



ANALISIS MULTITEMPORAL DE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR LA EXPLOTACIÓN MINERA
A CIELO ABIERTO EN SOACHA, CUNDINAMARCA

KAREN GINETH ALDANA LIZARAZO

11792123451

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2022

ANALISIS MULTITEMPORAL DE LA EROSION PRODUCIDA POR LA EXPLOTACION MINERA
A CIELO ABIERTO EN SOACHA - CUNDINAMARCA

KAREN GINETH ALDANA LIZARAZO

ASESORES

DAVID DONCEL BALLÉN, MSc.

ANDRÉS FELIPE CARVAJAL VANEGAS, Dr.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2022

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 6 |
| Pregunta de investigación | 8 |
| MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO | 9 |
| Estado del Conocimiento | 11 |
| OBJETIVOS | 13 |
| Objetivo General..... | 13 |
| Objetivos específicos | 13 |
| METODOLOGÍA..... | 14 |
| Área de estudio | 14 |
| Revisión de información..... | 16 |
| Adquisición y recopilación de imágenes | 16 |
| RESULTADOS..... | 19 |
| Análisis estadístico y visual de bandas | 19 |
| Matriz de covarianza..... | 19 |
| Matriz Correlación | 20 |
| Clasificación supervisada..... | 27 |
| Selección de muestras y construcción de firmas..... | 27 |
| EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS | 30 |
| CONCLUSIONES | 46 |
| BIBLIOGRAFÍA | 47 |

TABLA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localización general Municipio de Soacha (sin escala)..... | 14 |
| Figura 2. Mapa área de estudio..... | 15 |
| Figura 3. Diagrama de metodología general..... | 15 |

TABLA DE GRAFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1. Evaluación visual de puntos y polígonos de erosión Vs Imagen BaseMAP | 39 |
| Gráfico 2. Representación del crecimiento de la minería por clasificación | 42 |
| Gráfico 3. Comparación multitemporal del crecimiento de la erosión | 44 |

TABLA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Imagen Landsat 5 descargada, año 1991. | 17 |
| Ilustración 2. Imagen Landsat 8 descargada, año 2015. | 18 |
| Ilustración 3. Imagen Landsat 8, descargada año 2021. | 18 |
| Ilustración 4. Modelo en ERDAS para la obtención de la covarianza..... | 19 |
| Ilustración 5. Modelo en ERDAS para la obtención de la correlación..... | 20 |
| Ilustración 6. Combinación de bandas OIF Imagen L5 Año 1991 | 22 |
| Ilustración 7. Combinación de bandas OIF Imagen L8 Año 2015 | 25 |
| Ilustración 8. Combinación de bandas OIF Imagen L8 Año 2021 | 27 |
| Ilustración 9. Firmas espectrales - leyenda de clases temáticas identificadas | 28 |
| Ilustración 10. Clasificación supervisada año 1991..... | 28 |
| Ilustración 11. Clasificación supervisada 2015 | 29 |
| Ilustración 12. Clasificación supervisada 2021 | 29 |
| Ilustración 13. Verificación año 2015, Izquierda (Imagen con mayor contraste espectral) – Derecha (Imagen clasificada) | 30 |
| Ilustración 14. Confrontación puntos de validación | 31 |
| Ilustración 15. Reporte de exactitud temática L5_1991 | 32 |
| Ilustración 16. Reporte de exactitud temática L8_2015 | 33 |
| Ilustración 17. Reporte de exactitud temática L8_2021 | 33 |
| Ilustración 18. Representación espacial de la distribución de áreas en la zona de estudio..... | 34 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 19. Representación espacial de coberturas importantes como por ejemplo la represa del Muña | 35 |
|--|----|

TABLA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Imágenes satelitales para estudio de análisis multitemporal | 16 |
| Tabla 2. Planchas topográficas disponibles en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi | 16 |
| Tabla 1. Matriz de Covarianza L5 Año 1991 | 20 |
| Tabla 2. Desviación estándar L5 Año 1991 | 21 |
| Tabla 3. Matriz de Correlación L5 Año 1991 | 21 |
| Tabla 4. Matriz OIF L5 Año 1991 | 21 |
| Tabla 5. Matriz de Covarianza L8 Año 2015 | 23 |
| Tabla 6. Desviación estándar L8 Año 2015 | 23 |
| Tabla 7. Matriz de Correlación L8 Año 2015 | 23 |
| Tabla 8. Matriz OIF L8 Año 2015 | 23 |
| Tabla 9. Matriz de Covarianza L8 Año 2021 | 25 |
| Tabla 10. Desviación estándar L8 Año 2021 | 25 |
| Tabla 11. Matriz de Correlación L8 Año 2021 | 25 |
| Tabla 12. Matriz OIF L8 Año 2021 | 26 |
| Tabla 15. Cuadro de áreas de coberturas representativas del sector de estudio escala 1:25.000.. | 35 |
| Tabla 16. Inventario de áreas mineras en las principales veredas | 37 |
| Tabla 17. Descripción de los títulos mineros | 39 |
| Tabla 18. Cuadro de áreas de coberturas Imagen 1991 | 43 |
| Tabla 19. Cuadro de áreas de coberturas Imagen 2015 | 43 |
| Tabla 6. Cuadro de áreas de coberturas Imagen 2021 | 43 |
| Tabla 21. Comparación coberturas multitemporal | 45 |

INTRODUCCIÓN

La actividad minera se ha considerado actualmente como una de las más trabajadas por el ser humano y cuyo proceso trae consigo una relación significativa entre tiempo, espacio y sociedad, pero también medio ambiente debido a que su alta demanda ha causado explotaciones de sustancias que tienen como consecuencia daños preocupantes y desgaste de los territorios.

Esta investigación realiza un análisis sobre la erosión producida desde el año 1990 hasta el 2021 en el Municipio de Soacha debido al uso de la minería a cielo abierto, siendo que esta ha sido una actividad que trae consigo grandes cambios a nivel de infraestructura, pero una afectación significativa al medio ambiente por causa de la explotación de sus recursos minerales.

Si bien, hablar de la minería es abarcar a profundidad un aspecto histórico, actualmente se ha convertido en una actividad que trae beneficios económicos a nivel mundial, pero que también, se realiza por medio de un desgaste energético. En la Minería que se lleva a cabo en el Municipio de Soacha, se destaca que se encuentran diversidad de recursos naturales, los cuales han sido de gran importancia para acelerar o expandir la construcción de la ciudad de Bogotá, la cual tiene una cercanía con el municipio.

Colombia es actualmente uno de los países en América Latina que sufre las consecuencias del impacto ambiental causado por la degradación de suelos o erosión, la cual, se define como un proceso que se produce en la superficie de la corteza terrestre y tiene como resultado las pérdidas del suelo. En el Municipio de Soacha se produce principalmente una erosión antrópica cuyos resultados se deben a la explotación de los recursos minerales que tienen impacto en el paisaje y en la funcionalidad de los ecosistemas (Anaya & Díaz, 2016).

La explotación de minerales a cielo abierto genera impactos ambientales que en algunos casos son irreversibles; surgiendo la necesidad de implementar tecnologías novedosas para mitigar y mejorar su extracción. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten estudiar de forma integral los componentes de los ecosistemas que se encuentran en un proyecto minero, brindando conocimiento en las áreas que se pueden intervenir generando el menor impacto ambiental posible.

El municipio de Soacha se encuentra ubicado al suroccidente de la ciudad de Bogotá, posee un área de 184 km² donde aproximadamente el 15% del territorio se encuentra dedicado a la explotación de materiales de construcción como gravas, arenas, areniscas y recebos; actividad que se desarrolla desde la época de los 70's debido a las características ambientales. Este sector presenta los yacimientos de materiales más importantes de la Sabana de Bogotá; sin embargo, no hay datos certeros de la cantidad de canteras que se encuentran de manera ilegal y/o informal y que actúan bajo esta modalidad, aunque se estima que casi el 90% de las canteras operan sin la licencia expedida por el Ministerio de Minas y Energía, es decir, sin los requisitos de ley; según los títulos mineros otorgados por la Agencia Nacional de Minería (ANM) existen 68 títulos para explotar materiales de construcción, de los cuales 11 están vencidos y sólo 12 poseen plan de manejo ambiental.

Debido a las malas prácticas que se han realizado en la actividad minera y la explotación de materiales se han aumentado las consecuencias ambientales; así mismo, se puede mencionar que, una de las causas que conllevan a esta mala praxis se debe especialmente al escaso conocimiento que tiene la comunidad sobre el

impacto ambiental, pero también, la escasa participación de los actores institucionales que no poseen normativas o planes de gestión, es decir, el control de la actividad es nulo (Pérez & Betancur, 2016).

En virtud de lo mencionado con anterioridad, en el Municipio de Soacha es importante tener en cuenta que el paisaje terrestre debe seguir cuatro ciclos o procesos ecológicos para funcionar de manera adecuada, estos son: agua, biogeoquímicos o nutrientes, flujo de energía y dinámica de las comunidades, los que se han visto afectados por las actividades mineras a cielo abierto, puesto que estas requieren de un descapote total del terreno y es necesario que se adecue el área para realizar actividades de explotación y que no se tenga como consecuencia una pérdida de cobertura natural.

La actividad minera a nivel mundial se realiza como un medio para la consecución u obtención de materiales provenientes de la tierra. Actualmente, las prácticas realizadas en esta actividad han influido en el impacto al medio ambiente y con ello afectaciones no solo para las personas que la ejecutan, sino también para aquellas que están ubicadas alrededor de las minas. Partiendo de esta situación, se presenta que es de vital importancia indagar las causas más significativas que han llevado a la zona minera de Soacha a una erosión y como por medio de un análisis multitemporal se pueden obtener respuestas a la situación (Latorre & Tovar, 2017).

El sistema de explotación utilizado en este municipio para la extracción de minerales es a cielo abierto, siendo este tipo de minería la que genera mayor impacto y alteración en la corteza terrestre, dejando, por ejemplo, depresiones debido a la cantidad de material que se extrae durante su explotación (Belloti, 2011). La minería a cielo abierto ha traído consigo un impacto negativo a la superficie, por esta razón, es de vital importancia reconocer cuál ha sido el que presenta la de Soacha debido a que es un municipio en el que se ejecuta constantemente esta actividad.

El conjunto de malas prácticas y condiciones, como el método de explotación, el incumpliendo en la aplicación de los planes de manejo ambiental, y la baja regulación de la actividad por parte de las entidades ha ocasionado y continúa generando impactos ambientales negativos asociados principalmente al cambio de uso del suelo, el cual se establece como uno de los factores directamente relacionados con las dinámicas ecosistémicas de un lugar, alterando procesos y ciclos ecológicos (Galindo & Silva, 2016). Estos eventos pueden generar un peligro natural (degradación del suelo, avalanchas, deslizamientos de tierra) importante el cual produce pérdidas sociales y económicas de grandes consecuencias.

Comprendiendo lo anterior, la presente investigación se basa especialmente en fomentar desde una perspectiva legal y teórica los cambios que se requieren y la importancia de relacionar factores tipo políticos, económicos y ecológicos para que se obtenga un adecuado manejo de los recursos naturales extraídos de la mina durante el proceso, además, por este medio se busca reconocer áreas susceptibles al deterioro ambiental, con la finalidad de que se incorpore de manera integral un plan de buenas prácticas y se disminuyan los impactos en las zonas aledañas.

En este sentido, el análisis multitemporal empleando imágenes satelitales tipo Landsat, las cuales permiten determinar cambios de cobertura, desde la estimación de pérdida de suelo, hasta los cambios que sufren las coberturas vegetales como consecuencia de un fenómeno natural o de origen antrópico. Se constituye como uno método fundamental y eficaz para la comparación y determinación de cambios generados en un lapso de tiempo (Bedoya, Portillo, & Sáenz, 2016).

Motivo por el cual, se pretende evaluar el comportamiento de la erosión para el año 1990 (Donde se datan las primeras concesiones de títulos mineros para el sector por la autoridad minera (ANM), al año 2021, en tres periodos; en el polígono minero sur del municipio de Soacha ubicado en el corregimiento 1, su área se encuentra comprendida desde el límite del área protectora de los cerros del sur, en límites con el área urbana del Municipio hasta la vereda San Jorge donde el paisaje posee alto nivel de erosión.

Pregunta de investigación

¿Cuál es comportamiento espacio temporal de la erosión asociada a las dinámicas económicas de la explotación minera a cielo abierto en el corregimiento 1, del polígono minero Sur del municipio de Soacha, Cundinamarca?

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Dentro de este apartado, se hace una revisión de las teorías y conceptos que se encuentran relacionados con la investigación a fin poner al lector en contexto con lo que son los estudios multitemporales como una medida espacio temporal frente a fenómenos ambientales. Comprendiendo lo mencionado, se encuentra definido lo que son estudios multitemporales de la siguiente manera:

Inicialmente, se definen los estudios multitemporales como análisis y evaluaciones que se realizan de manera espacial por medio de fotografías aéreas, imágenes satélites o mapas y cuya función es hacer una comparación de datos desde un momento específico de una región o actividad para identificar sus cambios y obtener conclusiones de estos a través del tiempo, es un tipo de secuencia en la que se disponen los datos (Ordóñez & Serna, 2015).

Según lo que menciona (Montiel & Villareal, 2004) este tipo de análisis permite que se evalúe un medio natural que se encuentre degradado para revisar su estado o el impacto que ha tenido, en este caso el nivel de degradación o en su defecto, comparar el estado actual antes de la degradación. Por este motivo, se considera que es uno de los métodos más eficaces a la hora de identificar cambios en periodos de tiempo.

Ahora bien, se pueden utilizar diversos métodos o formas de obtener información de manera satelital para la comparación temporal, como lo es la Teledetección, comprendida como un método de obtención de información de la superficie terrestre sin la necesidad de tener contacto con esta. Se realiza por medio de la detección y grabación de energía que se emite. El proceso se lleva a cabo de la siguiente manera: se refleja, procesa y analiza la información. Además, se puede definir como un tipo de tecnología que emite información confiable de la tierra y el medio ambiente a través de imágenes de sensores (Labrador, Évora, & Arbelo, 2012).

La Teledetección es un concepto que se ha establecido como ciencia o método que se ejecuta por medio de procedimientos especializados, por lo cual, sus imágenes pueden generar diversos productos y con ello, se obtienen aplicaciones diferentes, mapas variados y clasificaciones digitales para estudiar fenómenos ambientales. Se trabaja de la mano con el procesamiento digital de imágenes, SIG (Sistema de Información Geográfica), Fotointerpretación y fotogrametría digital.

En este orden de ideas, es la teledetección fundamental para tomar información de la superficie a través de sensores remotos dentro de las plataformas espaciales sin la necesidad de que haya o exista comunicación e interacción alguna, esto se debe precisamente a que el sensor y el terreno identifican o interpretan la tierra; sin embargo, esta técnica sigue en perfeccionamiento o adaptación, ya que se buscan mejores resultados y disponibilidad de imágenes ante la presencia de nuevas tecnologías (Reyes, 2019).

De la existencia de la teledetección se ha obtenido que actualmente sea un método que sigue estando disponible aun cuando se encuentra en vuelto en diferente tecnología, por tal razón, se ha implementado como un método en distintos proyectos para obtener imagen, ventajas, información de los cambios.

Además, se pueden utilizar las imágenes satelitales, que son aquellas que se obtienen por medio de un sensor el cual se instala en un satélite artificial durante un momento o situación emitida por la radiación electromagnética de un cuerpo celeste. La imagen satelital es transmitida posteriormente a instalaciones terrenas con el fin de visualizarlas, procederlas y analizarlas (Peguero, 2016). Hoy en día, se pueden

encontrar diversos sensores que tienen la finalidad de captar amplios rangos del espectro electromagnético y con ello se obtiene información espacial.

En este orden de ideas, se puede mencionar las imágenes Landsat como una misión satelital realizada por medio de observación de la tierra y considerada la más antigua, opera desde 1972 generando imágenes y produciendo datos de las imágenes satelitales hasta la actualidad. Se realiza por medio de un sensor dentro de un satélite artificial que envía mensajes o fotografías a una estación terrena para que sean procesadas. Esta información o el uso de los datos se genera en menos tiempo con el fin de que se pueda seguir la evolución del fenómeno al cual se hace referencia; no obstante, debido al avance tecnológico, actualmente se pueden obtener imágenes que tienen mayor resolución o con más cantidad de bandas en el espectro electromagnético, es de decir de 12 bandas a una resolución máxima de 15m para mayor disponibilidad de los usuarios, ya que son beneficiarios debido a que son imágenes que ante el ojo humano son invisibles y su potencial puede ser utilizado para fines investigativos (Rodríguez & Arredonda, 2005).

Ahora bien, es fundamental abarcar temáticas que competen a los elementos terrenales, entre las que se encuentran las coberturas de la tierra. Hablar de las coberturas de la tierra es adentrarse a un proceso descriptivo de su composición física en el cual se encuentran:

- Ríos
- Montañas
- Lagunas – Lagos
- Poblaciones
- Capas vegetales
- Áreas sin vegetación, entre otros.

El uso de la tierra se puede comprender como una actividad realizada específicamente por el hombre en la cual se utilizan de manera conjunta las coberturas de la tierra con el fin de satisfacer sus necesidades sociales. El uso de la tierra, además, se encuentra relacionado con una diversidad de factores tanto económicos, como históricos, políticos y culturales que pueden afectar directamente al ecosistema (Britos & Barchuk, 2008).

En este orden de ideas, se habla de la cobertura y el uso del suelo al referirse a elementos en los que se llevan a cabo actividades humanas. Actualmente existe información que evidencia que, en la cobertura, debido al uso de la tierra se han producido diferentes programas de manejo ambiental para identificar la transformación a nivel de paisajes, magnitudes, recursos naturales y escenarios futuros sobre la administración de recursos, uso de la tierra y como interviene o debe hacerlo el hombre (Britos & Barchuk, 2013).

Debido al uso inadecuado de los elementos terrenales, se pueden presentar diversas consecuencias, como es el caso de la erosión del suelo, definido como el “proceso de desagregación o desprendimiento, transporte o arrastre y deposición de materiales del suelo de un lugar a otro causado por la lluvia, el viento o la intervención antrópica” (Veiga & Prado, 1993) Los agentes erosivos tienen como consecuencia una degradación progresiva que afecta directamente a la estructura física o el suelo trayendo consigo un estado de vulnerabilidad y afectación a las funciones del suelo, disminuyendo de manera progresiva la capacidad de retener agua y/o nutrientes disponibles para las plantas, es decir, se obtiene una reducción de la fertilidad (Alba, Cermeño, & Barbero, 2011).

Según el (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014) se conocen tres tipos de erosión del suelo, estas pueden ser:

1. Erosión hídrica, cuando el agente causante del arrastre del suelo es el agua.
2. Erosión eólica, cuando el agente causante es el viento.
3. Erosión antrópica, cuando el efecto del agua o viento es aumentado por las malas prácticas agrícolas o por actividades de remoción de la cobertura vegetal como la deforestación o tala de bosques, los incendios forestales y la sobreexplotación de cultivos o explotación intensiva.

En Colombia, se han realizado diferentes actividades para determinar la acción del ser humano, entre las que se destaca la Minería, empezada desde la época precolombina y desarrollada inicialmente para la explotación de oro en los años 1910 y la extracción de carbón para el uso de las máquinas a vapor (Cárdenas & Reina, 2008). Otros autores han determinado que la Minería se ha considerado como un medio por el cual los países obtienen su industrialización (Sotelo, 2014).

En la historia de la minería es pertinente mencionar que en los años 90 se dio un auge significativo en lo que respecta a la explotación de los recursos, trayendo consigo cambios políticos y normativos que se encuentran establecidos dentro de la Constitución Política de 1991, especialmente en su artículo 361 a través del cual se crea el Fondo Nacional de Regalías.

En este orden de ideas, para el año 2006 se produjo un plan de Desarrollo minero a fin de desarrollar la actividad, este plan, destaca que el sector es uno de los principales y necesarios para el crecimiento y desarrollo económico de la sociedad colombiana debido a que genera empleo, pero también, es el principal sector que permite el crecimiento del PIB según lo indica el Ministerio de Minas y Energías en la resolución 4134 de 2011.

Estado del Conocimiento

Teniendo en cuenta la temática de estudio es pertinente mencionar que han surgido investigaciones relacionadas con los estudios multitemporales para hacer frente a fenómenos sociales y geográficos como es el caso de las erosiones, por ende, se realiza un recorrido de investigaciones a nivel nacional que evidencian el uso de métodos necesarios para la obtención de información y comparación temporal de los cambios o transformaciones que tienen los fenómenos naturales, entre estos se encuentran:

(Orozco & Valbuena, 2016) la cual abarca un análisis multitemporal a través de imágenes de sensores remotos para la determinación del cambio del suelo del Municipio de Barrancas y Albania en el Departamento de la Guajira, el cual se ha producido por la explotación a cielo abierto de la Mina El Cerrejón. Esta investigación se propuso principalmente caracterizar e identificar la dinámica físico – espacial en las áreas de explotación a través del tiempo por medio de un análisis volumétrico y evolución del estado de las variables ambientales.

A través de la investigación de (Orozco & Valbuena, 2016) se tuvieron en cuenta aspectos fisiográficos como el clima, la hidrografía, vegetación y una evaluación de la geología a través de la estratigrafía. También se implementó una geología estructural para identificar las fallas en la provincia de la baja Guajira. La metodología implementada tuvo en cuenta cinco (5) fases: preparación, procesamiento de datos, análisis planimétrico, análisis volumétrico, análisis multitemporal de vegetación.

Los resultados obtenidos evidencian que la zona refleja una complejidad de relieve, donde las elevaciones sobrepasan 1200 metros. Además, se observa que en 1985 la vegetación es más densa al momento de iniciar

la actividad de extracción, para el año 1988 la composición de color incrementa el color magenta oscuro que representa los suelos excavados, es decir, fueron aumentando las áreas de explotación. Para 1996 se puede observar que la actividad extractiva ha incrementado y hay poca vegetación. Para 1998 la vegetación se incrementó debido a la época. En el 2007 se buscó reforestar áreas debido a que se han abandonado algunas que ya han sido explotadas al norte; mientras que al sur la explotación se amplía. En el año 2014 se extiende la explotación al sur y se aumenta la producción en comparación con los otros años.

En conclusión, a través de las técnicas o métodos multitemporales se desarrollan diferentes procesos que permiten obtener imágenes e interpretar los cambios y/o transformaciones que son elementales para determinar la magnitud de la superficie terrestre y las consecuencias que puede traer la explotación a cielo abierto como principal actividad realizada por el hombre. Este estudio brinda un acercamiento significativo para consolidar la presente investigación por medio del uso de herramientas como las imágenes satelitales.

Por su parte, (Anaya & Díaz, 2016) presentan un estudio que realiza un análisis sobre las coberturas naturales y la fragmentación que ha producido la minería a cielo abierto en el Municipio La Jagua de Ibérico. Como objetivos se propuso identificar inicialmente las coberturas naturales y la zona en la que se lleva a cabo la actividad de extracción minera en el municipio, continuamente se determinó la dinámica espacio – temporal y se evaluó el estado de fragmentación.

Se reconoce que a partir de la extracción minera en el municipio se han identificado diferentes impactos como en el caso de la disminución de reservas, contaminación del recurso hídrico, de los suelos, afectación a la calidad de aire, cambio climático, entre otros que repercuten directamente en la población aledaña. Para llevar a cabo el estudio, inicialmente se reconocieron las coberturas del municipio como lo son: Bosque natural degradado, bosque protector, rastrojos y pastos, y, zonas de vida como: Bosque seco tropical, bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo premontano y bosque muy húmedo montano bajo.

La metodología implementada fue documental y cartográfico utilizando diferentes herramientas como es el caso de los organismos estatales, licencias ambientales, planeaciones municipales y el análisis multitemporal que evidencia la transformación de las coberturas por el uso de la minería a cielo abierto. Se utilizaron visores como SIAC y SIGOT. Se realizó la investigación a través de fases como: recopilación de información, procesamiento de información, verificación o salida de campo, identificación de la cobertura, análisis multitemporal y análisis de fragmentación.

Como resultados se obtuvo que el cambio entre los años 1989 y 2015 de la cobertura del municipio evidencia tanto pérdidas como ganancias, lo cual es producto de la actividad minera. Se pudo inferir que, existió mayor pérdida en los bosques de galería y ripario ya que redujeron aproximadamente la mitad del área integral, seguidos el bosque abierto y arbustal. Por su parte, la extracción minera aumenta once veces su área, generando cambios en las dinámicas sociales, físicas y económicas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar el análisis multitemporal para determinar el comportamiento de la erosión producida por la minería a cielo abierto, para el periodo 1991 - 2021, en el polígono minero Sur, del municipio de Soacha, Cundinamarca.

Objetivos específicos

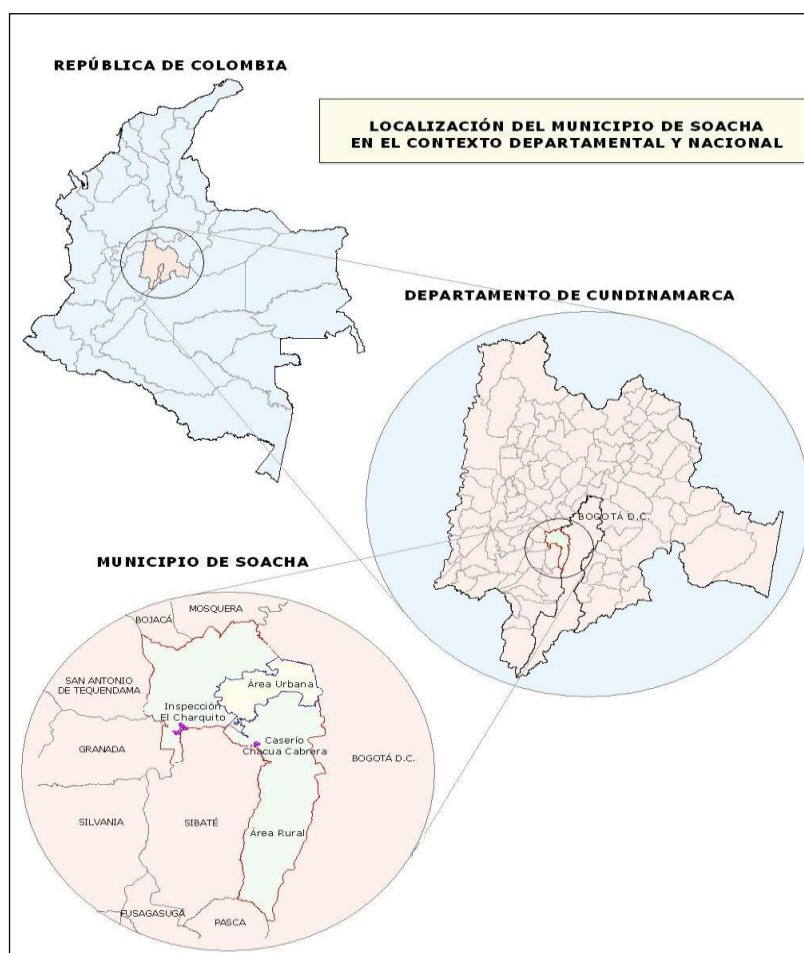
- 1) Determinar el área de erosión por explotación de materiales de construcción para el periodo 1990-2021 a través de la interpretación de imágenes satelitales.
- 2) Analizar la dinámica de los procesos de pérdida de suelo por erosión antrópica en el polígono minero Sur del municipio de Soacha, Cundinamarca.

METODOLOGÍA

Área de estudio

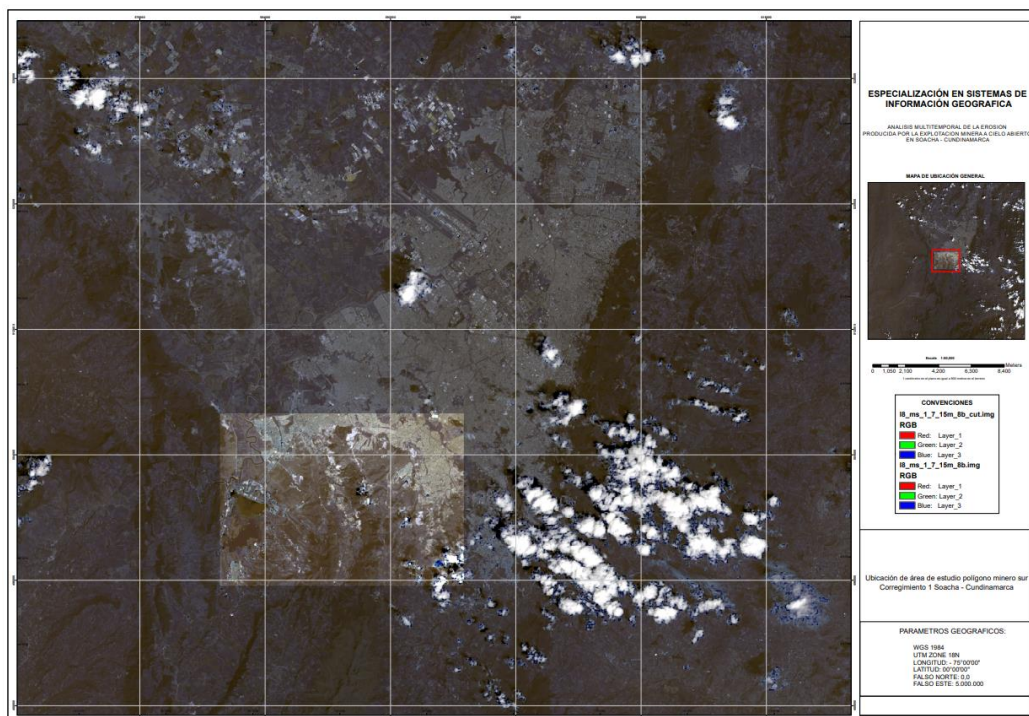
El estudio se realizó en el Municipio de Soacha, localizado en la parte central del Departamento de Cundinamarca, a 18 Km hacia el costado suroccidental del perímetro urbano del Distrito Capital. Limita por el norte con los municipios de Bojacá y Mosquera, por el este con Bogotá D.C., por el sur con Sibaté y Pasca y por el oeste con Granada y San Antonio del Tequendama. Su cabecera municipal está ubicada a los 04°35'14" de latitud norte y 74°13'17" de longitud oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 2.540 a 2820 m, temperatura media de 11.7°C y precipitación media anual de 777 mm.

Figura 1. Localización general Municipio de Soacha (sin escala)



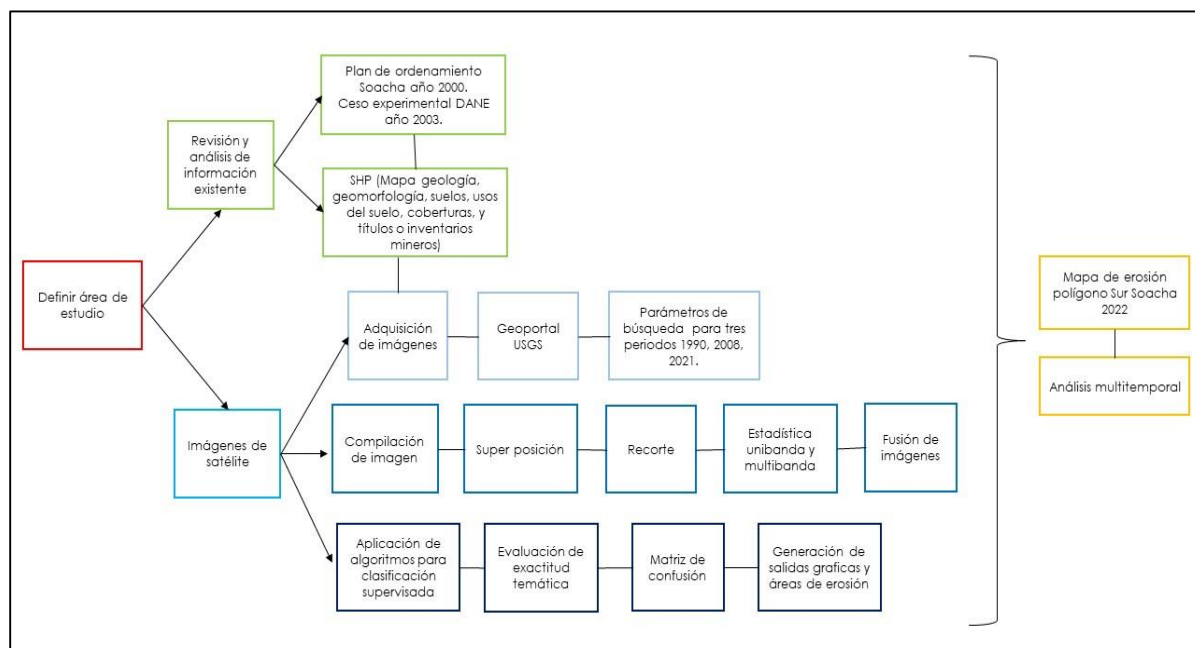
Fuente: (Departamento Administrativo Nacional de Estadística. , 2013)

Figura 2. Mapa área de estudio



Fuente: Imagen landsat, modificado por Autor, 2022.

Figura 3. Diagrama de metodología general



Fuente: Autor, 2022.

Revisión de información

La información fue recopilada a través del método documental y la cartografía utilizando diferentes recursos como las Licencias Ambientales y CAR de la Secretaría de Planeación Municipal de Soacha, así mismo, se llevó a cabo un análisis multitemporal del comportamiento erosivo que se presentó a causa de la minería a cielo abierto, por medio de imágenes satélites. Anterior a esto se obtuvo la aceptación del tamaño pixel y porcentaje de nubosidad. Se interpretaron las imágenes en tres años específicos 1990, 2008, 2021 como se indica en la Tabla 1.

Para el estudio se utilizaron imágenes satelitales y planchas topográficas a través del servicio geológico de Estados Unidos y del Geoportal de la página oficial del IGAC como principales insumos para la construcción del análisis.

Tabla 1. Imágenes satelitales para estudio de análisis multitemporal

| Año | Elipsoide WGS84 | Proyección UTM-Z18 | Sensor |
|------|--------------------|-----------------------|-----------|
| 1991 | | | Landsat |
| 2015 | | | Landsat 8 |
| 2021 | | | Landsat 8 |

Fuente: Geoportal USGS

En el Instituto Geográfico Agustín Codazzi existen planchas del sector en escalas 1:2.000, 1:5.000 y 1:25.000 como se evidencia en la Tabla 2.

Tabla 2. Planchas topográficas disponibles en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi

| Referencia de la plancha | Escala | Año |
|--|-----------|-------------|
| 246 – II – A, 246 – II - B | 1:25.000 | 1969 |
| K-66, L-56, L-57, L-67 y L-68 | 1:5.000 | 1960 |
| K-66-30, K-66-40, K-66-50, L-56-2, L-56-12, L-57-3, L-57-13, L-67-21, L-67-22, L-67-31, L-67-32, L-68-23 y L-68-33 | 1:2.000 | 1978 - 1982 |
| Coberturas de la tierra | 1:100.000 | 2001 |
| Minas y Títulos mineros vigentes | 1:100.000 | 2012 |

Fuente: Geoportal USGS

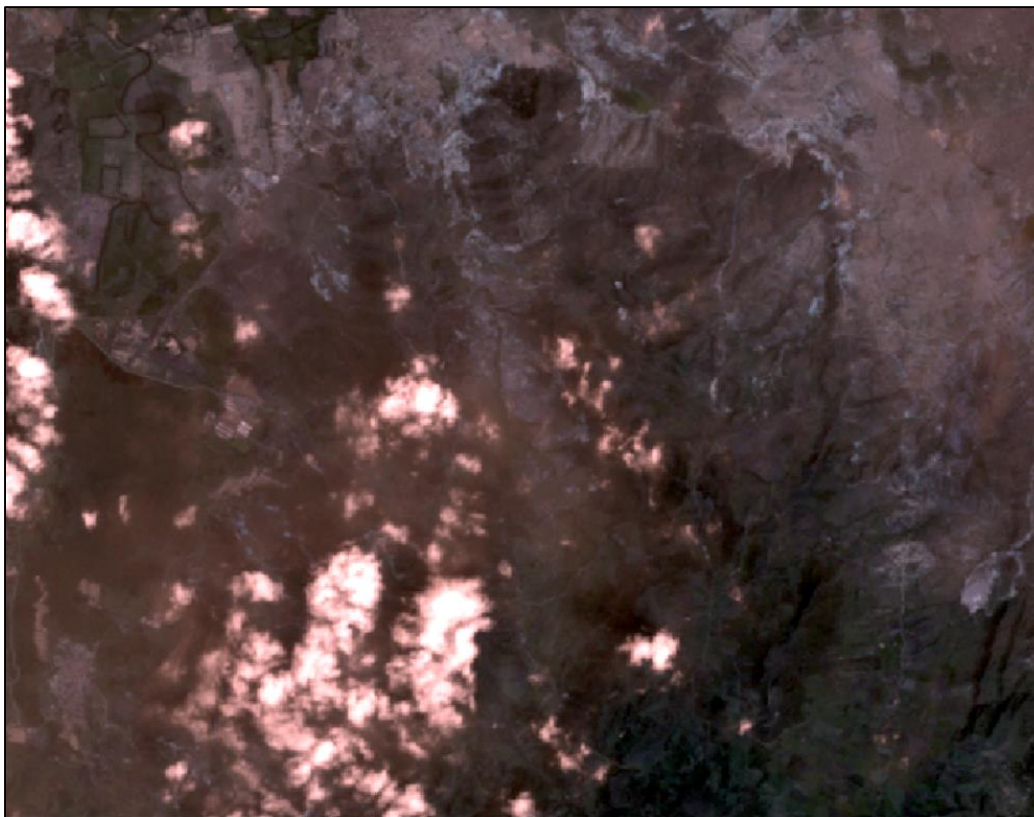
Adquisición y recopilación de imágenes

Para el presente estudio se adquieren las imágenes del Satélite LANDSAT desarrollado por la NASA. Landsat 5 fue lanzado en la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg en California en 1984 – 2013 casi 29 años de observación, posee instrumentos denominados Multispectral Scanner (MSS) y Thematic Mapper (TM). Landsat 5 estableció un récord mundial Guinness para el "satélite de observación de la Tierra en funcionamiento más largo"¹, Estas imágenes están compuestas por 7 bandas espectrales, con resolución

¹ <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>

espacial de 30 metros en las bandas del visible, el uso de estas imágenes se funda principalmente para el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas, el estudio de los recursos naturales; entre otras.² motivos por los cuales fue descargada la imagen LT05_L1TP_008057_19911204_20200914_02_T1 para el año de 1991(Anexo 1. Adquisición de imágenes), a continuación, se ilustra la imagen obtenida:

Ilustración 1. Imagen Landsat 5 descargada, año 1991.



Fuente: NASA, modificado por autor, 2022.

Por otra parte, las imágenes para el año 2015 y 2021 (Anexo 1. Adquisición de imágenes) fueron obtenidas del satélite Landsat 8 el cual inicio oficialmente sus operaciones en el año 2013. El USGS ahora dirige el equipo de operaciones de vuelo de satélites en el Centro de Operaciones de la Misión, que permanece situado en Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA en Greenbelt, Md. A diferencia de la Landsat 5 se encuentra compuesto por 11 bandas espectrales, con resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible. Se adquiere la imagen LC08_L2SP_008057_20150104_20200910_02_T1 para el año 2015 obteniendo la siguiente ilustración:

² Aspectos técnicos de las imágenes LANDSAT. INEGI

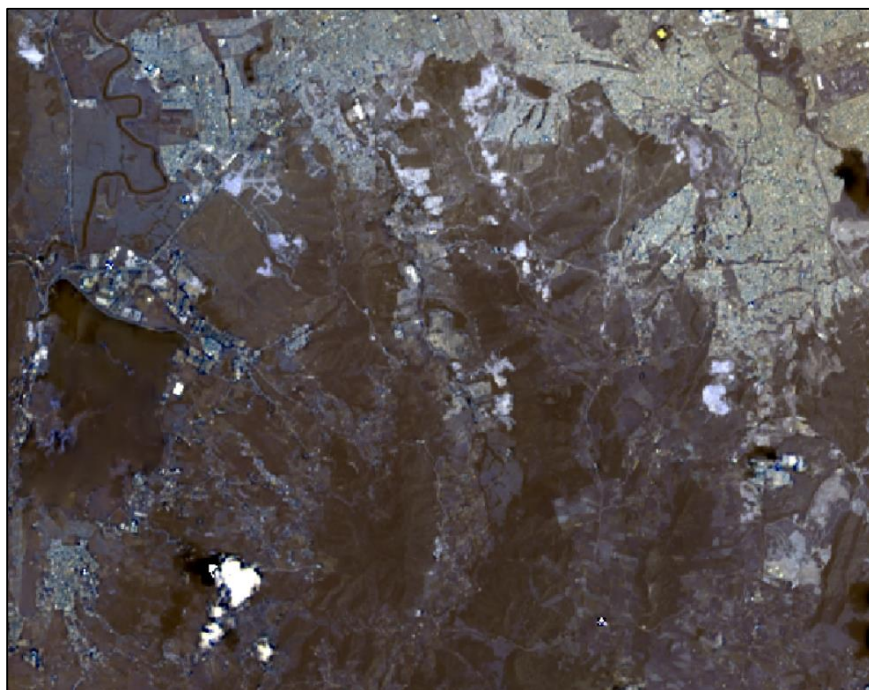
Ilustración 2. Imagen Landsat 8 descargada, año 2015.



Fuente: NASA, modificado por autor, 2022.

Finalmente, se encuentra el año 2021, cerrando el periodo del análisis cualitativo, recopilando la imagen Landsat 8 LC08_L2SP_008057_20211003_20211013_02_T1 obteniendo la siguiente ilustración:

Ilustración 3. Imagen Landsat 8, descargada año 2021.



Fuente: NASA, modificado por autor, 2022.

RESULTADOS

Análisis estadístico y visual de bandas

Para el análisis de las estadísticas multibanda se emplea El factor del índice óptimo (OIF) es cual es un indicador que selecciona la combinación de color óptima entre tres bandas de una imagen satelital a partir de la relación entre la varianza de los datos y la suma de las desviaciones estándar (Chavez Jr, 1982). Y su planteamiento matemático se basa en la siguiente formula:

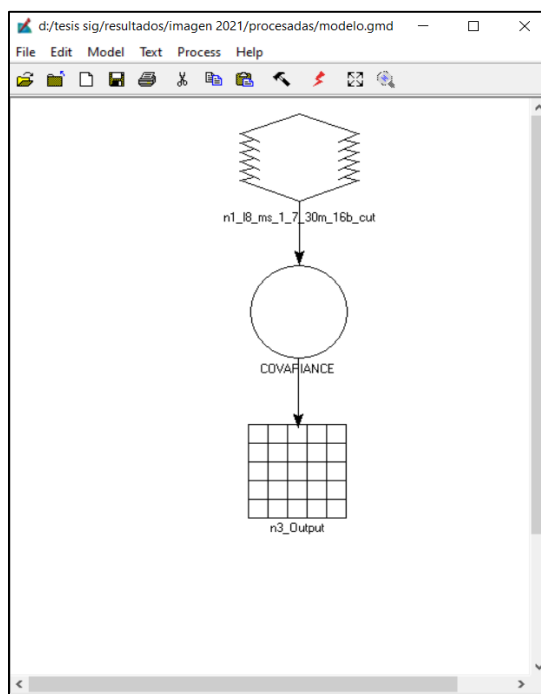
$$OIF = \frac{\sum_{K=1}^3 S_k}{\sum_{j=1}^3 Abs(r_j)}$$

Se realizan tres modelos para cada periodo de tiempo a través de la herramienta model maker del software ERDAS IMAGINE 2014, donde se realizan dos procesos para poder determinar la covarianza y correlación, siendo insumos necesarios para la obtención de la matriz OIF como se muestra a continuación, obteniendo los resultados de las tablas 1 – 12 (Anexo 2. Factor del índice optimo).

Matriz de covarianza

La covarianza mide la fuerza de la relación lineal entre dos variables numéricas (X & Y). Este es producto de los parámetros estadísticos básicos, tales como los valores de la desviación mínima, máxima, media y estándar para cada banda.

Ilustración 4. Modelo en ERDAS para la obtención de la covarianza



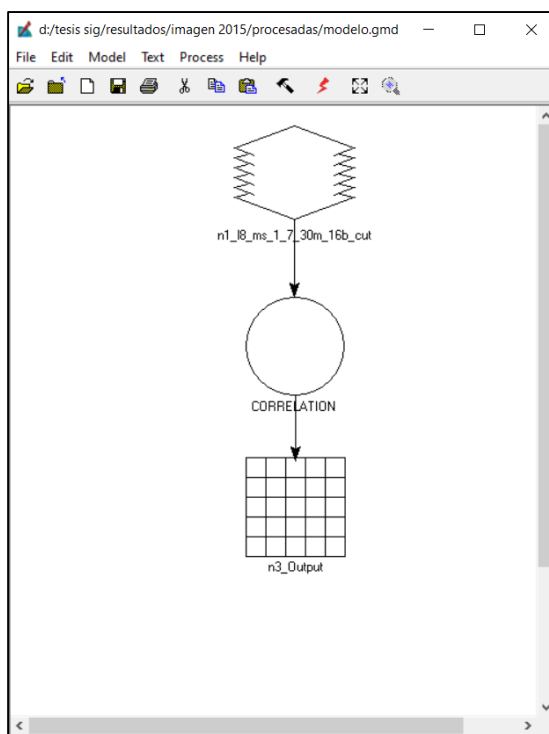
Fuente: Autor, 2022.

La covarianza de dos bandas es la intersección de la fila y la columna apropiadas. Los valores de la matriz de covarianza dependen de las unidades de valor, mientras que los valores de la matriz de correlación no.

Matriz Correlación

Esta matriz presenta los valores de celda de una banda a medida que se relacionan con los valores de celda de otra banda. La correlación entre las bandas es una medida de dependencia entre las bandas. Es la relación de la covarianza entre las bandas dividido por el producto de sus desviaciones estándares.

Ilustración 5. Modelo en ERDAS para la obtención de la correlación



Fuente: Autor, 2022.

La correlación varía de +1 a -1. Una correlación positiva indica una relación directa entre dos bandas, tal como cuando los valores de celda de una capa aumentan, es probable que los valores de celda de otra capa también aumenten.

Tabla 3. Matriz de Covarianza L5 Año 1991

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 1100.96151 | 624.511286 | 714.745825 | 482.476488 | 828.148552 | -151.816116 | 580.07423 |
| 2 | 624.511286 | 379.011379 | 437.064636 | 303.696437 | 531.537462 | -78.3092597 | 374.741063 |
| 3 | 714.745825 | 437.064636 | 510.370271 | 341.720859 | 638.155021 | -80.3970409 | 454.860198 |
| 4 | 482.476488 | 303.696437 | 341.720859 | 376.467997 | 491.706443 | -58.8681672 | 293.025712 |
| 5 | 828.148552 | 531.537462 | 638.155021 | 491.706443 | 1098.31436 | -14.6159501 | 731.243727 |
| 6 | -151.816116 | -78.3092597 | -80.3970409 | -58.8681672 | -14.6159501 | 73.3990355 | -9.51289041 |

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
| 7 | 580.07423 | 374.741063 | 454.860198 | 293.025712 | 731.243727 | -9.51289041 | 524.746484 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 4. Desviación estándar L5 Año 1991

| 1,1 | 2,2 | 3,3 | 4,4 | 5,5 | 6,6 | 7,7 |
|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 33.1807401 | 19.4682146 | 22.591376 | 19.4027832 | 33.1408261 | 8.56732371 | 22.9073456 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 5. Matriz de Correlación L5 Año 1991

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1.00 | 0.97 | 0.95 | 0.75 | 0.75 | -0.53 | 0.76 |
| 2 | 0.97 | 1.00 | 0.99 | 0.80 | 0.82 | -0.47 | 0.84 |
| 3 | 0.95 | 0.99 | 1.00 | 0.78 | 0.85 | -0.42 | 0.88 |
| 4 | 0.75 | 0.80 | 0.78 | 1.00 | 0.76 | -0.35 | 0.66 |
| 5 | 0.75 | 0.82 | 0.85 | 0.76 | 1.00 | -0.05 | 0.96 |
| 6 | -0.53 | -0.47 | -0.42 | -0.35 | -0.05 | 1.00 | -0.05 |
| 7 | 0.76 | 0.84 | 0.88 | 0.66 | 0.96 | -0.05 | 1.00 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 6. Matriz OIF L5 Año 1991

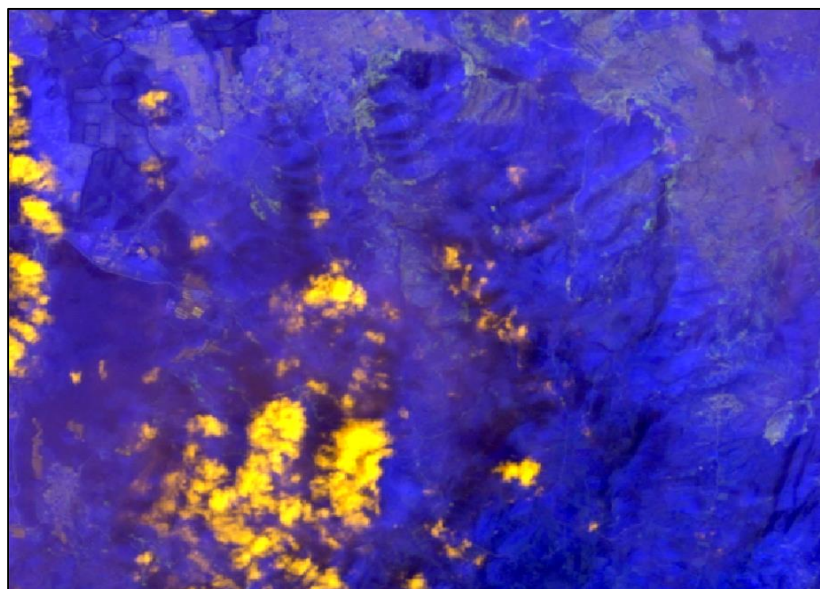
| No | R | G | B | Suma de desviaciones estándar | Suma del Coeficiente de correlación | Valor absoluto de la suma del coeficiente de correlación | OIF |
|----|---|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|---------|
| 1 | 1 | 2 | 3 | 75.2 | 2.9 | 2.9 | 25.8 |
| 2 | 1 | 2 | 4 | 72.1 | 2.5 | 2.5 | 28.6 |
| 3 | 1 | 2 | 5 | 85.8 | 2.5 | 2.5 | 33.7 |
| 4 | 1 | 2 | 6 | 61.2 | 0.0 | 0.0 | 1664.3 |
| 5 | 1 | 2 | 7 | 75.6 | 2.6 | 2.6 | 29.4 |
| 6 | 1 | 3 | 4 | 75.2 | 2.5 | 2.5 | 30.3 |
| 7 | 1 | 3 | 5 | 88.9 | 2.6 | 2.6 | 34.7 |
| 8 | 1 | 3 | 6 | 61.2 | 0.0 | 0.0 | 15068.1 |
| 9 | 1 | 3 | 7 | 78.7 | 2.6 | 2.6 | 30.3 |
| 10 | 1 | 4 | 5 | 85.7 | 2.3 | 2.3 | 37.8 |
| 11 | 1 | 4 | 6 | 61.2 | -0.1 | 0.1 | 440.7 |
| 12 | 1 | 4 | 7 | 75.5 | 2.2 | 2.2 | 34.8 |
| 13 | 1 | 5 | 6 | 74.9 | 0.2 | 0.2 | 446.9 |
| 14 | 1 | 5 | 7 | 89.2 | 2.5 | 2.5 | 36.0 |
| 15 | 1 | 6 | 7 | 64.7 | 0.2 | 0.2 | 357.9 |
| 16 | 2 | 3 | 4 | 61.5 | 2.6 | 2.6 | 23.8 |
| 17 | 2 | 3 | 5 | 75.2 | 2.7 | 2.7 | 28.2 |
| 18 | 2 | 3 | 6 | 50.6 | 0.1 | 0.1 | 465.1 |
| 19 | 2 | 3 | 7 | 65.0 | 2.7 | 2.7 | 23.9 |
| 20 | 2 | 4 | 5 | 72.0 | 2.4 | 2.4 | 30.1 |

| No | R | G | B | Suma de desviaciones estándar | Suma del Coeficiente de correlación | Valor absoluto de la suma del coeficiente de correlación | OIF |
|----|---|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|--------|
| 21 | 2 | 4 | 6 | 47.4 | 0.0 | 0.0 | 2413.5 |
| 22 | 2 | 4 | 7 | 61.8 | 2.3 | 2.3 | 26.8 |
| 23 | 2 | 5 | 6 | 61.2 | 0.3 | 0.3 | 202.0 |
| 24 | 2 | 5 | 7 | 75.5 | 2.6 | 2.6 | 28.7 |
| 25 | 2 | 6 | 7 | 50.9 | 0.3 | 0.3 | 158.1 |
| 26 | 3 | 4 | 5 | 75.1 | 2.4 | 2.4 | 31.4 |
| 27 | 3 | 4 | 6 | 50.6 | 0.0 | 0.0 | 5024.0 |
| 28 | 3 | 4 | 7 | 64.9 | 2.3 | 2.3 | 28.0 |
| 29 | 3 | 5 | 6 | 64.3 | 0.4 | 0.4 | 166.8 |
| 30 | 3 | 5 | 7 | 78.6 | 2.7 | 2.7 | 29.2 |
| 31 | 3 | 6 | 7 | 54.1 | 0.4 | 0.4 | 130.3 |
| 32 | 4 | 5 | 6 | 61.1 | 0.4 | 0.4 | 170.2 |
| 33 | 4 | 5 | 7 | 75.5 | 2.4 | 2.4 | 31.6 |
| 34 | 4 | 6 | 7 | 50.9 | 0.3 | 0.3 | 198.2 |
| 35 | 5 | 6 | 7 | 64.6 | 0.9 | 0.9 | 74.8 |

Fuente: Autor, 2022.

A partir del cálculo de los valores de las matrices de covarianza, y correlación, se obtiene el cálculo del factor del índice óptimo (OIF), donde se obtiene el factor del índice óptimo para 35 combinaciones. El mayor contraste espectral obtenido es 15068.1 obteniendo la combinación número 8 (Rojo 1, Verde 3, Azul 6), siendo esta combinación la óptima para realizar un análisis de coberturas. obteniendo la siguiente salida gráfica:

Ilustración 6. Combinación de bandas OIF Imagen L5 Año 1991



Fuente: Autor, 2022.

Tabla 7. Matriz de Covarianza L8 Año 2015

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 3014909.4 | 3235609.12 | 3584532.93 | 4025275.39 | 2686767.29 | 3932386.47 | 4062005.16 |
| 2 | 3235609.12 | 3549172.41 | 4025713.78 | 4552438.27 | 3043532.48 | 4517024.63 | 4666998.21 |
| 3 | 3584532.93 | 4025713.78 | 4927791.99 | 5611658.04 | 4373172.5 | 6042969.67 | 5939570.43 |
| 4 | 4025275.39 | 4552438.27 | 5611658.04 | 6553325.28 | 4518254 | 7028245.22 | 6995965.34 |
| 5 | 2686767.29 | 3043532.48 | 4373172.5 | 4518254 | 12293682.4 | 8313563.08 | 5712381.91 |
| 6 | 3932386.47 | 4517024.63 | 6042969.67 | 7028245.22 | 8313563.08 | 10473113.1 | 9016657.77 |
| 7 | 4062005.16 | 4666998.21 | 5939570.43 | 6995965.34 | 5712381.91 | 9016657.77 | 8690392.04 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 8. Desviación estándar L8 Año 2015

| 1,1 | 2,2 | 3,3 | 4,4 | 5,5 | 6,6 | 7,7 |
|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 33.1807401 | 19.4682146 | 22.591376 | 19.4027832 | 33.1408261 | 8.56732371 | 22.9073456 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 9. Matriz de Correlación L8 Año 2015

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1.00 | 0.99 | 0.93 | 0.91 | 0.44 | 0.70 | 0.79 |
| 2 | 0.99 | 1.00 | 0.96 | 0.94 | 0.46 | 0.74 | 0.84 |
| 3 | 0.93 | 0.96 | 1.00 | 0.99 | 0.56 | 0.84 | 0.91 |
| 4 | 0.91 | 0.94 | 0.99 | 1.00 | 0.50 | 0.85 | 0.93 |
| 5 | 0.44 | 0.46 | 0.56 | 0.50 | 1.00 | 0.73 | 0.55 |
| 6 | 0.70 | 0.74 | 0.84 | 0.85 | 0.73 | 1.00 | 0.95 |
| 7 | 0.79 | 0.84 | 0.91 | 0.93 | 0.55 | 0.95 | 1.00 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 10. Matriz OIF L8 Año 2015

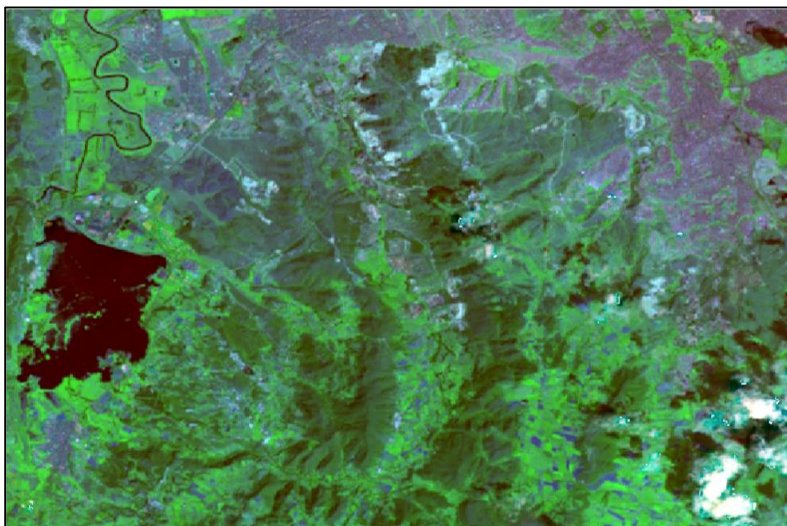
| No | R | G | B | Suma de desviaciones estándar | Suma del Coeficiente de correlación | Valor absoluto de la suma del coeficiente de correlación | OIF |
|----|---|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|--------|
| 1 | 1 | 2 | 3 | 5840.1 | 2.9 | 2.9 | 2026.6 |
| 2 | 1 | 2 | 4 | 6180.2 | 2.8 | 2.8 | 2177.2 |
| 3 | 1 | 2 | 5 | 7126.5 | 1.9 | 1.9 | 3768.2 |
| 4 | 1 | 2 | 6 | 6856.5 | 2.4 | 2.4 | 2821.8 |
| 5 | 1 | 2 | 7 | 6568.2 | 2.6 | 2.6 | 2504.0 |
| 6 | 1 | 3 | 4 | 6516.2 | 2.8 | 2.8 | 2308.2 |
| 7 | 1 | 3 | 5 | 7462.4 | 1.9 | 1.9 | 3860.3 |
| 8 | 1 | 3 | 6 | 6856.5 | 2.5 | 2.5 | 2774.8 |
| 9 | 1 | 3 | 7 | 6904.2 | 2.6 | 2.6 | 2624.0 |
| 10 | 1 | 4 | 5 | 7802.5 | 1.9 | 1.9 | 4216.9 |
| 11 | 1 | 4 | 6 | 7532.5 | 2.5 | 2.5 | 3069.8 |

| No | R | G | B | Suma de desviaciones estándar | Suma del Coeficiente de correlación | Valor absoluto de la suma del coeficiente de correlación | OIF |
|----|---|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|---------------|
| 12 | 1 | 4 | 7 | 7244.2 | 2.6 | 2.6 | 2758.5 |
| 13 | 1 | 5 | 6 | 8478.8 | 1.9 | 1.9 | 4524.9 |
| 14 | 1 | 5 | 7 | 8190.5 | 1.8 | 1.8 | 4582.0 |
| 15 | 1 | 6 | 7 | 7920.5 | 2.4 | 2.4 | 3248.1 |
| 16 | 2 | 3 | 4 | 6663.7 | 2.9 | 2.9 | 2302.6 |
| 17 | 2 | 3 | 5 | 7610.0 | 2.0 | 2.0 | 3833.3 |
| 18 | 2 | 3 | 6 | 7340.0 | 2.5 | 2.5 | 2884.5 |
| 19 | 2 | 3 | 7 | 7051.7 | 2.7 | 2.7 | 2601.6 |
| 20 | 2 | 4 | 5 | 7950.1 | 1.9 | 1.9 | 4166.5 |
| 21 | 2 | 4 | 6 | 7680.1 | 2.5 | 2.5 | 3031.8 |
| 22 | 2 | 4 | 7 | 7391.8 | 2.7 | 2.7 | 2726.3 |
| 23 | 2 | 5 | 6 | 8626.4 | 1.9 | 1.9 | 4459.7 |
| 24 | 2 | 5 | 7 | 8338.1 | 1.9 | 1.9 | 4498.0 |
| 25 | 2 | 6 | 7 | 8068.1 | 2.5 | 2.5 | 3193.6 |
| 26 | 3 | 4 | 5 | 8286.0 | 2.1 | 2.1 | 4036.6 |
| 27 | 3 | 4 | 6 | 8016.0 | 2.7 | 2.7 | 2994.4 |
| 28 | 3 | 4 | 7 | 7727.8 | 2.8 | 2.8 | 2738.2 |
| 29 | 3 | 5 | 6 | 8962.3 | 2.1 | 2.1 | 4196.4 |
| 30 | 3 | 5 | 7 | 8674.0 | 2.0 | 2.0 | 4289.5 |
| 31 | 3 | 6 | 7 | 8404.0 | 2.7 | 2.7 | 3119.6 |
| 32 | 4 | 5 | 6 | 9302.4 | 2.1 | 2.1 | 4462.8 |
| 33 | 4 | 5 | 7 | 9014.1 | 2.0 | 2.0 | 4545.5 |
| 34 | 4 | 6 | 7 | 8744.1 | 2.7 | 2.7 | 3214.1 |
| 35 | 5 | 6 | 7 | 9690.4 | 2.2 | 2.2 | 4344.6 |

Fuente: Autor, 2022.

A partir del cálculo de los valores de las matrices de covarianza, y correlación, se obtiene el cálculo del factor del índice óptimo (OIF), donde se obtiene el factor del índice óptimo para 35 combinaciones. El mayor contraste espectral obtenido es 4582.0 obteniendo la combinación número 14 (Rojo 1, Verde 5, Azul 7), siendo esta combinación la óptima para realizar un análisis de coberturas. obteniendo la siguiente salida gráfica:

Ilustración 7. Combinación de bandas OIF Imagen L8 Año 2015



Fuente: Autor, 2022.

Tabla 11. Matriz de Covarianza L8 Año 2021

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 1821737.16 | 2035454.45 | 2350293.08 | 2810765.83 | 1145017.81 | 2872427.23 | 3089650.08 |
| 2 | 2035454.45 | 2346715.44 | 2776762.26 | 3336699.98 | 1330436.06 | 3429262.28 | 3710868.82 |
| 3 | 2350293.08 | 2776762.26 | 3536420.8 | 4258510.94 | 2265082.54 | 4700615.89 | 4771376.21 |
| 4 | 2810765.83 | 3336699.98 | 4258510.94 | 5277252.9 | 2325682.55 | 5790619.03 | 5943087.73 |
| 5 | 1145017.81 | 1330436.06 | 2265082.54 | 2325682.55 | 9735353.31 | 5904506.65 | 3300520.51 |
| 6 | 2872427.23 | 3429262.28 | 4700615.89 | 5790619.03 | 5904506.65 | 9154067.91 | 7829815.45 |
| 7 | 3089650.08 | 3710868.82 | 4771376.21 | 5943087.73 | 3300520.51 | 7829815.45 | 7881838.84 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 12. Desviación estándar L8 Año 2021

| 1,1 | 2,2 | 3,3 | 4,4 | 5,5 | 6,6 | 7,7 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1349.71744 | 1531.89929 | 1880.53737 | 2297.22722 | 3120.15277 | 3025.56902 | 2807.46128 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 13. Matriz de Correlación L8 Año 2021

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1.00 | 0.98 | 0.93 | 0.91 | 0.27 | 0.70 | 0.82 |
| 2 | 0.98 | 1.00 | 0.96 | 0.95 | 0.28 | 0.74 | 0.86 |
| 3 | 0.93 | 0.96 | 1.00 | 0.99 | 0.39 | 0.83 | 0.90 |
| 4 | 0.91 | 0.95 | 0.99 | 1.00 | 0.32 | 0.83 | 0.92 |
| 5 | 0.27 | 0.28 | 0.39 | 0.32 | 1.00 | 0.63 | 0.38 |
| 6 | 0.70 | 0.74 | 0.83 | 0.83 | 0.63 | 1.00 | 0.92 |
| 7 | 0.82 | 0.86 | 0.90 | 0.92 | 0.38 | 0.92 | 1.00 |

Fuente: Autor, 2022.

Tabla 14. Matriz OIF L8 Año 2021

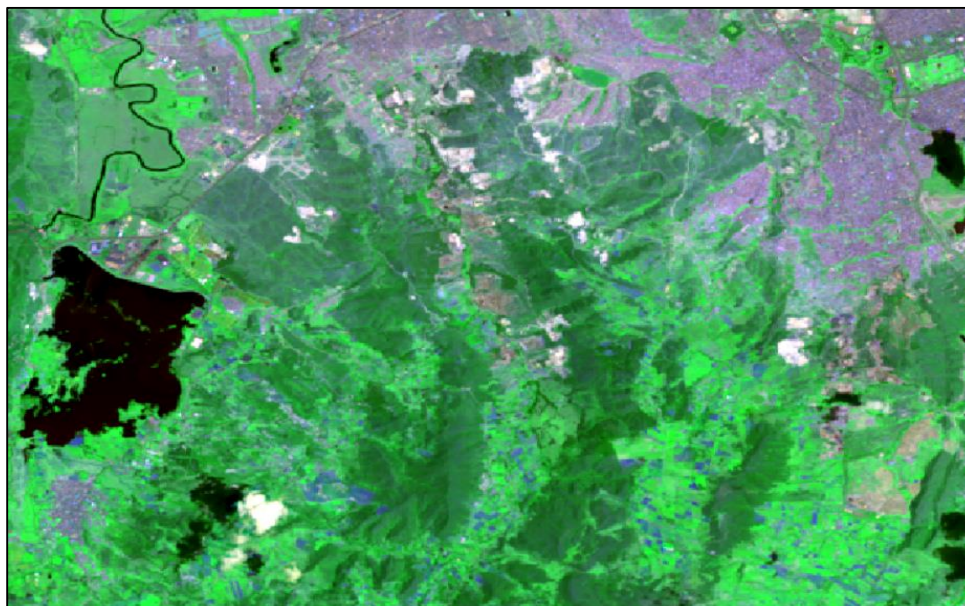
| No | R | G | B | Suma de desviaciones estándar | Suma del Coeficiente de correlación | Valor absoluto de la suma del coeficiente de correlación | OIF |
|----|---|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|---------------|
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4762.2 | 2.9 | 2.9 | 1656.8 |
| 2 | 1 | 2 | 4 | 5178.8 | 2.8 | 2.8 | 1824.1 |
| 3 | 1 | 2 | 5 | 6001.8 | 1.5 | 1.5 | 3910.8 |
| 4 | 1 | 2 | 6 | 5907.2 | 2.4 | 2.4 | 2433.2 |
| 5 | 1 | 2 | 7 | 5689.1 | 2.7 | 2.7 | 2136.6 |
| 6 | 1 | 3 | 4 | 5527.5 | 2.8 | 2.8 | 1961.3 |
| 7 | 1 | 3 | 5 | 6350.4 | 1.6 | 1.6 | 4009.4 |
| 8 | 1 | 3 | 6 | 5907.2 | 2.5 | 2.5 | 2405.7 |
| 9 | 1 | 3 | 7 | 6037.7 | 2.6 | 2.6 | 2282.6 |
| 10 | 1 | 4 | 5 | 6767.1 | 1.5 | 1.5 | 4502.8 |
| 11 | 1 | 4 | 6 | 6672.5 | 2.4 | 2.4 | 2731.2 |
| 12 | 1 | 4 | 7 | 6454.4 | 2.6 | 2.6 | 2441.7 |
| 13 | 1 | 5 | 6 | 7495.4 | 1.6 | 1.6 | 4682.5 |
| 14 | 1 | 5 | 7 | 7277.3 | 1.5 | 1.5 | 4970.7 |
| 15 | 1 | 6 | 7 | 7182.7 | 2.4 | 2.4 | 2943.1 |
| 16 | 2 | 3 | 4 | 5709.7 | 2.9 | 2.9 | 1970.3 |
| 17 | 2 | 3 | 5 | 6532.6 | 1.6 | 1.6 | 4012.0 |
| 18 | 2 | 3 | 6 | 6438.0 | 2.5 | 2.5 | 2544.7 |
| 19 | 2 | 3 | 7 | 6219.9 | 2.7 | 2.7 | 2278.0 |
| 20 | 2 | 4 | 5 | 6949.3 | 1.6 | 1.6 | 4480.6 |
| 21 | 2 | 4 | 6 | 6854.7 | 2.5 | 2.5 | 2718.8 |
| 22 | 2 | 4 | 7 | 6636.6 | 2.7 | 2.7 | 2428.8 |
| 23 | 2 | 5 | 6 | 7677.6 | 1.6 | 1.6 | 4671.0 |
| 24 | 2 | 5 | 7 | 7459.5 | 1.5 | 1.5 | 4914.1 |
| 25 | 2 | 6 | 7 | 7364.9 | 2.5 | 2.5 | 2917.4 |
| 26 | 3 | 4 | 5 | 7297.9 | 1.7 | 1.7 | 4302.3 |
| 27 | 3 | 4 | 6 | 7203.3 | 2.6 | 2.6 | 2723.3 |
| 28 | 3 | 4 | 7 | 6985.2 | 2.8 | 2.8 | 2485.0 |
| 29 | 3 | 5 | 6 | 8026.3 | 1.8 | 1.8 | 4367.7 |
| 30 | 3 | 5 | 7 | 7808.2 | 1.7 | 1.7 | 4685.2 |
| 31 | 3 | 6 | 7 | 7713.6 | 2.7 | 2.7 | 2908.9 |
| 32 | 4 | 5 | 6 | 8442.9 | 1.8 | 1.8 | 4735.1 |
| 33 | 4 | 5 | 7 | 8224.8 | 1.6 | 1.6 | 5068.5 |
| 34 | 4 | 6 | 7 | 8130.3 | 2.7 | 2.7 | 3037.7 |
| 35 | 5 | 6 | 7 | 8953.2 | 1.9 | 1.9 | 4653.3 |

Fuente: Autor, 2022.

A partir del cálculo de los valores de las matrices de covarianza, y correlación, se obtiene el cálculo del factor del índice óptimo (OIF), donde se obtiene el factor del índice óptimo para 35 combinaciones. El mayor contraste espectral obtenido es 5068.5 obteniendo la combinación número 33 (Rojo 4, Verde 5, Azul

7), siendo esta combinación la óptima para realizar un análisis de coberturas. obteniendo la siguiente salida gráfica:

Ilustración 8. Combinación de bandas OIF Imagen L8 Año 2021



Fuente: Autor, 2022.

Clasificación supervisada

La clasificación digital comprende el proceso de conversión de una imagen continua a otra categorizada temáticamente, a partir de agrupación de los niveles digitales por medio de la edición de firmas espectralmente similares. Existen dos métodos de clasificación supervisado y no supervisado. Para el presente estudio se llevará a cabo una clasificación supervisada la cual requiere de cierto conocimiento previo del terreno y de los tipos de coberturas empleando información secundaria como la cartografía básica plancha 246 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC a escala 1:100.000, Sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / Origen-Nacional; el documento POMCA del Rio Bogotá de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, y el documento Plan de Ordenamiento Territorial POT del municipio de Soacha de la alcaldía de Soacha entre otros.









Con base en esta línea base se definen y se delimitan sobre la imagen las áreas de entrenamiento. Las características espectrales de estas áreas son utilizadas para configurar un algoritmo de clasificación, el cual calcula los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio de entrenamiento, para luego evaluar cada ND de la imagen, compararlo y asignarlo a una respectiva clase. La clasificación supervisada pretende definir las clases temáticas que no tengan claro significado espectral, considerada como un método artificial.

Selección de muestras y construcción de firmas

Se realizó a través del análisis de las posibles coberturas que se pueden identificar en la imagen y la construcción de una leyenda con las clases temáticas identificadas. Por ejemplo, para una imagen LANDSAT se puede utilizar la siguiente leyenda: nubes, sombras, vegetación, cultivos, cuerpos de agua, construcciones y tipos de vegetación.

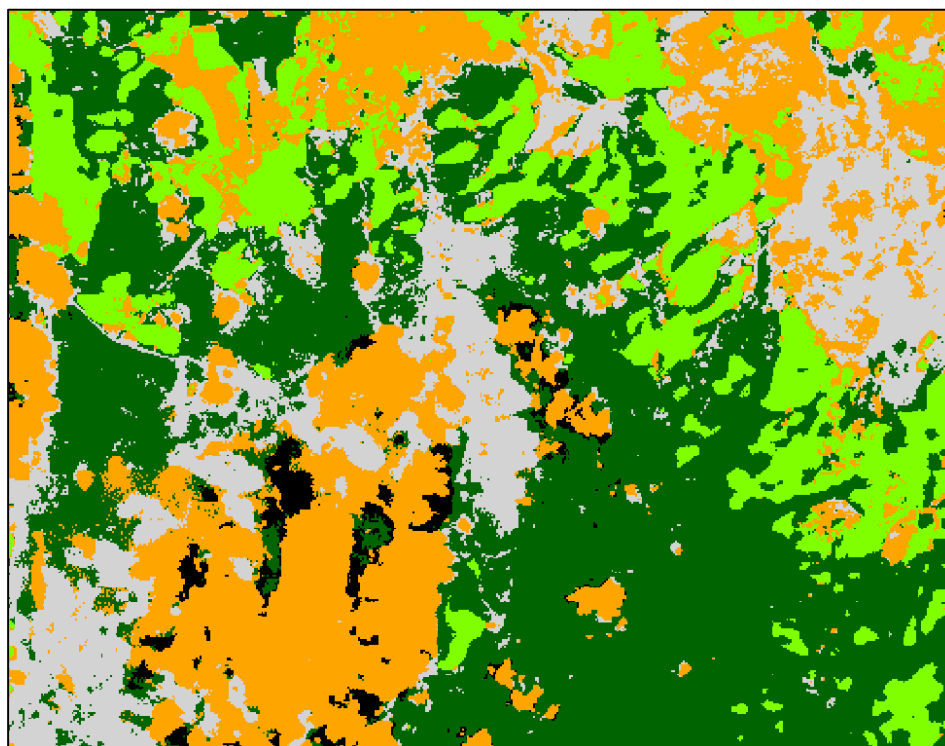
A partir de la interpretación visual, y comparación con la cartografía base se identifican 8 tipo de coberturas las cuales se presentan a continuación, siendo insumo necesario para la obtención de la clasificación de las imágenes (Ilustración 10 – 12), Anexo 3. Firmas espectrales y clasificación.

Ilustración 9. Firmas espectrales - leyenda de clases temáticas identificadas

| Class # | > | Signature Name | Color | Red | Green | Blue | Value | Order | Count | Prob. | P | I | H | A | FS |
|---------|---|------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|---|---|----|
| 1 | ▶ | Lago |  | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 1 | 1 | 356 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 2 | | Montañas |  | 0.000 | 0.392 | 0.000 | 2 | 2 | 248 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 3 | | Vegetacion densa |  | 0.220 | 0.506 | 0.494 | 3 | 3 | 60 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 4 | | Pastos |  | 0.381 | 1.000 | 0.384 | 4 | 4 | 36 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 5 | | Nubes |  | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 5 | 5 | 93 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 6 | | Sombras |  | 0.024 | 0.065 | 0.192 | 6 | 6 | 53 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 7 | | Construcciones |  | 0.827 | 0.827 | 0.827 | 7 | 7 | 200 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 8 | | Erosion |  | 1.000 | 0.647 | 0.000 | 8 | 8 | 34 | 1.000 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |

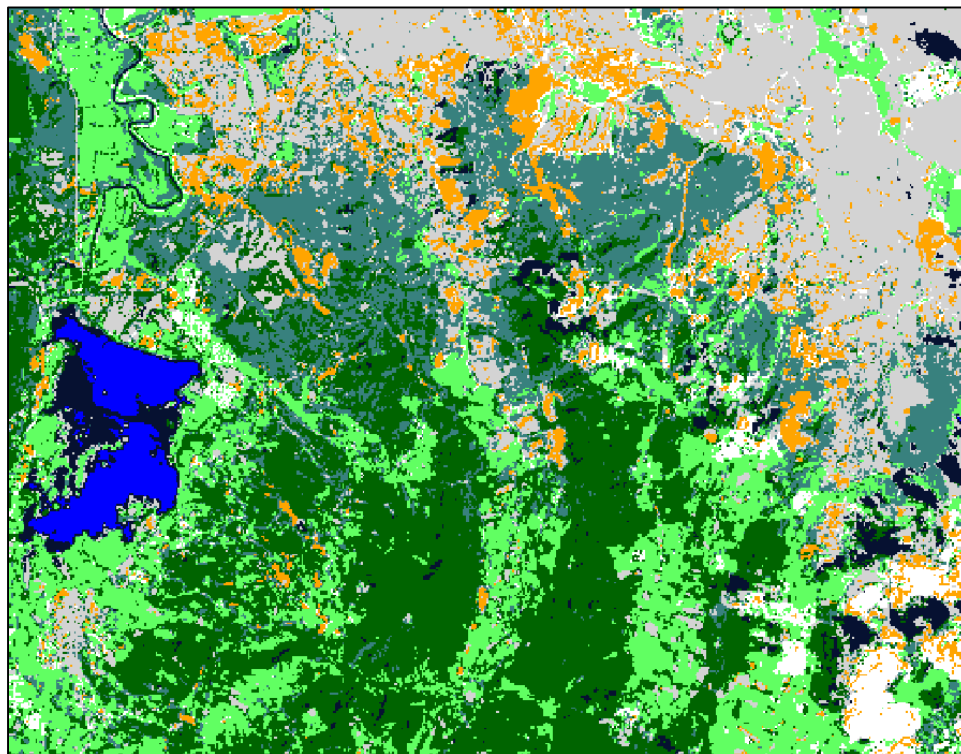
Fuente: Autor, 2022.

Ilustración 10. Clasificación supervisada año 1991



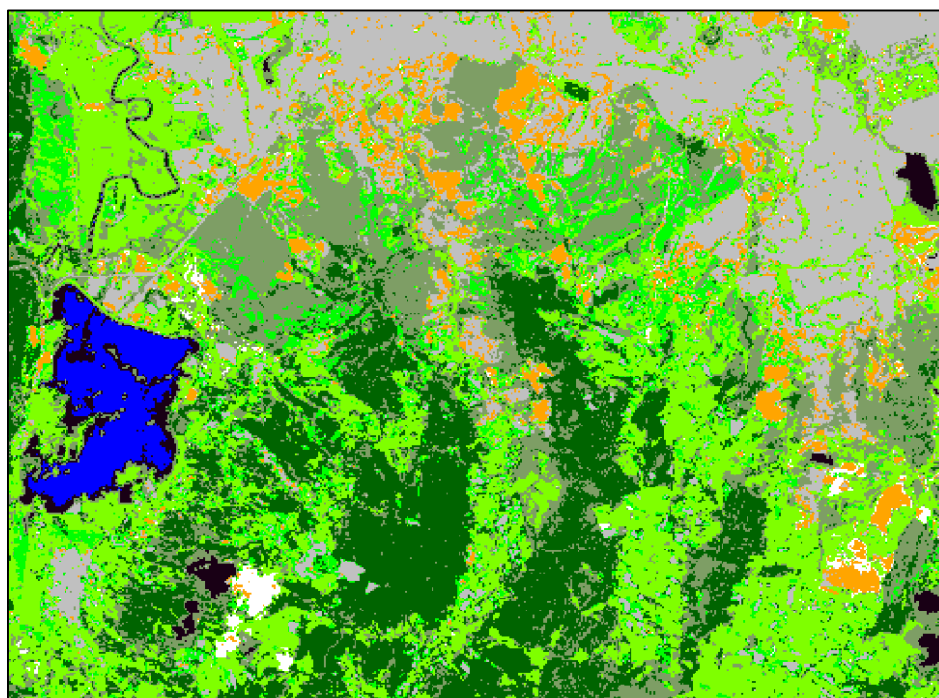
Fuente: Autor, 2022.

Ilustración 11. Clasificación supervisada 2015



Fuente: Autor, 2022.

Ilustración 12. Clasificación supervisada 2021



Fuente: Autor, 2022.

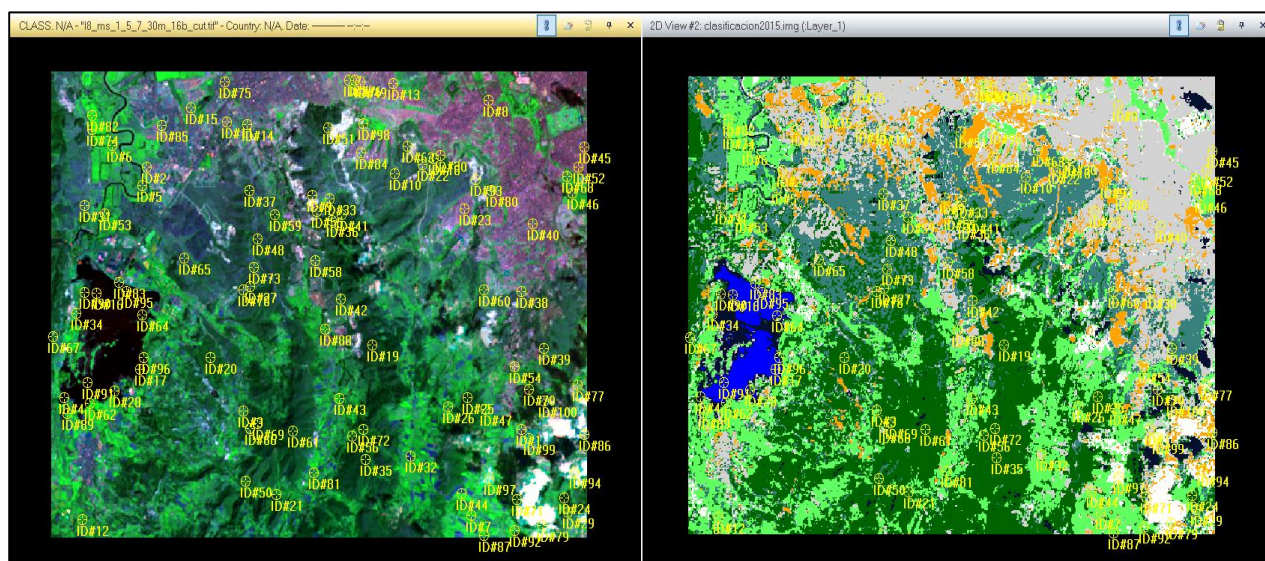
EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

El proceso de verificación de la correspondencia de la clasificación se realiza en el software ERDAS IMAGINE 2014 mediante el método de comparación de las firmas contra la imagen de trabajo generando una matriz de contingencia.

La matriz de contingencia se caracteriza por tener en sus columnas las clases generadas por la clasificación y en las filas las clases de referencia (terreno o análisis visual imagen de trabajo). Los elementos de la diagonal se refieren la coincidencia entre la clasificación y realidad, mientras que los elementos fuera de esta diagonal corresponden a errores de asignación. Las diferencias en filas fuera de la diagonal indican tipos de cobertura real que no se incluyeron en la clasificación (exactitud del productor) y en columna son tipos de cobertura que no se ajustan a la realidad (exactitud del usuario).

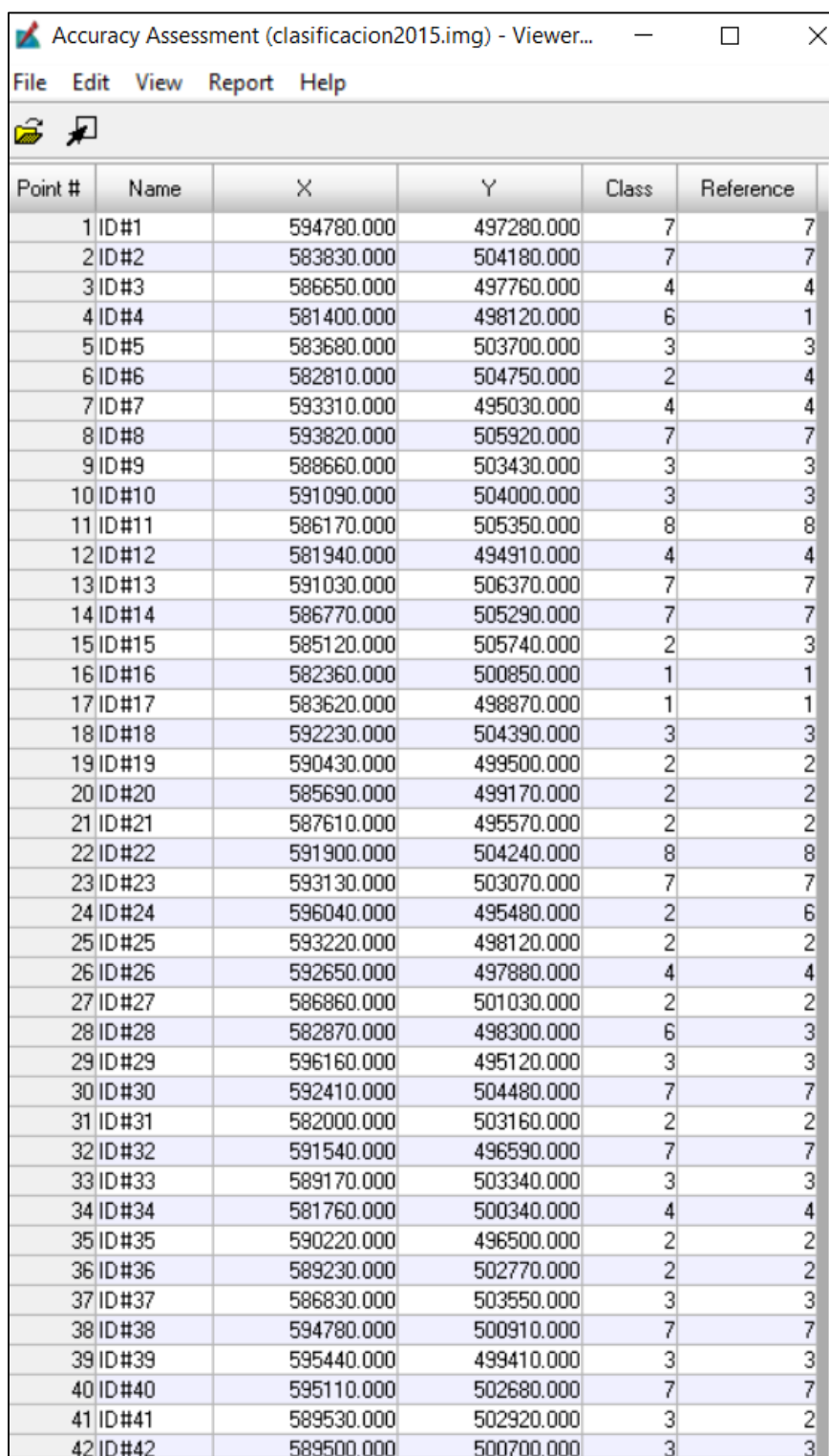
Se generan 100 puntos al azar (puntos de validación estratificados) los cuales garantizan la evaluación de las coberturas y zonas de identificación en la imagen para su comparación mediante la confrontación como se muestra en las siguientes ilustraciones realizadas para los tres periodos de tiempo, aunque en el presente documento solo se incluye una muestra para ilustrar al lector sobre el procedimiento.

Ilustración 13. Verificación año 2015, Izquierda (Imagen con mayor contraste espectral) – Derecha (Imagen clasificada)



Fuente: Autor, 2022.

Ilustración 14. Confrontación puntos de validación



| Point # | Name | X | Y | Class | Reference |
|---------|-------|------------|------------|-------|-----------|
| 1 | ID#1 | 594780.000 | 497280.000 | 7 | 7 |
| 2 | ID#2 | 583830.000 | 504180.000 | 7 | 7 |
| 3 | ID#3 | 586650.000 | 497760.000 | 4 | 4 |
| 4 | ID#4 | 581400.000 | 498120.000 | 6 | 1 |
| 5 | ID#5 | 583680.000 | 503700.000 | 3 | 3 |
| 6 | ID#6 | 582810.000 | 504750.000 | 2 | 4 |
| 7 | ID#7 | 593310.000 | 495030.000 | 4 | 4 |
| 8 | ID#8 | 593820.000 | 505920.000 | 7 | 7 |
| 9 | ID#9 | 588660.000 | 503430.000 | 3 | 3 |
| 10 | ID#10 | 591090.000 | 504000.000 | 3 | 3 |
| 11 | ID#11 | 586170.000 | 505350.000 | 8 | 8 |
| 12 | ID#12 | 581940.000 | 494910.000 | 4 | 4 |
| 13 | ID#13 | 591030.000 | 506370.000 | 7 | 7 |
| 14 | ID#14 | 586770.000 | 505290.000 | 7 | 7 |
| 15 | ID#15 | 585120.000 | 505740.000 | 2 | 3 |
| 16 | ID#16 | 582360.000 | 500850.000 | 1 | 1 |
| 17 | ID#17 | 583620.000 | 498870.000 | 1 | 1 |
| 18 | ID#18 | 592230.000 | 504390.000 | 3 | 3 |
| 19 | ID#19 | 590430.000 | 499500.000 | 2 | 2 |
| 20 | ID#20 | 585690.000 | 499170.000 | 2 | 2 |
| 21 | ID#21 | 587610.000 | 495570.000 | 2 | 2 |
| 22 | ID#22 | 591900.000 | 504240.000 | 8 | 8 |
| 23 | ID#23 | 593130.000 | 503070.000 | 7 | 7 |
| 24 | ID#24 | 596040.000 | 495480.000 | 2 | 6 |
| 25 | ID#25 | 593220.000 | 498120.000 | 2 | 2 |
| 26 | ID#26 | 592650.000 | 497880.000 | 4 | 4 |
| 27 | ID#27 | 586860.000 | 501030.000 | 2 | 2 |
| 28 | ID#28 | 582870.000 | 498300.000 | 6 | 3 |
| 29 | ID#29 | 596160.000 | 495120.000 | 3 | 3 |
| 30 | ID#30 | 592410.000 | 504480.000 | 7 | 7 |
| 31 | ID#31 | 582000.000 | 503160.000 | 2 | 2 |
| 32 | ID#32 | 591540.000 | 496590.000 | 7 | 7 |
| 33 | ID#33 | 589170.000 | 503340.000 | 3 | 3 |
| 34 | ID#34 | 581760.000 | 500340.000 | 4 | 4 |
| 35 | ID#35 | 590220.000 | 496500.000 | 2 | 2 |
| 36 | ID#36 | 589230.000 | 502770.000 | 2 | 2 |
| 37 | ID#37 | 586830.000 | 503550.000 | 3 | 3 |
| 38 | ID#38 | 594780.000 | 500910.000 | 7 | 7 |
| 39 | ID#39 | 595440.000 | 499410.000 | 3 | 3 |
| 40 | ID#40 | 595110.000 | 502680.000 | 7 | 7 |
| 41 | ID#41 | 589530.000 | 502920.000 | 3 | 2 |
| 42 | ID#42 | 589500.000 | 500700.000 | 3 | 3 |

Fuente: Autor, 2022.

El reporte de precisión temática de la clasificación realizada se genera a partir de la evaluación los resultados de las clases y el *Kappa Statistics*, donde un buen resultado se expresa en un valor kappa mayor o igual a 0.85.

Ilustración 15. Reporte de exactitud temática L5_1991

| ACCURACY TOTALS | | | | | | |
|--------------------------------------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|--|
| Class Name | Reference Totals | Classified Totals | Number Correct | Producers Accuracy | Users Accuracy | |
| Unclassified | 0 | 0 | 0 | --- | --- | |
| Nubes | 6 | 0 | 0 | --- | --- | |
| Sombras | 5 | 5 | 5 | 100.00% | 100.00% | |
| Lago | 2 | 0 | 0 | --- | --- | |
| Construcciones | 19 | 19 | 19 | 100.00% | 100.00% | |
| Pastos | 16 | 16 | 16 | 100.00% | 100.00% | |
| Erosion | 20 | 25 | 20 | 100.00% | 80.00% | |
| Vegetacion Dens | 32 | 35 | 32 | 100.00% | 91.43% | |
| Totals | 100 | 100 | 92 | | | |
| Overall Classification Accuracy = | | | 92.00% | | | |
| ----- End of Accuracy Totals ----- | | | | | | |
| KAPPA (K [^]) STATISTICS | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| Overall Kappa Statistics = 0.8966 | | | | | | |
| Conditional Kappa for each Category. | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| Class Name | Kappa | | | | | |
| Unclassified | 0.0000 | | | | | |
| Nubes | 0.0000 | | | | | |
| Sombras | 1.0000 | | | | | |
| Lago | 0.0000 | | | | | |
| Construcciones | 1.0000 | | | | | |
| Pastos | 1.0000 | | | | | |
| Erosion | 0.7500 | | | | | |
| Vegetacion Densa | 0.8739 | | | | | |
| ----- End of Kappa Statistics ----- | | | | | | |

Fuente: Autor, 2022.

Ilustración 16. Reporte de exactitud temática L8_2015

| ACCURACY TOTALS | | | | | | |
|--|------------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|--|
| Class Name | Reference Totals | Classified Totals | Number Correct | Producers Accuracy | Users Accuracy | |
| Unclassified | 0 | 0 | 0 | --- | --- | |
| Lago | 8 | 5 | 5 | 62.50% | 100.00% | |
| Montañas | 21 | 23 | 20 | 95.24% | 86.96% | |
| Vegetacion densa | 19 | 16 | 15 | 78.95% | 93.75% | |
| Pastos | 18 | 17 | 16 | 88.89% | 94.12% | |
| Nubes | 6 | 7 | 6 | 100.00% | 85.71% | |
| Sombras | 2 | 6 | 1 | 50.00% | 16.67% | |
| Construcciones | 17 | 18 | 17 | 100.00% | 94.44% | |
| Erosion | 9 | 8 | 8 | 88.89% | 100.00% | |
| Totals | 100 | 100 | 88 | | | |
| Overall Classification Accuracy = 88.00% | | | | | | |
| ----- End of Accuracy Totals ----- | | | | | | |
| KAPPA (K [^]) STATISTICS | | | | | | |
| Overall Kappa Statistics = 0.8577 | | | | | | |
| Conditional Kappa for each Category. | | | | | | |
| Class Name | Kappa | | | | | |
| Unclassified | 0.0000 | | | | | |
| Lago | 1.0000 | | | | | |
| Montañas | 0.8349 | | | | | |
| Vegetacion densa | 0.9228 | | | | | |
| Pastos | 0.9283 | | | | | |
| Nubes | 0.8480 | | | | | |
| Sombras | 0.1497 | | | | | |
| Construcciones | 0.9331 | | | | | |
| Erosion | 1.0000 | | | | | |
| ----- End of Kappa Statistics ----- | | | | | | |

Fuente: Autor, 2022.

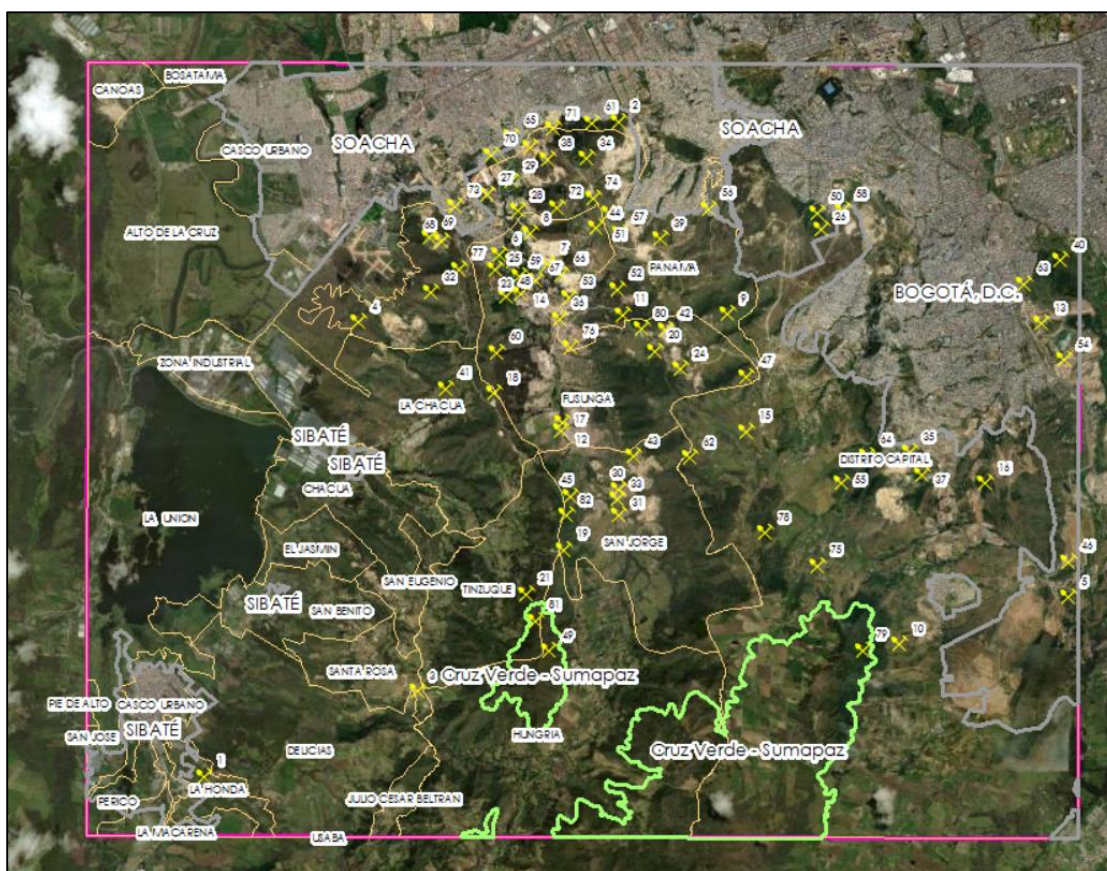
Ilustración 17. Reporte de exactitud temática L8_2021

| ACCURACY TOTALS | | | | | | |
|--|------------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|--|
| Class Name | Reference Totals | Classified Totals | Number Correct | Producers Accuracy | Users Accuracy | |
| Unclassified | 0 | 0 | 0 | --- | --- | |
| Lago | 11 | 6 | 6 | 54.55% | 100.00% | |
| Montañas | 14 | 15 | 14 | 100.00% | 93.33% | |
| Nubes | 3 | 5 | 3 | 100.00% | 60.00% | |
| Sombras | 0 | 5 | 0 | --- | --- | |
| Erosion | 5 | 5 | 5 | 100.00% | 100.00% | |
| Erosion 2 | 8 | 7 | 5 | 62.50% | 71.43% | |
| Construcciones | 15 | 15 | 13 | 86.67% | 86.67% | |
| Veg densa | 16 | 15 | 15 | 93.75% | 100.00% | |
| Cob Vegetal | 18 | 18 | 18 | 100.00% | 100.00% | |
| Pastos | 10 | 9 | 9 | 90.00% | 100.00% | |
| Totals | 100 | 100 | 88 | | | |
| Overall Classification Accuracy = 88.00% | | | | | | |
| ----- End of Accuracy Totals ----- | | | | | | |
| KAPPA (K [^]) STATISTICS | | | | | | |
| Overall Kappa Statistics = 0.8628 | | | | | | |
| Conditional Kappa for each Category. | | | | | | |
| Class Name | Kappa | | | | | |
| Unclassified | 0.0000 | | | | | |
| Lago | 1.0000 | | | | | |
| Montañas | 0.9225 | | | | | |
| Nubes | 0.5876 | | | | | |
| Sombras | 0.0000 | | | | | |
| Erosion | 1.0000 | | | | | |
| Erosion 2 | 0.6894 | | | | | |
| Construcciones | 0.8431 | | | | | |
| Veg densa | 1.0000 | | | | | |
| Cob Vegetal | 1.0000 | | | | | |
| Pastos | 1.0000 | | | | | |
| ----- End of Kappa Statistics ----- | | | | | | |

Fuente: Autor, 2022.

El área de estudio se encuentra en la cordillera oriental, tiene una extensión de 190.8 Km² - 19081.1 ha, de los cuales comprende 1560.6 ha del municipio de Soacha, 3241.8 ha de la ciudad de Bogotá, y 365.6 ha del municipio de Sibate. En la parte sur del área de estudio se tiene un área de 5168.2 ha de protección máxima debido a la ubicación del páramo Cruz Verde – Sumapaz el cual tiene un área de 1108.1 ha dentro del área de estudio, siendo una zona de recarga y con vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. Donde se identifican 3 puntos mineros activos según el catastro minero, contrastando con lo encontrado en la evaluación visual y el procesamiento digital de las imágenes ya que no se identifica la explotación de minerales.

Ilustración 18. Representación espacial de la distribución de áreas en la zona de estudio

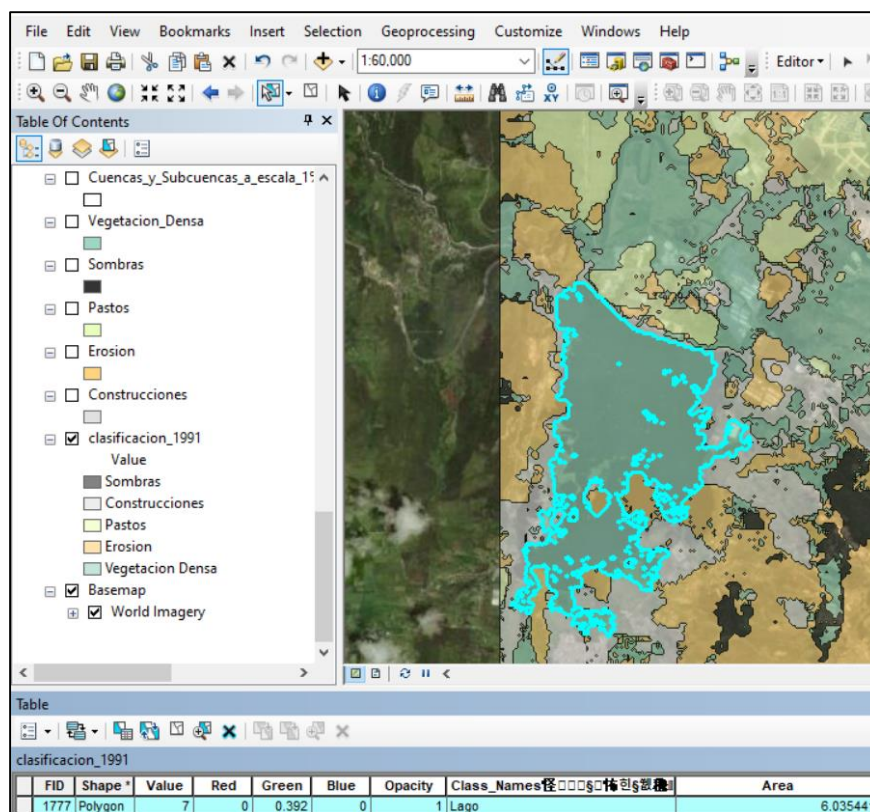


Fuente: Google Earth 2023, POMCA Rio Bogotá, 2019, modificado por autor.

La imagen anterior ilustra la identificación de 82 puntos mineros, de los cuales 55 pertenecen al municipio de Soacha, representando espacialmente el 88.9% del valor total del área de estudio. Se extrae el área del polígono de la Represa del Muña teniendo un valor de 6.035 km² - 603.5 ha de la clasificación de la imagen de 1991 en formato shapefile (Ilustración 19), la cual es comparada con el documento POMCA del Rio Bogotá del año 2019 bajo la jurisdicción de la entidad CAR, empleando información de la cartografía GDB_POMCA_RIO_BOGOTA a escala 1:25.000, el

cual será empleado como referencia para el análisis multitemporal. Se tiene un valor de 570.8 ha, teniendo un error de 5.41%.

Ilustración 19. Representación espacial de coberturas importantes como por ejemplo la represa del Muña



Fuente: Autor, 2022.

Para poder llevar a cabo una interpretación y cuantificación más sencilla de las áreas erosionadas, se divide el área de estudio en veredas disminuyendo el nivel de detalle; En la siguiente tabla se realiza el inventario con la descripción visual tomando como base una imagen de satélite para la elaboración del cuadro de áreas de coberturas por veredas y centros poblados, donde se identifican 27 zonas, de las cuales 3 son centros urbanos o poblados, y 24 zonas rurales presentándose erosión antrópica en el 37.5% del área, según el POT (2018), la minería en el sector está orientada a la explotación de materiales para la construcción.

Tabla 15. Cuadro de áreas de coberturas representativas del sector de estudio escala 1:25.000

| Descripción visual | Sector | Área (Km ²) | Área (Ha) |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------|
| Construcciones | Soacha | 19.0 | 1903.2 |
| Construcciones | Bogotá | 68.3 | 6833.8 |
| Construcciones | Sibaté | 1.38 | 138.2 |
| Pastos limpios | Vereda LA UNION – Sibaté | 12.0 | 1206.5 |
| Cuerpos de agua | Represa del Muña | 5.7 | |
| Vegetación densa | Vereda USABA - Sibaté | 0.004 | 0.43 |

| Descripción visual | Sector | Área (Km ²) | Área (Ha) |
|--|--|-------------------------|-----------|
| Construcciones (2) Vías, Pastos y algunos arboles | Vereda SAN JOSE - Sibaté | 0.057 | 5.7 |
| Pastos, Construcciones (1), vía y algunos arboles | Vereda PIE DE ALTO - Sibaté | 0.10 | 10.2 |
| Rio, cultivos, pastos | Vereda BOSATAMA - Soacha | 0.46 | 46.8 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa | Vereda JULIO CESAR BELTRAN - Sibaté | 0.59 | 59.2 |
| Mosaico de pastos y cultivos, con algunos arboles | Vereda LA MACARENA - Sibaté | 0.97 | 97.7 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa y erosión | Vereda CANOAS - Soacha | 0.99 | 99.4 |
| Mosaico de pastos y cultivos, construcciones, parte del centro poblado | Vereda PERICO - Sibaté | 1.17 | 117.6 |
| Mosaico de pastos y cultivos, construcciones, centros poblados | Vereda LA HONDA - Sibaté | 1.17 | 117.8 |
| Mosaico de pastos y cultivos, construcciones, y vegetación densa | Vereda EL JASMIN - Sibaté | 1.23 | 123.9 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa y erosión | Vereda SAN EUGENIO - Sibaté | 1.28 | 128.1 |
| Construcciones, mosaico de pastos y cultivos, algunos arboles | Vereda ZONA INDUSTRIAL - Sibaté | 1.71 | 171.4 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa y erosión | Vereda SANTA ROSA – Sibaté 3 (1) | 1.90 | 190.6 |
| Construcciones, mosaico de pastos y cultivos, algunos árboles y pequeñas áreas erosionadas | Vereda SAN BENITO - Sibaté | 2.95 | 295.6 |
| Mosaico de pastos y cultivos, construcciones, parte centros poblados, y vegetación densa | Vereda CHACUA - Sibaté | 3.49 | 349.5 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa | Vereda TINZUQUE – Soacha 21, 81 (2) | 4.83 | 483.8 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa alta montaña y erosión | Vereda SAN JORGE - Soacha | 6.82 | 682.1 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa alta montaña, construcciones y erosión | Vereda LA CHACUA – Soacha 41 (1) | 7.69 | 769.6 |
| Mosaico de pastos y cultivos, y vegetación densa de alta montaña | Vereda DELICIAS - Sibaté | 7.80 | 780.1 |
| Mosaico de pastos y cultivos, y vegetación densa de alta montaña | Vereda ALTO DE LA CRUZ - Soacha | 9.29 | 929.9 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa alta montaña, y alta erosión | Vereda FUSUNGA – Soacha 25, 6, 23, 8, 44, 48, 59, 14, 67, 7, 66, 50, 18, 12, 17, 80, 42, 20, 24, 47 (20) | 9.34 | 934.6 |
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa alta montaña, y alta erosión | Vereda PANAMA – Soacha 4, 32, 68, 69, 73, 27, 29, 28, 22, 38, 71, 34, 72, 74, 51, 57, 39, 56, 53, 36, 76, 11, 52, 9, 77 (25) | 11.4 | 1144.8 |

| Descripción visual | Sector | Área (Km ²) | Área (Ha) |
|---|--------------------------------|-------------------------|-----------|
| Mosaico de pastos y cultivos, vegetación densa alta montaña, y alta erosión | Vereda HUNGRIA – Soacha 49 (1) | 14.6 | 1460.3 |

Fuente: POMCA Rio Bogotá 2019, POT Soacha 2021, modificado por autor.

A partir de la anterior tabla se identifica que las veredas con mayor actividad minera, objeto de estudio son las veredas PANAMA con 25 títulos mineros, y FUSUNGA con 20 títulos mineros respectivamente, ubicadas en el municipio de Soacha. Representando finalmente el 10.9% del área de estudio. Jerarquizadas por orden de menor a mayor área. Las mayores áreas las poseen las veredas anteriormente mencionadas más la vereda HUNGRIA, donde se establece parte del corregimiento 1.

El suelo rural de Soacha soporta actualmente tres formas de producción afines con relación con el potencial del territorio y las relaciones funcionales producidas en la presencia urbana; la primera es la producción agrícola, la segunda es la producción agroindustrial y la tercera la producción minera, y la de mayor impacto económico localizada en las vertientes de la cuenca media del río Soacha y delimitada en las zonas compatibles con minería como lo establece la Resolución 1499 de 3 de Agosto 2018 (POT SOACHA, 2021).

Teniendo en cuenta que la Agencia Nacional de Minería es una agencia estatal que administra integralmente los recursos minerales de propiedad del Estado promoviendo su óptimo aprovechamiento y sostenibilidad conforme a la normatividad vigente en coordinación con las autoridades ambientales a partir de Ley 685 de 2001 – Código de Minas, establece que en Colombia solo se podrá probar el derecho de explotación y exploración de minas mediante el contrato de concesión minera. Se tiene en cuenta la cartografía minera actualizada del año 2021 donde se tienen los polígonos mineros censados por la ANM, por otra parte, se relaciona con los puntos de minería censados en el POMCA del rio Bogotá y finalmente visualmente se identifican áreas mineras a través de imagen satelital tomando como BASEMAP, el World Imagery del programa ArcMap 10.8 donde se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 16. Inventario de áreas mineras en las principales veredas

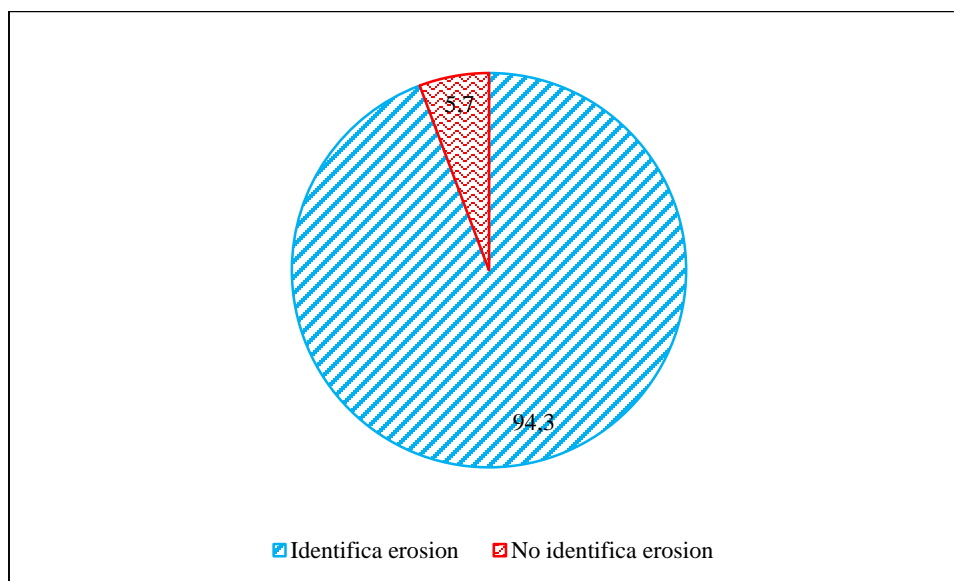
| Sector | Polígono Censado ANM | Puntos de minería Censados | Minería identificable en imágenes |
|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Vereda PANAMA | FJR-127 | 3 (69, 68, 32) | Si |
| Vereda FUSUNGA | 15847 | No | Si |
| Vereda PANAMA | HIF-15021 | No | Si |
| Vereda PANAMA | DLQ-121 | 1 (38) | Si |
| Vereda FUSUNGA | 15495 | 1 (67) | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | FJR-12J | 4 (34, 72, 74, 44) | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | HDP-141 | 1 (51) | Si |
| Vereda PANAMA | 18079 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | BB4-091 | No | Si |
| Vereda PANAMA | 17513 | No | Si |
| Vereda PANAMA | GJ3-081 | 2 (57, 39) | Si |

| Sector | Polígono Censado ANM | Puntos de minería Censados | Minería identificable en imágenes |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | HC8-081 | 1 (28) | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | JD3-09471 | 1 (25) | Si |
| Vereda PANAMA | CHG-156 | No | Si |
| Vereda PANAMA y LA CHACUA | 14103 | 1 (4) | Si |
| Vereda FUSUNGA | 10937 | 1 (60) | Si |
| Vereda FUSUNGA | 13733 | 4 (48, 23, 59, 14) | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | 18109 | 1 (20) | Si |
| Vereda FUSUNGA y LA CHACUA | 3694 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA | 18964 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA | BK9-141 | 1 (42) | Si |
| Vereda PANAMA | GKH-081 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | 22399 | 1 (77) | No |
| Vereda FUSUNGA | HIC-08151 | 1 (8) | Si |
| Vereda PANAMA | 15794 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | ADC-101 | 2 (76, 36) | Si |
| Vereda FUSUNGA | ICQ-08273 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA y SAN JORGE | 959 | 6 (12, 17, 45, 30, 33, 31) | Si |
| Vereda FUSUNGA | 17041 | No | Si |
| Vereda PANAMA | EH6-101A | No | No |
| Vereda PANAMA | GFM-13331X | No | Si |
| Vereda PANAMA y Casco Urbano Bogotá | 14986 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA | 817 | No | Si |
| Vereda FUSUNGA Y PANAMA | 15795 | 2 (11, 80) | Si |
| Vereda FUSUNGA | 11764 | 1 (24) | Si |

Fuente: POMCA Rio Bogotá 2019, POT Soacha 2021, modificado por autor.

En el grafico 1 representa la visualización de las áreas erosionadas por minería a cielo abierto empleando imágenes satelitales, donde la precisión es del 94.3% de las áreas identificadas, siendo una excelente herramienta de análisis de información. Mostrando la simbiosis de la información representada espacialmente por la cartografía minera de la ANM en el año 2021.

Gráfico 1. Evaluación visual de puntos y polígonos de erosión Vs Imagen BaseMAP



La explotación minera se ubica estratégicamente por fuera de los círculos de influencia de los suelos urbanos y de los corredores viales de mayor importancia y se ubica en una de las cuencas hídricas más importantes del Municipio, el río Soacha siendo una zona de especial cuidado ambiental y paisajístico, en donde adicionalmente compite con el desarrollo agropecuario. Esta doble circunstancia se suma a un proceso de legalización relativamente reciente, en donde la informalidad se presenta en forma considerable, sin un interés por su legalización o incorporación a las prácticas formales de explotación y producción (POT SOACHA, 2021). La Resolución MADS No. 1499 de 2018 modificada por la Resolución MADS No. 1499 de 2018 establece que se “*permitirá realizar actividades mineras en todas sus fases, al interior de los polígonos o zonas compatibles adoptados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS*”, las cuales corresponden a determinantes ambientales que deben ser observadas en la reglamentación de los usos del suelo. Tal como se establece en la siguiente tabla donde se describe a mayor detalle el estado de los títulos mineros comprendidos en las zonas compatibles de la minería en la Sabana de Bogotá, donde se tiene en cuenta la fecha de la solicitud para establecer el inicio de la actividad minera en esa zona, obteniendo que el 48.6% de los títulos fueron otorgados entre el periodo de 1990 al 2000 y el 45.7% restante pertenecen al periodo 2000 al 2008, desde esa fecha no se identifican nuevas solicitudes por lo que las áreas erosionadas fuera de estos polígonos, pertenecerían a minería ilegal. De los 35 títulos inventariados 7 se encuentran con la fecha del permiso caducado a lo que se relaciona la terminación del título minero en la etapa de explotación, para dar inicio a las fases de recuperación y compensación.

Tabla 17. Descripción de los títulos mineros

| Título | Estado | Modalidad | Clasificación | Minerales | Solicitud | Fin permiso |
|---------|--------|----------------------------|-----------------------|------------------------|------------|-------------|
| FJR-127 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Arenas, gravas, recebo | 27/10/2004 | 18/12/2036 |
| 15847 | Activo | LICENCIA DE EXPLOTACION | Pequeña - Explotación | Arcillas | 30/04/1993 | 7/08/2014 |

| Título | Estado | Modalidad | Clasificación | Minerales | Solicitud | Fin permiso |
|---------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|--|------------------|--------------------|
| HIF-15021 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arenas arcillosas, arenas feldespáticas, arenas industriales, arenas y gravas silíceas, gravas, recebo | 10/12/2007 | 9/12/2037 |
| DLQ-121 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Arcillas | 26/12/2002 | 15/08/2035 |
| 15495 | Activo | LICENCIA DE EXPLOTACION | Pequeña - Explotación | Arcillas | 29/07/1992 | 21/08/2016 |
| FJR-12J | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Gravas | 27/10/2004 | 17/12/2036 |
| HDP-141 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arenas y gravas silíceas | 25/04/2006 | 8/04/2043 |
| 18079 | Activo | LICENCIA DE EXPLOTACION | Pequeña - Explotación | Arenas, recebo | 26/08/1996 | 14/01/2012 |
| BB4-091 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Grande - Explotación | Arenas, recebo | 4/02/2000 | 23/09/2036 |
| 17513 | Activo | LICENCIA DE EXPLOTACION | Pequeña - Explotación | Arcillas | 23/11/1994 | 5/06/2012 |
| GJ3-081 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Arenas, recebo | 3/10/2005 | 10/10/2036 |
| HC8-081 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arenas, gravas, recebo | 8/03/2006 | 10/01/2038 |
| JD3-09471 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Recebo | 3/04/2008 | 24/10/2035 |
| CHG-156 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arenas, gravas, recebo | 16/08/2001 | 27/06/2031 |
| 14103 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Mediana - Explotación | Arenas, recebo | 18/09/1991 | 23/08/2024 |
| 10937 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Mediana - Explotación | Arcillas | 2/05/1990 | 14/07/2028 |
| 13733 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Arcillas, areniscas | 17/01/1994 | 3/06/2039 |
| 18109 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Gravas, recebo | 21/10/1997 | 10/06/2047 |
| 3694 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arcillas | 9/07/1990 | 18/11/2024 |

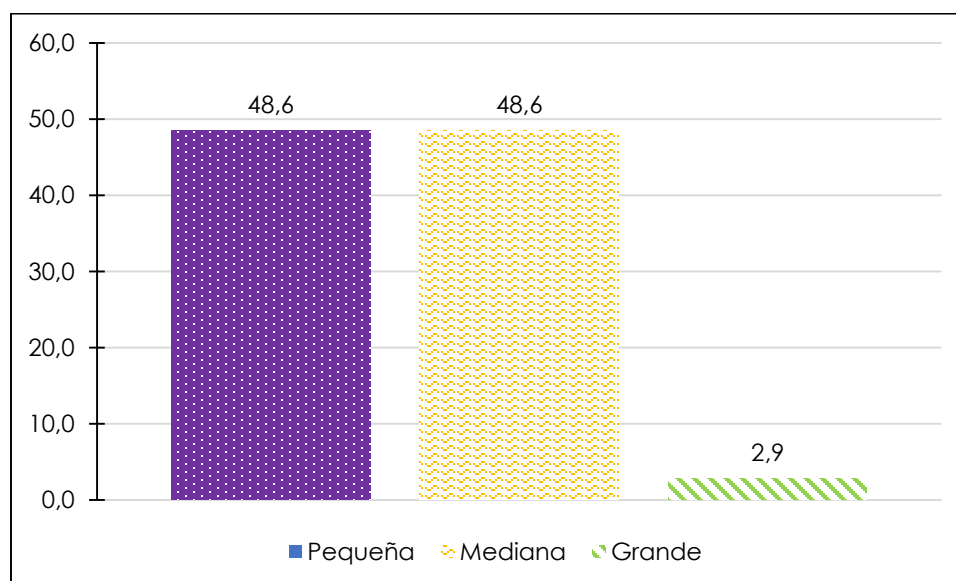
| Titulo | Estado | Modalidad | Clasificación | Minerales | Solicitud | Fin permiso |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---|------------|-------------|
| 18964 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Arcillas | 13/06/1997 | 26/10/2028 |
| BK9- 141 | Activo | LICENCIA DE EXPLOTACION | Mediana - Explotación | Arenas, recebo | 9/11/2000 | 21/10/2027 |
| GKH- 081 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Mediana - Explotación | Recebo | 17/11/2005 | 9/07/2036 |
| 22399 | Activo | LICENCIA DE EXPLOTACION | Pequeña - Explotación | Areniscas | 16/08/2005 | 15/08/2006 |
| HIC- 08151 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Recebo | 12/09/2006 | 9/12/2037 |
| 15794 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Mediana - Explotación | Arcilla común, arcillas, arcillas especiales, arcillas refractarias, arenas, arenas arcillosas, arenas feldespáticas, arenas industriales, arenas y gravas silíceas, bentonita, caolín, gravas, recebo | 12/01/1993 | 13/10/2033 |
| ADC- 101 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Mediana - Explotación | Arcillas y areniscas | 12/04/1999 | 8/09/2030 |
| ICQ- 08273 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arcilla común, arcillas, arcillas especiales, arcillas refractarias, arenas, arenas arcillosas, arenas feldespáticas, arenas industriales, arenas y gravas silíceas, bentonita, caolín, gravas, recebo | 26/03/2007 | 24/04/2043 |
| 959 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Mediana - Explotación | Arcillas | 22/06/1990 | 8/06/2018 |
| 17041 | Activo | LICENCIA DE EXPLOTACION | Pequeña - Explotación | Arenas | 22/12/1992 | 31/08/2019 |
| EH6- 101A | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arcillas, y recibos | 6/08/2003 | 9/08/2036 |
| GFM- 13331X | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arenas arcillosas, arenas feldespáticas, arenas industriales, arenas y gravas silíceas, gravas, recebo | 22/06/2005 | 17/03/2040 |
| 14986 | Titulo terminado-en | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Gravas, recebo | 19/06/1991 | 17/01/2025 |

| Titulo | Estado | Modalidad | Clasificación | Minerales | Solicitud | Fin permiso |
|--------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|--|------------|-------------|
| | proceso de liquidación | | | | | |
| 817 | Activo | CONTRATO CONCESION (L 685) | Pequeña - Explotación | Arcillas | 5/06/1990 | 28/11/2020 |
| 15795 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Mediana - Explotación | Arcillas, arenas, areniscas, asfalto natural, basalto, diabasa, gravas, recebo, roca o piedra caliza, rocas de origen volcánico, puzolana, basalto | 12/01/1993 | 26/11/2031 |
| 11764 | Activo | CONTRATO CONCESION (D 2655) | Mediana - Explotación | Arenas y gravas síliceas | 28/03/2003 | 24/06/2028 |

Fuente: POMCA Rio Bogotá 2019, POT Soacha 2021, modificado por autor.

En la revisión a la normativa del sector minero en el país, antes de la reforma a la constitución política de Colombia del año 1991 la minería no estaba clasificada como una actividad económica principal, razón por la cual las políticas eran muy generales, a partir de la expedición de la nueva constitución, y a medida que el tiempo ha transcurrido se evidencia el esfuerzo por parte de las entidades gubernamentales, para instaurar una normatividad convergente que asegure el desarrollo minero con mejores estándares técnicos, ambientales y sociales, generando beneficio para los territorios. Ajustándose a la fecha del presente análisis donde se realiza una categorización de los títulos mineros solicitados por periodos, para determinar el crecimiento de la actividad. Se establece una clasificación del 48.6% en mediana, el 48.6% en clasificación pequeña y solo un 2.9% en clasificación grande concluyendo que esta clasificación se da con base en la producción y el 97.1% se encuentran en estado activo.

Gráfico 2. Representación del crecimiento de la minería por clasificación



Los cuadros de las tablas 18 – 20, se obtienen de la clasificación supervisada donde se extrae información cuantitativa a partir de datos de imágenes censadas remotamente (Richards, 1993) transformando la imagen formato raster a formato shapefile según la clasificación de coberturas, la cual requirió de cierto nivel de conocimiento de la zona de estudio para categorizar las distintas coberturas identificadas para los tres periodos de tiempo con el fin de establecer tendencias que puedan adoptar los cambios por crecimiento de minería.

Tabla 18. Cuadro de áreas de coberturas Imagen 1991

| Cobertura | Área (Km ²) | Área (Ha) |
|------------------|-------------------------|---------------|
| Vegetación Densa | 72.721 | 7272.1 |
| Erosión | 49.420 | 4942.0 |
| Construcciones | 35.509 | 3550.9 |
| Pastos | 30.752 | 3075.2 |
| Sombras | 3.760 | 376.0 |

Fuente: Autor, 2022.

En esta imagen no se identifica coberturas como nubes y cuerpos de agua; por otra parte el algoritmo de supervisión clasificada toma como cobertura de erosión coberturas como construcciones y vegetación densa. Asociando este error a la alta cantidad de nubes en la imagen que generan errores y no permiten obtener información relevante para el estudio en este periodo.

Tabla 19. Cuadro de áreas de coberturas Imagen 2015

| Cobertura | Área (Km ²) | Área (Ha) |
|---------------------------|-------------------------|---------------|
| Construcciones | 39.624 | 3962.4 |
| Erosión | 12.033 | 1203.3 |
| Cuerpos de agua - Represa | 3.594 | 359.4 |
| Vegetación montañosa | 53.509 | 5350.9 |
| Nubes | 9.218 | 921.8 |
| Pastos | 36.446 | 3644.6 |
| Sombras | 6.270 | 627.0 |
| Vegetación Densa | 31.466 | 3146.6 |

Fuente: Autor, 2022.

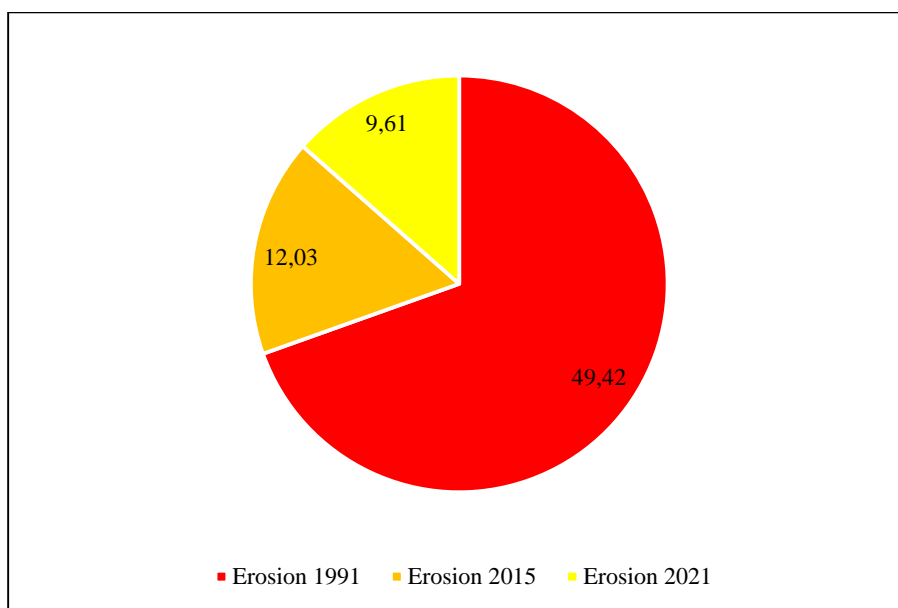
Tabla 20. Cuadro de áreas de coberturas Imagen 2021

| Cobertura | Área (Km ²) | Área (Ha) |
|----------------|-------------------------|--------------|
| Construcciones | 35.634 | 3563.4 |
| Erosión | 9.606 | 960.6 |

| Cobertura | Área (Km ²) | Área (Ha) |
|---------------------------|-------------------------|-----------|
| Cuerpos de agua - Represa | 4.195 | 419.5 |
| Vegetación montañosa | 35.918 | 3591.8 |
| Nubes | 1.785 | 178.5 |
| Pastos | 14.519 | 1451.9 |
| Sombras | 3.141 | 314.1 |
| Vegetación Densa | 49.500 | 4950.0 |

Fuente: Autor, 2022.

Gráfico 3. Comparación multitemporal del crecimiento de la erosión



Fuente: Autor, 2022.

Tomando los tres datos del polígono de erosión a partir de la clasificación de las coberturas se identifica que para el año 1991 se da un 49.42 Km² de área erosionada, para el año 2015 tiene un valor de 12.03 Km² y finalmente para el 2021 tiene un valor de 9.61 Km², concluyendo a simple vista que el comportamiento del crecimiento de la expansión de las áreas donde se lleva a cabo la explotación por minería a cielo abierto disminuye, contrastando con la participación de las actividades económicas para el año 2018 posee un valor del 46% asociado a actividades de Explotación de minas y canteras de las tres actividades principales y de vocación del municipio.

Soacha se encuentra ubicado en el décimo puesto de producción principalmente con una extracción recibe con 1167.3 m³, gravas 658.3 m³ y arenas 550.0 m³, (materiales de construcción) del departamento de Cundinamarca en el último trimestre del 2020 (UPME, 2020) siendo el que más aporta al Producto Interno Bruto (PIB) departamental con 2.5 billones de pesos al año, con al menos el 95% de sus habitantes están en el Sistema Subsidiado de Salud (Sisbén). Ni la mitad de ese valor lo pone Chía, otro vecino de Bogotá, con la mejor calidad de vida de Cundinamarca.

Los resultados obtenidos de la comparación de las tres imágenes no muestran cambios significativos de manera visual; al realizar la clasificación los resultados. La cuantificación de patrones de cambio en la cobertura del suelo por la acción de actividad minera a cielo abierto empleando imágenes satelitales aun no puede ser concluyente ya que los títulos mineros otorgan al concesionario el derecho de extraer minerales conferidos, realizar obras y labores vinculadas a la exploración, construcción, montaje, y explotación, con una vigencia de 30 años a partir de la inscripción en el Registro Minero Nacional.

Tabla 21. Comparación coberturas multitemporal

| Sector | Multitemporal POMCA | Cobertura tierra Uso Actual | Cobertura CORINE LAND COVER | Cobertura imagen satelital Google Earth |
|--------------------------------|--|--|---|---|
| Vereda PANAMA - FUSUNGA Soacha | Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva - PÉRDIDA MODERADA | Conservación - Bosques y Áreas Seminaturales | Arbustal abierto (Bosques y áreas seminaturales) | Vegetación densa alta montaña |
| | Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva - COBERTURA NATURAL SIN CAMBIO | Sin uso - Bosques y Áreas Seminaturales | Pastos enmalezados (Territorios agrícolas) | Pastos limpios y vegetación secundaria |
| | Zonas urbanizadas - SIN CAMBIO | Zonas Urbanas - Territorios Artificializados | Tejido urbano continuo (Territorios artificializados) | Centros urbanos municipio Soacha |
| | Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva - PÉRDIDA SEVERA | Ganadería - Territorios Agrícolas | Zonas de extracción minera (Territorios artificializados) | Erosión por minería a cielo abierto |
| | Zonas urbanizadas - GANANCIA MODERADA | Zonas Urbanas - Territorios Artificializados | Tejido urbano (discontinuo) | Asentamientos ilegales - viviendas |
| | Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación - GANANCIA SEVERA | Zonas Urbanas - Territorios Artificializados | Zonas industriales o comerciales - Territorios artificializados | Construcciones |

Fuente: POMCA Rio Bogotá 2019, POT Soacha 2021, modificado por autor.

CONCLUSIONES

1. La imagen de 1991 no es concluyente, teniendo en cuenta que se presentan errores en la identificación de coberturas como cuerpos de agua, se mezcla el crecimiento de la erosión, con las nubes, y las construcciones de expansión urbana, teniendo un error del >25%, según lo estimado en la matriz de confusión tomando como punto de comparación la imagen basemap Imagery del software Arcmap 10.8.
2. Los resultados de la clasificación supervisada son mucho más ajustados a la realidad en la medida en que sean seleccionadas áreas de entrenamiento representativas y puras, teniendo en cuenta que la afinidad del detalle depende de la calidad visual o de interpretación del autor variando los resultados obtenidos ya que se encuentran directamente relacionados con una adecuada clasificación de coberturas.
3. Es necesario que desde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible hasta la alcaldía local de Soacha se realice una evaluación y seguimiento a la implementación de las fases de recuperación y compensación de los estudios de impacto ambiental a las empresas que se otorgó título mineros de explotación, para establecer si el grado de erosión se encuentra asociado a la acumulación de la actividad a través del tiempo, u obedece a las dinámicas de demanda de materiales de construcción a nivel mundial.
4. Las características geológicas y del suelo que presentes en el área de estudio, generan que tenga una aptitud propicia para la explotación de materiales de construcción. Conjugadas con una adecuada gestión territorial podría enmarcar el desarrollo sostenible del sector.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alba, S. D., Cermeño, F., & Barbero, A. (2011). Erosión y manejo del suelo. *Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos*.
2. Anaya, V., & Díaz, R. (2016). *Análisis de la fragmentación de coberturas naturales producida por la minería a cielo abierto en el municipio La Jagua de Ibirico, departamento del Cesar*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
3. Bedoya, A. M., Portillo, M. F., & Sáenz, H. (2016). *Análisis del cambio de la cobertura entre 1999 y 2015 del páramo de Chiles-Cumbal a través de la utilización de herramientas SIG*. Universidad de Manizales.
4. Belloti, M. L. (2011). Minería a cielo abierto versus glaciares en alerta roja en Argentina. . *Revista de Derecho de Daños (Rubinzal-Culzoni Editores)*, 2011(1), 391-437.
5. Britos, A. H., & Barchuk, A. H. (2008). Cambios en la cobertura y en el uso de la tierra en dos sitios del Chaco Árido del noroeste de Córdoba, Argentina. *Agriscientia*, 25(2), 97-110.
6. Britos, A., & Barchuk, A. (2013). Dinámica de la cobertura vegetal y los usos de la tierra a través de modelos de no-equilibrio. . *Revista de Teledetección*, 40, 88-109.
7. Cárdenas, M., & Reina, M. (2008). *La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal*. . Obtenido de <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/893>
8. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. . (2013). *Censo experimental de Soacha*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/prensa/comunicados/cp_censo_experim_soacha4.pdf
9. Galindo, J. S., & Silva, H. D. (2016). *Impactos ambientales producidos por el uso de maquinaria en el sector de la construcción*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
10. Labrador, M., Évora, J., & Arbelo, M. (2012). Satélites de teledetección para la gestión del territorio. *La Laguna, Spain*.
11. Latorre, A., & Tovar, M. (2017). Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. . *Saúde em Debate*, 41., 77-91.
12. Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). *Programa Presupuestal 0089 Reducción de la Degradación de los Suelos Agrarios. Cartillas para la conservación del suelo*. Obtenido de La erosión del suelo.: <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/ais-2015/erosion-suelo>
13. Montiel, K., & Villareal, L. (2004). Análisis multitemporal del impacto generado por la explotación minera en el medio geomorfológico de la isla de toas, estado zulía. *Terra. Nueva Etapa*, 20 (29), 55 - 71.
14. Ordóñez, A., & Serna, J. (2015). *Análisis superficial y multitemporal de imágenes Landsat 7 ETM+ Y Landsat 8 OLI TIRS en el proyecto carbonífero la luna entre los años 2001 y 2015*. . Universidad de Manizales.

15. Orozco, O. D., & Valbuena, C. A. (2016). Análisis multitemporal mediante imágenes de sensores remotos de la explotación a cielo abierto en la mina El Cerrejón municipio de Barrancas y Albania departamento de la Guajira. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*.
16. Peguero, C. (2016). Sensores remotos y aplicaciones en teledetección. Geodesia y gestión de recursos naturales y patrimonio natural. *Sensores Remotos y Aplicaciones En Teledetección*. 21 (306).
17. Pérez, M., & Betancur, A. (2016). Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia. *Sociedad y Ambiente*, (10), 95-112.
18. Reyes, P. (12 de diciembre de 2019). *Teledetección*. Obtenido de <http://prepa.chapingo.mx/wp-content/uploads/2019/01/20-TELEDETECCION-clase.pdf>
19. Rodríguez, Ó. E., & Arredonda, B. H. (2005). Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto Modis de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil.
20. Sotelo, A. S. (2014). uis Jorge Garay (dir.). Minería en Colombia: institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos. Bogotá, Contraloría General de la República, Imprenta Nacional de Colombia. *Revista Opera*, (14), 10.
21. Veiga, M. D., & Prado, L. D. (1993). *Manual para la instalación y conducción de experimentos de perdida de suelos*.