámara</b>	Rmk-A15/93	Rmk-A15/93
<b>Altura Vuelo</b>	29600	29000
<b>Aerofotografías</b>	38-39-40-41-42 83-84-85-86-87	80-81-82-83

Fuente: IGAC

### 2.2.3 Imagen de referencia horizontal orthofotomosaicos

La recopilación de orthofotomosaicos de alta resolución espacial, es el insumo en la construcción del tiempo 2. Mediante la captura digital a partir de fotointerpretación de los principales rasgos y contrastes foto identificables dentro de un archivo georreferenciado y codificado previo a la estructuración de la capa temática dentro de una base de datos geoespacial o un archivo de intercambio como el formato shapefile.

Figura 8 Aerofotografías IGAC



Fuente: Autor

Figura 9 Ortofotomosaico de referencia



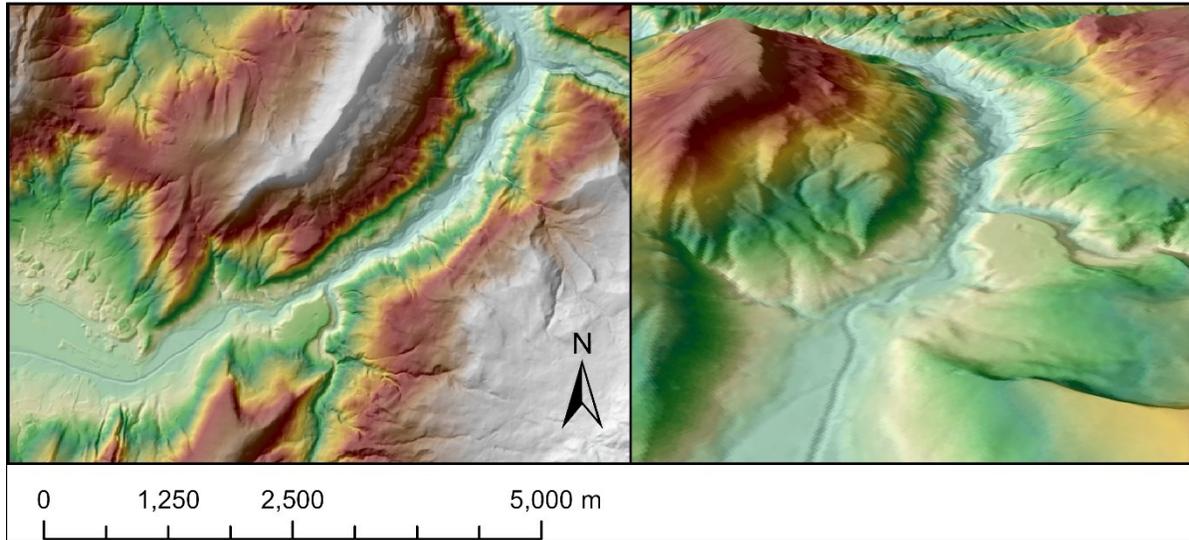
Fuente: Convenio 2985 – 2014 (IGAC 4397-2013)

## 2.2.4 Modelos digitales de elevación

A través del tratamiento de fotografías aéreas orto rectificadas los proyectos fotogramétricos contemplan la realización de modelos digitales del terreno, este archivo de tipo raster contiene

consigo el valor de referencia de altura sobre el nivel del mar para cada pixel dentro del arreglo matricial de filas y columnas que conforman una imagen de tipo raster.

Figura 10 Modelo digital del terreno de referencia



Fuente: Convenio 2985 – 2014 (IGAC 4397-2013)

### 2.2.5 Imágenes de satelitales

La recopilación de imágenes obedece a las características de la metadata del sensor y el grado de procesamiento de las imágenes multiespectrales. La evaluación va en diversas líneas siendo de especial interés, la resolución espectral y espacial de los datos. En tal caso la recopilación dentro del área de interés, deja consigo dos imágenes multiespectrales, siendo la primera de ellas del sensor Landsat 8 de 11 bandas multiespectrales de resolución espacial mínima de 15 metros banda pancromática, 30 metros para las bandas multiespectrales y 100 en las bandas 10 y 11.

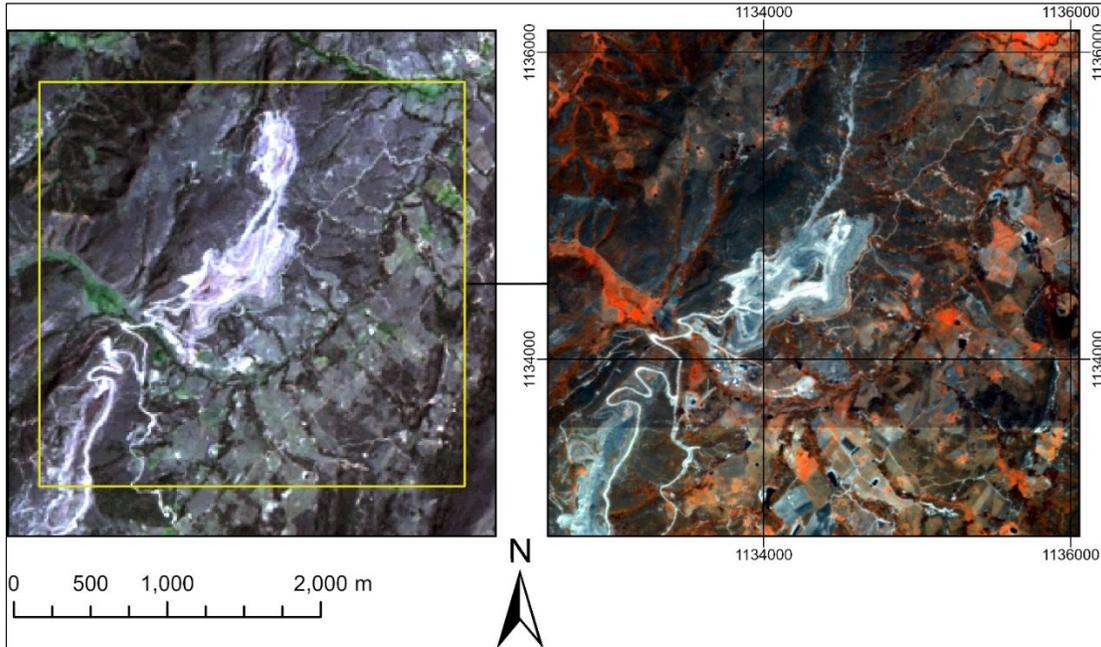
La segunda imagen tratada es del sensor Rapideye de resolución espectral de 5 bandas y espacial de 5 metros útil en la construcción de capa intermedia comparativa entre los periodos de análisis años 1990-2016.

Tabla 8 Identificación de imágenes analizadas

SENSOR	LANSAT	RAPIDEYE
<b>Resolución radiométrica</b>	16 bits	16bits
<b>Resolución espacial</b>	30m /15 m pancromática	5m
<b>Número de bandas</b>	11	5
<b>Fecha de toma</b>	2017-04-05	2012-02-16
<b>Identificación</b>	LC80070562016016LGN02	1841724_2012-02-16_RE5_3A

Fuente: Autor.

Figura 11 Imagen derecha Landsat, Izquierda Rapideye



Fuente: Autor – Sensores Landsat y Rapideye

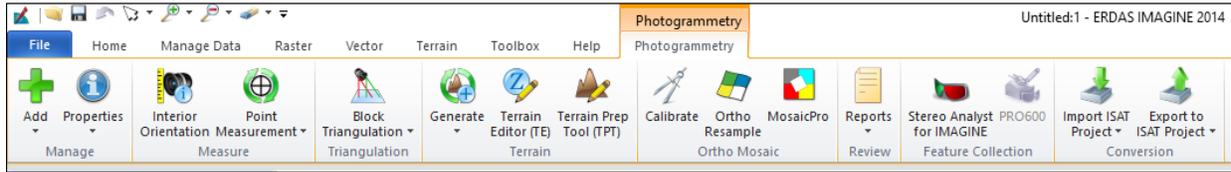
### 2.3 Fotogrametría digital

En la construcción del proyecto fotogramétrico se recurre al uso del software Erdas image. Dentro de un proyecto de extensión. blk. El cual corresponde a un formato de almacenamiento en la que se asocia toda la información dentro de un block; se incluye la localización de las imágenes, información de la cámara, medidas de las marcas fiduciales y medición de los GCP. (Geography controls point)

Desde la triangulación los puntos de control son usados para establecer la relación matemática entre la cámara, la fotografía y la superficie en 3D. durante la orto rectificación las coordenadas de las imágenes de entrada son reemplazadas por el sistema de coordenadas indicado en la etapa de construcción del proyecto que en este caso es usado el EPSG:3116

Dentro de panel de herramientas de la barra photogrammetry de software, 8 tareas se encuentran distribuidas de izquierda a derecha como lo señala la Figura 12. A continuación, se describen los principales aspectos a tener en cuenta dentro del proyecto. No obstante, es indispensable la identificación y obtención de los parámetros de la cámara, fecha de toma, así como altura del vuelo.

Figura 12 Barra de herramientas dentro del proyecto fotogramétrico



### 2.3.1 Parámetros de la cámara

- ❖ Longitud focal calibrada: 152.801 mm
- ❖ Distorsión de los lentes

Tabla 9 Parámetros de la cámara

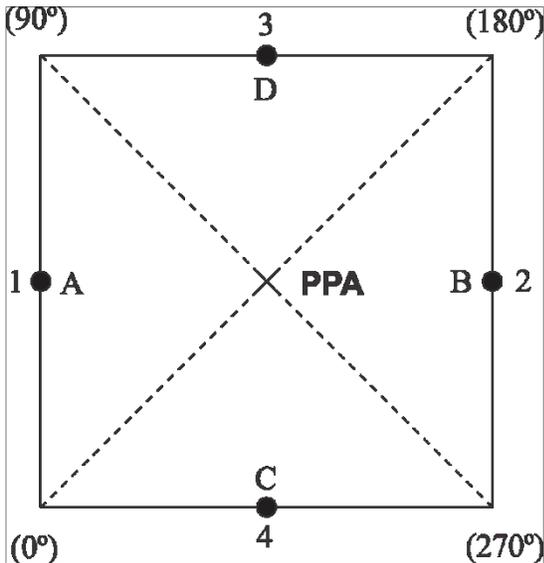
<i>Fiel angle</i>	7.5 °	15°	22.7°	30°	35°	40°
Symetric radial (um)	0	0	-1	-3	-2	2
Decentering (um)	0	1	2	4	5	8

Symetric Radial distortion parameters		Decentering distortion parameters		Calibrated principal point	
K0	= -0.9675*10-5	p1	= -0.4371*10-6	Xp	= -0.028 mm
k1	= 0.1012*10-7	p2	= 0.1877*10-6	Yp	= 0.008 mm
k2	= -0.6512*10-12	p3	= 0		
k3	= 0	p4	= 0		
k4	= 0				

Fuente: (USGS Geological Survey, 2006)

Los valores y parámetros para la longitud focal de calibración (CFL), distorsión radial simétrica (k0, k1, k2, k3, k4), distorsión descentrada (p1, p2, p3, p4), y calibración del punto principal (punto de simetría) (Xp, Yp) fueron determinados en calibración analítica simultanea multitrama (SMAC). La coordenada x y y, utilizada en la medición y ajuste de parámetros sobre una desviación estándar ( $\sigma$ ) de  $\pm$  micrones.

❖ Punto principal y coordenadas fiduciales

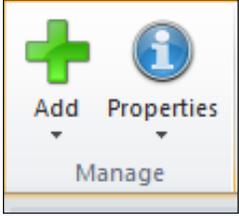
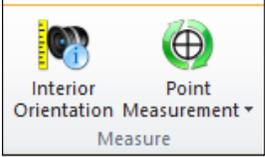


Fiducial marks		
1	- 113.016 mm	-0.006 mm
2	112.990	-0.006
3	0.000	112.965
4	-0.014	-113.002
Distances between fiducial		
1-2	226.006 mm	
3-4	225.967 mm	
Accurate	0.003 mm	

### 2.3.2 Cargue y parámetros de la cámara.

Desde la creación del modelo block el sistema requiere diversas propiedades del modelo, entre ellos los parámetros de orientación marcas fiduciales y la indicación de los puntos de control entre las imágenes.

Tabla 10 Descripción de las etapas

Etapa	Descripción	Necesidades
	<p>Posterior a la creación del proyecto blk, mediante la opción de administración se adicionan las respectivas imágenes a ser orto rectificadas.</p> <p>A través de la opción de propiedades se accede a la configuración tales como; tipo de sensor, sistema de coordenadas, proyección y modelo específico del proyecto.</p>	<p>Localización o ruta de las fotografías aéreas “crudas”</p>
	<p>Dentro del menú de mediciones se presentan dos opciones; la primera de ellas corresponde al ingreso del tipo de sensor (parámetros de la cámara), orientación interior (marcas fiduciales) e información exterior.</p> <p>La segunda opción corresponde al ingreso de los GCP (Puntos de control).</p>	<p>La selección previa de los GCP el cual puede ser registrado dentro de un archivo shape file a ser importado dentro del modelo.</p> <p>A partir del uso de la imagen de referencia horizontal y el modelo digital de elevación.</p>

Fuente: Autor

De acuerdo a la posición de referencia en las imágenes se indica la orientación de la foto con respecto a la dirección del vuelo. Así como la orientación exterior define la posición y orientación angular de la cámara mediante la determinación de los parámetros de  $\omega$  omega en el eje Z,  $\phi$  phi en el eje Y &  $\kappa$  kappa en el eje Z

### 2.3.3 Medición de los puntos de control y sus tipos

Los puntos de control los hay de tres tipos posibles; los (control points full, vertical y horizontal points) que corresponden a medición de coordenadas de forma sub métrica idealmente y que sean representativos para áreas de traslape entre las diversas imágenes.

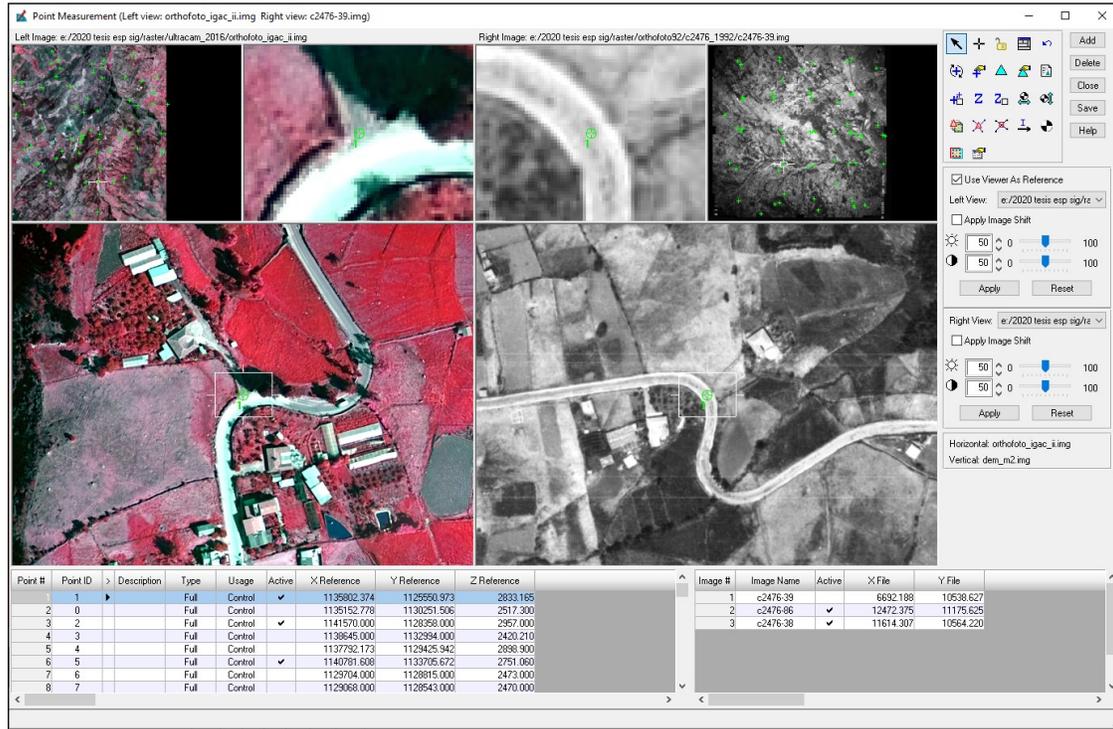
Dentro de un ejercicio académico, es posible su obtención realizando uso de la orto foto o imágenes de referencia según aplique, así como el modelo digital de elevación recopilados dentro de la etapa 1 de la metodología propuesta.

El formato requerido para la importación es del tipo ASCII en datos del tipo XYZ. Para ello y con el apoyo de ArcMap es posible la obtención tanto de las alturas desde el modelo digital de elevación y la exportación de los datos. Commandos Interpolate Shape y (feature class z to ascii (3d analyst])

El mínimo de puntos por imagen son 3 puntos GCPs, verticales (con coordenada Z) y dos horizontales (con coordenadas X y Y) lo ideal esta que estos sean localizados en múltiples imágenes para su uso. La inclusión automática de los denominado tie point busca establecer puntos de referencia en el solape entre imágenes los cuales no poseen coordenadas xy pero no se conocen.

De manera simultánea es posible la ejecución de la triangulación del modelo con el fin de verificar dentro del reporte de group points e image points a fin de verificar cuál de los n puntos utilizados presenta el mayor error de posición ajustado desde el viewer point measurement.

Figura 13 Obtención de GCP desde las imágenes de referencia



Fuente: Autor- Software ERDAS Image.

### 2.3.4 Modelo de triangulación.

La triangulación es el resultado del ajuste del proceso de georreferenciación y orto rectificado de las imágenes que fueron incluidas en el modelo blk. A partir del cálculo del RMS o mejor conocido como el error medio cuadrático de los datos en relación al ajuste espacial de posición. El éxito del mismo obedece a diversos factores entre los cuales se evalúa; la superposición al menos con un 60% de áreas entre líneas, la cantidad y distribución de los GCP y los puntos de enlace (tie points).

Dentro de las opciones avanzadas para la aérea triangulación de fotografías aéreas, el software Erdas provee 4 alternativas en el modelado de errores sistemáticos.

<p><b>Baure's simple model</b></p>	<p>Modelo propuesto por el Dr Bauer. En análisis de tres parámetros, dos parámetros determinan la extensión de la deformación y el tercero la distorsión simétrica de la lente.</p>
------------------------------------	---

<b>Jacobsen's simple model</b>	Modelo propuesto por Dr K. Jacobsen, En el cual se integran 4 parámetros donde los cuatro parámetros compensan las distorsiones de primer y segundo orden asociadas con la deformación afín y la distorsión de la lente.
<b>Ebner's ortogonal model</b>	Investigación del Dr. H. Ebner. Cuenta con doce parámetros que compensan varios tipos de error sistemático, incluida la distorsión de la lente, el error del escáner, la deformación afín y la deformación de la película. De tal modo de su cálculo requiere de una mayor cantidad de GCP y tie points.
<b>Brown's physical model</b>	Investigación del Dr. D. C. Brown. El modelo consta de 14 parámetros que compensa la mayoría de errores lineales y no lineales. formas de distorsión de película y lente. El uso de este modelo requiere del incremento de los puntos de enlace (tie points).
<b>Lens Distortions model</b>	El modelo de distorsión de la lente está diseñado para auto calibrarse automáticamente los parámetros de distorsión de la lente. Esto es especialmente efectivo para aplicaciones con cámaras digitales de aficionados para reducir el RMSE.

Fuente: (ERDAS, Inc., 2010)

El total de puntos ingresados correspondió a 29 distribuidos entre control points y chek points. para el caso de los puntos de enlace (tie pointst) se alcanzó un total de 125 generados de forma automática realizando el uso del modelo Brown's. con un **RMSE de 0.339**.

### 2.3.5 Obtención de orto fotos, DTM y mosaico.

Ejecutada la triangulación en la cual se busca obtener el menor RMSE posible, se procede a la creación del modelo digital del terreno como producto derivado del proyecto fotogramétrico siendo opcional su obtención, así como de forma alterna la extracción de fotos y modelos es individual o grupal. No obstante, el principal interés del uso de la herramienta corresponde a la creación y salidas orto fotos y posterior creación de un mosaico que integre las imágenes orto rectificadas.

### 2.3.6 Orto fotos

En la obtención de los datos orto rectificadas, la calibración del modelo requiere del modelo digital de elevación usado en el proyecto u obtenido desde la fotogrametría para ello se hace uso

del modelo digital de elevación creado por el IGAC en el marco de la creación de cartografía base escala 1:10.000 año 2016.

A fin evitar que en las nuevas salidas se incluyan los bordes e identificación de las imágenes, es recomendable utilizar la opción de área activa dispuesta en la pestaña de orto resople. Así como configurar el re-muestreo de la resolución radiométrica de la imagen, sobre posición, resolución espacial, sistema de coordenadas que por defecto se asignarán las indicadas desde la creación del modelo de bloque del proyecto fotogramétrico.

Como se va a observa en la Figura 14 Muestra de una imagen orto rectificadas. Figura 14 la imagen se encuentra modificada en sus respectivos niveles digitales, orto rectificadas y con una apariencia stretch o corrugada dado que busca el mayor ajuste espacial sobre el modelo digital de elevación de referencia. A manera de verificación se incluyen los puntos de control de tipo full utilizados en la georreferenciación.

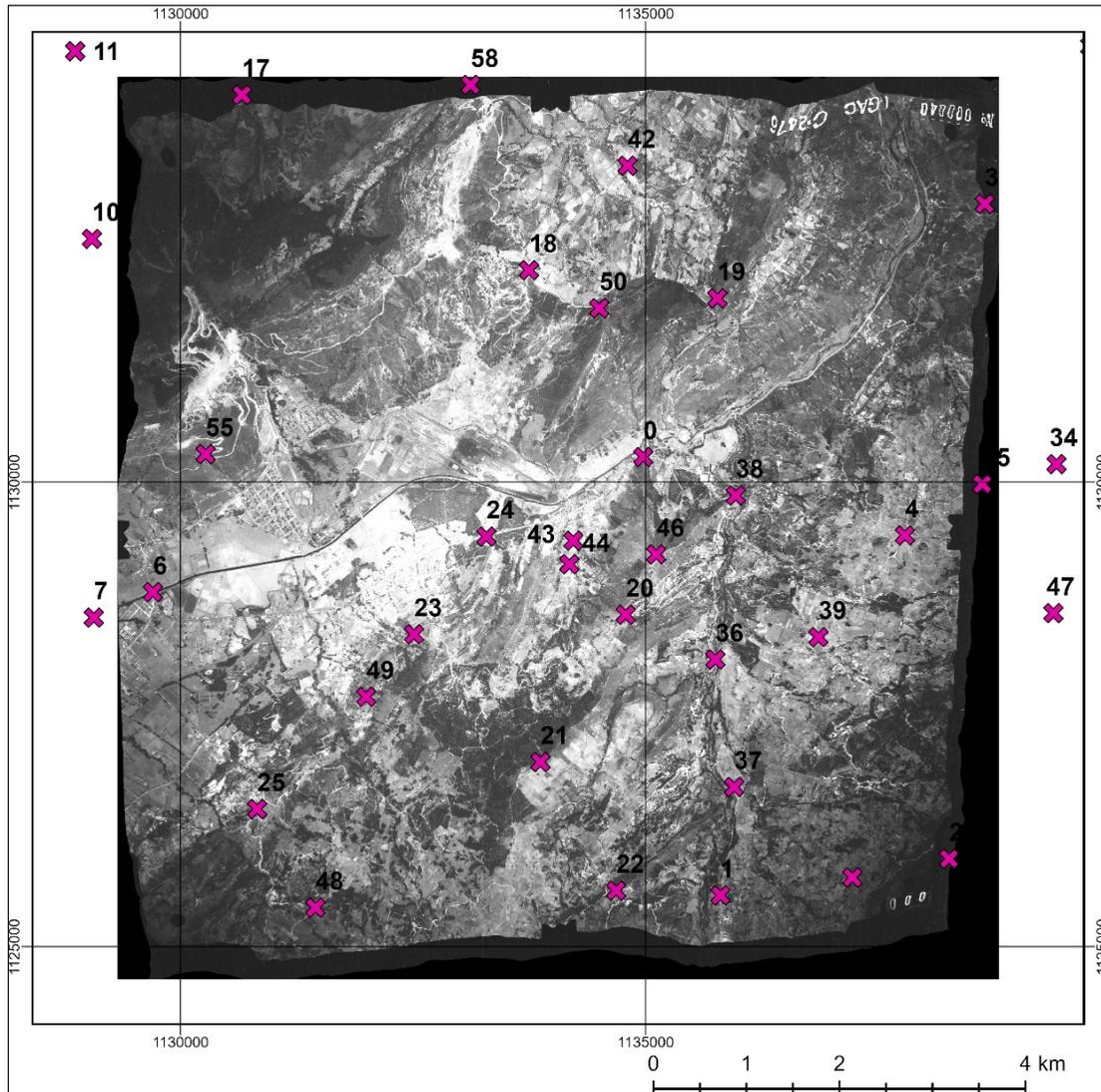
### **2.3.7 Creación del mosaico.**

El ideal en la creación de un mosaico orto rectificadas lo es el obtener una imagen cuyo contraste sea homogéneo y de menor solape entre las imágenes que lo constituyen. para tal efecto ERDAS a través de su herramienta mosaico pro permite la vinculación directa de las orto fotos arrojadas en el proyecto LPS.

Por defecto se introduce el resultado de 8 imágenes creadas, el método utilizado de las opciones posibles para la creación de las líneas de costura (seamline) es el most nadir, con pixel similar de 10, dirección preferencial 20, y desviación estándar de 10 en unidades de pixel.

Previo a la corrida del procesamiento, se preestablecen parámetros de transformación del contraste de color, desde la coincidencia de histograma (histogram matching), Figura 15 .

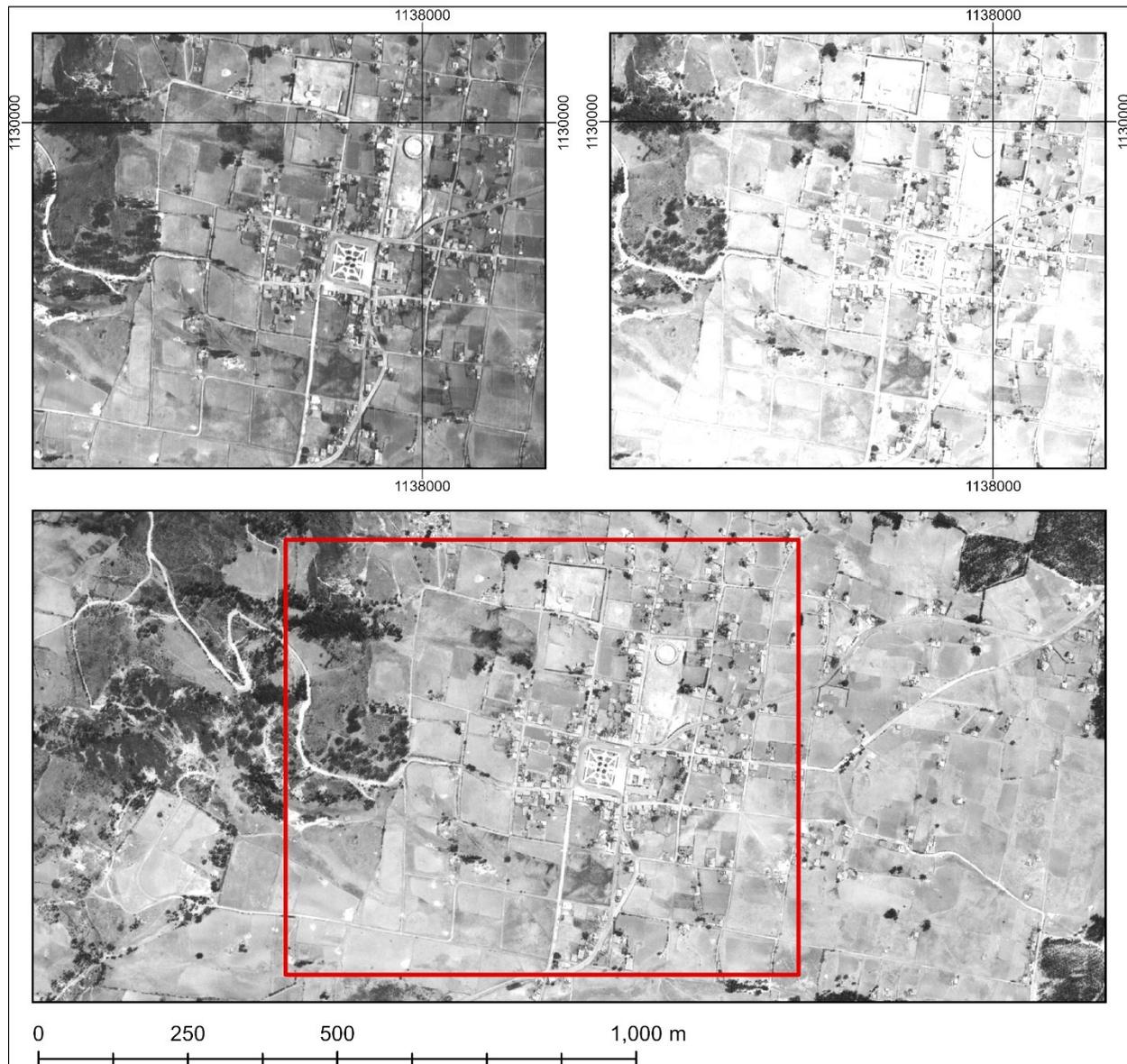
Figura 14 Muestra de una imagen orto rectificada.



Fuente: Autor

La imagen superior izquierda (orthoc2476-40.img) representa niveles digitales próximos al negro (más oscuros) con tendencia al cero dentro del nivel digital. En contraposición la imagen superior derecha (orthoc2476-86.img) se presenta en tonos más claros con tendencia al blanco (nivel digital 255), aplicada la herramienta de coincidencia de histograma se busca una distribución de los niveles digitales se asemeje a la distribución normal de los datos Ver Figura 16.

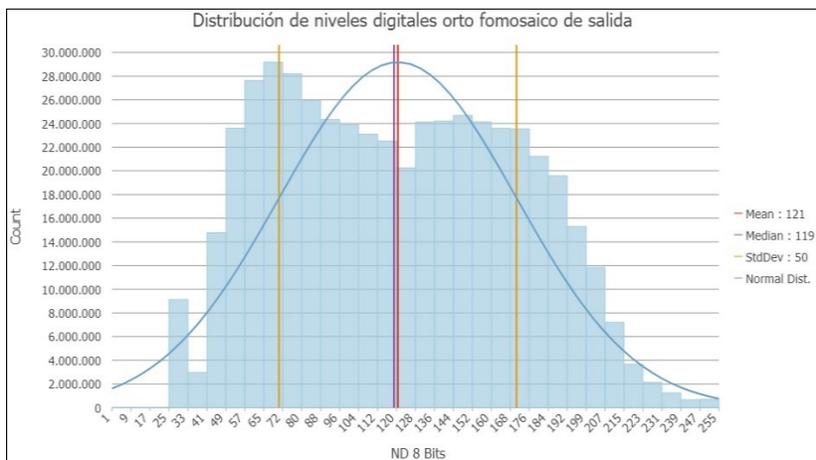
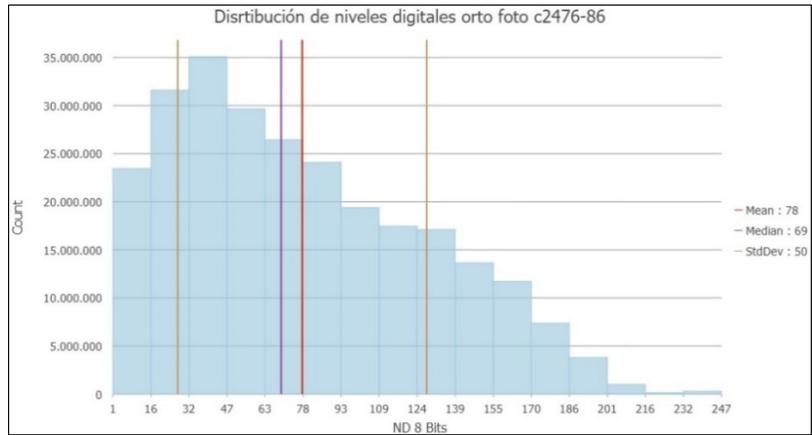
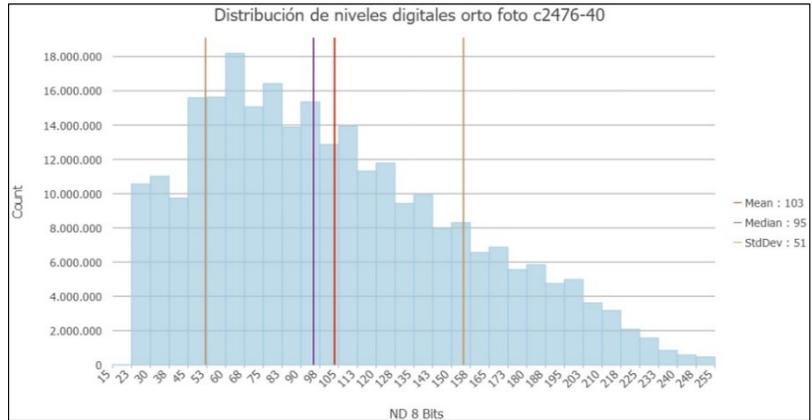
Figura 15 Mosaico de referencia creado.



Fuente: Autor

La obtención de los histogramas se obtiene desde el registro de datos en analítica de los valores radiométrico de datos, en la vertical el número total de píxeles para su correspondiente nivel radiométrico de una imagen de 8 bits desde el software ArcGIS PRO 2.5

Figura 16 Resultado de la coincidencia de histograma



Fuente: Autor – Software usado ArcGIS PRO 2.5

## 2.4 Procesamiento digital

Con el fin de establecer una comparación entre los resultados a obtener desde la clasificación de niveles digitales de una imagen Rapideye de resolución espacial de 5m y espectral de 5 bandas y las unidades cartográficas extraídas en captura vectorial. Se realiza procesamiento digital de la imagen y posteriormente clasificación supervisada.

### 2.4.1 Preparación de la imagen

La preparación de la imagen con un mejor contraste de color a ser usada en la conversión a niveles digitales discretos desde de la reclasificación supervisada procede de diversas alternativas (corrección atmosférica, cálculo de índices, transformaciones de contraste u transformaciones de color) para nuestro caso se obtienen dos imágenes desde el procesamiento digital correspondientes a la corrección atmosférica y transformaciones de color.

Como se señala en la Figura 17, La obtención de la imagen denominada A, parte del procesamiento digital de un par de imágenes del sensor Rapideye con un nivel de procesamiento 3A , En secuencia lineal el cálculo de radiancia, reflectancia y re proyección se realiza a través del uso del software Envi 5.1 usando las herramientas (radiometric calibration , y flaash atmosphery correction) y la metadada asociada a cada una de las imágenes.

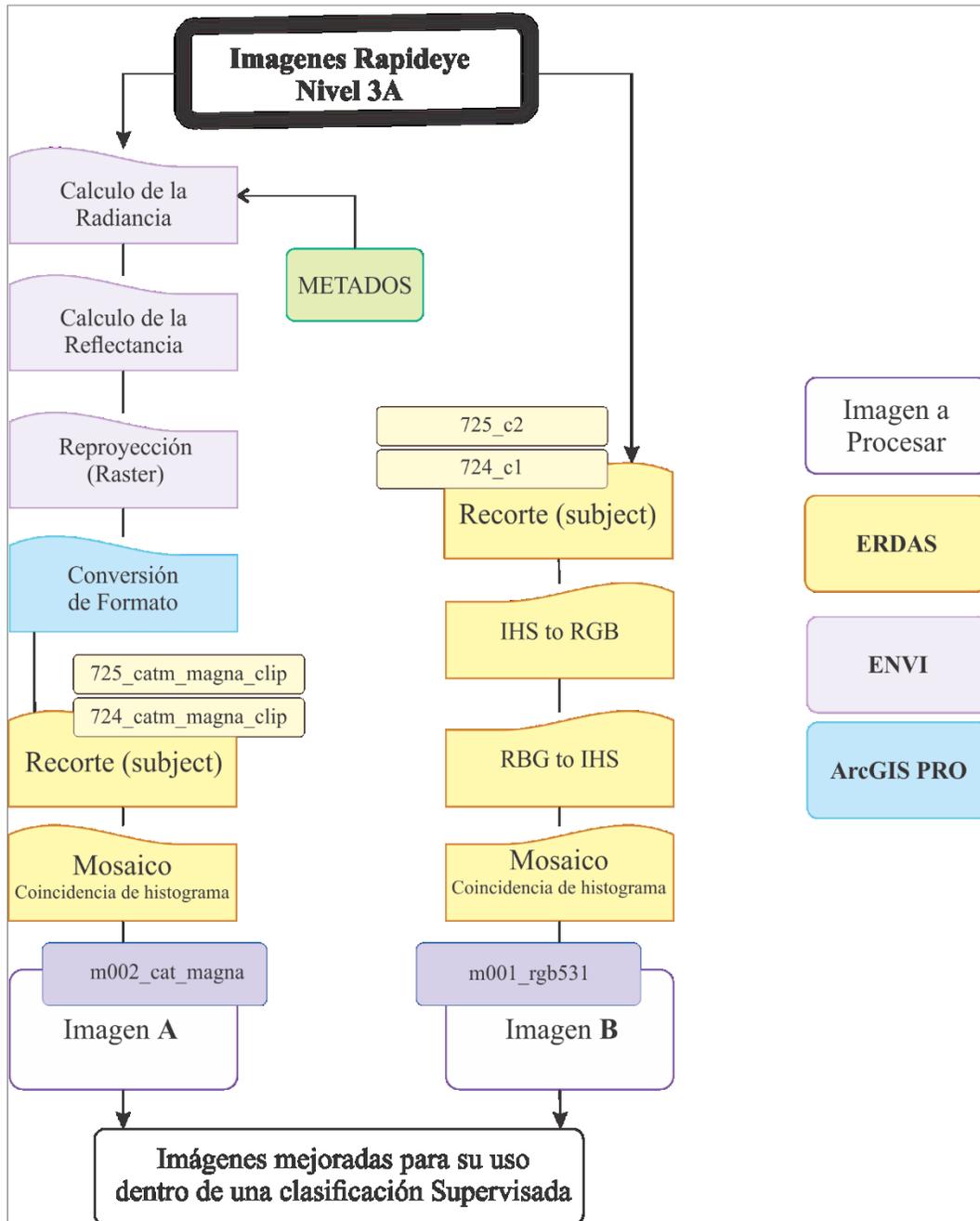
A través del balance de color, se logra construir una imagen mejorada del área de interés desde de la coincidencia de histograma (histogram matching – Erdas).

De forma alterna se ejecutan acciones procedimentales de re proyección al EPSG 3116. Así como la conversión del formato de imagen, ya que el algoritmo de calibración radiométrica de Envi en formato BIL (band interleaved by line) intercalación de bandas por líneas, presentando la imagen en una extensión del tipo .dat

La segunda alternativa parte de la creación de un mosaico en recorte al área de interés, y la utilización de técnicas de transformación de color. stretch y saturación de la imagen con la herramienta RGB to IHS en mejora a través del cálculo IHS (intensidad, tono y saturación) y viceversa IHS to RGB.

En la Figura 18 visualmente no se aprecian cambios u variaciones significativas, no obstante, la imagen A (Izquierda) presenta una mejor visualización u contraste de elementos para la composición RGB531, obtenida como la combinación a color de mejor contraste “dispersión” del rango espectral a través del cálculo del factor de índice optimo OIF.

Figura 17 Estructura usada la obtención de imágenes de trabajo



Fuente: Autor

### 2.4.2 Pre procesamiento

La imagen de trabajo corresponde al resultado de la corrección atmosférica o imagen A. Con el uso del software Erdas se obtienen los cálculos de la matriz de covarianza y matriz de correlación que en construcción de la Tabla 13, se determina la imagen con un mejor rango espectral de datos

que dentro de una composición en falso color RGB como alternativa para la obtención de niveles discretos desde la clasificación supervisada.

Tabla 11 Matriz de Covarianza

	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>
<i>B1</i>	1118977	1442436	1684289	1254690	690051
<i>B2</i>	1442436	2177327	2421319	1971133	1458221
<i>B3</i>	1684289	2421319	3044832	2264714	1287571
<i>B4</i>	1254690	1971133	2264714	2097467	1860809
<i>B5</i>	690051	1458221	1287571	1860809	3638639

Fuente: Autor

Tabla 12 Matriz de Correlación

	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>
<i>B1</i>	1.000	0.924	0.912	0.819	0.342
<i>B2</i>	0.924	1.000	0.940	0.922	0.518
<i>B3</i>	0.912	0.940	1.000	0.896	0.387
<i>B4</i>	0.819	0.922	0.896	1.000	0.674
<i>B5</i>	0.342	0.518	0.387	0.674	1.000

	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>
<i>B1</i>	1.000				
<i>B2</i>	C12	1.000			
<i>B3</i>	C13	C23	1.000		
<i>B4</i>	C14	C24	C34	1.000	
<i>B5</i>	C15	C25	C35	C45	1.000

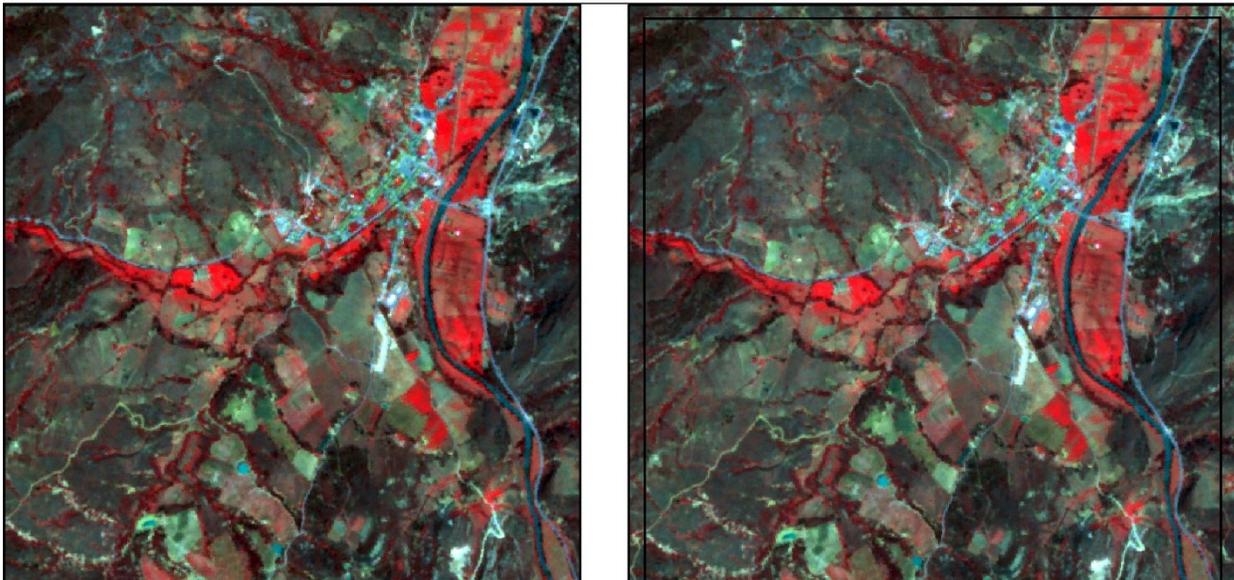
Fuente: Autor

Tabla 13 Cálculo del Factor de índice óptimo

<i>ID</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>CRG</i>	<i>CRB</i>	<i>CGB</i>	<i>SumC</i>	<i>SumD</i>	<i>OIF</i>	<i>C</i>
<i>1</i>	1	2	3	C12	C13	C23	2.78	4278.34	1540.64	<b>C12</b> 0.92411081
<i>2</i>	1	2	4	C12	C14	C24	2.67	3981.66	1493.79	<b>C13</b> 0.91248213
<i>3</i>	1	2	5	C12	C15	C25	1.78	4440.92	2489.07	<b>C14</b> 0.81898921
<i>4</i>	1	3	4	C13	C14	C34	2.63	4251.02	1617.82	<b>C15</b> 0.34198052
<i>5</i>	1	3	5	C13	C15	C35	1.64	4710.28	2869.86	<b>C23</b> 0.94039097
<i>6</i>	1	4	5	C14	C15	C45	1.83	4413.60	2405.83	<b>C24</b> 0.92237293
<i>7</i>	2	3	4	C23	C24	C34	2.76	4668.78	1692.25	<b>C25</b> 0.51807435
<i>8</i>	2	3	5	C23	C25	C35	1.85	5128.04	2778.98	<b>C34</b> 0.89615714
<i>9</i>	2	4	5	C24	C25	C45	2.11	4831.36	2285.39	<b>C35</b> 0.38682989
<i>10</i>	3	4	5	C34	C35	C45	1.96	5100.73	2606.99	<b>C45</b> 0.67357301

Fuente: Autor

Figura 18 Muestra de la preparación de imágenes



Fuente: Autor, Izquierda imagen A obtenida de la clasificación supervisada, Imagen B Derecha obtenida desde la transformación de color.

## 2.5 Clasificación supervisada

Obtenida la imagen A<sup>1</sup> la cual cuenta con la corrección atmosférica en mosaico de las dos imágenes Rapideye de nivel 3A. Se procede a realizar la construcción de un proyecto de clasificación supervisada desde de ArcGIS PRO 2.5. Pruebas iniciales practicadas en comparación con el software Erdas conllevaron a seleccionar esta herramienta para la obtención de niveles digitales discretos reclasificados o categorizados.

En contraste ArcGIS ofrece la construcción automática de una imagen segmentada en la que se involucran 3 parámetros a diferenciar (el detalle espectral, detalle espacial y el número mínimo de píxeles a agrupar). Procedimentalmente esta dado según la Figura 19. El objetivo es realizar la agrupación de valores discretos basados en los vecinos cercanos, desde los valores radiométricos conformados en composición a color RGB531. Procedimentalmente se permite así discriminar la unidad mínima de agrupación.

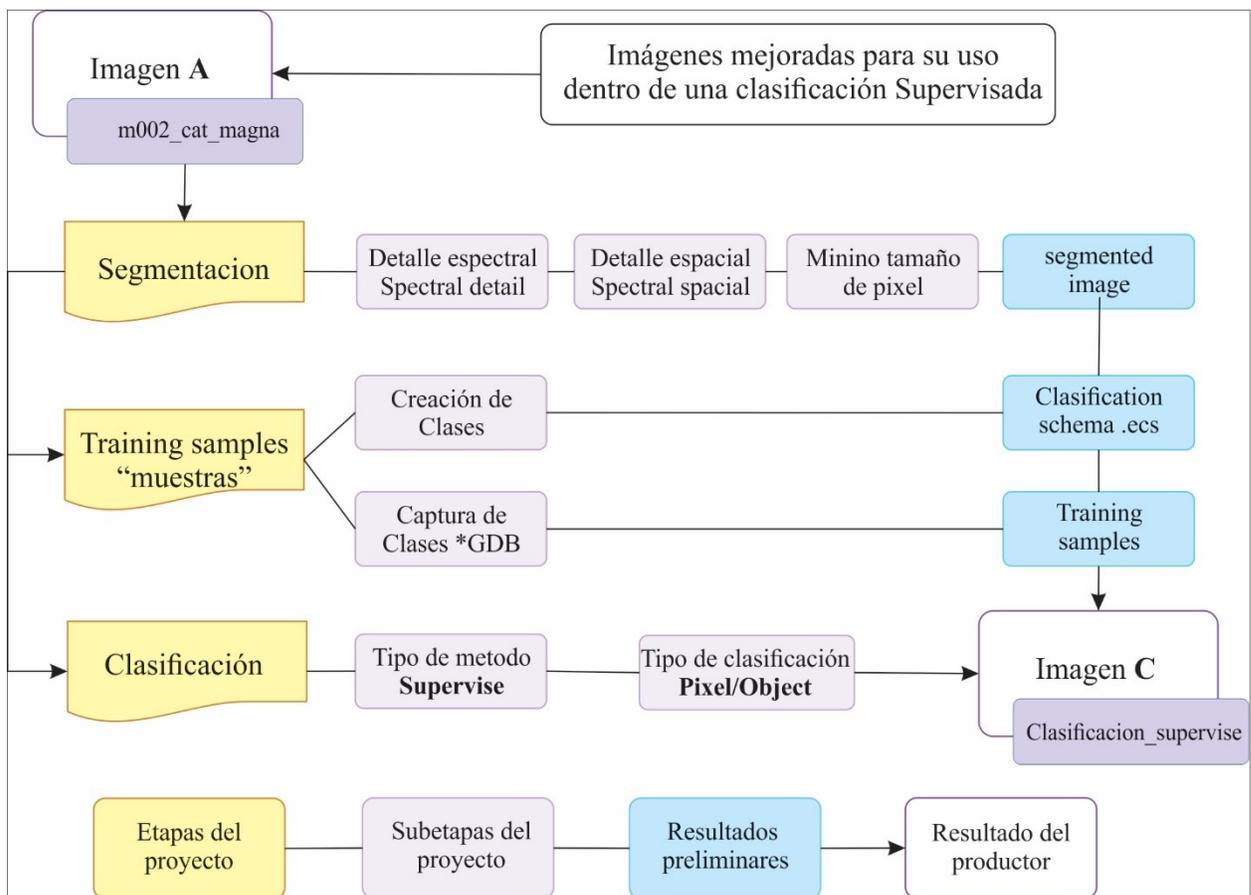
---

<sup>1</sup> Obtenida a través de la corrección atmosférica con ENVI imagen Rapideye.

En la creación de las muestras “training samples”, se crean dos sub productos; el primero corresponde a las clases o (categorías) y el segundo a los polígonos de muestra para la cobertura almacenados como las muestras de entrenamiento.

Al realizar la selección del tipo de clasificación que en este caso es del tipo supervisada se solicita el tipo de tipo de correlación, así como la imagen segmentada asociada a los detalles radiométricos registrados pixel a pixel.

Figura 19 Etapas de la clasificación supervisada



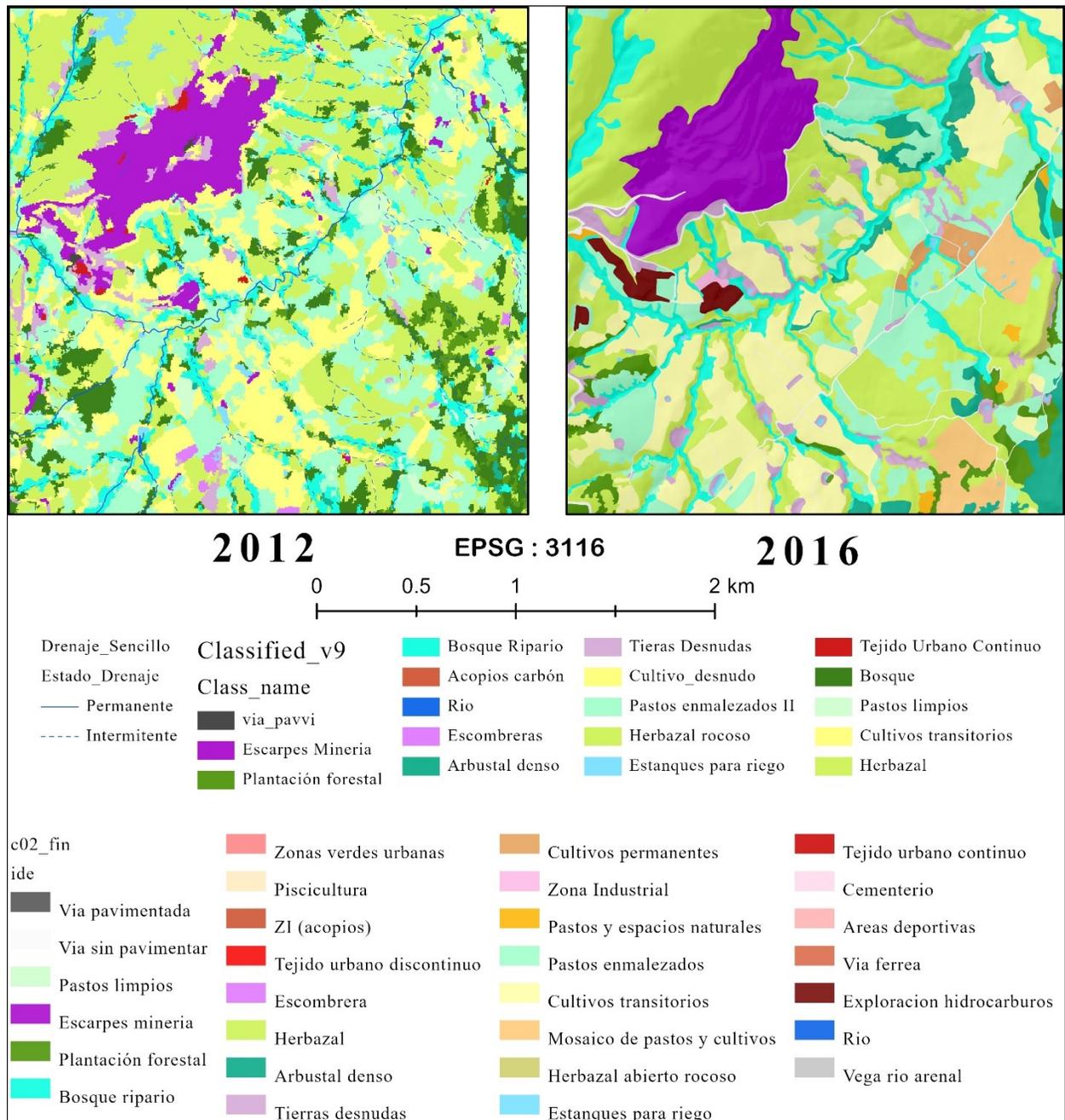
Fuente: Autor, obtenidos desde las herramientas de ESRI.

La correspondencia visual es alta, pese a que en la imagen 2016 las generalizaciones gozan de la subjetividad aportada por el intérprete, se apoya de las visitas de campo y la imagen de referencia de alta resolución espacial (50cm) lo permite una mayor diferenciación.

De forma general la especificidad de la categorización de unidades es mayor en la imagen 2016, ya que actividades u categorías de respuesta homogénea a otras estas adquieren su atributo en base a la actividad propiamente dicha , mas no la similitud de respuesta espectral; un ejemplo de

ello lo son las tierras desnudas y degradadas cuya firma de entrenamiento o imagen de segmentación es homologa a las áreas requeridas en los espacios adecuados en las etapas de exploración de hidrocarburos (tono marrón oscuro) así como a las áreas o zonas de escarpe minero. (tono morado oscuro) ver Figura 20.

Figura 20 Comparación visual clasificación supervisada e imagen capturada.



Fuente: Autor.

Otro ejemplo de ello los son las áreas de biomasa de las categorías del grupo forestal en donde áreas de plantaciones forestales poseen respuesta similar a la de arbustales densos y bosque ripario.

Si se hace uso al concepto de la mínima unidad cartografiable que para este caso se toma el propuesto por (Chuvieco, 1995) de utilizar  $4\text{mm}^2$ , elementos cuya distancia visual sea inferior a estos rangos no son foto identificables y por ende agrupados como unidades cartográficas geométricas de tipo polígono como (vías, drenajes dobles, vía férrea).

## 2.6 Corine land Cover

Con el fin de crear unidades espaciales a ser procesadas, analizadas y/o modificadas dentro del software en el análisis cuantitativo, se recurre a la Metodología Corine Land Cover ajustada para Colombia desde una clasificación subjetiva apoyada con controles de campo para la identificación del nivel dentro del cual recaen las unidades homogéneas u generalizadas en relación a la cobertura.

Tabla 14 Unidades de cobertura vegetal identificadas

N1	N2	N3	N4	N5	N6	Código	Nombre	ID	
1. Territorios Artificializados	1.1 Zonas Urbanas	111	Tejido Urbano				111	Tejido urbano continuo	23
		112	Centros poblados				112	tejido urbano discontinuo	10
	1.2 Zonas Industriales	121	Zonas Industriales o comerciales	1211	Red Vial y territorios asociados		121	Zona industrial o comercial	16
							1211	Zona industrial (acopio)	9
							121153	Piscicultura	8
		122	Redes viales ferroviarias y terrenos asociados				122	Vía Férrea	26
							122111	Vía pavimentada	1
						122112	vía sin pavimentar	2	
	1.3 Zonas mineras y escombreras	131	Zonas extracción minera				131	Escarpes minería	4
							1312	Explotación de hidrocarburos	27
		132	Escombreras y vertederos				132	Escombrera	11
	1.4 Zonas Verdes Artificiales	141	Zonas verdes urbanas	1412	Parques y cementerios		141	Zonas verdes urbanas	7
							1412	Parques cementerio	24
		142	Instalaciones recreativas	1422	Áreas deportivas		1422	Áreas deportivas	25

N1	N2	N3	N4	N5	N6	Código	Nombre	ID	
2. Territorios Agrícolas	2.1 Cultivos transitorios	211	Otros cultivos transitorios				211	Cultivos transitorios	19
	2.2 Cultivos Permanentes	223	Cultivos permanentes arbóreos	2231	otros Cultivos permanentes arboles		2231	Otros Cultivos permanentes arbóreos	15
	2.3 Pastos	231	Pastos limpios				231	Pastos limpios	3
		233	Pastos enmalezados en rastrojados				233	Pastos enmalezados	18
	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	242	Mosaico de pastos y cultivos				242	Mosaico de pastos y cultivos	20
		244	Mosaico de pastos y espacios naturales				244	Pastos y espacios naturales	17
3. Bosques y áreas semi naturales	3.1 Bosque	314	Bosque de galería y ripario				314	Bosque ripario	6
		315	Plantación forestal			31521	31521	Plantación foresta - eucalipto	5
	3.2 Áreas con vegetación herbácea	321	Herbazal				321	Herbazal	12
		321	Herbazal			32122	32122	Herbazal abierto rocoso	21
		322	Arbustal	3221	Arbustal denso		3221	Arbustal denso	13
	3.3 Áreas abiertas con poca vegetación	331	Zonas arenosas naturales	3312	Arenales		3312	Vega rio	29
333		Tierras desnudas y degradadas				333	Tierras desnudas y degradadas	14	
5. Superficies de Agua	5.1 Aguas continentales	511	Ríos				511	Río	28
		514	Cuerpos de agua artificiales	5144	Estanques para riego		5144	Estanques para riego	22

Fuente: Adaptado del Corine land Cover

Tabla 15 Evidencias de campo análisis de categorías de cobertura.

Área de escombreras (132),  
cercanas al caserío de vado  
castro.

Hace parte la categoría 1.3 zonas  
mineras y escombreras. En  
territorio corresponde a los  
desechos de tipo industrial  
apilados en cercanías al caserío  
de vado castro municipio de  
Topagá.



Área industrial (121) Sector la  
mesa vereda san juan de  
Nepomuceno.

R2 Energy. “Transformación de  
gas a energía eléctrica”.

Esta actividad es única en el área  
de estudio y corresponde a la  
transformación de energía  
eléctrica desde el uso de gas  
natural a través de combustión en  
generadores de tipo industrial  
localizada en el sector de la mesa  
municipio de Topagá



Explotaciones de arena (131)  
cercanas al sector de vado castro.

La actividad se desarrolla con  
antesala al año 1992.  
Actualmente se localiza en las  
veredas la esperanza, Modeca y  
san juan de Nepomuceno.



Área industrial asociada a la explotación de hidrocarburos. Pozo Bolívar 1. Sector de la mesa vereda de vado castro.



Áreas industriales asociadas al acopio de carbón (1211)  
Esta dinámica comercial se centra en la periferia de las principales vías intermunicipales.

Industrialmente se base en una clasificación mediante granulometría en actividades que se realizan en los lugares de acopio previa a la distribución.



Herbazal denso – rocos 32122  
Cerro de culatas, vereda Modeca.

Corresponde a una categoría de cobertura la cual se presenta preferencialmente en áreas desprovistas de poco suelo y en áreas con de exposición rocosa.



Otros Cultivos permanentes  
arbóreos (2231) Vereda Modeca,  
cultivos de Durazno.

En las visitas de campo se  
identificó este tipo de actividad  
en la vereda Modeca.



Herbazal (321) “Cobertura  
constituida por una comunidad  
vegetal dominada por elementos  
típicamente herbáceos  
desarrollados de forma natural en  
diferentes densidades y  
substratos los cuales forman una  
cobertura densa (>70% de  
ocupación) o abierta (30-70% de  
ocupación).” (IDEAM, 2010)



Pastos Limpios (231). Esta  
cobertura corresponde a áreas  
abiertas ocupadas por pastos  
limpios a lo que el (IDEAM,  
2010) se refiere como áreas con  
limpieza escalamiento y/o  
fertilización etc.)



Cultivos transitorios (211) Esta cobertura es ocupada por los cultivos transitorios que se localizados en el área de interés, siendo estos (cebolla, maíz y papa preferencialmente).



La categoría (5144), hace parte del grupo de cuerpos de agua superficiales creado con el propósito de almacenar agua para el uso agro industrial.



Fuente: Autor.

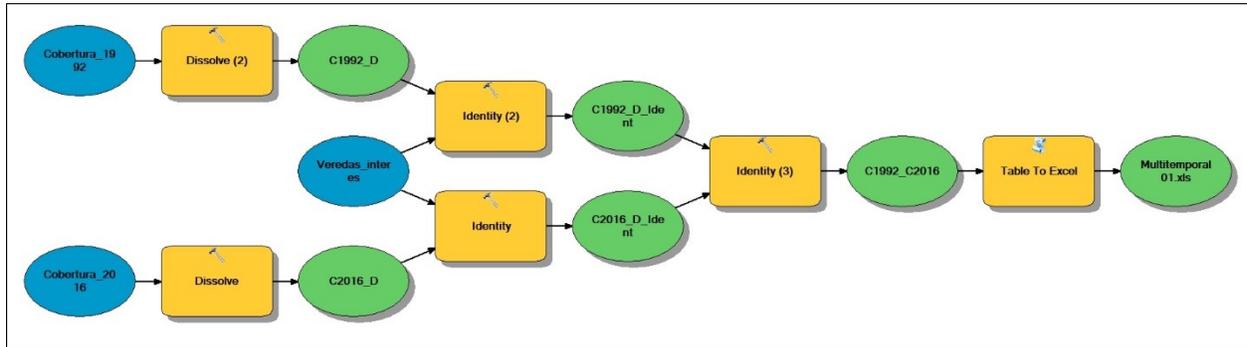
### 3 Análisis de resultados y obtención de índices

Con el fin de aportar en el análisis multitemporal de las capas se recurre al modelo de programación (builder) de ArcGIS, el objetivo propuesto es obtener la capa temática del cambio y posteriormente ingresar los resultados de los cálculos de índices de ganancia perdida y persistencia de Braimoh.

Para este fin las capas son tratadas desde la identificación numérica de la Tabla 14 con un valor entero. El tratamiento de la unidad cartográfica y análisis espacial se realiza a través de herramientas de intersección, agrupación, unión, disolución y diferencia.

Lo anterior permite así recrear la matriz de transferencia llevando los datos a valores porcentuales para su análisis

Figura 21 Modelación para el cálculo de indicadores geo estadísticos



Fuente: Autor

#### 3.1 Cálculo de los índices de Braimoh (Ganancia, perdida y persistencia)

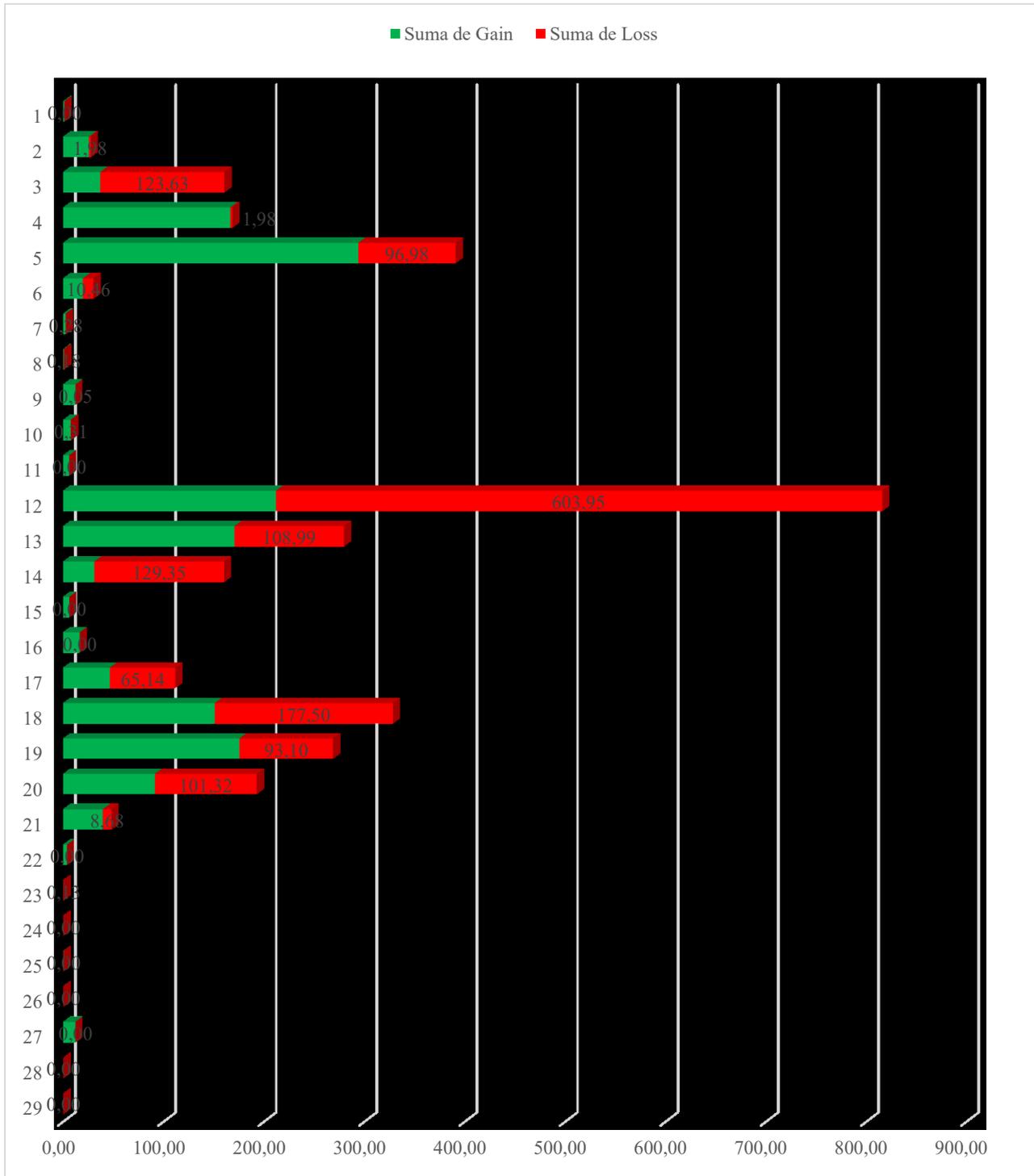
El cálculo de los índices de Braimoh, permiten establecer estadísticamente valores porcentuales para tres relaciones básicas en el cambio de coberturas vegetales, denominados como perdidas, ganancias y persistencias.

La ganancia se define como el aumento de área de una categoría evaluada en el tiempo 1 que migra hacia al tiempo 2 con una mayor área, que en contraposición la pérdida se establece como disminución de área dentro de las categorías en tránsito del tiempo 1 hacia el tiempo 2.

El tercer indicador hace alusión a la fracción de área que no cambia dentro del lapso de tiempo analizado. Dentro la matriz de transferencia Tabla 17, corresponden a los valores de la diagonal denominado persistencia.

Tanto la suma total de las ganancias o pérdidas parten de una distribución aleatoria en intercepto con una o más categorías denominadas intercambios.

Figura 22 Distribución de pérdidas y ganancias categorías de análisis en ha.



Fuente: Autor

En la Figura 22 se presentan las 29 categorías de cobertura identificadas en distribución del valor total en hectáreas para los índices de pérdida (rojo) y ganancia.(verde) La denotación de la significancia del valor numérico de trabajo se encuentra en la Tabla 14 y en la

Tabla 18 son presentados los índices calculados.

En la Tabla 16, se presenta en síntesis el valor total en hectáreas de la cuantificación de pérdidas y ganancias dentro de las 5 veredas de análisis.

Tabla 16 Cálculo de pérdidas y ganancias en distribución veredal

Vereda	Ganancia	Perdida	Persistencia	Total general
Corrales	208.44	114.52	749.16	1072.13
La Esperanza	89.14	42.10	281.28	412.51
Modeca	200.91	287.52	1257.52	1745.96
San José	212.65	78.84	429.58	721.07
San Juan Nepomuceno	169.09	120.79	525.07	814.94
<b>Total general</b>	<b>880.23</b>	<b>643.77</b>	<b>3242.60</b>	<b>4766.60</b>

Fuente: Autor

Tabla 17 Matriz de transferencia Años 1992-2016

ID	T2016														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	13.35														
2		41.88	0.01	0.42	0.03	0.12						0.22	0.03		
3		1.21	73.83	1.83	5.67	1.18			5.28	0.57		21.28	1.55	0.76	
4		0.38		31.51	0.00	0.24				0.20		0.45	0.57		
5		2.44	5.07	3.61	489.55	0.54			6.68		4.88	8.81	18.08	4.58	
6		0.19	0.04	2.90	1.61	153.90						1.79	2.03	0.86	0.00
7							0.11			0.28					
8								0.11		0.18					
9		0.05							2.00						
10		0.04						0.27		6.94					
11											43.05				
12		11.37	4.88	117.66	156.87	10.84				1.34		1173.54	99.85	13.77	4.35
13	0.89	1.64	0.49	7.85	42.16	0.61						39.44	268.25	1.02	
14		1.54		17.91	18.85	2.13				0.76		49.48	31.16	136.04	
15															0.71
16															
17		0.95	1.28	4.74	27.19	1.10		0.14	0.02	0.71	0.86	6.58	2.79	1.69	
18		2.86	4.63	2.85	32.80	0.56				1.84	0.03	47.60	6.57	3.10	0.64
19		1.11	2.21	0.90	1.83	1.08				1.04		26.37	2.16	1.67	0.89
20		0.84	18.07	0.09	6.71	1.06	2.28			0.30		9.68	5.32	1.41	
21		0.79		5.50	0.00							0.08	0.35	1.94	
22															
23															
24															

25															
26															
27															
28															
29															
<b>T2016</b>	<b>14.25</b>	<b>67.29</b>	<b>110.51</b>	<b>197.77</b>	<b>783.29</b>	<b>173.37</b>	<b>2.39</b>	<b>0.52</b>	<b>13.99</b>	<b>14.15</b>	<b>48.83</b>	<b>1385.32</b>	<b>438.70</b>	<b>166.85</b>	<b>6.59</b>
<b>Gain</b>	<b>0.89</b>	<b>25.41</b>	<b>36.68</b>	<b>166.27</b>	<b>293.74</b>	<b>19.47</b>	<b>2.28</b>	<b>0.41</b>	<b>11.99</b>	<b>7.21</b>	<b>5.78</b>	<b>211.78</b>	<b>170.46</b>	<b>30.81</b>	<b>5.88</b>
<b>P</b>	<b>13.35</b>	<b>41.88</b>	<b>73.83</b>	<b>31.51</b>	<b>489.55</b>	<b>153.90</b>	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>2.00</b>	<b>6.94</b>	<b>43.05</b>	<b>1173.54</b>	<b>268.25</b>	<b>136.04</b>	<b>0.71</b>

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	T1992	Loss
														13.35	0
0.01			0.12	0.01	0.99					0.01				43.86	2
0.32	1.82	10.15	18.98	51.10	0.24	0.30	0.04				1.37			197.46	124
			0.10		0.04									33.49	2
12.28	5.42	7.21	12.09	4.25	0.20	0.13					0.70			586.53	97
	0.08	0.19	0.06	0.05		0.51					0.13			164.36	10
														0.39	0
														0.29	0
														2.05	0
														7.25	0
														43.05	0
					26.6										
0.18	10.77	51.87	84.59	6.48	6	0.79					1.67			1777.49	604
	4.28	4.48	3.69	0.54	1.65	0.16					0.08			377.23	109
0.59	1.60	1.40	1.37	0.69	0.68	0.24					0.96			265.40	129
														0.71	0
31.24														31.24	0
	113.5	9.49	2.80	3.62		0.10					1.07			178.74	65
2.44	5.87	142.0	43.57	14.52	3.25	0.51		0.00			3.86			319.53	177
0.35	3.35	37.63	108.5	9.94	0.01	0.48					2.07			201.65	93
0.11	13.14	28.26	8.00	186.6	5.52	0.41			0.11					287.96	101
		0.02			200.0									208.73	9
						0.51								0.51	0
		0.13					0.56							0.69	0
	0.00							0.92						0.92	0
									0.40					0.40	0
										3.90				3.90	0
											0.31			0.31	0
	0.00											15.52		15.52	0
												0.00	3.60	3.60	0
47.54	159.91	292.86	283.93	277.85	239.29	4.13	0.60	0.92	0.51	3.91	12.23	15.52	3.6	4766.6	1524
16.29	46.32	150.83	175.38	91.20	39.23	3.62	0.04	0.00	0.11	0.01	11.92	0.00	0.00	1524	

31.24	113.5	142.0	108.5	186.64	200	0.51	0.56	0.92	0.40	3.90	0.31	15.52	3.60
-------	-------	-------	-------	--------	-----	------	------	------	------	------	------	-------	------

Fuente: Autor

Tabla 18 Matriz de datos, ganancia, perdida y persistencia en hectáreas

ID	Unidad	T1992	T2016	Gain	Loss	Persistencia
1	vía pavimentada	14.2	13.4	0.9	0.0	13.4
2	vía sin pavimentar	67.3	43.9	25.4	2.0	41.9
3	Pastos limpios	110.5	197.5	36.7	123.6	73.8
4	Escarpes minería	197.8	33.5	166.3	2.0	31.5
5	Plantación foresta - eucalipto	783.3	586.5	293.7	97.0	489.6
6	bosque ripario	173.4	164.4	19.5	10.5	153.9
7	Zonas verdes urbanas	2.4	0.4	2.3	0.3	0.1
8	Piscicultura	0.5	0.3	0.4	0.2	0.1
9	Zona industria (acopio)	14.0	2.0	12.0	0.0	2.0
10	tejido urbano discontinuo	14.2	7.3	7.2	0.3	6.9
11	Escombrera	48.8	43.1	5.8	0.0	43.1
12	Herbazal	1385.3	1777.5	211.8	603.9	1173.5
13	Arbustal denso	438.7	377.2	170.5	109.0	268.2
14	Tierras desnudas y degradadas	166.9	265.4	30.8	129.4	136.0
15	Cultivos permanentes arbóreos	6.6	0.7	5.9	0.0	0.7
16	Zona industrial o comercial	47.5	31.2	16.3	0.0	31.2
17	Pastos y espacios naturales	159.9	178.7	46.3	65.1	113.6
18	Pastos enmalezados	292.9	319.5	150.8	177.5	142.0
19	Cultivos transitorios	283.9	201.7	175.4	93.1	108.5
20	Mosaico de pastos y cultivos	277.8	288.0	91.2	101.3	186.6
21	Herbazal denso	239.3	208.7	39.2	8.7	200.1
22	Reservorio de Agua	4.1	0.5	3.6	0.0	0.5
23	Tejido urbano continuo	0.6	0.7	0.0	0.1	0.6
24	Parques cementerio	0.9	0.9	0.0	0.0	0.9
25	Áreas deportivas	0.5	0.4	0.1	0.0	0.4
26	Vía Férrea	3.9	3.9	0.0	0.0	3.9
27	Explotación hidrocarburos	12.2	0.3	11.9	0.0	0.3
28	Rio	15.5	15.5	0.0	0.0	15.5
29	Vega rio	3.6	3.6	0.0	0.0	3.6
<b>Totales, en hectáreas</b>		<b>4766.6</b>	<b>4766.6</b>	<b>1524.0</b>	<b>1524.0</b>	<b>3242.6</b>

Fuente: Autor

El tono lila en la Tabla 19, corresponde al valor usado en la ecuación 1.8 usado en el cálculo de los intercambios así como la presentación de resultados para cada una de las unidades cartográficas de la forma: (G = Ganancia, L= Perdidas, D= Cambio neto, S= Intercambios, C= Cambio total, Gp= Índice de ganancias, Gl=Índice de pérdidas y Np = índice de cambio neto a persistencia).

Con el fin de identificar aquellas categorías que presentan un mayor cambio en la Tabla 19 son ordenadas de mayor a menor en la columna Np. Sobresalen así: Áreas de exploración para

hidrocarburos, Zonas verdes urbanas, cultivos arbóreos, reservorios de agua, zonas industriales para el acopio de carbón y las zonas de explotación de mineras.

Tabla 19 Cambios de las coberturas en términos de porcentajes (%)

		Mayor cambio	Segundo cambio	Tercer Cambio	Cuarto Cambio	Quinto Cambio	Sexto Cambio					
ID	Unidad	T92P	T16P	P	G	L	D	S	C	Gp	Lp	Np
27	Explotación hidrocarburos	0.01	0.26	0.01	0.25	0.00	0.25	0.00	0.25	38.45	0.00	38.45
7	Zonas verdes urbanas	0.01	0.05	0.00	0.05	0.01	0.04	0.01	0.05	21.00	2.55	18.45
15	Cultivos permanentes arbóreos	0.01	0.14	0.01	0.12	0.00	0.12	0.00	0.12	8.27	0.00	8.27
22	Reservorio de Agua	0.01	0.09	0.01	0.08	0.00	0.08	0.00	0.08	7.07	0.00	7.07
9	Zona industria (acopio)	0.04	0.29	0.04	0.25	0.00	0.25	0.00	0.25	6.00	0.02	5.97
4	Escarpes minería	0.70	4.15	0.66	3.49	0.04	3.45	0.08	3.53	5.28	0.06	5.21
8	Piscicultura	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	3.79	1.61	2.18
10	tejido urbano discontinuo	0.15	0.30	0.15	0.15	0.01	0.14	0.01	0.16	1.04	0.04	0.99
19	Cultivos transitorios	4.23	5.96	2.28	3.68	1.95	1.73	3.91	5.63	1.62	0.86	0.76
2	vía sin pavimentar	0.92	1.41	0.88	0.53	0.04	0.49	0.08	0.57	0.61	0.05	0.56
16	Zona industrial o comercial	0.66	1.00	0.66	0.34	0.00	0.34	0.00	0.34	0.52	0.00	0.52
5	Plantación foresta - eucalipto	12.31	16.43	10.27	6.16	2.03	4.13	1.02	5.15	0.60	0.20	0.40
25	Áreas deportivas	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.27
13	Arbustal denso	7.91	9.20	5.63	3.58	2.29	1.29	4.57	5.86	0.64	0.41	0.23
21	Herbazal denso	4.38	5.02	4.20	0.82	0.18	0.64	0.36	1.01	0.20	0.04	0.15
11	Escombrera	0.90	1.02	0.90	0.12	0.00	0.12	0.00	0.12	0.13	0.00	0.13
1	vía pavimentada	0.28	0.30	0.28	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.07	0.00	0.07
6	Bosque ripario	3.45	3.64	3.23	0.41	0.22	0.19	0.44	0.63	0.13	0.07	0.06
26	vía Férrea	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	Parques cementerio	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	Rio	0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	Vega rio	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	Mosaico de pastos y cultivos	6.04	5.83	3.92	1.91	2.13	0.21	3.83	4.04	0.49	0.54	-0.05
23	Tejido urbano continuo	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.23	-0.17
17	Pastos y espacios naturales	3.75	3.35	2.38	0.97	1.37	0.39	1.94	2.34	0.41	0.57	-0.17
18	Pastos enmalezados	6.70	6.14	2.98	3.16	3.72	0.56	6.33	6.89	1.06	1.25	-0.19
12	Herbazal	37.29	29.06	24.62	4.44	12.67	8.23	8.89	17.11	0.18	0.51	-0.33
14	Tierras desnudas y degradadas	5.57	3.50	2.85	0.65	2.71	2.07	1.29	3.36	0.23	0.95	-0.72

ID	Unidad	T92P	T16P	P	G	L	D	S	C	Gp	Lp	Np
3	Pastos limpios	4.14	2.32	1.55	0.77	2.59	1.82	1.54	3.36	0.50	1.67	-1.18
<b>Totales</b>		<b>100</b>	<b>100</b>	<b>68.03</b>	<b>31.97</b>	<b>31.97</b>	<b>26.57</b>	<b>34.32</b>	<b>60.89</b>	<b>98.59</b>	<b>11.65</b>	<b>86.95</b>

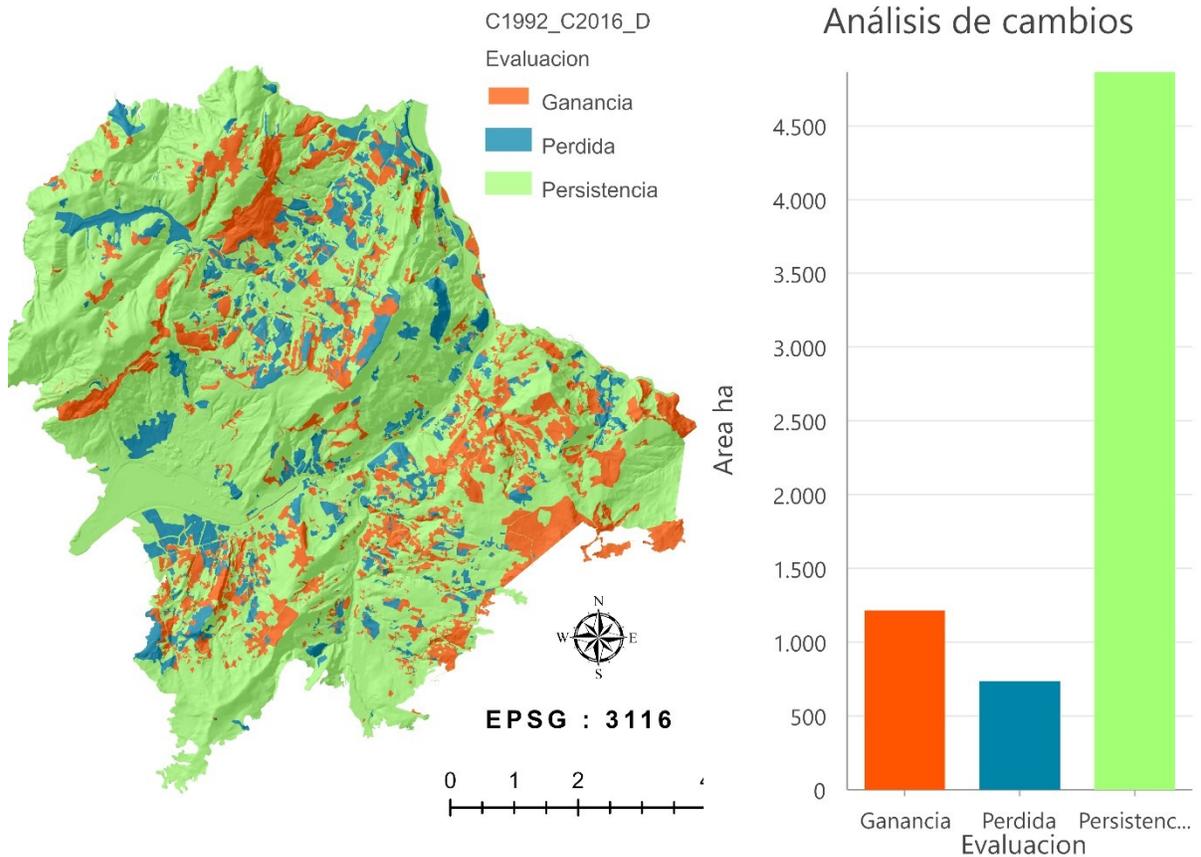
Fuente: Autor.

### 3.2 Análisis de resultados

El factor de cambio con relación al área total alcanza un 31.97% como la suma que representan tanto las áreas que ganan o representan las pérdidas. Que en análisis y descripción de los 5 valores más representativos para las ganancias estos son: las plantaciones forestales 6.16%, herbazales 4.44%, cultivos transitorios 3.68%, Arbustal denso 3.58% y los escarpes de minería 3.49%. con una sumatoria que llega a un 21.35% del total indicado en relación al (31.97%).

De lo anterior tres de estas (herbazales, arbustales y las plantaciones forestales) denotadas como una transición natural mientras las otras dos son de tipo antrópico asociadas a actividades económicas primarias (cultivos y extracciones mineras).

Figura 23 Distribución de los cambios con relación las pérdidas, ganancias y persistencia.



Fuente: Autor.

Con respecto a las unidades que representan las mayores pérdidas ver Figura 23 (tono azul oscuro) estas corresponden a (herbazales 12.67%, pastos enmalezados 3.72%, tierras desnudas y degradadas 2.71%, pastos limpios 2.59% y Arbustal denso 2.29%).

Las pérdidas asociadas a la cobertura de herbazal se deben a la expansión de actividades agrarias en áreas de ladera y las nuevas actividades implantadas en territorio en zonas planas que con anterioridad al análisis ocupan unidades del tipo pastos, cultivos transitorios y espacios naturales.

Ahora bien, los intercambios llegan a alcanzar un 34.32% dentro del área de interés, (herbazales, pastos enmalezados, Arbustal denso, cultivos transitorios y mosaicos de pastos y cultivos) representan el 27.52%.

Si tan solo observamos el intercambio dentro de la unidad de cobertura herbazal, llevada en registro del cambio a un 100%, esta migra preferencialmente hacia las coberturas de plantaciones forestales (8.83%), minería con un (6.62%) y cultivos transitorios con un 4.76%. La persistencia en la unidad es del 66.02% y un 13.5% restante redistribuido en las 25 unidades restantes. Ver fila en la Tabla 17.

Al realizar el comparativo entre los porcentajes de área que persisten vs el área que gana o pierde en el establecimiento del indicador del cambio neto a la persistencia (**Np**) Ecuación 1-13. En el cual se presentan los valores máximos en relación a cada unidad cartográfica, las 6 unidades que sobresalen son (áreas para la exploración de hidrocarburos, zonas verdes urbanas, cultivos permanentes arbóreos, los reservorios de agua, las zonas industriales para acopio, y los escarpes de minería).

Lo anterior indica que estas 6 coberturas son las de mayor crecimiento en comparativo con relación al tiempo 1. Bien sea por el desarrollo de actividades económicas o la inserción de una unidad cartográfica a lo largo del tiempo de análisis como es caso particular de las unidades de cultivos permanentes arbóreos, l áreas industriales y acopios entre otros.

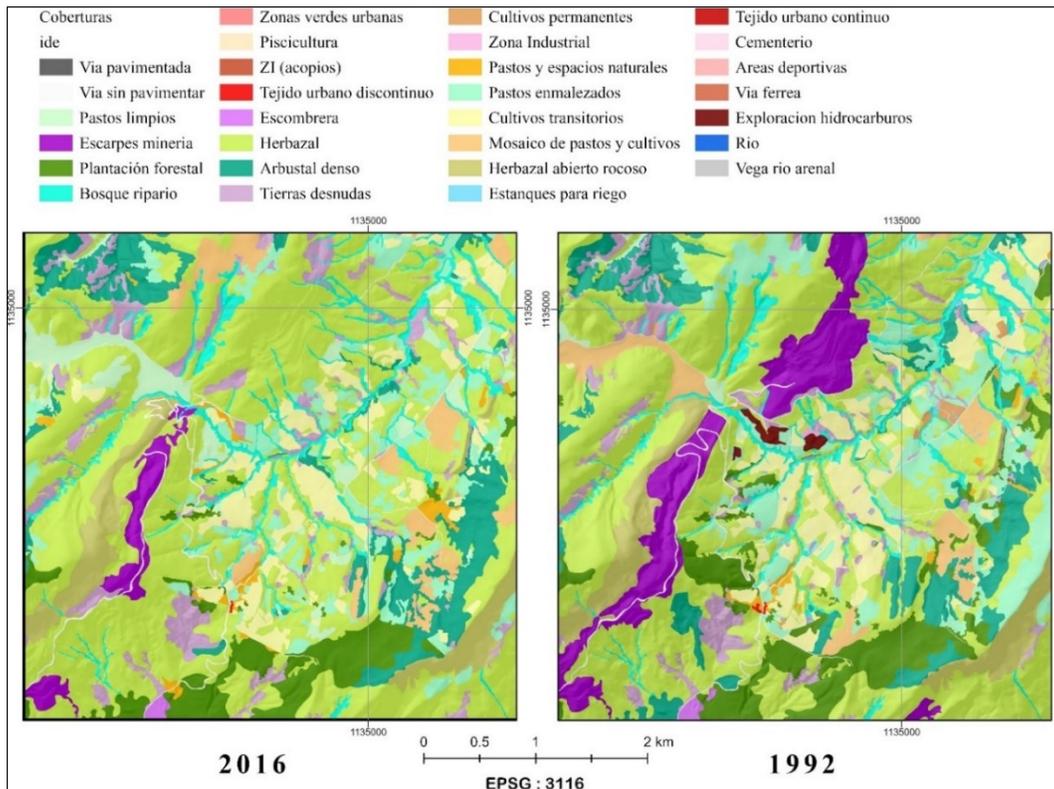
### **3.2.1 Descripción de cambios.**

A continuación, se realiza un esbozo de tipo descriptivo:

El cálculo de los resultados anteriores engloba estadística y matemáticamente indicadores porcentuales en relación al cambio, no obstante, es pertinente indicar que los análisis de dichos campos en el espacio se enmarcan en torno a la ubicación, esto se traduce a que las actividades en particular de tipo antrópicas se localizan a diferentes capas objeto del análisis. De tal forma la matemática pierde su valor absoluto en relación a las cifras y los cambios con relación a la localización puede ser abordado desde una perspectiva geográfica que ahonde en estas dinámicas.

Sim embargo abarcar u extender una actividad en pleno se encuentra dentro de imaginario sub real, conllevando en términos de la praxis que las actividades se localicen de manera asociada, contigua, cercana en incluso de tipo puntual en distribución de las coberturas de la tierra objeto de interés. Recursos minerales, poblaciones asentadas, infraestructura asociada, limitaciones ambientales en relación al uso u limitantes paisajísticas asociadas a la geomorfología y condiciones geológico naturales representadas desde la geo localización de los recursos mineros energéticos.

Figura 24 Análisis visual cambios vereda Modeca



Fuente: Autor

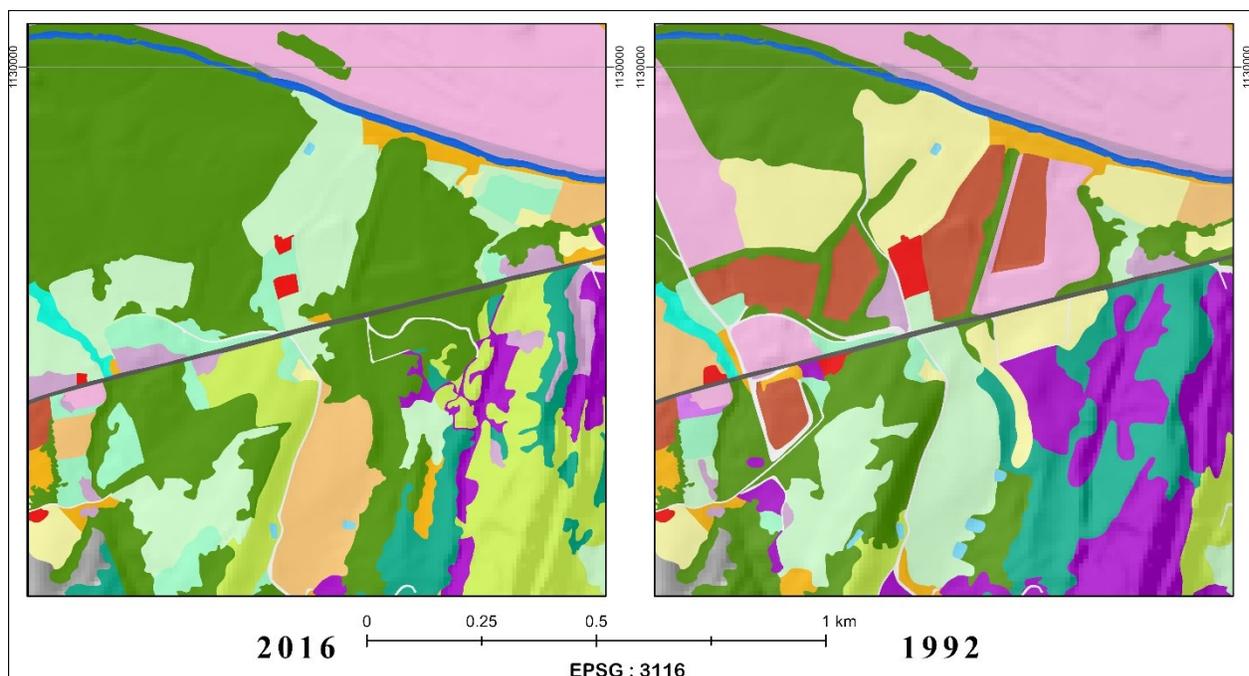
Como se observa en la Figura 24. El tono morado corresponde a la categoría de minería. La cual presenta un cambio significativo en la vereda Modeca municipio de corrales. A razón de las explotaciones de caliza para la industria cementera.

Con relación a la identificación de cambios, en el área de estudio el cálculo del índice de ganancia-perdida y persistencia, para 3 de los 6 valores más representativos (minería, acopios y áreas de para la exploración de hidrocarburos). Se catapultan como las áreas de mayor crecimiento relacionadas directamente con variables de tipo antrópico.

En la Figura 25, en tono morado nuevamente se observa el crecimiento de la categoría de la cobertura de minería a razón de las explotaciones de arena cercanas al caserío de vado castro, en tono verde oscuro la pérdida de la cobertura de plantación forestal a razón de la inserción de la categoría del grupo industrial (acopios) y transformación de materias primas. Dentro de una transición faunística se observa un cambio de herbazales a arbustos densos cercanos a las áreas de explotación.

La Figura 26, presenta nuevamente a la categoría de minería, así como la ganancia o aumento de la cobertura industrial (exploración de hidrocarburos – tono café oscuro) cambio en la cobertura de plantación forestal (tono verde oscuro) y un cambio en la cobertura de herbazales (verde claro).

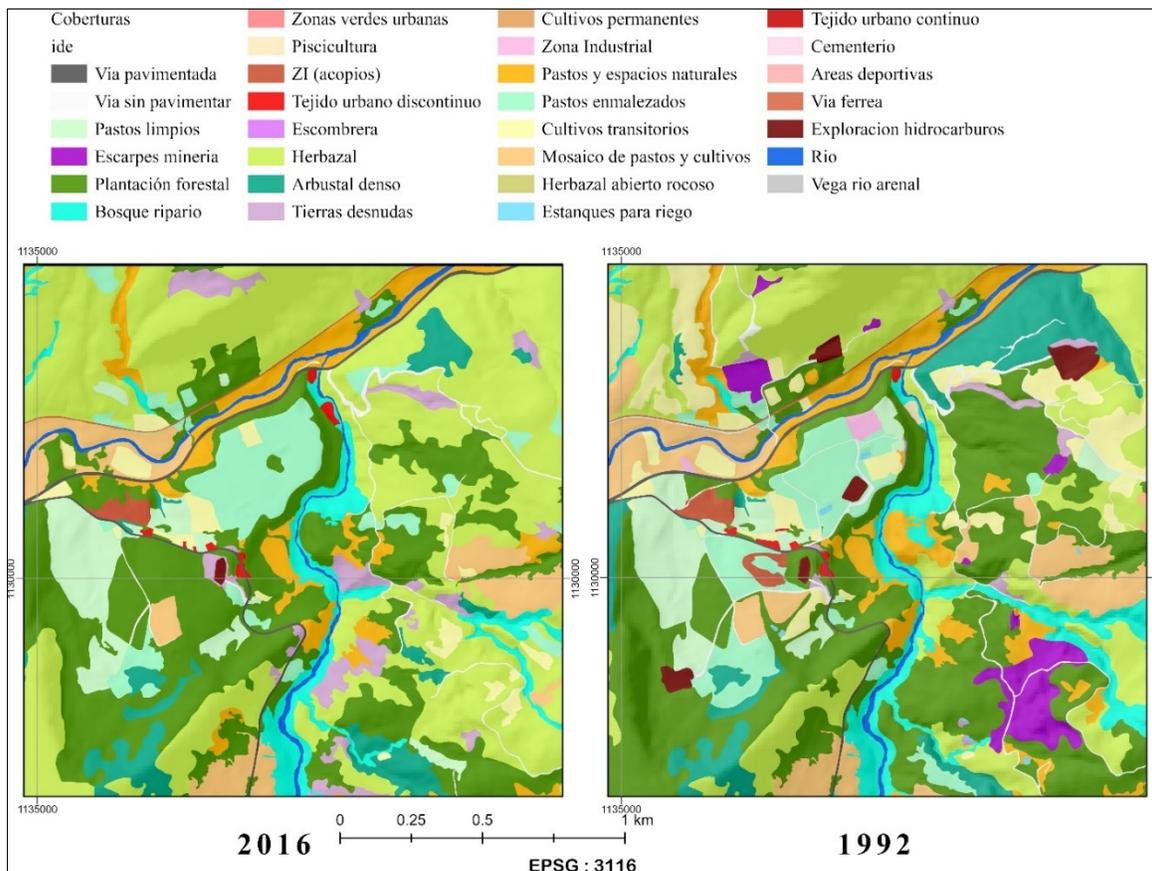
Figura 25 Análisis visual cambios vereda San Juan Nepomuceno



Fuente: Autor.

Es de especial atención la cobertura de escarpes mineros ya que todos los indicadores presentan una tendencia progresiva hacia las ganancias, el cambio neto es alrededor del 3.53% pero su ganancia total en relación a áreas que persisten es del 5.28. Característica directamente asociada con la oferta de minerales dentro del área de interés.

Figura 26 Análisis visual cambios vereda San Juan Nepomuceno (sector la mesa)



Fuente: Autor.

De la misma manera es significativo el crecimiento de cuerpos hídricos artificiales construidos como reservorios para las actividades agro silvo pastoriles. Con respecto a los cultivos del tipo permanente arbóreos esta actividad a la fecha de análisis es puntual puesto que estos aún se centralizan en un lugar específico dentro de la vereda Modeca municipio de corrales.

Por demás existen actividades de tipo industrial puntuales que en relación al área de estudio no representan valores significativos desde un punto de vista cuantitativo entorno al total, ejemplo de ellos la conversión por ignición de gas a corriente eléctrica “R2 Energy” vereda San Juan de Nepomuceno sector la mesa y algunas procesadoras de arena distribuidas a lo largo de la vía que conduce a corrales-tasco. Pero sus particularidades las hacen objeto de estudio.

Cuando se observan los cambios desde el índice de cambio neto. Las plantaciones forestales representan el mayor valor de crecimiento 5%, pero en contraposición el índice de pérdida - persistencia es bajo. Esto se debe a que en algunos lugares la explotación de maderas aumenta mientras en otras áreas existe una recuperación gradual de la cobertura, siendo su valor de cambio neto con relación a la persistencia alrededor de 0.40 %

Cuando se observan los resultados de las tablas 15 y 17 la cobertura de herbazal registra el mayor valor de pérdida 8.23%, característica que se asocian a las categorías de: minería, plantaciones forestales, cultivos transitorios, pastos limpios y pastos enmalezados que son representados como una expansión de la frontera agrícola y actividades minero energéticas.

La cuantificación de áreas asociadas a explotaciones de carbón es una subcategoría asociada a la minería, sus huellas o registros no son significativamente altas dentro de análisis espaciales bidimensionales. Lo que conlleva a señalar la necesidad de optar por metodologías alternas entorno a su crecimiento basados en estadísticas de explotación y disgregar las marcas de crecimiento generalizado de la categoría.

Como alternativa de comparación se recurre al análisis visual de una imagen satelital del sensor Rapideye, la cual fue procesada digitalmente con el fin de extraer técnicamente la composición en falso color que presentara la mayor desviación de información dentro de su registro espectral y posterior clasificación a niveles discretos con el uso de software y desarrollo procedimental de clasificaciones supervisadas. Esto con el fin de evidenciar la limitante de imágenes con resolución espacial de 5 metros en la obtención de cartografía escala 1:10.000

## 4 Conclusiones

El conjunto de acciones procedimentales realizadas desde los sistemas de información geográfica permite obtener 8 indicadores en relación a conceptos de pérdida, ganancia y persistencia para cada una de las categorías temáticas objeto de análisis. En donde la ganancia – pérdida total registra un valor del 32%, los intercambios en un 35% alcanzando un cambio total del 60.89% en relación al área de estudio, en los que se identifica una tendencia marcada de cambio hacia actividades de tipo antrópico relacionadas al sector primario de la economía desde la extracción minera de arenas, arcillas, carbón y caliza, así como el uso de áreas industriales, acopios y áreas asociadas a la exploración de hidrocarburos.

La aplicación de conceptos y técnicas de fotogrametría digital permitió la construcción de una imagen de referencia para año 1992, en integración de 8 fotografías aéreas pancromáticas dentro de un mosaico con resolución espacial de 50 cm y espectral de 8 bits homologa a la imagen de referencia del año 2016 (16bits y 50 cm de resolución) necesarias para la captura de unidades cartográficas objeto de estudio.

Aplicar la metodología Corine Land Cover permitió la clasificación de dos entidades temáticas en relación a la cobertura de suelo que facilitan el análisis multitemporal comparando dos o más periodos de tiempo. De tal forma que su uso puede extenderse a estudios medio ambientales, ordenamiento territorial y otras áreas de investigación.

Los cambios de tipo espacial en las coberturas se detectaron mediante el uso de los 8 indicadores de (Brammoh, 2006), que permitieron observar la ganancia y pérdida de áreas, la persistencia de unidades de cobertura, así como los intercambios, el cambio neto, cambio total y las áreas que ganan o pierden respecto al área que persiste.

Los valores obtenidos de los índices propuestos por (Braimoh, 2006), son consistentes al resaltar los cambios de las categorías de cobertura propuestas, no obstante la lógica o dinámica económica de los mismos no son objeto de estudio, pero son el punto de partida al análisis integral desde otras perspectivas geográficas.

Los índices propuestos por (Braimoh, 2006) buscan determinar cambios del tipo cuantitativos en pérdida, ganancia y persistencia como fueron aplicados en este trabajo, no obstante estos indicadores son comúnmente utilizados en análisis cualitativos asociados a enfoques medio ambientales que difieren del concepto cuantitativo con el cual fueron diseñados.

## 5 Recomendaciones

Dentro del estado del arte, (Loya Carrillo, et al., 2015), se plantea un modelo de simulación a partir de autómatas celulares que se haya dentro de las herramientas de software Idrisi Taiga del módulo Ca\_Markov el cual busca la probabilidad de los cambios para un periodo posterior. Apreciación que da pie a un trabajo de investigación alterno que donde sean utilizadas las unidades cartográficas elaboradas desde la fotointerpretación de imágenes y sensores remotos.

Con relación a las escalas recopiladas de la información secundaria, sensores de tipo comercial que distribuyen imágenes con resoluciones espaciales de 1 metro y espectral de 5 bandas, dan pie a evaluar mediante una comparación de resultados la obtención de categorías de análisis desde el procesamiento digital a través de clasificaciones supervisadas y así establecer valores intermedios o posteriores en los cuales se pueda analizar las categorías en otro lapso de tiempo de análisis.

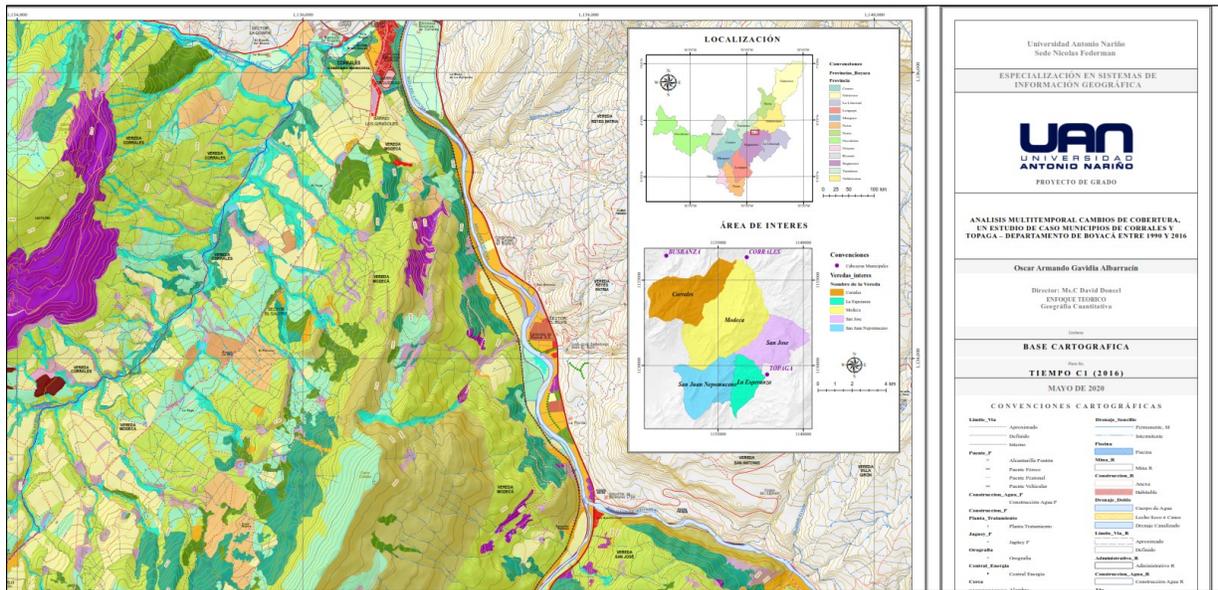
El análisis de la capa no es exclusivo al límite territorial veredal, a partir del límite de unidades territoriales relativas de menor extensión el ejercicio realizado es replicable y así establecer valores puntuales con base a la organización espacial lo que permitirá así identificar los sectores donde se presentan los mayores cambios.

## 6 Anexos

Como parte integral del presente ejercicio teórico práctico se construyen dos salidas de tipo cartográfico para los tiempos 1 y 2 (1992-2016) a escala 1:10.000 respectivamente.

Ortofotomosiaco para el tiempo 1 pancromático.

Anexo 1. Mapa del periodo 1992.



Fuente: Autor

## 7 Trabajos citados

- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la Corrección Atmosférica de Imágenes Aster, Rapideye, Sport 2 y Landsat 8 con el Módulo Flaash del Software ENVI. *Revista Geográfica de América Central* N° 53, 39-59.
- Baxendale, C. (2015). Ordenar el territorio con base en la geografía cuantitativa. En G. Buzai, G. Cacace, & L. Humacata, *Teoría y métodos de la geografía cuantitativa* (págs. 39-51). Mercedes, Buenos Aires Argentina: MCA Libros.
- Braimoh, A. (2006). Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 113, 254-263.
- Buzai, G., Cacace, G., Humacata, L., & Lanzelotti, S. (2015). *Teoría y Métodos de la Geografía Cuantitativa: Libro 1 por una geografía de lo real*. Buenos Aires, Argentina: MCA Libros. doi:IBBN 978-987-45986-2-2
- Cabrera, E., Vargas, D., Garcia, M., & Ordonez, M. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia Nivel subnacional Escala gruesa y fina*. Bogotá D.C: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Calle, A., & Salvador, P. (2012). Revisado el concepto de resolución en la teledetección. *Revista de teledetección*, 74-79.
- Chavez Jr, P. (Febrary de 1982). Statistical Method for Selecting Landsat MSS Ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8(1), 23-30.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp S.A.
- Costa Campos, A., & Fenandez Bozal, J. (2005). La imagen digital. *Ortod*, 35, 255-266.
- ERDAS, Inc. (2010). *Manger, Technical Documentation*. Norcross, GA 30092-2500 USA.: 5051 Peachtree Corners Circle.
- Flórez Yepes, G., Rincon Santamaria, A., Cardona, S., & Alzate Alvarez, A. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *Dyna*, 84(201), 95-101.
- Hernandez Menco, C. (2017). Análisis multiemporal del cambio en la cobertura del suelo, en la zona de inundación de la represa Hidrosogamoso, Departamento de Santander, Años 2001 y 2015. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6377/1/HernandezMencoCarlosEsteban2017.pdf>
- Humacata, L. (2014). Aportes metodológicos del análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica a la clasificación espacial en Geografía. *Revista del Departamento de Ciencias Sociales*, 3, 118-147.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá: Scripto Ltda.
- IDEAM, IGAC Y CORMAGDALENA. (2008). *Mapa de Cobertura de la tierra Cuenca Magdalena Cauca, Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia a escala 1:100.000*. Bogotá D.C: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional de río Grande de la Magdalena.
- IGAC. (2009). *Coberturas y usos de la tierra del Departamento del Quindío*. Santa fe de Bogotá: IGAC.

- Jensen, J. (2015). *Introductory Digital Image Processing A remote Sensing Perspective* (4 ed.). South Carolina: Pearson Education.
- Labrador Garcia, M., & Evora Brondo, J. (2012). *Satelites de teledetección para la Gestión del Territorio*. Canarias: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del gobierno de Canarias.
- Lamprea Avellaneda, F. (2017). *Zonificación de las Coberturas de la Tierra Mediante la aplicación de herramientas SIG para la revisión y ajustes del P.O.T en el marco del crecimiento urbano y la conurbación norte: Caso municipio de Zipaquirá*. Bogotá D.C: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Loya Carrillo, Jaime Octavio; Torres Olave, María Elena; Bravo Peña, Luis Carlos; Alatorre Cedujo, Luis Carlos. (2015). Análisis del cambio de cobertura y uso de suelo durante el periodo 1995-2011, EMC y autómatas celulares para la predicción del crecimiento urbano, el caso de ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua. En U. A. Ciudad, *Geoinformática aplicada a procesos geoambientales* (págs. 163-194). Juárez, Chihuahua: Dirección General de Difusión Cultural y Divulgación Científica. Subdirección de Publicaciones.
- Madrid Soto, A., & Lopez Ortiz, L. (2005). *Análisis y síntesis en cartografía: Algunos procedimientos*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1239/3/02CAPI01.pdf>
- Mateus, M. (2014). *Análisis de la cobertura vegetal, uso del suelo y su impacto en la desecación del lago de Tota*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/11585>.
- Montes Galbán, E. (2015). Estructura diacrónica de los procesos de investigación aplicada a la Geografía Cuantitativa. En G. Buzai, G. Cacace, & L. Humacata, *Teoría y Métodos de la Geografía Cuantitativa* (págs. 53-67). Mercedes, Buenos Aires Argentina: MCA Libros.
- Montiel A., K., & Villarreal, L. M. (2004). *Análisis multitemporal del impacto generado por la explotación minera en el medio geomorfológico*. Caracas, Venezuela: Terra Nueva Etapa, vol. XX.
- Neuta Tunjo, N. (2018). *Análisis multitemporal para la detección en el Desecamiento de la Laguna de Fúquene a través de imágenes de Radar*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/20379>.
- Peña Suárez, J. (2015). *Análisis multitemporal del retroceso glacia de la Sierra Nevada del Cocuy Ubicada en los Departamentos de Boyacá y Arauca entre los años 1992, 2003 y 2014*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/13551>.
- Pérez Umaña, M. (2018). *Análisis multitemporal de la zona de explotación minera a cielo abierto en el municipio de Duitama a partir de imágenes Landsat 7 y Sentinel 2A*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/17633>
- Pontius Jr, R., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 101, 251-268.
- Randall, B. (04 de January de 2012). *Introduction to remote sensing o environment (RSE9)*. Obtenido de <http://www.microimages.com>
- Rojas Paez, D. (2018). *Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat del cambio de la cobertura vegetal y su impacto en la desecación del espejo de agua en la laguna de Tota para el periodo de 1991 al 2017*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/17715>.
- Sanabria, R., Camacho Sanabria, J. M., Balderas Plata, M., & Sánchez López, M. (2017). Cambios de Cobertura y uso de suelo: Estudio de caso en progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera bosques*, 23(3).

- Sánchez, D. (2017). *Contribución del análisis espacial a la ciencia y a la geografía*. Madrid, España: Académica española.
- Sánchez, D. C. (2012). Métodos Estadísticos en geografía breve introducción al muestreo. *Geoperspectivas Geografía y Educación*.
- Soca Flores, R. (2017). *Corrección Atmosférica SMAC para Imágenes del Sensor OLI del Satélite Landsat - 8*. Ayacucho - Perú: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- USGS Geological Survey. (2006). *Reporte de Calibración de Cámara Aérea*.