

**ESTUDIO MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA DE EXPLOTACIÓN DE ORO DE ALUVIÓN DEL  
BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO EN LOS AÑOS 2014 Y 2017 A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES**



**DANIELA MARÍA ACOSTA DÍAZ**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA GEOMÁTICA**

**BOGOTÁ D.C**

**Diciembre de 2107**

# ESTUDIO MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA DE EXPLOTACIÓN DE ORO DE ALUVIÓN DEL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO EN LOS AÑOS 2014 Y 2017 A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES.

**multitemporal study of alluvion gold dynamics of exploitation in bajo cauca antioqueño in the years 2014 and 2017 through satellite images**

Daniela Maria Acosta Diaz  
Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Aspirante a especialista en Geomática  
Estudiante de posgrado de la UMNG  
Bogotá, Colombia,  
U3101371@unimilitar.edu.co

## RESUMEN

La explotación de oro aluvial es una de las actividades con mayores índices de ilegalidad del país, puesto que sólo el 2% de cumple con los requisitos legales. La explotación de oro de aluvión genera grandes impactos ambientales sobre el medio físico, biótico y social afectando grandes extensiones del territorio colombiano en los cuales se han identificado 26 departamentos con presencia de extracción de oro de aluvión, entre estos los departamentos que lideran las estadísticas son Antioquia y Chocó. Para determinar la dinámica de la explotación de oro de aluvión en los municipios de Zaragoza, el Bagre y Nechí se realizó a través de imágenes satelitales LANDSAT 8 y SENTINEL 2 correspondientes a los años 2014 y 2017 respectivamente. Por medio del software PCI geomática se realizó la corrección atmosférica a nivel de terreno para obtener valores de reflectancia, posteriormente se realizó la clasificación supervisada seguido de los procedimientos de post clasificación como son agregación de clases, edición, y evaluación de precisión. Posteriormente se calculó el porcentaje de área cobertura para cada año con el fin de determinar el incremento o disminución de explotación de oro de aluvión en el área de estudio. Por último se aplicó filtro de paso bajo y se realizó la transformación a formato vectorial para generar las salidas gráficas. Los resultados obtenidos demuestran un incremento del 936% en las coberturas de minería y pozos, y una disminución de las ciénagas y bosques del 97,4 y 10% respectivamente entre los años 2014 al 2017

**Palabras clave:** Explotación de oro de aluvión, LANDSAT 8, SENTINEL 2, clasificación supervisada, detección de cambios.

## ABSTRACT

Alluvial gold exploitation is one of the activities with the highest rates of illegality in the country, since only 2% of compliance with legal requirements. The exploitation of alluvial gold generates large environmental impacts on the physical, biotic and social environment affecting great areas of Colombian territory, in which 26 departments have been identified with the presence of alluvial gold extraction, among these the departments that lead the statistics are Antioquia and Chocó. To determine the dynamics of alluvial gold exploitation in the town of Zaragoza, Bagre and Nechí was carried out through satellite images LANDSAT 8 and SENTINEL 2 corresponding to the years 2014 and 2017 respectively. Subsequently, the percentage of coverage area for each year was calculated in order to determine the increase or decrease in the exploitation of alluvial gold in the study area. Finally, a low-pass filter was applied and the transformation was made to vector format to generate the graphic outputs. The results obtained show an increase of 936% in the coverage of mining and wells, and a decrease in the marshes and forests of 97.4 and 10% respectively between the years 2014 to 2017

**Keywords:**

Exploitation of alluvial gold, LANDSAT 8, SENTINEL 2, supervised classification, change detection.

## INTRODUCCIÓN

Una de las principales problemáticas del país asociadas al conflicto armado, la ilegalidad y la criminalidad es la expansión de las áreas de explotación de oro de aluvión que conlleva graves consecuencias e impactos ambientales irreversibles. La explotación aurífera en Colombia se da según los tipos de yacimiento y las formaciones geológicas de cada región; el primero de ellos se denomina filón o veta y se realiza subterráneamente. La segunda es de aluvión de cielo abierto, la cual es objeto de monitoreo en el presente estudio.

Según los datos reportados del año 2011 por el Sistema de Información Minero Colombiano, el 82% del producido total proviene de minería de aluvión y el 18% restante de filón. De la totalidad producida, el 95% de las minas de aluvión no poseen titulación, y de las minas de filón solo el 23% tiene título minero. Se aclara que al poseer el título minero no implica el otorgamiento de la licencia ambiental para el proyecto, pues sólo el 2% de todas las explotaciones mineras del país cumple con los requisitos legales [1].

Una de las consecuencias más significativas de la explotación de oro aluvial es la pérdida de biodiversidad biológica en todas las regiones del país, sin embargo, no en todas las regiones existe el mismo nivel de impacto y producción por dicha actividad. Por ejemplo, en el departamento del Chocó hubo afectación sobre el 77% de la cobertura de bosques naturales y vegetación secundaria, sin contar los impactos ambientales generados por el vertimiento y emisión de mercurio sobre los ríos, suelos y atmósfera.

La explotación de oro aluvial debido a su gran impacto sobre el medio debería ser una actividad con estricta regulación y vigilancia por el estado, aunque existen operativos por parte del Ejército Nacional para controlar la ilegalidad, la

explotación de oro de aluvión se ha expandido por todo el territorio nacional hasta llegar a la jurisdicción de zonas de manejo especial como Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNNC) y resguardos indígenas, esto es un claro ejemplo de que la minería de aluvión está presente inclusive en la zonas donde está prohibido realizar cualquier tipo de explotación de recursos naturales, y donde “prima la conservación y protección de flora y fauna [1].

Los PNNC afectados por EVOA son: Puinawai, paramillo, los Katios, Munchique, Selva de Florencia, entre otros. De los cuales hubo una pérdida de coberturas de alto valor ambiental de 24450 hectáreas entre los años 2013 y 2014.

Desde la posición gubernamental frente a la problemática planteada; el ministerio de Justicia y del Derecho y la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, en el año 2013 presentaron un informe en el cual se evidencia la expansión del EVOA en el territorio colombiano, y cómo ésta actividad está asociada a zonas donde hubo o hay presencia de cultivos ilícitos de Coca, en el año 2014 y 2015 se presentó una metodología de detección del fenómeno a través de fotografías aéreas e imágenes satelitales con el fin de monitorear a partir de la percepción remota la explotación de minería aurífera de aluvión [1].

El presente estudio pretende responder cuál ha sido la dinámica de la actividad de explotación de oro de aluvión del Bajo Cauca Antioqueño desde el año 2014 hasta la actualidad, mediante un estudio multitemporal en las coberturas vegetales e hidrografía asociados a la dinámica de explotación de oro a través de imágenes satelitales LANDSAT 8 y SENTINEL 2 en los municipios de Zaragoza, El bagre y Nechí.

El estudio se realizó por medio de clasificación supervisada de los diferentes tipos de cobertura presentes, para posteriormente realizar la detección de cambios en el proceso dinámico de la explotación de oro aluvial y el cálculo de áreas de expansión o disminución de explotación de oro aluvial comprendido en el área de estudio.

La subregión de estudio se encuentra en el departamento de Antioquia en las serranías de Ayapel y San Lucas sobre la cordillera Central, está conformado por los municipios de Zaragoza, El Bagre, Nechí, Caucaasia, Cáceres y Tarazá. Esta área abarca las cuencas de los ríos Nechí y Cauca [2] y a su vez al sistema hidrográfico de los ríos Aburrá, Grande, Porce, Nechí y Cauca que ocupan un 42% del área total [3] .

En el sector del bajo Cauca Antioqueño la economía se caracteriza por ser principalmente minera, pues según registros históricos, la región se llegó a poblar debido a esta fuerte actividad que allí se desarrollaba, además de la producción ganadera, piscícola y agrícola.

El Bajo Cauca Antioqueño presenta una alta presencia de conflicto armado, bandas criminales, narcotráfico e inequidad. No siendo poco lo anterior, además existe un gran porcentaje de informalidad en la ocupación de tierra, sumado a que se genera conflicto de usos vocacionales de suelos, intensificando la

ocurrencia de emergencias ambientales y alta vulnerabilidad de la región por efectos de cambio climático. [4].

Se creería que la extracción de oro de aluvión en el Bajo Cauca, es una problemática socioeconómica y ambiental que surgió como producto del conflicto armado en Colombia, y una forma de lucración ilegal de los grupos al margen de la ley. Resulta que esta actividad data desde la conquista, los indígenas Zenú, Embera, y población negra procedentes del occidente de África trabajaron ineludiblemente en las minas de oro aluvial, es por esto que los conquistadores se asentaban sobre las márgenes de las quebradas y ríos. Desde la época colonial ha sido muy importante la actividad minera de aluvión sobre el asentamiento en la orillas de los ríos que conforman el bajo Cauca Antioqueño [4].

Los registros que se han obtenido de producción de oro en Colombia en los años 2013 y 2014 presentan un aumento en un 2,3% puesto que la producción fue de 55745 kilogramos en el 2013 a 57015 en el 2014. Con respecto a la extracción de plata hubo una disminución en su producción del 2013 al 2014 en un 17,7%.

A nivel nacional el departamento de Antioquia es el que más produce oro; con aproximadamente 28000 kg que representa el 49,3%. Luego sigue el departamento del Chocó con 11317 kg que representó el 19,9% de la producción nacional.

Los resultados estadísticos obtenidos del Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) reporta que entre los años 2014 a 2015 la producción total de metales preciosos se redujo en un 25% en el departamento de Antioquia; sin embargo, a pesar de haber una reducción tan significativa la minería de oro de aluvión sigue siendo la principal vocación de la subregión y uno de los pilares fundamentales de la economía del Bajo Cauca.

De los 8,8 millones kilogramos de oro extraídos en el 2015; el 78 % fue producido en los municipios de Tarazá, El Bagre y Nechí. Por lo tanto son los principales epicentros de exploración y extracción de este metal precioso.

Desde los años 2010 a 2015 el Bajo Cauca pasó de aportar el 65 % a 41% de la producción regional, según los datos la producción de Cauca y Tarazá disminuyó pero en el municipio del Bagre aportó el 75 % de la producción del metal en la subregión durante 2015 [5]

## **1 MARCO TEORICO**

### **1.1 EXPLOTACION DE ORO DE ALUVIÓN**

Para comprender la explotación de minería aurífera de aluvión es necesario definir previamente algunos conceptos. Primero, el aluvión son los sedimentos dejados por una corriente de agua que generan depósitos conformados por el arrastre de material de la cuenca que pueden acumularse dentro o fuera del cauce.

El proceso de explotación minera de aluvión se realiza directamente sobre el cauce del río, o sobre terrenos aluviales se observa en el territorio comprendido que hay distintas modalidades de extraer el oro según el tipo de tecnificación implementada en la actividad. La primera de ellas usa maquinaria pesada como retroexcavadoras, bulldozer, dragas, elevadores, bombas, entre otros. Y la segunda es la rudimentaria o artesanal, donde las áreas de explotación son pequeñas e imperceptibles, además no usan ningún químico para la obtención del oro [1].

Cuando la extracción de oro se realiza sobre los cuerpos de agua con dragas o maquinaria pesada se genera alteración sobre la carga de sedimentos del río, en cambio cuando se explota sobre terrenos aluviales hay una afectación directa sobre el paisaje.

Por otro lado, la implementación de maquinaria pesada para la extracción de oro ha ganado cada vez mayor protagonismo ya que genera ganancias superiores; sin embargo las consecuencias del uso de este tipo de máquinas se ve reflejado en las coberturas terrestres, en la alteración de los cuerpos de agua, alto impacto visual por cambio en el paisaje, deforestación y por ende degradación de los suelos.

Una de las ventajas de estudiar los impactos ambientales mencionados a partir de la percepción remota es que se pueden cubrir grandes extensiones y obtener resultados en un menor tiempo con costos muy inferiores al estudio in situ. El análisis multitemporal de detección de cambios de la dinámica de explotación aurífera puede ser estudiado a través de la interpretación visual como por índices espectrales [1].

## **1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 (OLI) Y (TIRS).**

Las imágenes LANDSAT 8 trabajan con nueve bandas espectrales con resolución espacial de 30 (m) cuando son obtenidas de los sensores (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 (m) para las bandas de 1 a 7 y 9.

La banda 1 se llama azul profundo y se utiliza especialmente para estudios de aerosoles y estudios costeros. La banda 9 también fue incorporada y recomienda para la detección de nubes. La banda con mayor resolución espacial es la pancromática con 15 (m). Además trabaja con dos bandas térmicas en los canales 10 y 11 en los que se pueden estudiar la temperatura con 100 (m) de resolución espacial para hacer seguimiento del uso de la tierra y el agua [6].

## **1.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MISIÓN SENTINEL 2**

La misión SENTINEL 2 proporciona imágenes ópticas de alta resolución a través de una constelación de dos satélites con cobertura global de la tierra cada cinco días con los dos satélites operando. SENTINEL 2 trabaja con 13 bandas espectrales con distintas resoluciones espaciales, las bandas 2, 3, 4, 8 tienen

una resolución de 10 (m), las bandas 5, 6, 7, 11,12 de 20 (m) y las bandas 1, 9, 10 de 60 (m).

El satélite SENTINEL 2A fue lanzado el 23 de junio de 2015 y el 2B en 2016. Tienen una vida útil de 7 años. Una de las ventajas de la constelación es que tiene interoperabilidad con el programa LANDSAT y un convenio (GEOGLAM) entre ambos para investigaciones relacionadas a la observación y monitoreo de : Vegetación, coberturas de suelo, agua, infraestructura, navegación, zonas costeras, uso de la tierra, detección de cambios, ocupación del suelo, prevención de desastres y vigilancia del cambio climático [7].

Niveles de corrección:

Nivel 1 – A correcciones radiométricas

Nivel 1 – B correcciones geométricas

Nivel 2 – A detección Nube

Nivel 2 – B correcciones atmosféricas

Nivel 2 – C las variables geofísicas algoritmos de recuperación

Nivel 3 Simulación de correcciones en la nube [7].

## **1.4 CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES**

La clasificación multispectral es un proceso en el que se ordenan los píxeles de una imagen y se asignan a una clase o categoría finita.

La clasificación es un proceso en el cual se extrae información sobre distintas clases que contenga una imagen raster, según el tema y área de estudio. Las clases pueden ser litológicas, uso vocacional de suelos, tipos de vegetación, hidrografía, entre otros [8].

Si un grupo de píxeles cumple con unos criterios matemáticos determinados basado en información estadística derivada de las características espectrales de los píxeles de la imagen.

Los píxeles con ciertas características espectrales son asignados a una clase específica; este proceso también es llamado segmentación, en el cual los niveles digitales de la imagen se reagrupan en clases para tener un mejor conocimiento de los recursos que contiene el área de estudio.

El producto del proceso de clasificación es una imagen raster que puede ser el insumo para la creación de mapas temáticos. [9].

### **1.4.1 Clasificación supervisada.**

Cuando se realiza la clasificación supervisada es necesario conocer previamente el área de estudio, y se realiza manualmente con mucha precisión cada una de las áreas de entrenamiento representativas de las categorías que conforman la leyenda a discriminarse.

Se recomienda que durante el proceso de clasificación de cada tipo de clase de cobertura se elijan varios campos de entrenamiento pequeños pero con la

certeza de que se están seleccionando muestras “puras” con alto valor de representatividad, en vez de un área grande en el que se eligen muchos píxeles en el que probablemente fueron capturados varios tipos de cobertura para la misma clase. Posteriormente se va a reflejar un error en la clasificación de la variabilidad de las clases en la zona de estudio.

Algunos de los algoritmos usados para la clasificación supervisada son: mínima distancia, máxima probabilidad, paralelepípedos, clase probable, y redes neuronales.

#### **1.4.2 Clasificación no supervisada.**

El proceso se basa en la búsqueda automática de grupos de valores homogéneos en un área determinada, a través de la conglomeración o clúster de píxeles cuando los niveles digitales de la imagen tienen un comportamiento espectral homogéneo. Así mismo el técnico que realiza la clasificación no supervisada debe asignar un significado temático a cada una de las clases creadas. Algunos de los algoritmos creados para crear clúster son: K-means, ISODATA, competitivo entre otros.

### **1.5 AREA DE ESTUDIO.**

#### **1.5.1 Delimitación del área de estudio.**

El área de estudio multitemporal de la actividad de Explotación de Oro De Aluvión (EVOA) está delimitado según la hidrografía del departamento de Antioquia, el límite sur está dado por la confluencia del río Porce y Nechí aguas abajo hasta la desembocadura del río Nechí en el río Cauca. El polígono que se observa en la imagen comprende una área total de 2287 (km<sup>2</sup>) correspondientes a los municipios de Zaragoza, el Bagre y Nechí en el cual se evalúan los complejos de ciénagas y zonas circundantes a ríos y quebradas asociados a la dinámica del (EVOA).





**Fig 1.** Imagen de delimitación de área de estudio.

**Fuente:** El Autor

### **1.5.2 características físicas del área de estudio.**

La corporación autónoma de Antioquia en su plan de gestión ambiental actual realizó una sectorización de regiones dentro del departamento según sus características biogeográficas, entre ellas la región del Panzenú se caracteriza por su alta pluviosidad (2.500 a 5.000 mm/año), está conformado por los municipios de Zaragoza, Valdivia, Cáceres, El Bagre, Caucasia, Nechí y Tarazá. Y por los ríos Man, Cauca y Caserí-Nechí en los que se forma un plano de inundación joven, con aproximadamente 65 (km<sup>2</sup>) de planicie con sistemas cenagosos de alta valoración ecosistémica. Los ríos contienen gran cantidad de sedimento transportado, y se comportan con alta furcación, en un plano de inundación joven y dinámico.

#### **1.5.2.1 Generalidades de la unidad del complejo hidrológico del Bajo Cauca:**

Las unidades de paisaje están compuestas por ciénagas canales bajos y terrazas sobre las llanuras de inundación de los ríos Nechí y Cauca asociados a un régimen hidrológico de inundación natural definido por las temporadas de lluvia, debido a la intervención del hombre sobre la parte media de las cuencas ha incrementado en el ecosistema el nivel de vulnerabilidad.

La unidad del paisaje extiende hacia el sur del departamento de Córdoba áreas de colinas bajas de origen sedimentario con producción de cultivos tecnificados y ganadería extensiva, sin embargo muchas de estas actividades han sido reemplazadas por la explotación minera a cielo abierto a gran escala y con prácticas ambientalmente insostenibles sobre las terrazas aluviales de los ríos

Nechí y Cauca modificando drásticamente el paisaje y generando un pasivo ambiental incalculable.

Tradicionalmente, esta unidad ha estado dedicada a la ganadería extensiva y algunos cultivos tecnificados en donde la topografía de bajas pendientes favorece la conservación del paisaje, pero en las últimas dos décadas se presentó un auge por la explotación minera a cielo abierto con prácticas inadecuadas sobre las terrazas aluviales de los ríos Cauca y Nechí, alterando drásticamente el paisaje y dejando un gran pasivo ambiental. Actualmente, sobre la llanura aluvial del río Nechí, continúa operando una explotación minera a gran escala” con prácticas ambientalmente insostenibles.

“la unidad del complejo del Bajo Cauca presenta una alta presencia de población indígena, en las que se identifican once asentamientos que corresponden a la etnia Zenú. La población tiene una dinámica de integración territorial baja excepto en la zona correspondiente al municipio de Caucasia y su proximidad con Cáceres donde se dan mejores condiciones de vida y accesibilidad [10].

#### **1.5.2.1 Unidad del sistema colinado del Bajo Cauca**

La unidad colinada del bajo Cauca está ubicada en los municipios de Caucasia y Cáceres y cubre una parte de Zaragoza y Tarazá entre los ríos Nechí y Cauca. El área se caracteriza por tener colinas bajas del altiplano conservado de la superficie de erosión Caucasia. Gran parte de la zona está constituida por pastos para uso ganadero. Hacia el municipio de Cáceres se realiza explotación maderera y se encuentran fragmentos de bosques y rastrojos [10].

La unidad presenta un alto potencial de recursos: acuíferos, forestal comercial, agroecológico y aurífero en las llanuras aluviales. En general el área está constituida por grandes extensiones ganaderas. Las comunidades indígenas presentes en esta área son Pueblito, Puerto Triana, Quebradota, Anará, Pando y Puerto Santo [10]

#### **1.5.2.2 Unidad de bosques tropicales de la cuenca media del río Nechí.**

“Esta unidad localizada sobre las estribaciones de la cordillera central hacia las llanuras aluviales de los ríos Cauca y Nechí, se caracteriza por un paisaje de transición entre serranías con filos de topes amplios y prolongados, hacia un sistema colinado de cerros bajos asociados con la superficie de erosión Amalfi – Anorí” [10].

## **2 MATERIALES Y METODOS**

### **2.1 IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2 Y LANDSAT 8.**

El estudio tomó como insumos básicos para el análisis multitemporal una imagen SENTINEL 2 correspondiente a fecha de captura de la escena el día 1º de septiembre de 2017, y una imagen LANDSAT 8 capturada el 17 de septiembre de 2014.

El nivel de corrección geométrica de la imagen SENTINEL 2 es 1C; es decir ortorrectificada y con valores de reflectancia por encima de la atmósfera. La imagen LANDSAT 8 posee un nivel de corrección 1T; se caracteriza por tener correcciones geométricas a través de puntos de control y con proyección WGS 84 al igual que SENTINEL 2.

Se empleó un modelo digital de elevaciones de 12 (m) PALSAR para realizar la corrección atmosférica en ambas imágenes para obtener valores de reflectancia.

Para realizar un correcto análisis multitemporal es fundamental que la captura de las escenas sea en la misma época del año y que los regímenes climáticos para ambas fechas coincidan, ya que si una escena es tomada en época de sequía y la siguiente imagen fue capturada en época con alta precipitación; las imágenes no pueden ser comparables y el estudio no tendría validez.

## **2.2 SOFTWARE PCI GEOMTICA 2016 Y 2017**

El software se empleó como herramienta fundamental para el proceso de corrección atmosférica, para teledetección, y para realizar la clasificación supervisada para las imágenes correspondientes a las fechas 2014 y 2017.

## **2.3 SOFTWARE ARCGIS**

Fue empleado para el análisis del cálculo de áreas por coberturas y generación de salidas gráficas.

# **3 METODOLOGIA**

Una vez descargadas las imágenes se procede a realizar las correcciones atmosféricas siguiendo el flujo de trabajo establecido por PCI geomática.

En el cual el primer procedimiento se calcularon los valores de reflectancia por encima de la atmosfera, es decir que convirtió los valores digitales del pixel a valores físicos de reflectancia teniendo en cuenta las variables de iluminación solar y el día de adquisición de la escena.

Posteriormente se realizó la remoción de bruma y las máscaras de nubes para mejorar la calidad de visualización, procesamiento y análisis de las imágenes. Por último se generó la corrección de reflectancia a nivel de terreno para obtener los valores verdaderos de cada tipo de cobertura para proceder a realizar la clasificación supervisada de manera correcta-

## **3.1 DELIMITACION DE AOI**

Al observar las imágenes corregidas se identificaron zonas de mayor explotación de oro aluvial, de esta manera se definió un polígono con la misma área de estudio para ambos años. Se creó un polígono y se utilizó la herramienta recorte y subconjunto para recortar la imagen original al área de estudio (AOI).

## **3.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.**

Para dar inicio a la clasificación supervisada se tomó la composición de las bandas 6,5,4 para LANDSAT 8, y las bandas 8, 4,3 en SENTINEL 2. Al usar esta composición de bandas permite diferenciar la etapa de madurez de la cobertura vegetal y el contenido de clorofila con las bandas infrarrojo, además éstas composiciones de bandas permiten determinar el grado de sedimentación de cuerpos de agua e identificar de forma sencilla distintos tipo de cobertura presentes en las imágenes.

Al empezar la clasificación de la imagen se creó una nueva sesión donde se generaron 4 nuevos canales de 8 bits, allí se guardaron la composición de las bandas y se almacenaron el área de entrenamiento y los resultados de los procedimientos.

### **3.2.1 Toma de muestras**

A partir del área de estudio se tomaron firmas espectrales de cada tipo de cobertura trazando varios polígonos representativos relacionados un código y color específico.

Las muestras se tomaron de pixeles puros, con mucho detalle sin que se tomaran pixeles que correspondieran a otras coberturas para garantizar la correcta clasificación.

Se verificó luego de capturar las muestras, en el reporte estadístico de grado de separabilidad existente entre coberturas, este debe ser igual o cercano a 2; si los valores son muy bajos es preferible volver a tomar las muestras para mejorar la separabilidad y garantizar los resultados de la clasificación.

Mediante la herramienta scatter plot se rectifica de manera gráfica que una cobertura no esté contenida dentro de otra, al igual que en el procedimiento anterior; se debe retomar el procedimiento de entrenamiento de captura de firmas espectrales.

### **3.2.2 Selección del método de clasificación**

Posteriormente se pre visualizaron los distintos métodos de clasificación, y se eligió el de mejor adaptación entre ellos; ya sea el de mínima distancia, paralelepípedo o máxima verosimilitud, en este caso se eligió de máxima verosimilitud ya que los demás no se acercaban a la realidad de distribución de coberturas y requerían mayor edición de clases.

Este último procedimiento generó un reporte de clasificación en el cual mostró la relación del porcentaje de cobertura con respecto al total de la imagen y la cantidad de pixeles que fueron muestreados por cada una de estas. Además generó el valor porcentual del coeficiente kappa; el cual es un indicador del grado de confiabilidad del método clasificación elegido.

### **3.2.3 Post clasificación**

Posteriormente se realizaron los procesos de post clasificación que mejoraron el resultado obtenido; el primero de ellos fue el de agregación, en este se crearon nuevas clases para agrupar coberturas relacionadas en una sola.

### **3.3 EDICIÓN DE CLASES**

Se crearon nuevas clases para generar máscaras de nuevas coberturas, con el fin de clasificarlas a mano para tener mayor precisión; puesto que en la clasificación supervisada no se logró obtener el resultado esperado. En este caso se creó la clase de nubes, pozos mineros, centros urbanos y vías. Además se editaron clases en sitios específicos relacionados a ciénagas y minería.

### **3.4 EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD**

Posteriormente se procedió a realizar un control de calidad de las muestras tomadas para mejorar la clasificación de los objetos.

### **3.5 FILTROS**

Los filtros empleados fueron de paso bajo con el propósito de suavizar los contrastes y homogenizar las distintas coberturas. En este procedimiento Se compararon el comportamiento de los filtros según el tipo de cobertura; se experimentó con los filtros SIEVE, FMO y filtro medio de 3 x 3.

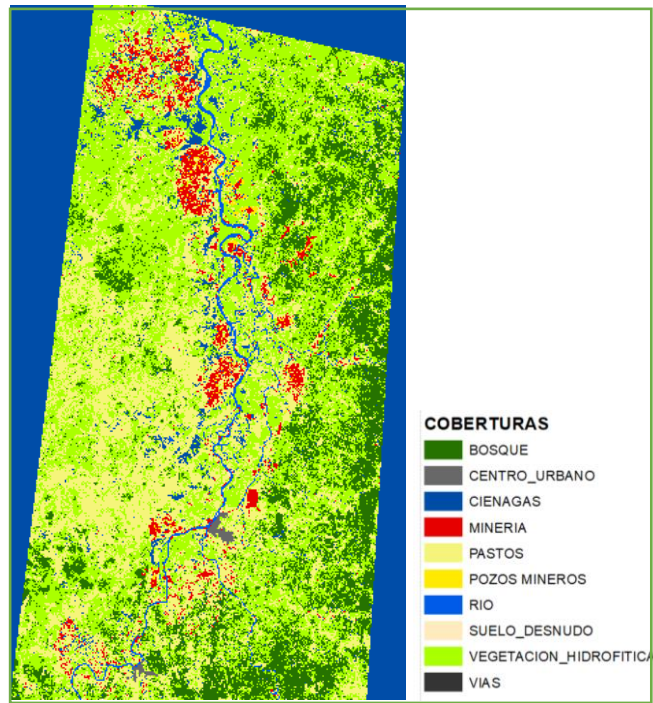
### **3.6 TRANSFORMACION A FORMATO VECTORIAL**

Debido a que los valores estadísticos de áreas arrojados por PCI geomática fueron erróneos, se procedió a convertir de formato raster a polígono y posteriormente a vector. En el programa ARCGIS se calcularon las áreas por tipo de cobertura y se realizaron los análisis estadísticos de cambio en área de minería, pozos, pastos, vegetación hidrofítica, bosques, ríos y ciénagas.

## **4 RESULTADOS.**

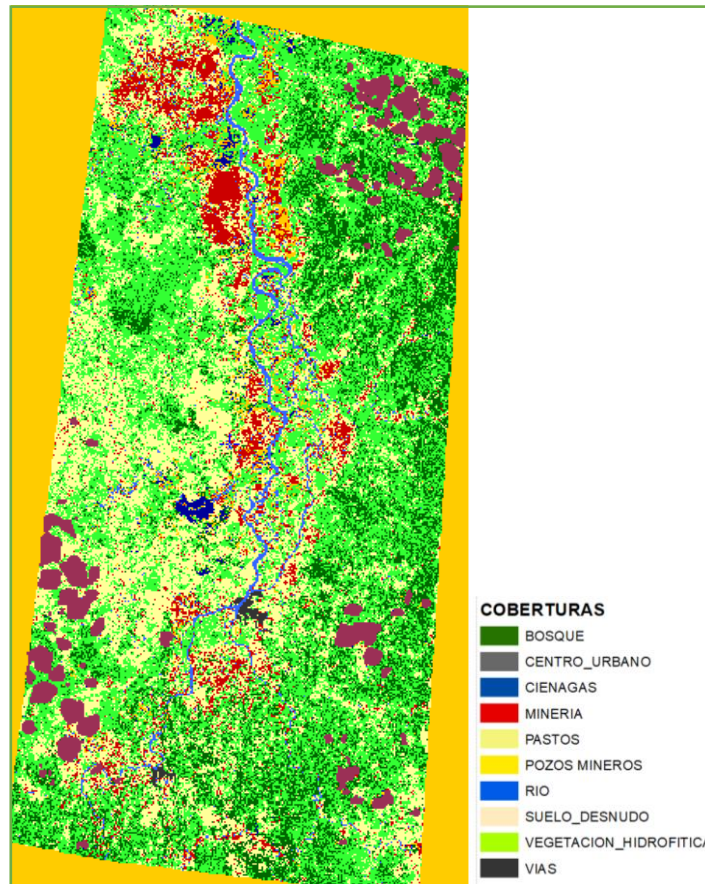
Del proceso de clasificación de imágenes se comparó el porcentaje de cambio de área entre los años 2014 y 2017 de las coberturas más relevantes, como lo son minería, pozos, ciénagas, vegetación hidrofítica, bosques, ríos y pastos.

A continuación se puede observar de forma general el resultado final de del proceso de clasificación supervisada sin filtros correspondiente a los años 2014 y 2017 correspondiente al AOI seleccionado.



**Fig 2.** Clasificación supervisada LANDAST 8 año 2014.

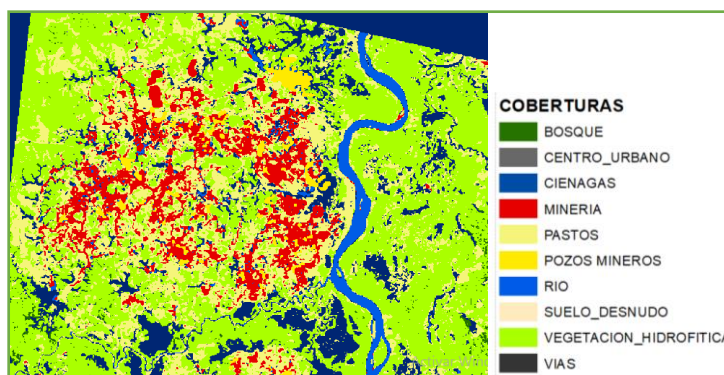
**Fuente:** El Autor



**Fig 3.** Clasificación supervisada SENTINEL 2.

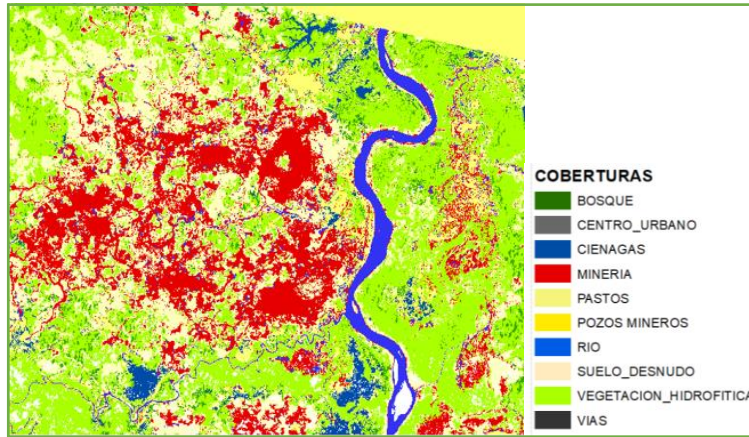
**Fuente:** El Autor

En las imágenes se seleccionaron las áreas con mayor cambio en donde se evidencia un incremento en el porcentaje de cobertura de minería, la imagen que se muestra a continuación corresponde a la zona noroccidental de la imagen correspondiente a la jurisdicción de Nechí.



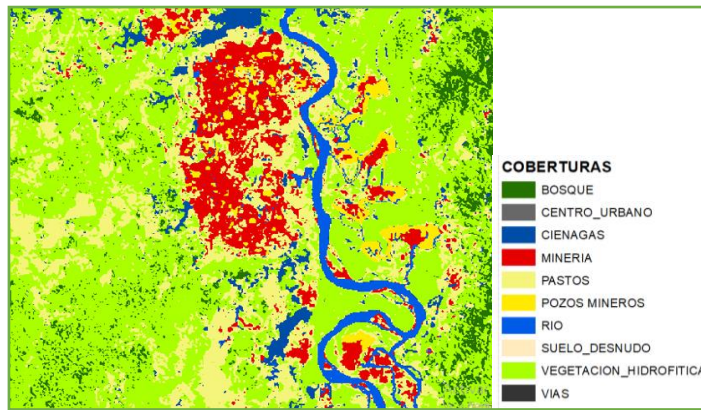
**Fig 4.** Clasificación supervisada LANDSAT8 zona noroccidente.

**Fuente:** El Autor



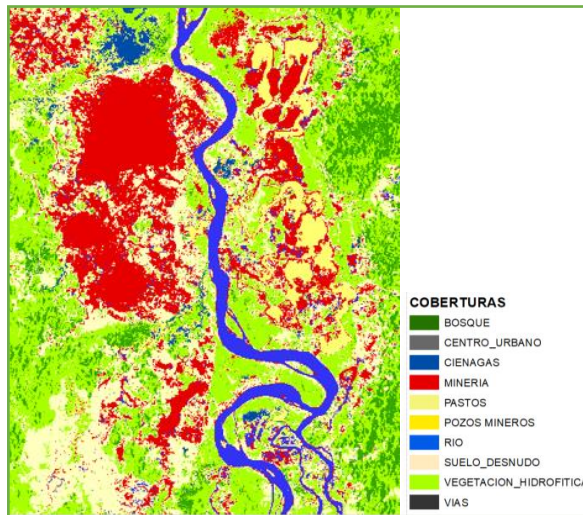
**Fig 5.** Clasificación supervisada SENTINEL 2 zona noroccidente.

**Fuente:** El Autor



**Fig 6.** Clasificación supervisada LANDSAT8 zona centro.

**Fuente:** El Autor



**Fig 7.** Clasificación supervisada SENTINEL 2 zona centro.

**Fuente:** El Autor

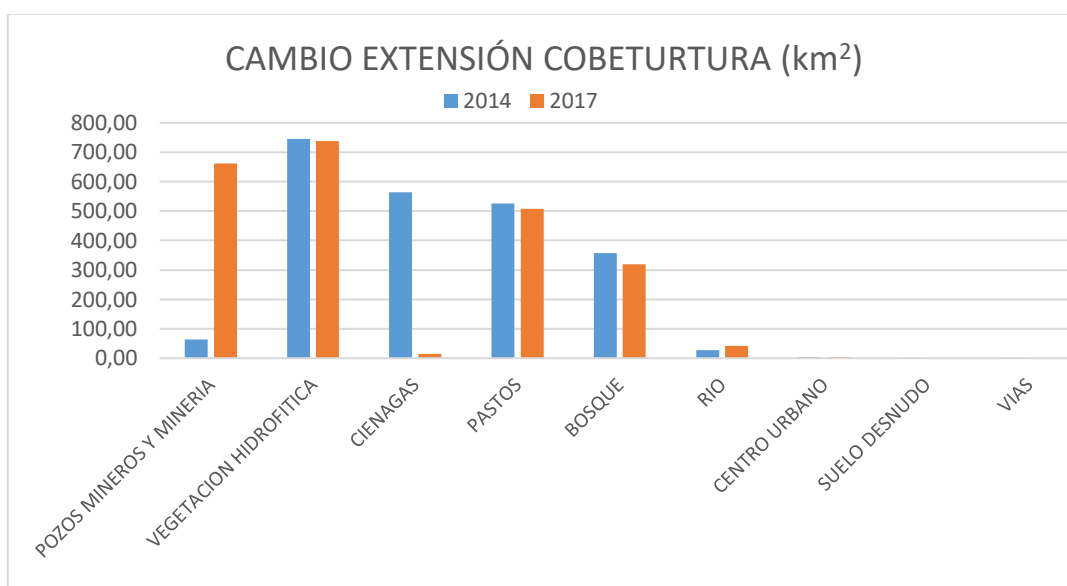
A continuación se muestra en la tabla 1 el cálculo de porcentaje de área por cada cobertura en los años 2014 al 2017 y el cambio presentado en área y en porcentaje.



**Tabla 1.** Cálculo de área por coberturas en los años 2014 y 2017

COBERTURA	L8 Área	S2 Área	DIFERENCIA	
	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	%
Año	2014	2017		
Pozos mineros y minería	63,91	662,50	598,59	936,6
Vegetación hidrofítica	745,16	737,32	-7,84	-1,1
Ciénagas	564,54	14,51	-550,03	-97,4
Pastos	525,00	508,18	-16,82	-3,2
Bosque	356,45	319,92	-36,53	-10,2
Río	27,86	40,88	13,02	46,8
Centro urbano	3,93	3,86	-0,07	-1,8
Total general	2.287,98	2287,20	-0,78	

Fuente: El Autor



**Fig 8.** Gráfica de porcentaje de cambio de cobertura entre los años 2014 y 2017 de la zona de estudio

## 5. DISCUSIÓN

En cuanto a la metodología para realizar el análisis multitemporal de la dinámica de explotación de EVOA; la clasificación supervisada ofrece una buena herramienta para determinar de manera visual y estadísticamente el detalle de cambio de las coberturas afectadas entre los años 2014 y 2017. Sin embargo, el proceso de clasificación supervisada y los procedimientos de post clasificación dependiendo de la extensión del área de estudio puede ser un poco lenta de procesar, no obstante se logran muy buenos resultados comparativos entre fechas.

Para la obtención de una correcta clasificación supervisada es necesario tomar muy buenas muestras de firmas espectrales de cada tipo de cobertura y

asimismo comprobar que el grado de separabilidad sea cercano a 2 para así obtener un coeficiente de kappa cercano a 100.

De igual manera, fue importante comparar cada uno de los métodos de clasificación y elegir el que mejor se adapte a las condiciones de AOI; no todos se comportan igual y pueden afectar el resultado final y generar más recursos de edición.

Para obtener información aproximada a la realidad de porcentajes de coberturas es necesario guardar una copia del canal donde se realizó el proceso de clasificación y post clasificación sin usar los filtros, ya que se alcanza a modificar los valores reales del terreno. Sólo se aplican los filtros para disminuir el ruido de las salidas gráficas.

Las imágenes de clasificación supervisada de los años 2014 y 2017 evidencian visualmente un incremento de la explotación de oro aluvial; y las estadísticas generadas comprueban las salidas gráficas generadas.

Según los valores calculados de la tabla 1 se demuestran un aumento del 936% en las coberturas de minería y pozos, mientras que hay una disminución del 97,4% de las ciénagas, esto se debe a que el área de estudio está compuesta por sistemas cenagosos alimentados por el río Nechí afectados directamente por la expansión de la actividad minera

Se observa que directamente sobre las ciénagas se realizan excavaciones con maquinaria pesada, y los cuerpos de agua los transforman en pozos mineros.

A través de los sensores se pudo detectar que las ciénagas sin intervención antrópica tienen un color azul oscuro, casi negro; es decir que no contiene contaminantes, ni sedimentos arrastrados por el río o por la actividad minera. Sin embargo cuando hay extracción de minerales, el color del agua se torna azul turquesa o azul claro. Grandes complejos de ciénagas se ven reemplazados por pozos que son de fácil acceso y una fuente directa de millones de litros de agua natural y de muy buenas condiciones para este fin.

De igual manera se evidencia una pérdida en las coberturas de bosques y pastos de 10 y 1% respectivamente, en la que se observa la influencia de la actividad de explotación de oro de aluvión en esta zona. Aunque los ríos aumentaron en un 46% esto se debe a que durante el proceso de clasificación supervisada algunos pozos mineros se tomaron como cobertura de río, pero realmente son cifras que aportarían al aumento de áreas de minería aluvial. Esa edición no fue del todo posible ya que se generan más de 50.000 polígonos muy pequeños que se tardarían en editar.

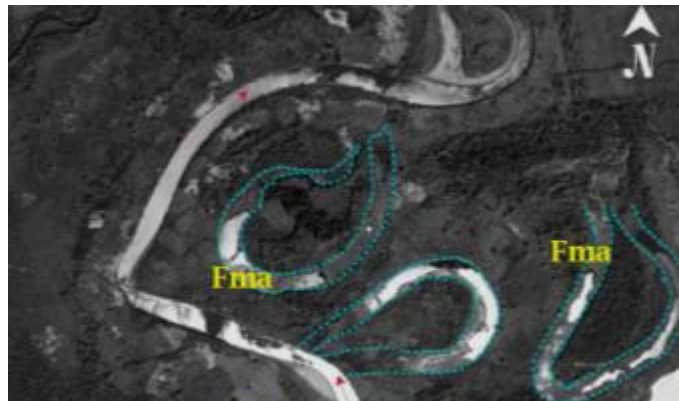
De igual forma se observa en las imágenes del 2017 la pérdida de conectividad de algunos ríos con las ciénagas y con los brazos de ríos, originados por el desvío de la corriente natural de agua para uso de EVOA.

Al realizar excavaciones en las rondas de los ríos y conducir el agua hacia otras zonas, el nivel de lámina de agua de las ciénagas y los ríos disminuye en gran medida, ya que el caudal remanente no alcanza a distribuirse por todo el

ecosistema; esas zonas anteriormente con riqueza hídrica es reemplazada por suelo desnudo o pastizales, así se evidenció en la zona nororiente de la imagen.

Por otro lado, según lo mencionado anteriormente, al disminuir los caudales se presenta una mayor divagación del río modificando sus parámetros morfométricos como sinuosidad y ancho de divagación.

Asimismo, al interrumpir el flujo de agua de un brazo del río sinuoso como se encuentra en esta zona de planicie del Bajo Cauca Antioqueño, podría generar madres viejas, es decir crear nuevos ecosistema lagunares, ya que se interrumpe el curso de agua natural.



**Fig 7.** Formación de Madre Vieja.

**Fuente:** [11]

Se apreció que la actividad de EVOA es la actividad económica de mayor ocupación detectable a través de imágenes satelitales, aunque se reconocieron zonas de pastos para ganadería intensiva, el EVOA adquiere mayor fortaleza través del tiempo. Además al ser una actividad que en Colombia sólo el 2% corresponde a minería legal, esto conlleva consecuencias negativas para la población que allí habita, por lo que genera mayores ingresos de forma ilegal y fortalece los grupos al margen de la ley.

Por otro lado se identificó un incremento de EVOA en zonas contiguas a las cabeceras municipales, esto demuestra el abandono del estado y de las Autoridades Ambientales para la intervención de la zona con el fin de efectuar la restauración ecológica y asimismo ofrecer alternativas de sustento económico de los ciudadanos para que no reincidan en las actividades ilegales asociadas al EVOA.

El impacto ambiental del EVOA afectó el componente físico, biótico y social. Se evidenció una afectación directa sobre la calidad de las características fisicoquímicas del agua, puesto que la afectación logra ser identificada desde los sensores espaciales alterando los valores espectrales del agua.

Asimismo, se produce una alteración del paisaje al remover capa vegetativa y capa orgánica durante el proceso de muestreo de la zona, montaje y el descapote, esto genera a su vez zonas de inestabilidad y deslizamientos lo que

provoca mayores porcentajes de erosión de la cuenca y pérdida de la estructura del suelo.

Además el uso de mercurio para la amalgación del mineral provoca la contaminación de las fuentes hídricas, como ríos, lagunas, ciénagas, como también la contaminación de aguas subterráneas, suelo y emisión de gases de mercurio a la atmósfera.

Por otro lado las concentraciones de mercurio en muchos casos pueden ser tan elevadas que causan la muerte de flora y fauna de todo un ecosistema; teniendo en cuenta que las ciénagas son ecosistemas estratégicos que permiten la reproducción, y crecimiento de especies; muchas de éstas endémicas y que a su vez los complejos de ciénagas ofrecen la seguridad alimentaria y garantiza biodiversidad; pues estos ecosistemas de gran valor, están siendo amenazados directamente al explotarlos como minas de oro a cielo abierto.

Colombia es el segundo país que presenta los mayores niveles de contaminación por mercurio. La concentración en (ppm) es tan elevada en los cuerpos hídricos que pueden generar la muerte de personas, según el consumo de este producto químico, que tiene la capacidad de bioacumularse a través de la cadena trófica, por tal motivo está presente en los animales y vegetación circundante en donde se producen los productos alimenticios.

## **CONCLUSIONES.**

La clasificación supervisada de las imágenes SENTINEL 2 y LANDSAT 8 fue una herramienta adecuada y con alto grado de confiabilidad para determinar la dinámica de explotación de oro de aluvión en el área de estudio determinada en el Bajo Cauca Antioqueño entre los años 2014 y 2017.

A través de la comparación de los mapas generados por medio de la clasificación supervisada de los años 2014 y 2017 se pudo realizar una detección de cambios de coberturas de la tierra e identificar zonas específicas donde se presentaron los mayores cambios.

Los valores estadísticos de cambio de porcentaje de coberturas demuestra que hubo un aumento del 936% en las coberturas de minería y pozos, mientras que hay una disminución del 97,4% de las ciénagas, esto se debe a que el área de estudio está compuesta por sistemas cenagosos alimentado por el río Nechí afectados directamente por la expansión de la minería de aluvión.

El municipio con mayor porcentaje de aumento de EVOA fue Nechí, en donde se identificaron los mayores cambios en la explotación de recursos naturales.

Por medio de la clasificación supervisada se identificó que hubo una reducción del 10% de la cobertura de bosques y un 1% en vegetación hidrofítica. De igual manera se evidencia el desvío de cauces para la explotación minera, generando la desconexión de ciénagas y brazos de los ríos. Del mismo modo, se identificó

una afectación directa sobre los parámetros morfométricos del río, como ancho de divagación y sinuosidad ocasionado por el EVOA.

## REFERENCIAS

- [1] Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito, MIn Justicia, Min ambiente, Minas., «Colombia Explotación de oro de aluvión Evidencias a partir de percepción remota,» 2016.
- [2] Gobernación de Antioquia, «antioquia.gov.co,» 4 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://antioquia.gov.co/index.php/antioquia/regiones/bajo-cauca>.
- [3] Instituto de Estudios Regionales Dirección de Regionalización UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, «Bajo Cauca: Desarrollo regional: una tarea común universidad-región,» Medellín, 2000.
- [4] A. S. R. Sotelo, «Minería aurífera en el Bajo Cauca antioqueño,» *Revista Zero, Universidad Externado de Colombia.*, 2014.
- [5] Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia., «Perfil socioeconómico de la subregión del Bajo Cauca,» Medellín, 2015.
- [6] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, «Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 (Landsat Data Continuity Mission),» Bogotá, 2013.
- [7] Sentinel 2, «Sentinel 2,» 3 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.esa-sen2agri.org/SitePages/Home.aspx>.
- [8] Arcgis Desktop, «Arcgis Desktop,» 24 Octubre 2017. [En línea]. Available: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/what-is-image-classification-.htm>.
- [9] F. A. Sarría, «Universidad de Murcia,» 02 Febrero 2006. [En línea]. Available: [http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node74\\_mn.html](http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node74_mn.html).
- [10] Corantioquia, «Plan de Gestión Ambiental 2007-2019,» Medellín, 2007.
- [11] INGETEC S.A, «Geomorfología y Modelamiento de la Dinámica Fluvial del río Carare, Valle Medio del Magdalena,» 2014.

