



Propuesta metodológica para corroboración de evidencia de áreas con remoción de cobertura vegetal por minería en el Bajo Cauca antioqueño a través del índice NDVI

Laura Orrego Josa

Ingeniera Ambiental

John Fernando Escobar Martínez, PhD Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Pregrado
Medellín
2024

Cita	(Orrego Josa, 2024)
Referencia	(Orrego Josa, 2024). <i>Propuesta metodológica para corroboración de evidencia de áreas con remoción de cobertura vegetal por minería en el Bajo Cauca antioqueño a través del índice NDVI</i>
Estilo APA 7 (2020)	[Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín UdeA.



Centro de Documentación de Ingeniería - CENDO I

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A ti. A ese hubiera que me enseñó tanto, iluminó mi vida y me dio la oportunidad de hacerlo mejor.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por llegar hasta aquí. A mi mamá, por ser capaz de ir hasta lo más recóndito de mi mundo para ayudarme. A mi hermana, por sentirla más cerca que nunca. A los maestros y amistades que conocí en mi camino y de los que algo me llevo de cada uno de ellos. A John por su comprensión. Y a mí. Gracias a mí.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema	13
1.1 Antecedentes	13
2. Justificación	15
3. Objetivos	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos	16
4. Marco teórico	17
4.1 Explotación de oro de aluvión	17
4.2 Teledetección	17
4.2.1 Espectro electromagnético	18
4.2.2 Sensores	19
4.2.3 Firma espectral	20
4.2.4. Resolución de un sistema sensor	21
4.4. Satélites Sentinel	22
Sentinel-2	23
4.5 Composición a color	24
4.6 Índice de Vegetación Normalizada NDVI	25
4.7 EVOA (UNODC-SIMCI)	26
4.8 CASCDH	26
4.9 Área de estudio	28

5. Metodología	30
5.1 Materiales	30
5.2 Métodos	30
6. Resultados	34
6.1 Variación porcentual del área de zonas con evidencia de minería y zonas nuevas	34
6.2 Estado de permanencia zonas con minería	41
7. Discusión	45
8. Conclusiones	46
Referencias	47

Lista de tablas

Tabla 1 Resoluciones de cada banda de la misión Sentinel-2	24
Tabla 2 Información de imágenes Sentinel-2	30
Tabla 3 Categorización estados de permanencia de zonas con evidencia minera	32
Tabla 4 Intervalos del Índice de Vegetación Normalizada para las coberturas analizadas	34

Lista de figuras

Figura 1 El espectro electromagnético	19
Figura 2 Diagrama sensores pasivos y activos	20
Figura 3 Firmas espectrales de algunos elementos naturales	20
Figura 4 Perfil de reflectancia típico de rango completo de vegetación sana	21
Figura 5 Flujograma de la metodología desarrollada dentro del CASCDH	27
Figura 6 Área de estudio	28
Figura 7 Flujograma del desarrollo de la propuesta metodológica	31
Figura 8 Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre marzo y mayo 2023	37
Figura 9 Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre mayo y julio 2023	38
Figura 10 Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre julio y septiembre 2023	39
Figura 11 Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre septiembre y noviembre 2023	40
Figura 12 Estados de permanencia de minería en la zona 1	42
Figura 13 Estados de permanencia de minería en la zona 2	43
Figura 14 Estados de permanencia de minería en la zona 3	44

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CASCDH	Centro de Analítica, Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos
ESA	European Space Agency (Agencia Espacial Europea)
EVOA	Explotación de oro de aluvión
Ha	Hectáreas
MSI	Multispectral Instrument (Instrumento Multiespectral)
NDVI	Índice de vegetación normalizada
NIR	Near-infrared spectroscopy (Espectroscopía del infrarrojo cercano)
SAR	Synthetic aperture radar (Sistema de radar de apertura sintética)
SIMCI	Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos
SWIR	Short-wave infrared (Infrarrojo de onda corta)
UNODC	United Nations Office on Drugs and Crime (Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito)
VNIR	Visible and near-infrared (Infrarrojo cercano y visible)

Resumen

El informe se centra en el monitoreo de la actividad minera en la región del Bajo Cauca Antioqueño, donde se destaca su importancia económica pero también los impactos negativos en el medio ambiente y la seguridad ciudadana. La metodología actual implementada por el Centro de Analítica de Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos (CASCDH) se basa en la percepción remota, pero se propone mejorarla mediante la validación con imágenes Sentinel-2 y el análisis del Índice de Vegetación Normalizada (NDVI).

El objetivo general del informe es desarrollar una propuesta metodológica para corroborar la remoción de cobertura vegetal debido a la minería en el Bajo Cauca antioqueño. Para ello, se plantean objetivos específicos como determinar la eficiencia de la metodología CASCDH, analizar el estado de permanencia de las zonas mineras y evaluar la potencialidad de las imágenes Sentinel-2.

Los resultados muestran que la propuesta metodológica mejora la precisión y frecuencia del monitoreo, aunque se identifican algunas incongruencias debido a condiciones atmosféricas y limitaciones técnicas. Se destaca la importancia de la frecuencia en la publicación de los resultados para la toma de decisiones en la gestión territorial de la seguridad.

En conclusión, la incorporación de imágenes Sentinel-2 y técnicas de teledetección mejora significativamente el monitoreo de la actividad minera en el Bajo Cauca Antioqueño, ofreciendo una intervención más efectiva en la gestión ambiental y la seguridad ciudadana. Además, se resalta la utilidad del NDVI y la identificación de áreas con permanencia minera para entender tendencias y patrones en la región.

Palabras clave: minería, metodología de monitoreo, sentinel-2, índice NDVI, teledetección

Abstract

The report focuses on monitoring mining activity in the Bajo Cauca of Antioquia, highlighting its economic importance as well as its negative impacts on the environment and public safety. The current methodology implemented by the Center for Analytics of Security, Coexistence, and Human Rights (CASCDH) is based on remote sensing, but an improvement is proposed through validation with Sentinel-2 images and analysis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

The overall objective of the report is to develop a methodological proposal to corroborate vegetation removal due to mining in the Lower Cauca region. Specific objectives include determining the efficiency of the CASCDH methodology, analyzing the permanence status of mining zones, and evaluating the potential of Sentinel-2 images.

Results show that the methodological proposal significantly improves monitoring accuracy and frequency, although some discrepancies are identified due to atmospheric conditions and technical limitations. The importance of result publication frequency for decision-making in territorial security management is emphasized.

In conclusion, the incorporation of Sentinel-2 images and remote sensing techniques significantly enhances mining monitoring in the Bajo Cauca region, offering more effective intervention in environmental management and public safety. Additionally, the utility of NDVI and identification of areas with mining permanence is highlighted to understand trends and patterns in the region.

Keywords: mining, monitoring methodology, sentinel-2, normalized difference vegetation index NDVI, remote sensing

Introducción

La región del Bajo Cauca antioqueño se destaca por su gran llanura rodeada de majestuosas montañas y numerosas ciénagas, constituyendo uno de los principales patrimonios ecosistémicos de la región (Argota, 2017). Con una economía marcada por actividades como la ganadería, el cultivo de coca y la minería (Santisteban, 2020), esta última se destaca como un pilar fundamental para la subsistencia de una parte significativa de su población. Según datos del Ministerio de Minas y Energía (MinMinas, 2014), el Bajo Cauca es reconocido por albergar la mayor producción de oro del país representando un 49% de la producción del departamento y un 16% a nivel nacional, tal como lo confirman las cifras históricas del SIMCO (s.f.).

La presencia de multinacionales como Anglo Gold Ashanti, interesadas en obtener licencias ambientales para explotaciones a cielo abierto, evidencia el atractivo de esta región (Medina, 2014). Sin embargo, este interés también ha dado lugar a la presencia de grupos armados que, encontrando en la minería una fuente crucial de financiación, ejercen una tenencia forzada sobre los territorios (Santisteban, 2020). Los efectos devastadores de la explotación minera se reflejan en la remoción de la cobertura vegetal, lo cual conlleva a la destrucción parcial o total de ecosistemas, afectando tanto a la flora como a la fauna, así como a los servicios ecosistémicos disponibles. La contaminación por mercurio representa, además, una amenaza latente para la salud de los suelos, los acuíferos y los cuerpos de agua (Delgado, 2022).

Ante esta problemática, en colaboración con el Ministerio de Minas y Energía y la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, se ha implementado un modelo de monitoreo desde 2016, utilizando herramientas como la percepción remota y los sistemas de información geográfica, para recopilar evidencia sobre la Explotación de Oro de Aluvión. Sin embargo, esta información se publica de forma general solo un año después de su análisis (UNODC/SIMCI, 2022). Aunque este enfoque permite comprender las dinámicas de un sector complejo que oscila entre lo legal e ilegal, así como identificar alertas para diseñar estrategias políticas que minimicen su impacto, persiste la necesidad de proporcionar información actualizada para entender los patrones de explotación por parte de grupos criminales.

Es en este contexto que surge la iniciativa del Centro de Analítica de Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos (CASCDH) de la Secretaría de Seguridad y Justicia de la Gobernación de Antioquia, la cual desarrolla un ejercicio de monitoreo para focalizar las áreas con

remoción de cobertura vegetal debido a la explotación minera en el Bajo Cauca antioqueño, una región cuya actividad minera supera la media departamental.

Ante esta urgencia, se plantea la necesidad de corroborar la metodología implementada por el CASCDH mediante un análisis comparativo histórico del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), centrándose en la desaparición orgánica y vegetal, y con la aplicación de imágenes Sentinel-2. Esta validación podría ofrecer mejoras significativas a la metodología empleada por el CASCDH, fortaleciendo así su capacidad para enfrentar los desafíos presentes en la región.

1. Planteamiento del problema

¿Qué eficacia tiene el monitoreo de la minería en el Bajo Cauca Antioqueño utilizando la metodología actual del Centro de Analítica de Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos (CASCDH), en términos de identificación y abordaje de la remoción de cobertura vegetal, y cómo podría mejorarse este proceso mediante el uso de imágenes Sentinel-2 y la cuantificación de áreas a través del índice de vegetación NDVI?

1.1 Antecedentes

Los cambios en los usos del suelo pueden generar impactos tanto positivos como negativos en los recursos naturales, tanto a nivel local como global. Uno de los efectos negativos más significativos de estos cambios es la deforestación, un fenómeno ampliamente documentado. La deforestación conlleva una serie de consecuencias ambientales adversas, que incluyen la emisión de CO₂, el cambio climático, la degradación de la calidad ambiental, la pérdida de biodiversidad y la alteración de las características ecológicas y biofísicas de la superficie (Moscoso, Muñoz García, & González Monosalva, 2022).

En el Bajo Cauca, la actividad minera es una de las principales fuentes de sustento para la población local, dado que la región cuenta con abundantes recursos auríferos tanto en el suelo como en el subsuelo. Esta actividad minera, aunque vital para la economía local, también plantea desafíos significativos en términos de conservación ambiental y sostenibilidad. Además de esto, enfrenta problemas de criminalidad donde se ha encontrado que la región del Bajo Cauca converge la minería considerada criminal la cual, sin importar el tipo de minería que sea (entiéndase como formal, ilegal, informal o ilícita), confluyen estructuras de los grupos armados organizados al margen de la ley, lo cual constituye un potenciador de violencia y delincuencia que no permite el desarrollo social de la región (Maldonado Sarmiento & Roza Gutiérrez, 2014).

Las evidencias físicas de cambios de la actividad minera pueden detectarse por medio de técnicas de percepción remota tal como lo desarrolló Ramos y Moreno (2021) para el municipio de Nechí donde analizaron la alteración en la salud del ecosistema a través de fotografías aéreas e imágenes satelitales detectando los tipos coberturas por medio de los índices multiespectrales NDVI y NDWI con el fin de detectar impactos debido a la extracción de oro a cielo abierto; en su

estudio, concluyen la efectividad de las imágenes multiespectrales para evaluar impactos de la minería en el agua como la presencia de minerales en los cuerpos de agua y el secado de cauces donde la ribera del río se hace más notoria que el río mismo (presencia de suelos, arenas y similares que se detectan por su alta reflectancia en la banda roja y NIR).

Por otro lado, Monroy y Armenteras (2017) también realizan un análisis respecto a cambios de cobertura por minería aluvial en el río Nechí donde describen y cuantifican los mismos durante un período entre 2009-2014, detectando los patrones espaciales mediante interpretación de imágenes espectrales de satelitales Landsat. El uso de imágenes, junto con otros métodos implementados, permitió caracterizar los rápidos patrones de cambio lo cual provee de información sobre condiciones actuales y su probable evolución en los años siguientes.

En el caso de Plata y Fuentes (2023), analizan el crecimiento urbano en La Gabarra, Santander para la identificación de cambios de usos de suelo por medio de teledetección, además de datos geográficos y demográficos. En el análisis de las imágenes, se implementaron diferentes índices espectrales, entre ellos el NDVI, los cuales permitieron obtener información del suelo de manera automática. En relación con el crecimiento urbano, se resalta que uno de los principales factores para la expansión es debido al desplazamiento forzado y abandono de tierras por la influencia del conflicto entre grupos armados ilegales.

Un común denominador de los estudios realizados con la técnica de la teledetección representa una ventaja en el análisis del cambio de coberturas a nivel global y de forma periódica ya que las características orbitales de los satélites permiten obtener imágenes repetitivas de gran parte de la tierra, incluso de áreas con difícil acceso (Chuvieco, 1995).

2. Justificación

La importancia de abordar el monitoreo de la minería en el Bajo Cauca Antioqueño radica en la necesidad urgente de comprender y mitigar los impactos negativos de esta actividad tanto en el medio ambiente como en las comunidades locales. La minería, siendo una de las principales fuentes económicas de la región, conlleva desafíos ambientales, sociales y de seguridad que requieren una respuesta integral y efectiva.

En primer lugar, la explotación minera en el Bajo Cauca ha sido asociada con la deforestación, la contaminación del agua y del suelo, así como la pérdida de biodiversidad, lo cual afecta directamente a los ecosistemas locales y a los servicios ambientales que estos proporcionan. Además, la presencia de grupos armados ilegales vinculados a la minería genera conflictos socioeconómicos y violaciones de los derechos humanos en la región.

El monitoreo de la minería, utilizando herramientas como la percepción remota y los sistemas de información geográfica, es fundamental para identificar y abordar estos impactos de manera oportuna y efectiva. Sin embargo, la eficacia de los actuales métodos de monitoreo, como los implementados por el CASCDH, aún requiere ser validada y mejorada para garantizar una gestión sostenible de la minería en la región.

La validación y mejora de la metodología de monitoreo mediante un análisis comparativo histórico del NDVI y el uso de imágenes Sentinel-2 representan una oportunidad para fortalecer la capacidad del CASCDH y otras instituciones involucradas en la gestión ambiental y la seguridad ciudadana en el Bajo Cauca Antioqueño. Este proyecto no solo contribuirá a generar información actualizada y precisa sobre los impactos de la minería en la región, sino que también sentará las bases para el diseño de políticas y estrategias de intervención más efectivas y orientadas a la protección del medio ambiente y los derechos humanos de las comunidades locales.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta metodológica para la corroboración de descapotes por minería utilizando el índice de vegetación normalizada en la región del Bajo Cauca antioqueño.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia de la metodología CASCDH para el monitoreo de la remoción de cobertura vegetal debido a la minería en el Bajo Cauca antioqueño
- Analizar el estado de permanencia de las zonas con presencia de minería durante el período de monitoreo
- Identificar la potencialidad de las imágenes satelitales Sentinel-2.

4. Marco teórico

4.1 Explotación de oro de aluvión

Actualmente, la minería del oro en Colombia se compone de tres divisiones: la minería formal a gran escala, la minería a pequeña escala y la minería artesanal. La minería artesanal implica principalmente actividades como el lavado de sedimentos de ríos para separar el oro de la arena, o el empleo de herramientas manuales como picos para extraer tierra que contiene oro (Betancur-Corredor, Loaiza-Usuga, Denich, & Borgemeister, 2018). Este tipo de minería es la que se entiende también como minería aluvial, es decir, el oro es extraído de los depósitos aluviales de la llanura aluvial. Estos depósitos aluviales son comunes en las áreas inferiores de los ríos, donde crean llanuras aluviales y deltas, aunque pueden desarrollarse en cualquier punto donde el río se desborde de sus límites o donde su flujo se vea obstaculizado (Cano-Londoño, 2023). Es común que estas zonas presenten niveles bajos de macronutrientes y un pH ácido, lo que suele interferir con los procesos de formación del suelo y el desarrollo de las plantas (Betancur, 2018).

4.2 Teledetección

La teledetección se define como un conjunto de técnicas destinadas a la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes digitales (Pérez & Ángel L., 2006). La teledetección investiga las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, revelando las relaciones entre estas variaciones y las propiedades de diversos materiales terrestres.

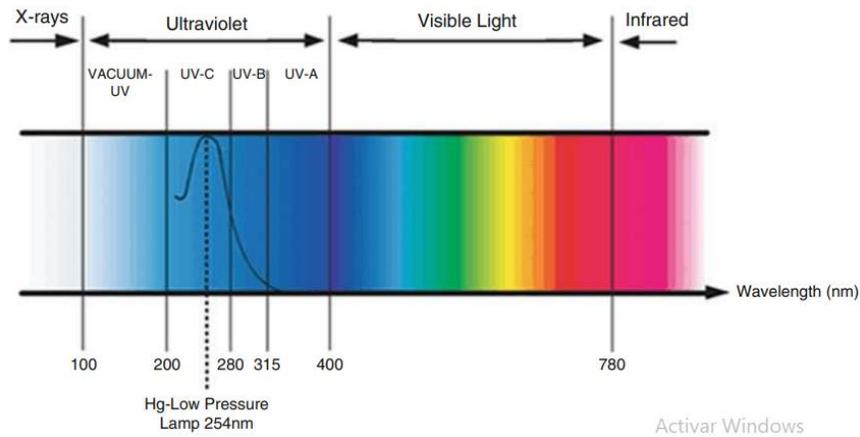
Su principal propósito es identificar los materiales y fenómenos en la superficie de la Tierra mediante su *firma espectral* (Sacristán Romero, 2006). Para este objetivo, las imágenes digitales son obtenidas a través de satélites espaciales o aviones y cuyo conjunto de datos comprende tres tipos de información:

- *Espacial*: Se refiere a la disposición física de los elementos que forman parte de la imagen.
- *Espectral*: Se refiere a datos espectrales que describen y pueden proporcionar entendimiento sobre las características de la superficie terrestre.
- *Temporal*: Permite a la identificación de los cambios que ocurren en la superficie terrestre a lo largo del tiempo.

Por otra parte, las superficies del planeta pueden clasificarse en tres grandes categorías superficies con agua, superficies con vegetación y suelos desnudos. Cada una de estas categorías cuentan con una gran variabilidad, esto es, diferentes tipos de suelos, diversidad de especies vegetales y las condiciones fisicoquímicas del agua. El comportamiento espectral de cada categoría, es decir, cómo cada cobertura refleja la energía en distintas longitudes de onda, no es uniforme y varía considerablemente debido a factores físicos, químicos y ambientales. Estos factores se refieren a la temperatura, humedad, textura, composición química, contenido de materia orgánica, pendiente, orientación, estación del año y hora del día, entre otros. La presencia de estos factores representa una dificultad en la interpretación de las imágenes, pero a su vez, enriquece la información capturada proporcionando una variedad de matices de la heterogeneidad de las superficies. Estos matices permiten llevar a cabo estudios e investigaciones en diferentes disciplinas (Pérez & Ángel L., 2006).

4.2.1 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la gama completa de energía electromagnética que viaja en forma de ondas a través del espacio y la atmósfera. Estas ondas tienen diferentes longitudes y frecuencias, desde las ondas de radio de longitud más larga hasta los rayos gamma de longitud más corta. La luz visible, detectable por el ojo humano, está en el medio de este espectro (Figura 1). Los satélites utilizan esta energía para observar la Tierra y otros cuerpos celestes, y la principal fuente de energía es el Sol. La cantidad de energía reflejada, absorbida o transmitida por un objeto depende de su albedo, que es la medida de su capacidad para reflejar la luz solar en lugar de absorberla. Por ejemplo, la nieve tiene un alto albedo y refleja hasta el 90% de la radiación solar entrante, mientras que el océano absorbe más de lo que refleja, un 6% (NASA, s.f.).

Figura 1*El espectro electromagnético*

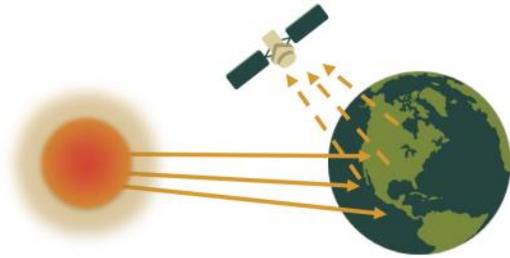
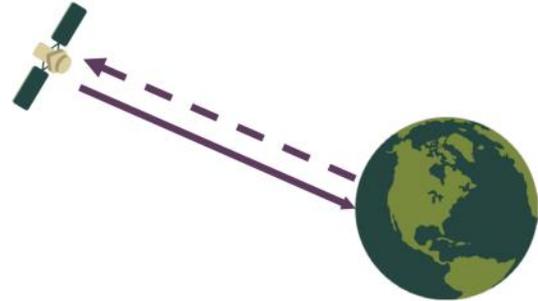
Nota. Fuente https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1 (Light, Electromagnetic Spectrum, 2015).

4.2.2 Sensores

Los sensores o instrumentos de medición que miden y detectan la radiación electromagnética en determinada longitud de onda presentes en satélites y aviones, pueden utilizar la luz solar o emitir su propia iluminación para medir la energía reflejada. Aquellos que utilizan la energía solar se les denomina *sensores pasivos* y los que emiten su propia energía, *sensores activos* (Figura 2). Los sensores pasivos incluyen dispositivos como radiómetros y espectrómetros, que miden la radiación electromagnética en diferentes bandas del espectro (ópticos). Estos sensores son útiles para medir la temperatura, propiedades vegetales, nubes y otros atributos físicos, pero tienen limitaciones para observar a través de nubes densas. Por otro lado, los sensores activos como el radar operan en la banda de microondas, lo que les permite penetrar la atmósfera y proporcionar mediciones detalladas de la superficie terrestre, la estructura forestal, la precipitación y otros fenómenos (NASA, s.f.) .

Figura 2

Diagrama sensores pasivos y activos

Passive Sensors**Active Sensors**

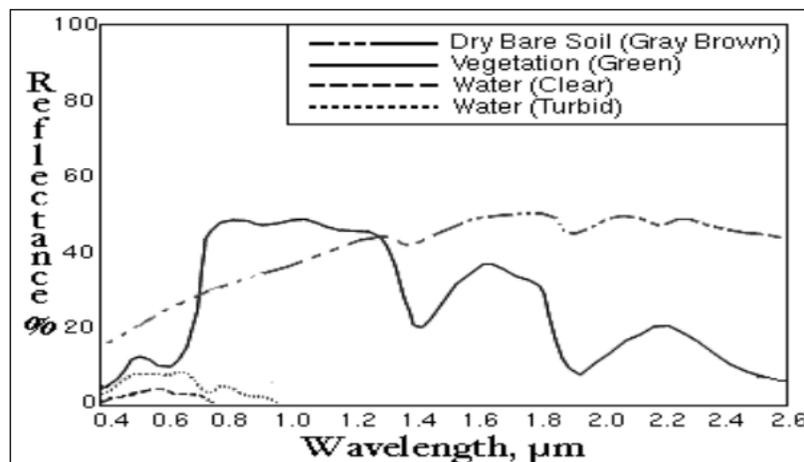
Nota. Fuente <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing> (Programa de capacitación en teledetección de ciencias aplicadas de la NASA, s.f.).

4.2.3 Firma espectral

Las distintas superficies, como el agua, el suelo desnudo y la vegetación, reflejan la radiación de manera única en varios canales. La radiación reflejada en relación con la longitud de onda se conoce como la *signatura o firma espectral* de la superficie y se representa por medio de curvas (ESA, s.f.). La figura 3 muestra la firma espectral entre diferentes superficies y entre diferentes estados de una misma superficie, es decir, para el caso del agua, el porcentaje de reflectancia es distinta para el agua turbia y clara.

Figura 3

Firmas espectrales de algunos elementos naturales

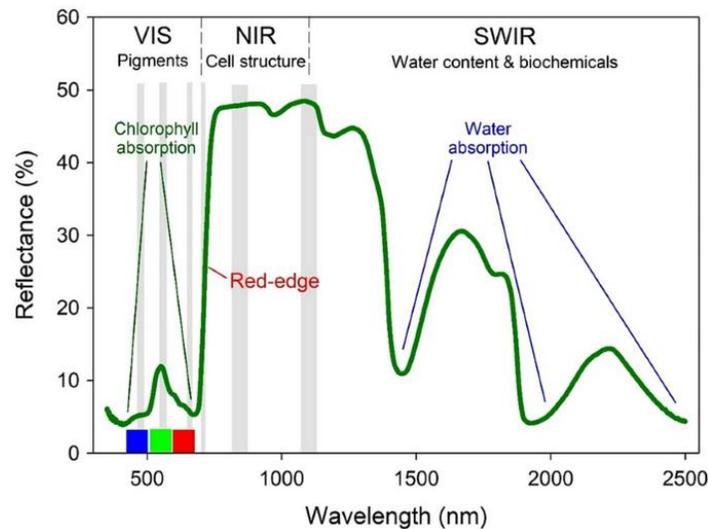


Nota. Fuente (Teledetección: Nociones y Aplicaciones, 2006).

En el caso de la vegetación, su firma espectral es notable (Figura 4). Durante su fase de crecimiento, la clorofila presente en las plantas absorbe predominantemente la luz visible, especialmente la luz roja, para su empleo en la fotosíntesis. Por otro lado, la luz cercana al infrarrojo es reflejada eficientemente por las plantas, dado que no es aprovechada por ellas. Este proceso ayuda a las plantas a regular su temperatura y a evitar la pérdida de humedad debido a la evaporación. Como resultado, la reflectancia de la vegetación en las gamas cercanas al infrarrojo y al espectro visible experimenta variaciones considerables, lo que proporciona información valiosa sobre la cantidad de área cubierta por hojas en crecimiento (ESA, s.f.).

Figura 4

Perfil de reflectancia típico de rango completo de vegetación sana



Nota. Franjas grises muestran bandas espectrales comúnmente medidas por sensores multiespectrales. Fuente <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01378-w> (Cotrozzi, 2020).

4.2.4. Resolución de un sistema sensor

La resolución de las imágenes es uno de los conceptos más importantes y destacados en el ámbito de la teledetección y, además, puede influir en cómo se pueden utilizar los datos de un sensor ya que la resolución depende de la órbita del satélite y el diseño del sensor (NASA, s.f.). Los tipos de resolución son: espacial, temporal, espectral y radiométrica (Zapata Arbeláez & Anaya Acevedo, 2011) & (Chuvieco, 1995).

- Resolución espacial: Se relaciona directamente con el tamaño de los píxeles en la imagen, lo que a su vez está asociado con las dimensiones de los objetos en el terreno. Además, hace referencia al potencial de detalle de una imagen. La selección de la resolución espacial debe estar alineada con el objetivo a analizar y la escala, es decir, es esencial definir el tamaño del área de estudio y su alcance en tres niveles posibles: global, nacional o regional.
- Resolución temporal: Indica la frecuencia de la toma de imágenes para una misma posición. Si la resolución temporal es alta, es apropiado para el estudio de tendencias de vegetación de rápido crecimiento.
- Resolución espectral: Se refiere al intervalo del espectro electromagnético que una banda puede capturar, es decir, dicho rango corresponde a un rango de longitud de onda específico. En la práctica, resulta más idóneo un sensor capaz de proporcionar mayor número de bandas (multiespectral) ya que facilita una mejor caracterización de las coberturas y, por ende, la diferenciación en las mismas.
- Resolución radiométrica: Hace referencia al número de valores posibles de una banda. Este número puede limitar la sensibilidad del sensor o la cantidad de variación que se puede detectar. En términos de información, señala la cantidad de bits que representan la energía registrada; cada bit registra un exponente de potencia, es decir, una resolución de 8 bits es 28, muestra que el sensor tiene 256 valores digitales para almacenar información. De esta manera, a medida que mayor sea la resolución radiométrica, hay más valores disponibles para almacenar información lo que permite una mejor discriminación de detalle.

4.4. Satélites Sentinel

Los satélites Sentinel hacen parte del programa Copernicus de la Unión Europea y son operados por la Agencia Espacial Europea (ESA). Este proyecto de teledetección ha desarrollado diferentes misiones entre las cuales se destacan:

- Sentinel-1: Consiste en una constelación de dos satélites que operan día y noche con un sistema de radar de apertura sintética (SAR) que trabaja en el sensor de radar en banda C, es decir, permite la toma de imágenes independientemente de la condición meteorológica (ESA, s.f.).

- Sentinel-2: Comprende una constelación de dos satélites compuesta por el instrumento MSI (Multispectral Instrument) que proporciona imágenes multiespectrales de alta resolución muestreadas en 13 bandas para la visualización de vegetación, suelo, cobertura del agua, etc. (ESA, s.f.).
- Sentinel-3: Suministra datos ópticos, de radar y altimétricos al tratarse de una misión multinstrumental con la capacidad de medir variables como topografía superficial, temperatura del mar y tierra, color del océano y tierra con gran precisión (Programme, s.f.)

Sentinel-2

Esta misión está compuesta por dos satélites en órbita sincronizada con una fase de 180° entre sí para situarlos en extremos opuestos del globo terrestre y proporcionar imágenes con una frecuencia temporal mayor. Las imágenes que se obtienen de este satélite cuentan con una resolución espacial de hasta 10 metros y una amplia cobertura con un ancho de franja orbital de 290 kilómetros. Estos satélites desempeñan un papel fundamental en una amplia gama de ámbitos como la gestión de recursos terrestres, agricultura, silvicultura, respuesta ante desastres naturales, operaciones de ayuda humanitaria, evaluación de riesgos y seguridad.

El instrumento óptico MSI (Multispectral Instrument) con el que cuenta el satélite, es un *sensor pasivo* que captura la luz solar reflejada desde la superficie terrestre mientras avanza a lo largo de su órbita. Mediante un divisor de haz, la luz entrante se canaliza hacia dos conjuntos de planos focales separados dentro del instrumento, uno destinado a las bandas visibles e infrarrojo cercano (VNIR) y el otro a las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR).

El diseño óptico del telescopio MSI garantiza un amplio campo de visión de 290 kilómetros, mientras que un mecanismo de obturación protege al instrumento de la iluminación directa del sol en órbita y sirve como dispositivo de calibración al recoger la luz solar reflejada por un difusor. Este meticuloso sistema de captura de imágenes garantiza la precisión y fiabilidad de los datos recopilados en diversas aplicaciones y estudios científicos. Las resoluciones de la misión Sentinel-2 se representan en la Tabla 1.

Tabla 1*Resoluciones de cada banda de la misión Sentinel-2*

Banda Sentinel-2	Resolución espectral (longitud de onda central en μm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal	Resolución radiométrica
Banda 1 – costa aerosol	0.443	60		
Banda 2 – azul	0.490	10		
Banda 3 – verde	0.560	10		
Banda 4 – rojo	0.665	10		
Banda 5 – VRE	0.705	20	10 días por satélite y 5 días en total cuando se combinan información de ambos satélites	El instrumento óptico MSI es de 12 bits , es decir, imágenes en un rango de 0 a 4095 valores de intensidad de luz potencial.
Banda 6 – VRE	0.740	20		
Banda 7 – VRE	0.783	20		
Banda 8 – NIR	0.842	10		
Banda 8A – VRE	0.865	20		
Banda 9 – vapor agua	0.945	60		
Banda 10 – SWIR (cirros)	1.375	60		
Banda 11 – SWIR	1.610	20		
Banda 12 – SWIR	2.190	20		

4.5 Composición a color

Las composiciones RGB de color son comúnmente implementadas como técnicas de análisis en teledetección para identificar y diferenciar características en la superficie como vegetación, masas de agua, explosiones de algas, entre otras. Las combinaciones de bandas de colores falsos más comunes son:

- Color verdadero RGB (4, 3, 2): Esta combinación da como resultado un color natural tal como lo percibe el ojo humano.
- Infrarrojo RGB (8,4,3): Las imágenes en falso color utilizan una combinación específica de bandas espectrales para representar la información de manera visual. En este caso, se emplean las bandas de infrarrojo cercano, rojo y verde para generar una representación de

la vegetación, donde las áreas con vegetación densa aparecen en tonos rojos intensos. Esta técnica es comúnmente utilizada para evaluar la salud de las plantas y la densidad de la vegetación. Por otro lado, las áreas urbanas y el terreno expuesto se muestran en tonos grises o tostados, mientras que el agua se representa en tonos azules o negros.

- Infrarrojo de onda corta RGB (12,8,4): Las bandas 11 y 12 del infrarrojo de onda corta (SWIR) son útiles para detectar la presencia de agua en plantas y suelos, así como para diferenciar entre diferentes tipos de nubes, nieve, hielo y áreas quemadas. También son efectivas para mapear la geología al analizar la reflexión de la luz en diferentes tipos de roca. En la composición de imágenes, el canal verde destaca la vegetación mediante la banda B8A, mientras que el canal azul resalta el suelo desnudo y las áreas construidas mediante la banda roja.
- Agricultura RGB (11,8A,2): utiliza las bandas SWIR-1 (B11), infrarrojo cercano (B08) y azul (B02), se emplea principalmente para monitorear la salud de los cultivos. Las bandas de onda corta e infrarrojo cercano resaltan la vegetación densa, que se visualiza en verde oscuro en la composición. Además, las mediciones SWIR ayudan a estimar la cantidad de agua presente en plantas y suelo. Estas bandas también permiten distinguir entre nieve, hielo y áreas quemadas, siendo útiles para mapear los daños causados por incendios.

4.6 Índice de Vegetación Normalizada NDVI

Los índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales (como las obtenidas por la misión Sentinel-2) permiten evaluar la salud de los cultivos mediante diversas características como el contenido de clorofila, el nivel de humedad entre otras (Revelo Luna, Mejía Manzano, Montoya Bonilla, & Hoyos García, 2020). El índice NDVI, calculado a partir de datos satelitales, se relaciona con el análisis de condiciones de sequía y se utiliza para evaluar la densidad vegetal en una región determinada. Se basa en la observación de la luz solar reflejada por las plantas en distintas longitudes de onda, tanto visible como infrarroja cercana. Este índice varía entre -1 y +1, donde valores superiores indican una vegetación más abundante y saludable, mientras que valores inferiores señalan una vegetación más escasa (Drisya , Kumar D, & Roshni , 2018).

La ecuación general para el NDVI es:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

donde:

NIR → *Banda de infrarrojo cercano*

RED → *Banda roja*

4.7 EVOA (UNODC-SIMCI)

Desde el MinEnergía y la UNODC (2022), se cuenta con un sistema de monitoreo donde uno de sus pilares está basado en la detección de evidencias de oro de aluvión (EVOA) por medio de imágenes satelitales y la integración de otras herramientas de percepción remota. Los datos recogidos también son usados para el estudio de la legalidad de las EVOA y el marco normativo de restricción ambiental. Finalmente, la información atraviesa un riguroso análisis antes de su publicación la cual se da mediante tableros de control y mapas interactivos. Sin embargo, al tratarse un monitoreo meticuloso, las evidencias se publican aproximadamente un año después del período de monitoreo por lo que, en caso de requerir información de las áreas con remoción de cobertura vegetal y el estado de las minas en un corto plazo, no sería posible.

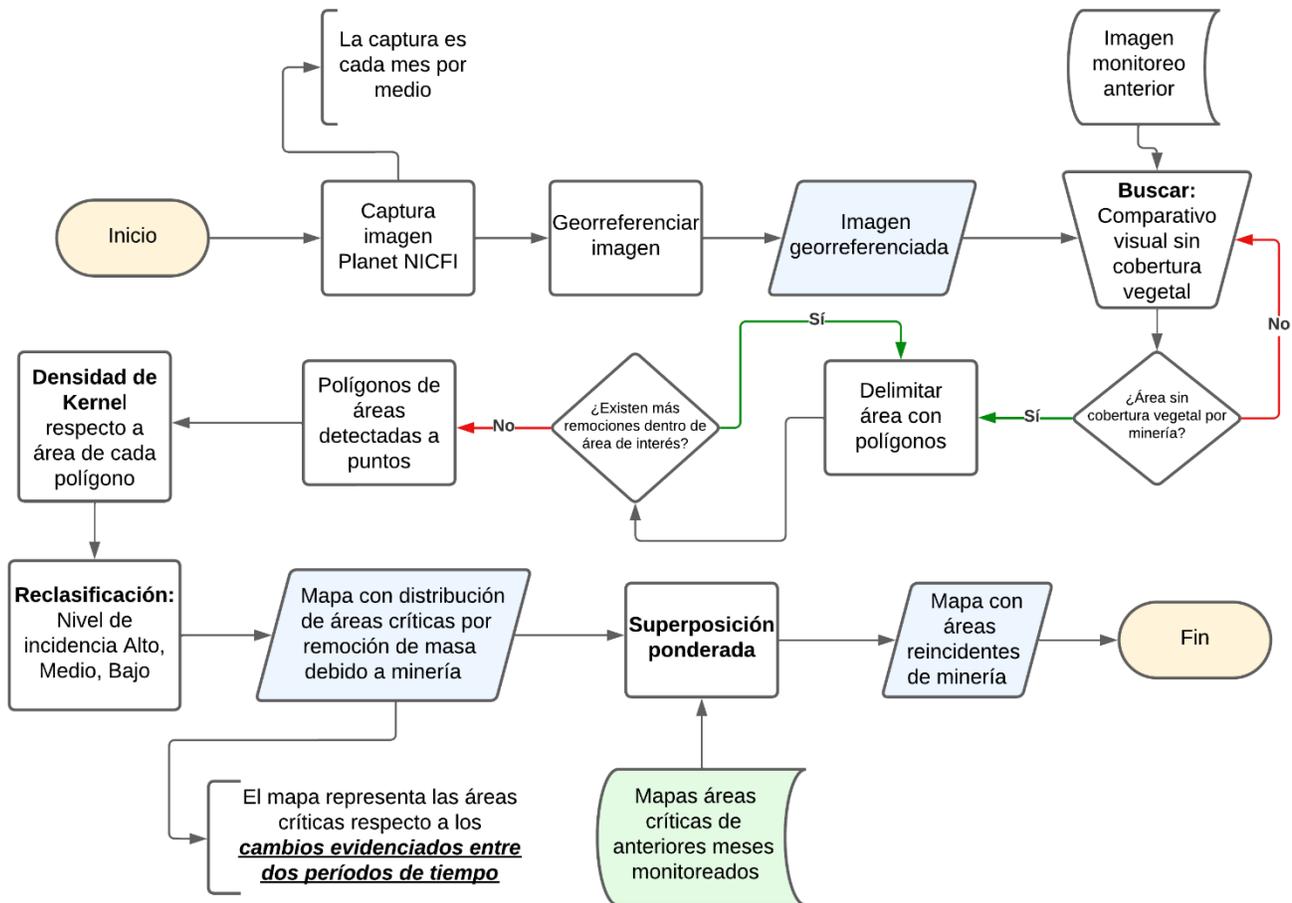
4.8 CASCDH

El Centro de Análisis de Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos (CASCDH) fue creado en 2020 mediante la Ordenanza No. 08 de ese mismo año, como respuesta a la necesidad de contar con análisis detallados basados en datos sobre el estado del orden público, convivencia, seguridad ciudadana, derechos humanos y acceso a la justicia en los 125 municipios del departamento de Antioquia. Su principal objetivo es brindar apoyo a la toma de decisiones en la gestión territorial de la seguridad del departamento, trabajando en conjunto con la Fuerza Pública, Organismos de Seguridad y Justicia, entidades territoriales y otras instituciones pertinentes.

El ejercicio de monitoreo para la focalización de zonas críticas por minería en el Bajo Cauca antioqueño desarrollado por el CASCDH se explica en la Figura 5. Este ejercicio se desarrolló para los meses Marzo, Mayo, Julio, Septiembre y Noviembre con el fin de obtener cambios de áreas con remoción de cobertura con mayor frecuencia.

Figura 5

Flujograma de la metodología desarrollada dentro del CASCDH



La metodología en el CASCDH se caracterizaba por desarrollarse de una manera más manual en toda su línea del proceso, desde la toma de imágenes (la cual se realizaba como un captura de la visualización de la imagen en un geovisor), la georreferenciación por medio de puntos de control establecidos con ayuda del mapa base del software hasta la delimitación de las áreas identificadas como expansión de los descapotés por la minería (por medio de comparación visual entre dos meses y construcción del polígono de manera manual).

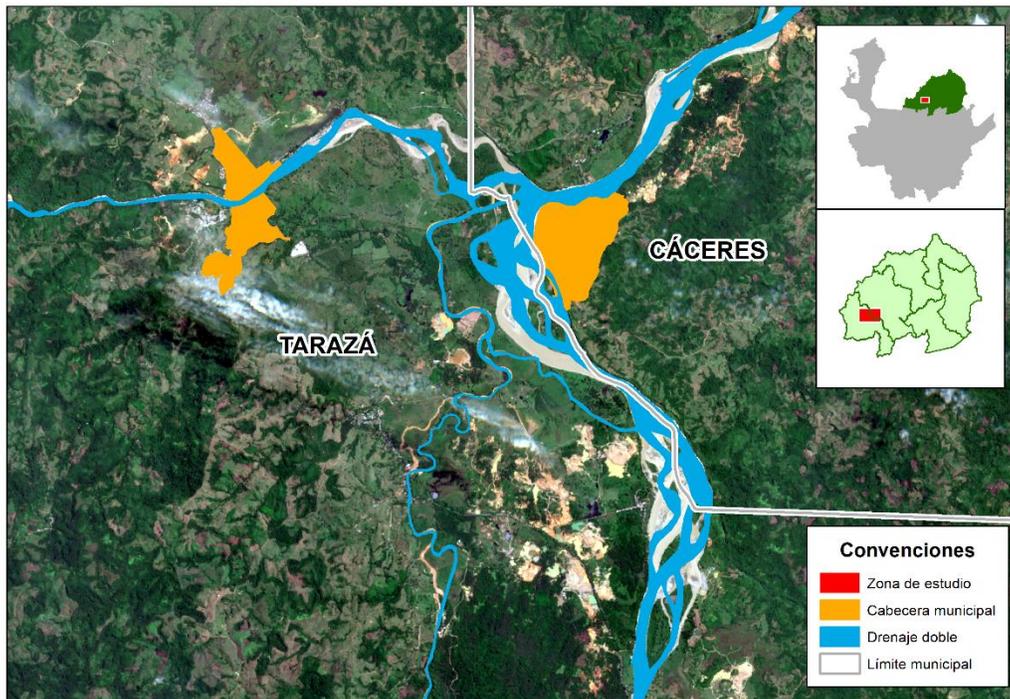
Esta metodología, si bien permite encontrar áreas de cambio y aumento de descapotés, presenta cierta incertidumbre sistemática (los polígonos encierran un área, pero no precisamente el límite mismo del descapote) y aleatoria (al tratarse de capturas de imágenes y no de imágenes satelitales debidamente georreferenciadas). Por otro lado, esta metodología detecta únicamente áreas nuevas de zona minera de extensión considerable frente a la percepción humana, excluyendo el aumento de los límites de los descapotés preexistentes, lo cual no pierden relevancia ya que

indican una prevalencia en la zona y su ampliación en el tiempo. Además, en términos de optimización, la revisión de una gran extensión del territorio de esta manera toma un tiempo considerable.

4.9 Área de estudio

La zona estudio delimitada para el objetivo de este informe está ubicada entre los municipios de Tarazá y Cáceres del departamento de Antioquia. En la Figura 6, se puede evidenciar las cabeceras municipales de dichos municipios junto con al río Tarazá y el río Cauca, respectivamente. Ambos municipios se caracterizan por tener como actividad económica principal la minería la cual hace parte de la tradición de la subregión en conjunto con la ganadería y los cultivos ilícitos. En el caso de la minería, esta se produce en su mayoría de forma ilegal debido al dominio del territorio por parte de grupos armados ilegales que, además de provocar contaminación de los cuerpos de agua con mercurio y la tala indiscriminada de árboles, ejercen su poder de manera violenta con el propósito de mantener su renta criminal.

Figura 6
Área de estudio



El municipio de Tarazá presenta un relieve muy variado, con altitudes que van desde los 125 m.s.n.m. en la cabecera y las zonas más bajas, hasta alcanzar los 1.500 y 2.000 m.s.n.m. en los límites con el municipio de Ituango. Además, tiene una diversidad de pisos térmicos templados y temperaturas medias (Gómez García, 2020). Por otro lado, el municipio de Cáceres cuenta con una ubicación geográfica privilegiada al estar ubicado entre los ríos Cauca y Nechí. Su área rural, se encuentra en altitudes que van desde los 50 hasta los 500 m.s.n.m., con temperaturas que oscilan entre los 23°C y 32°C. Además, la precipitación media anual alcanza los 2.500 mm, siendo más pronunciadas las lluvias en la zona sur del municipio en comparación con la zona norte (Clavijo et al.2023).

Respecto a la variación mensual de la precipitación, en la mayoría de las subregiones del departamento de Antioquia se evidencia el comportamiento bimodal propio de la región Andina del país cuyos valores altos se presentan en los trimestres MAM-SON y los más bajos en DEF-JJA. Para el Bajo Cauca, este comportamiento no se exhibe notoriamente; por el contrario, predominan valores altos de precipitación entre los meses de agosto-noviembre, lo cual revela un comportamiento de lluvia unimodal (Naranjo Bedoya, Aristizábal Giraldo, & Morales Rodelo, 2019). Esto indica que la temporada seca que experimenta el departamento, en esta subregión tiende a desaparecer (Arango, C., Dorado, D., & Ruiz, s.f.). Lo anterior representa una característica importante en el análisis de coberturas por medio de imágenes multiespectrales y el índice NDVI ya que la energía reflejada de una misma cobertura puede variar si se encuentra hidratada o seca.

5. Metodología

5.1 Materiales

El insumo de imágenes satelitales Sentinel-2 se obtuvo a través de la plataforma Copernicus. La descripción de las imágenes se presenta en la Tabla 2. Para el procesamiento de las imágenes y la elaboración cartografía final, se implementa el software ArcGIS 10.8.

Tabla 2

Información de imágenes Sentinel-2

Nomenclatura	Fecha de toma	Proyección
S2B_MSIL2A_20230322T153619_N0509_R068_T18NVP_20230322T212929.SAFE	22 marzo de 2023	WGS84
S2A_MSIL2A_20230526T153621_N0509_R068_T18NVP_20230526T221759.SAFE	26 mayo de 2023	WGS84
S2B_MSIL2A_20230717T152649_N0509_R025_T18NVP_20230717T193958.SAFE	17 julio de 2023	WGS84
S2B_MSIL2A_20230925T152639_N0509_R025_T18NVP_20230925T204750.SAFE	25 septiembre de 2023	WGS84
S2A_MSIL2A_20231112T153621_N0509_R068_T18NVP_20231112T210402.SAFE	12 noviembre de 2023	WGS84

El rango de búsqueda para la imagen óptima se realiza para todo el mes de monitoreo con la finalidad de obtener una imagen con la menor presencia de nubes posible. Sin embargo, las imágenes obtenidas para el mes de Julio y Septiembre presenta nubes en una magnitud considerable lo cual puede representar un sesgo en los datos.

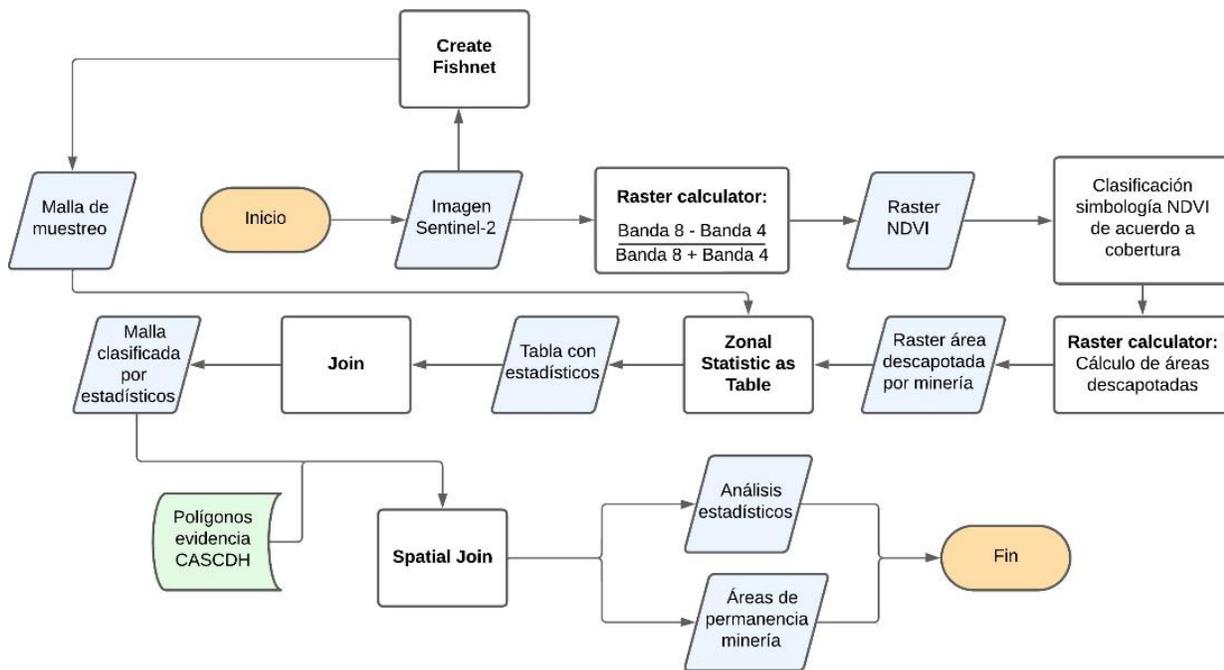
5.2 Métodos

La metodología se describe a través del flujograma de la Figura 7. Si bien la metodología CASCDH se presenta para todo el Bajo Cauca antioqueño, esta propuesta se focaliza en hacer la corroboración en una zona en específico donde se evidenciaron cambios para todo el período de monitoreo. El proceso propuesto se aplica para cada mes de monitoreo de la metodología

CASCDH. La resolución espacial de las imágenes que representan el índice de vegetación NDVI es de 10 metros. Por otro lado, se construye la malla de 60 m x 60 m con el fin de facilitar análisis de los resultados.

Figura 7

Flujograma del desarrollo de la propuesta metodológica



La clasificación de coberturas se focaliza en dos principalmente: cuerpos de agua y suelo desnudo debido a la minería (cuya coloración es de tonos amarillos y rojizos relacionados con la presencia de limo y arenas en la superficie, es decir, ausencia de la capa orgánica). Los cuerpos de agua también se incluyen ya que esta actividad es común en zonas ribereñas y, además, para la identificación de cuerpos de agua asociados a la extracción de oro. La clasificación del índice de vegetación para cada mes se hace por medio de calibración visual respecto a la imagen de color verdadero TCI con el fin de incluir adecuadamente las zonas relacionadas con minería

Después de la clasificación, se realiza un geoprocésamiento a la imagen con el fin de almacenar la cantidad de hectáreas correspondientes a cobertura vegetal removida por minería en una malla construida para la zona de estudio. En este procesamiento, se excluyen aquellas áreas que por el índice de vegetación son incluidas pero que no son precisamente evidencia de minería sino cobertura vegetal removida para otras actividades como la ganadería. El mismo proceso se

realiza para cada mes del monitoreo con el fin de obtener una malla cuyos datos almacenados se refieren al valor del área de minería y su cambio a través el período de estudio.

Para evaluar el cambio en el área de zona minera, se calcula la variación porcentual entre cada período del monitoreo:

$$\text{Variación porcentual}_{\text{Mes 1-Mes 2}} = \frac{\text{Área}_{\text{final}} - \text{Área}_{\text{inicial}}}{\text{Área}_{\text{inicial}}} * 100\%$$

La ecuación anterior indica el porcentaje de cambio en el área del valor final respecto al valor inicial, es decir, si se presenta una variación positiva, indica que se produjo un aumento o extensión del área, y si se presenta una variación negativa, se refiere a una reducción en el área de minería. Sin embargo, aquellas cuadrículas donde el valor inicial es cero quedan excluidas de la ecuación. En este caso, se toman por separado y se presentan como áreas nuevas de explotación minera las cuales son esenciales para la corroboración de la metodología CASCDH que se enfoca en estas zonas, precisamente.

Por otro lado, con la información recolectada a través de la malla de muestreo, se establece un estado de permanencia de las zonas con evidencia de minería en tres categorías: *Permanece*, *Desaparece* y *Aparece*, las cuales se categorizan de acuerdo con la Tabla 3. El propósito de esta categorización es definir las zonas donde la minería persiste, es decir, se mantiene a través del tiempo; zonas donde aparece, es decir, áreas con presencia reciente de esta actividad; y zonas donde la explotación no perdura o se expone de manera oscilante.

Tabla 3

Categorización estados de permanencia de zonas con evidencia minera

Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Noviembre	Estado
✓	✓	✓	✓	✓	Permanece
✓	✓	✓	✓	■	
✓	✓	✓	■	✓	
✓	✓	■	✓	✓	
✓	■	✓	✓	✓	
■	✓	✓	✓	✓	
■	■	✓	✓	✓	
■	■	✓	✓	✓	

█	█	█	✓	✓	
█	█	█	█	✓	
✓	✓	█	█	✓	Aparece
✓	█	█	█	✓	
█	█	✓	✓	█	
█	✓	✓	█	█	
✓	✓	✓	█	█	
✓	✓	█	█	█	Desaparece
✓	█	█	█	█	
✓	█	✓	█	█	
█	✓	█	✓	█	
✓	█	✓	█	✓	

Nota. El símbolo (✓) indica evidencia de minería. El símbolo (█) indica ausencia de minería.

El estado “Permanece” indica las zonas donde la evidencia de minería se presenta en mínimo cuatro meses o en los últimos tres meses de forma consecutiva. El estado de “Aparece” se refiere a las zonas donde la minería se evidencia en mínimo uno de los dos últimos meses y durante el monitoreo hayan presentado dos meses o más de ausencia consecutiva. Finalmente, una zona posee estado “Desaparece” cuando no hay evidencia de minería en los dos últimos meses o durante el monitoreo se haya presentado un comportamiento oscilatorio.

6. Resultados

La clasificación del índice de vegetación obtenido para cuerpos de agua y suelos desnudos de zonas minera se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Intervalos del Índice de Vegetación Normalizada para las coberturas analizadas

NDVI	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Noviembre
Cuerpos de agua	[-0.33, -0.13]	[-0.32, -0.13]	[-0.35, -0.13]	[-0.30, -0.011]	[-1, -0.06]
Suelo desnudo por zona minera	(0.13, 0.20]	(0.13, 0.20]	(0.13, 0.25]	(-0.011, 0.24]	(-0.06, 0.23]

Los intervalos en el índice de vegetación establecidos para cada cobertura cambian notoriamente para los meses de septiembre y noviembre, lo cual se debe a que la temporada húmeda suele producirse concretamente entre los meses de agosto y noviembre. El índice de vegetación puede variar entre coberturas de menor a mayor contenido de humedad. En zonas con abundante humedad, es común encontrar vegetación densa y saludable, lo que se refleja en un índice más elevado debido a una mayor reflectancia en el rango del infrarrojo cercano y una menor reflectancia en el rango del rojo visible. Por otro lado, en áreas más secas, la vegetación tiende a ser escasa o bajo estrés hídrico, lo que resulta en un índice de vegetación más bajo.

6.1 Variación porcentual del área de zonas con evidencia de minería y zonas nuevas

La variación representa el porcentaje de cambio de la minería respecto al mes de monitoreo anterior, es decir, las salidas gráficas no muestran las áreas preexistentes sino los cambios en magnitud de área en una misma unidad de área.

La variación entre marzo y mayo se presenta en la Figura 8. Al oeste de la cabecera municipal de Tarazá (Zona A), las evidencias de la metodología CASCDH coinciden con ciertas

cuadrículas que representan zonas nuevas; sin embargo, no es preciso con todas las que se sobrepone. Por otra parte, el cambio en el área sobre las riberas del río Tarazá menores al 8% respecto al valor registrado en marzo, se alude a la natural fluctuación que sufren las márgenes de los cuerpos lóticos. Además, el registro de cuadrículas con evidencias de áreas nuevas de minería alrededor de las preexistentes, indican la expansión de estas.

En la zona B, las evidencias CASCDH coinciden adecuadamente con la metodología propuesta. En esta zona, las riberas del río Cauca presentan diferentes variaciones que podrían señalar que para el mes de marzo se presentó un bajo nivel del río permitiendo la visibilidad del lecho en los límites de este.

La zona C y D revelan una la correspondencia en algunas de las zonas nuevas. En particular, la zona C se exhiben aumentos sobre zonas preexistentes que pueden indicar la reducción del tamaño de los cuerpos de agua producidos por la misma actividad en el mes anterior, o pueden indicar expansión de las mismas zonas.

La variación entre mayo y julio evidenciada en la Figura 9, muestra que para la región A las zonas nuevas coinciden con los polígonos del CASCDH adecuadamente. En la zona B, se reportan áreas nuevas de suelo desnudo de 0,2 ha que no son reportadas por la metodología CASCDH. Por otro lado, si bien la variación porcentual predominante para esta región es menor al 8%, se identifican unidades de área con cambios entre 9% - 25% y 26% - 60%. Además, es posible identificar que sobre el río Cauca no se presentan tantas áreas nuevas como para la variación anterior; en su lugar, se revela un cambio porcentual menor al 100% en comparación con el mes de mayo, lo que indica mayor contenido de humedad y menor exposición del lecho del río.

En el caso de la zona C se identifica por ambas metodologías un descapote significativo a un 1,5km de distancia del río más cercano. Para la zona D se percibe que la concordancia de zonas nuevas es buena, en general. Sin embargo, para dos zonas establecidas como nuevas en la metodología CASCDH, no hay coincidencia por parte del esquema propuesto ya que se encontró un cambio en la magnitud del suelo desnudo preexistente para esa unidad de área, en lugar de representarse como *área nueva*.

Entre los meses de julio y septiembre (Figura 10), se presenta que para la cabecera municipal de Tarazá (zona A), no coincide la evidencia del CASCDH como *área nueva* sino como variación. Sin embargo, esta propuesta logra detectar tres nuevas áreas significativas de presencia de minería entre 0,2 ha y 0,3 ha. Por otra parte, en la zona B sí se ajustan las evidencias de áreas

nuevas de minería de ambas metodologías; a pesar de ello, la metodología reporta dos zonas adicionales de relevancia debido a su extensión. También puede observarse que los cambios porcentuales indican aumentos de hasta 400% el valor de julio. En el caso de la zona C, coincide adecuadamente la detección de la expansión del descapote identificado para la variación anterior; no obstante, cerca al río Rayo, se presentan un *área nueva* de extensión significativa que es detectada en el esquema del CASCDH. Finalmente, para este período, la evidencia del CASCDH presente en la zona D es detectada en este monitoreo. Adicionalmente, se observa para esta misma región variaciones porcentuales menores al 8%.

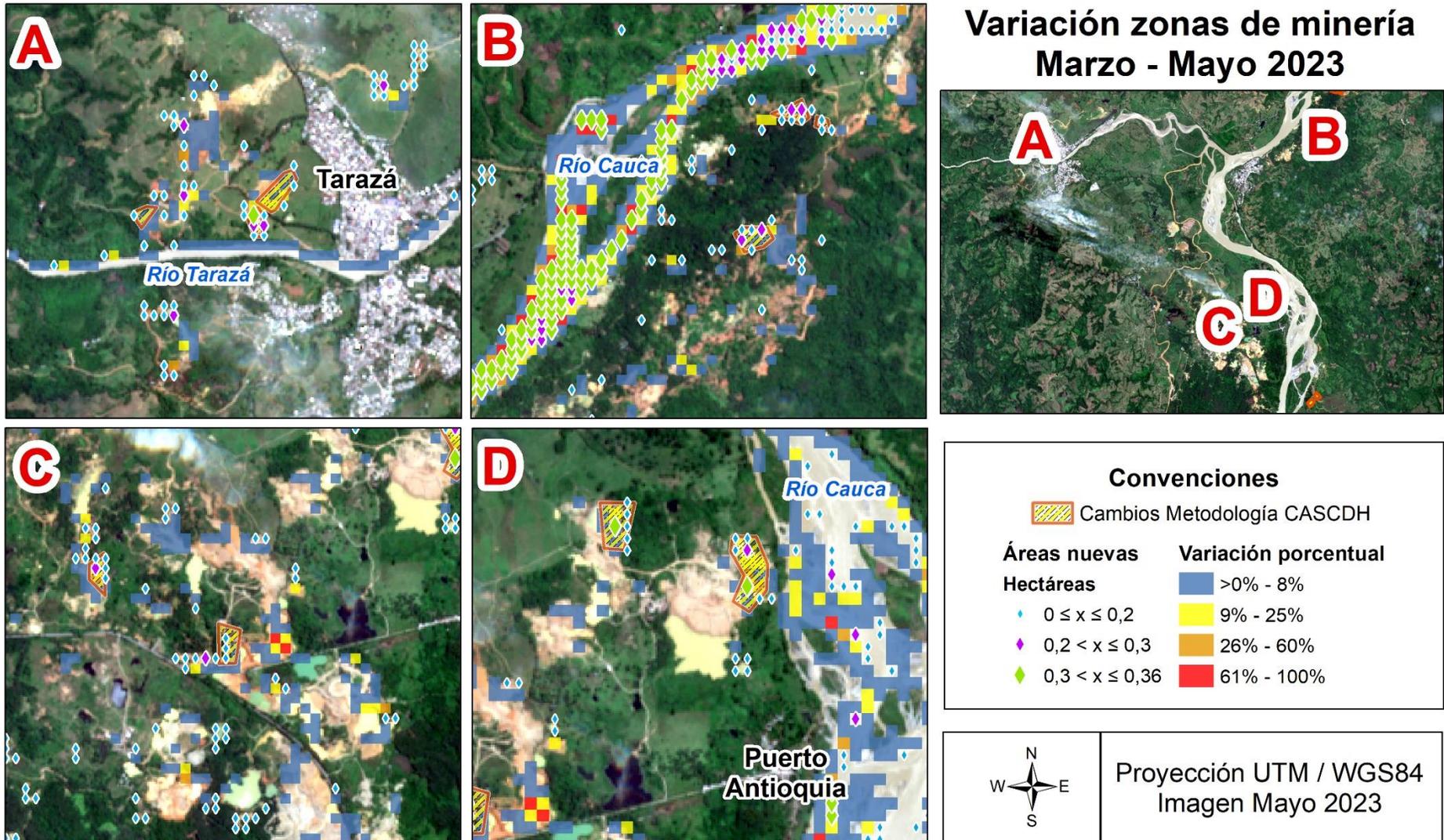
En el último período de comparación (Figura 11), para la zona A coinciden parcialmente ambas evidencias. Alrededor y sobre la zona minera existente, se producen cambios menores al 8% en base al valor de septiembre y, además, se registran aumentos entre 26% y 60%. Para la región B y C, además del buen ajuste del *área nueva*, las variaciones porcentuales registradas ocurren en la periferia de la zona minera previa lo que denota un crecimiento del área de esta. Finalmente, las evidencias de la zona D coinciden de forma parcial y los cambios dentro de esta región también indican una expansión del área.

Las diferentes incongruencias en las zonas nuevas de minería reportadas de ambas metodologías que se percibieron en el análisis pueden estar asociados a ciertos factores como:

- Fallas en la detección visual por la metodología CASCDH
- Origen de la imagen implementada en CASCDH: corresponde a una captura, no un ráster, y además la captura se realiza sobre una imagen que es compilado mensual para obtener un resultado sin presencia de nubes. En este sentido, representa un sesgo ya que no es claro si la imagen representa los cambios adecuadamente en su totalidad.
- La presencia de las nubes de las imágenes Sentinel-2 que interfieren en la detección de zonas

Figura 8

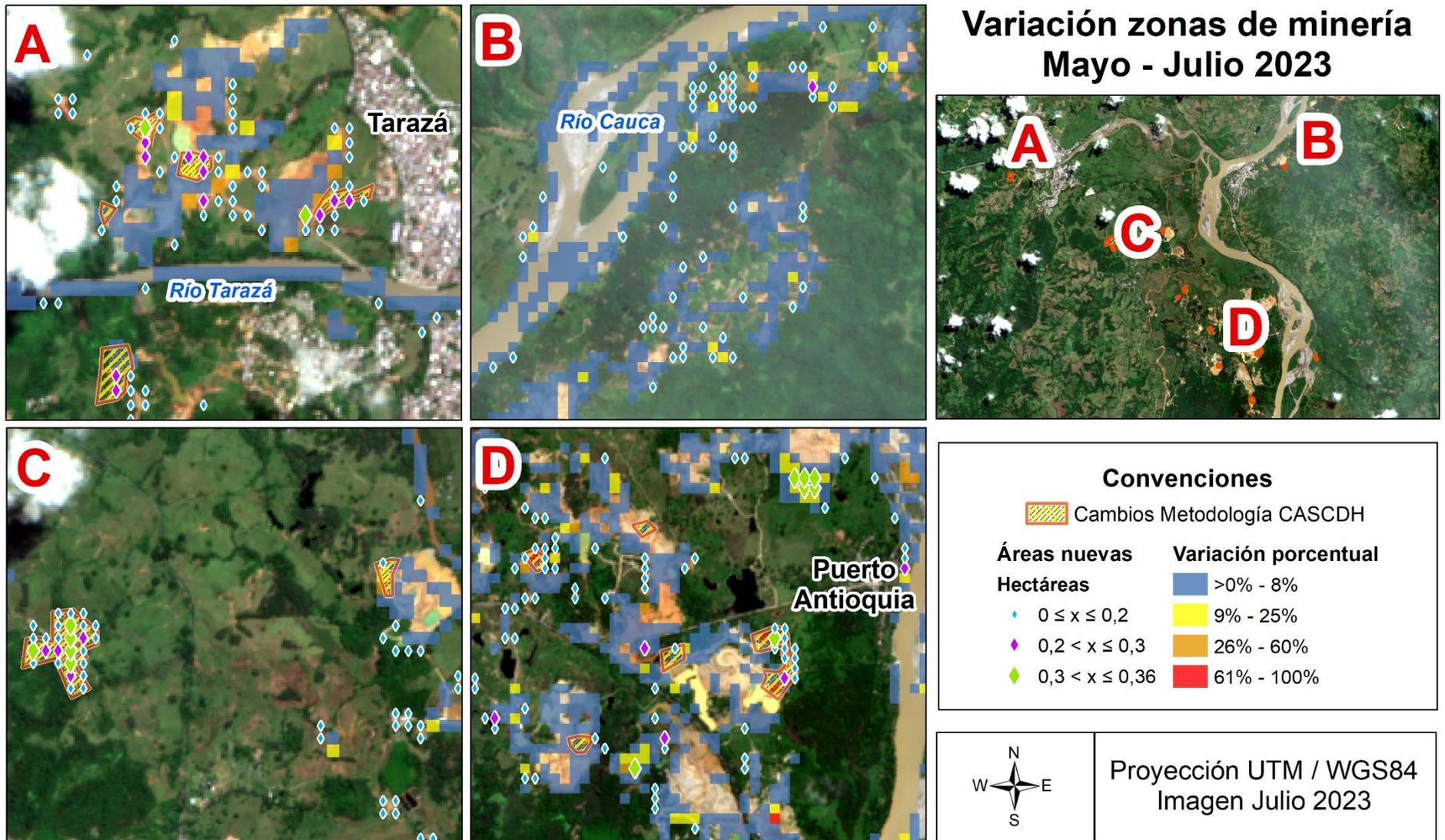
Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre marzo y mayo 2023



Nota. Los polígonos se refieren a la evidencia del CASCDH. La simbología de rombos indica presencia de minería reciente que no se encontraba en el mes inicial (marzo).

Figura 9

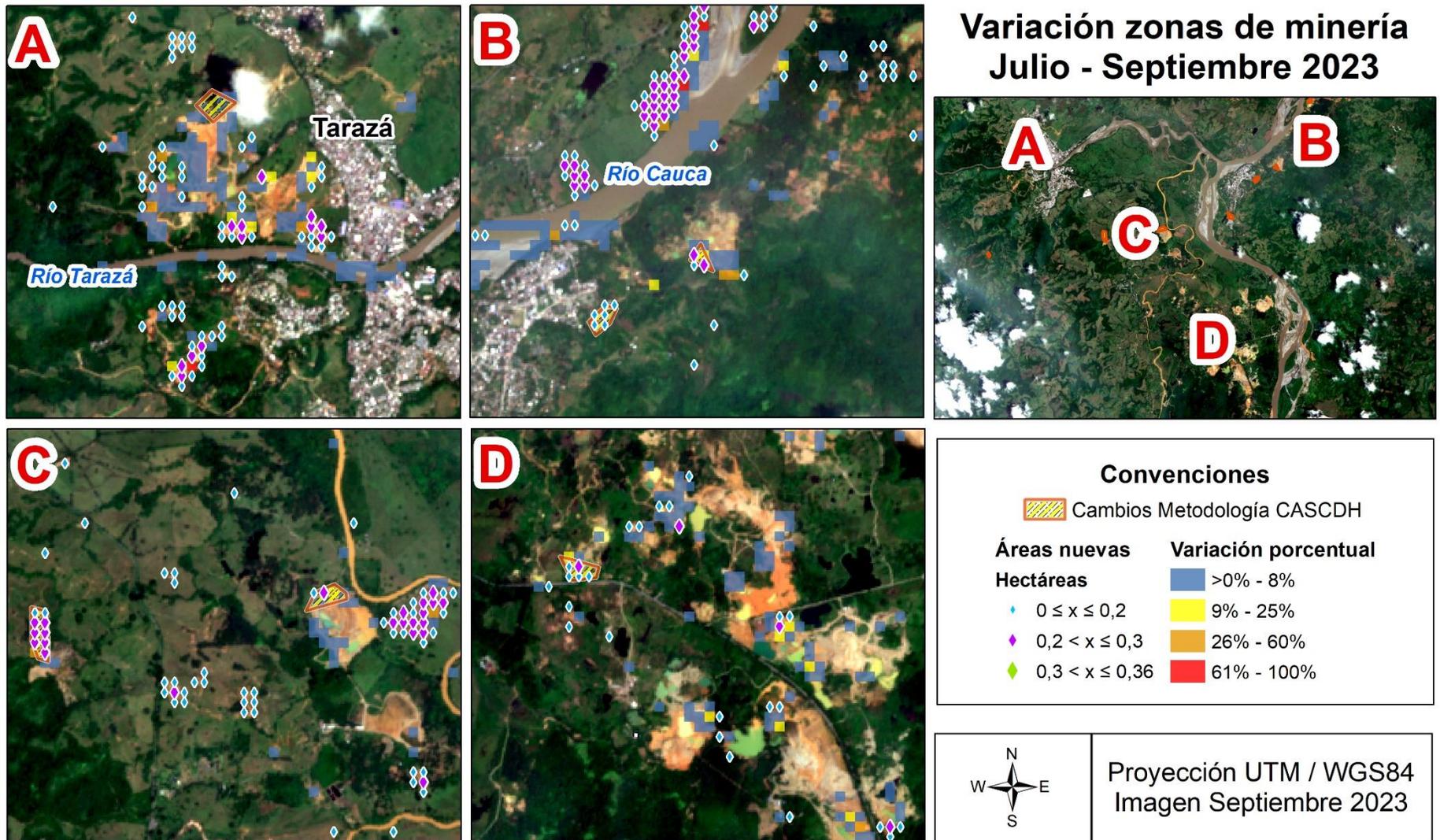
Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre mayo y julio 2023



Nota. Los polígonos se refieren a la evidencia del CASCDH. La simbología de rombos indica presencia de minería reciente que no se encontraba en el mes inicial (mayo).

Figura 10

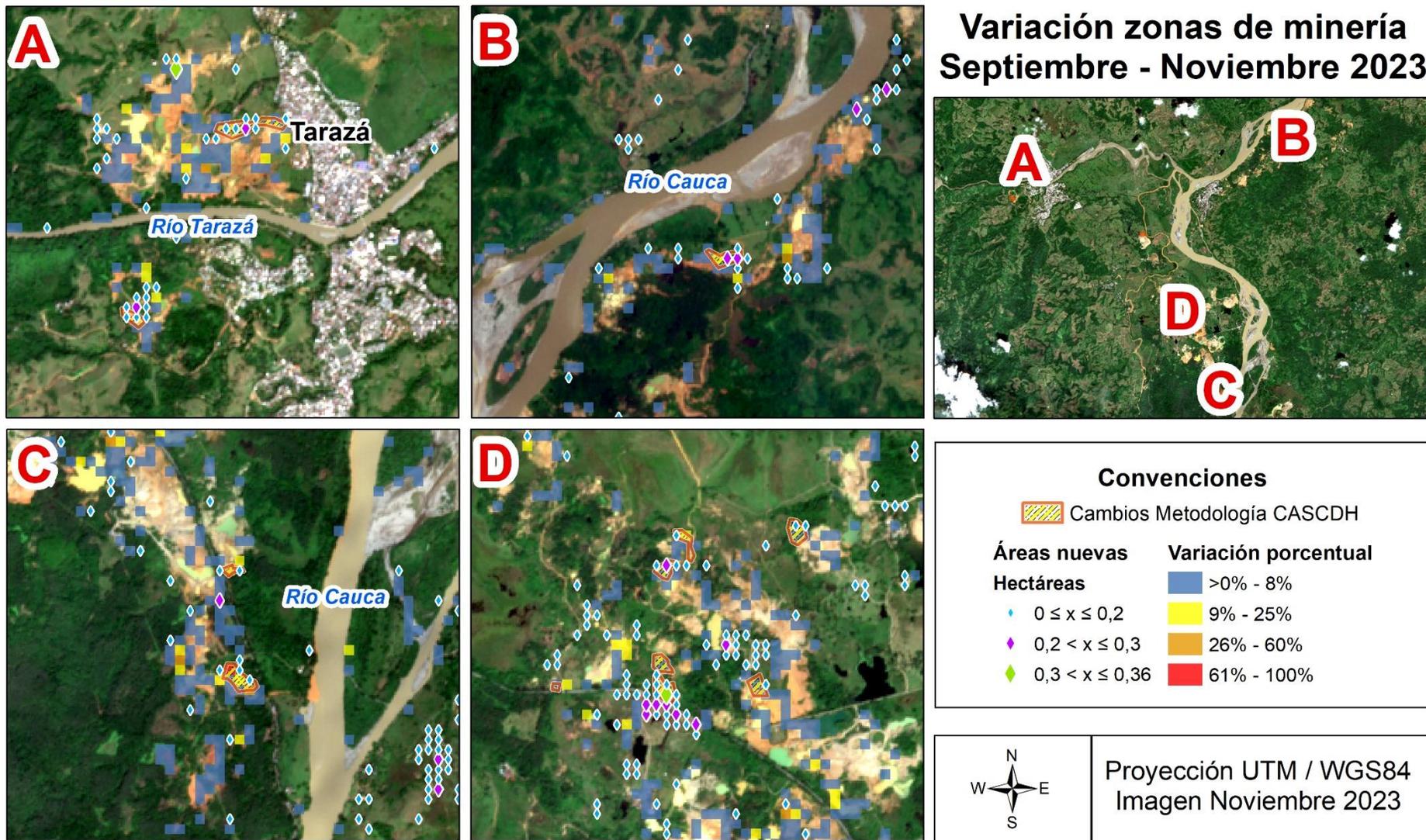
Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre julio y septiembre 2023



Nota. Los polígonos se refieren a la evidencia del CASCDH. La simbología de rombos indica presencia de minería reciente que no se encontraba en el mes inicial (julio).

Figura 11

Variación porcentual del cambio en hectáreas asociadas a minería por cuadrículas entre septiembre y noviembre 2023



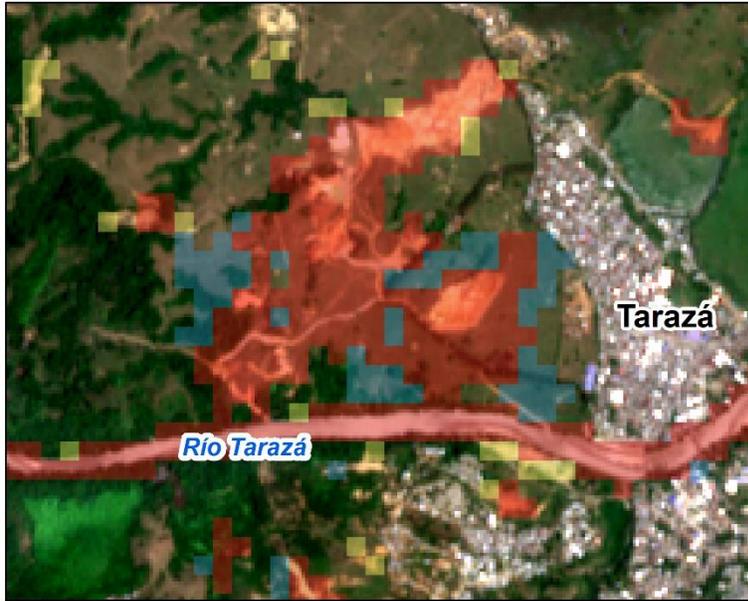
Nota. Los polígonos se refieren a la evidencia del CASCDH. La simbología de rombos indica presencia de minería reciente que no se encontraba en el mes inicial (septiembre).

6.2 Estado de permanencia zonas con minería

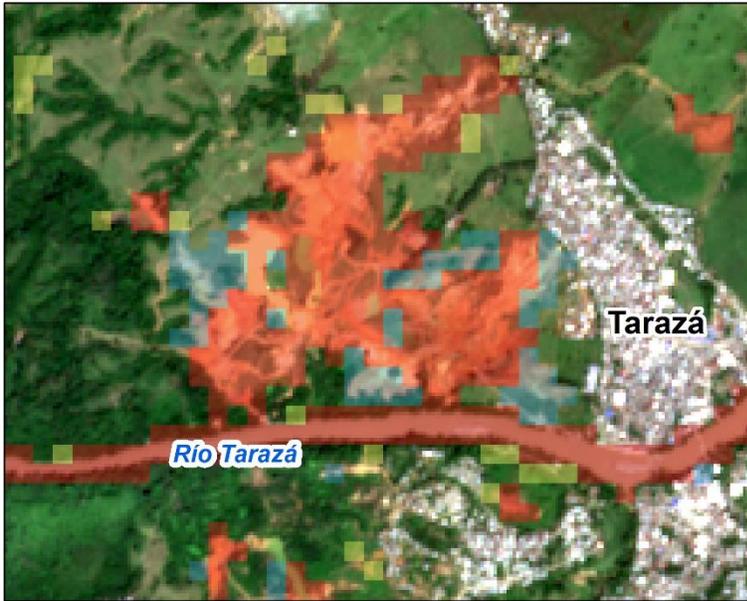
Tanto el río Cauca como el río Tarazá, se muestran como zonas donde la minería permanece debido a que su cauce cambia constantemente haciendo que el lecho del río en la zona ribereña queda expuesto o cubierto a lo largo del período de monitoreo. Por esto mismo, se registran zonas donde la minería aparece e incluso permanece alrededor del cuerpo de agua lo cual indica que más adelante el área de minería podría extenderse a sus alrededores.

En la zona de estudio, se detectan 3 zonas de descapotes de minería con carácter de permanencia durante el período de monitoreo y que, además, son zonas identificadas previamente donde la extracción ya ocurría allí. Lo que sucede en estas zonas es la creciente expansión que sufren de su perímetro respecto al estado inicial. En este caso, es posible encontrar un patrón de permanencia sobre un área y cuyos alrededores indican un carácter de “Aparece”, lo cual sugiere que en los próximos meses podría evolucionar a un estado de “Permanece” en caso de que la actividad minera fuera satisfactoria y, en el caso contrario, cambiar a un estado de “Desaparece”. Este patrón resulta importante en los monitoreos siguientes ya que cuando se transforma en categoría de permanencia, lo más probable es que siga expandiéndose en su área de extracción. Esta configuración se evidencia fuertemente en la zona a oeste de Tarazá (Figura 13, zona 1) y al oeste de Puerto Antioquia (Figura 13, zona 2). Para el área al noreste de Cáceres (Figura 14, zona 3), difiere un poco de las otras zonas ya que se pueden distinguir más áreas donde “Desaparece” que las que “Aparecen”.

Figura 12
Estados de permanencia de minería en la zona 1



**Estado de permanencia
Zona 1
(Marzo - Noviembre)**



Convenciones

Estado de permanencia

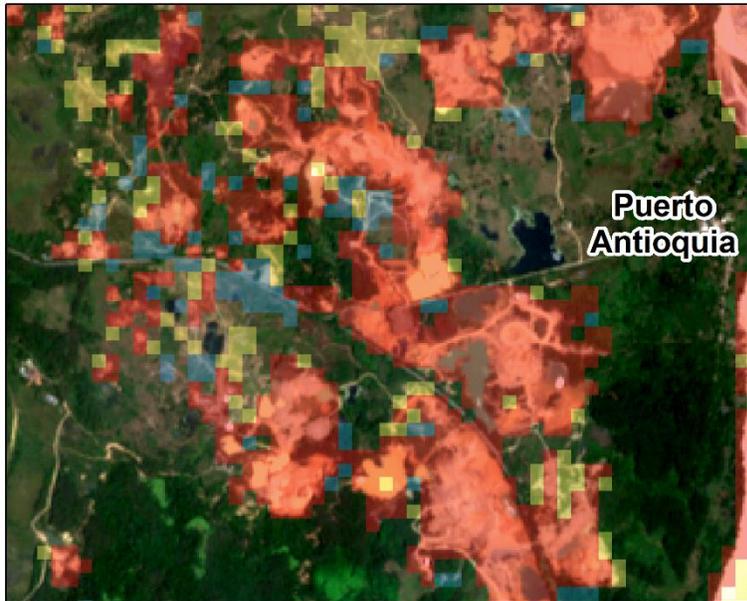
- Aparece
- Desaparece
- Permanece



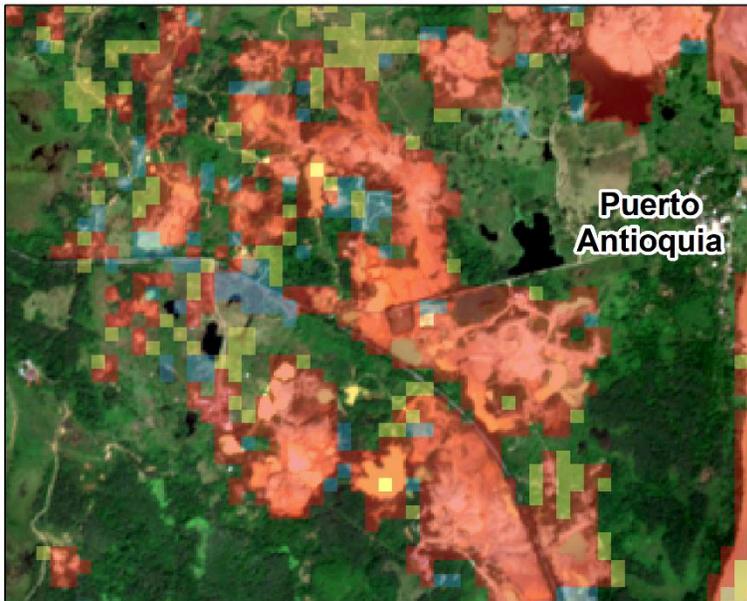
Proyección
UTM / WGS84
Imágenes 2023

Figura 13

Estados de permanencia de minería en la zona 2



**Estado de permanencia
Zona 2
(Marzo - Noviembre)**



Convenciones

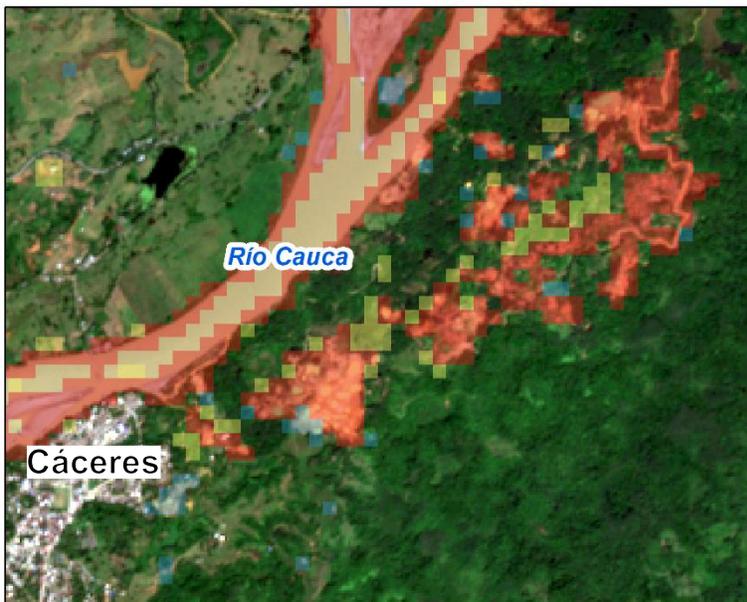
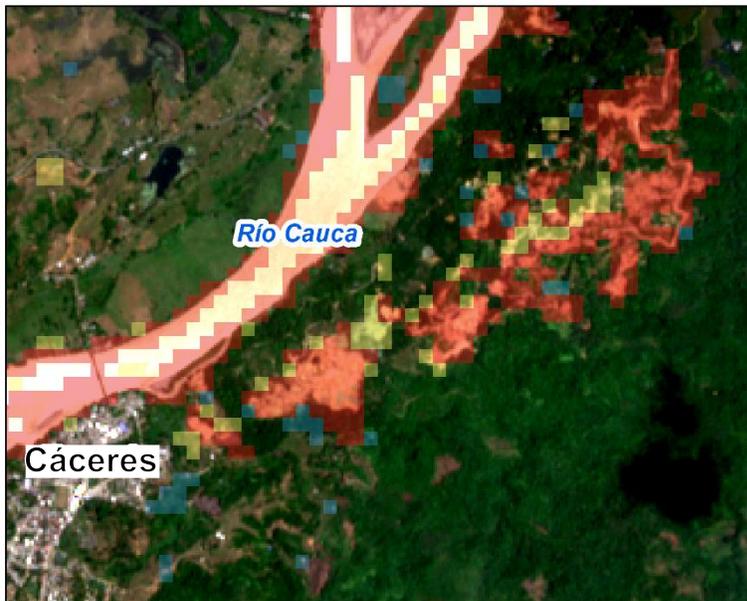
Estado de permanencia

- Aparece
- Desaparece
- Permanece



Proyección
UTM / WGS84
Imágenes 2023

Figura 14
Estados de permanencia de minería en la zona 3



**Estado de permanencia
Zona 3
(Marzo - Noviembre)**



Convenciones

Estado de permanencia

- Aparece
- Desaparece
- Permanece



Proyección
UTM / WGS84
Imágenes 2023

7. Discusión

El objetivo de esta propuesta metodológica radica alrededor de continuar proporcionando información constante a cerca de los cambios en la cobertura del suelo debido a la actividad minera característica de la subregión del Bajo Cauca. Si bien el monitoreo que se realiza desde el Ministerio de Energía y la UNDOC incluye un análisis riguroso por medio de herramientas de percepción remota, la frecuencia en la publicación de los resultados resulta un obstáculo dentro de las necesidades dentro del CASCDH donde se busca brindar apoyo a la toma de decisiones en la gestión territorial de la seguridad del departamento a través del análisis de datos y estadísticas de forma oportuna. En este sentido, realizar un seguimiento a la minería en el Bajo Cauca contribuye a la gestión y control del territorio en temas de seguridad ya que es una actividad que está fuertemente relacionada con los grupos armados que hacen de esta explotación su renta criminal para el dominio de los territorios.

La hipótesis planteada antes del desarrollo de la propuesta metodológica atribuía un grado de acierto en la detección de cambios a través de la metodología del CASCDH que se enfocaba en un desarrollo más manual y visual. Sin embargo, en los resultados se observa que, si bien se presenta concordancia en la mayoría de las evidencias de *áreas nuevas*, dejaba un sesgo en aquellas zonas donde los cambios no resultaban evidentes al ojo humano. De esta manera, reducir el sesgo a través de imágenes satelitales y el índice NDVI, otorga un resultado más preciso y con más opciones de análisis respecto a la información registrada. En este caso, la propuesta además de detectar zonas donde la minería es reciente respecto al mes anterior, tuvo el alcance de determinar cómo es la persistencia de la minería durante el período analizado y, de esta forma, denotar un carácter de permanencia que posibilite detectar patrones y la probabilidad de expandir las áreas mineras a determinadas zonas.

Sin embargo, la metodología aquí desarrollada también puede presentar sesgos debido a, por ejemplo, condiciones atmosféricas poco favorables como la presencia de nubes que no permiten la toma adecuada de los datos.

8. Conclusiones

La propuesta metodológica presentada para la corroboración de minería en el Bajo Cauca Antioqueño utilizando el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) y las imágenes Sentinel-2 ofrece una oportunidad para mejorar la efectividad del monitoreo de la actividad minera. Si bien se encontró cierta correspondencia en la identificación de zonas con cobertura removida por minería, la metodología CASCDH no detectaba zonas con un área más reducida pero que finalmente son importantes en la medición y monitoreo. La comparación de esta propuesta metodológica con las prácticas actuales del Centro de Analítica de Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos (CASCDH) sugiere que la incorporación de imágenes satelitales y técnicas de teledetección puede mejorar significativamente la precisión y la frecuencia de los informes sobre la remoción de cobertura vegetal debido a la minería.

En cuanto a la frecuencia en la publicación de los resultados del monitoreo, como se evidencia en el caso del Ministerio de Energía y la UNDOC, es un factor crítico para la toma de decisiones en la gestión territorial de la seguridad. La propuesta de mejora metodológica presentada en este informe busca proporcionar información actualizada y constante sobre los cambios en la cobertura del suelo debido a la actividad minera en el Bajo Cauca Antioqueño, lo que permitirá una intervención más efectiva en la gestión ambiental y la seguridad ciudadana en la región.

Además de la corroboración de las metodologías, esta propuesta añade un análisis de la permanencia de las zonas con presencia de minería, lo cual proporciona información crucial para entender las tendencias y los patrones de la actividad minera en la región y de esta manera, identificar oportunamente áreas críticas donde la minería tiene un carácter constante y expansivo.

Finalmente, el uso de las imágenes Sentinel-2 demostraron ser una herramienta valiosa para el monitoreo de la cobertura vegetal y la detección de cambios, donde la alta resolución espacial de estas imágenes y la aplicación del índice NDVI permitieron una identificación precisa de las áreas afectadas y una evaluación detallada de los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo.

Referencias

- Arango, C., Dorado, J., D., G., & Ruiz, J. F. (s.f.). *Climatología trimestral de Colombia*. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático. Subdirección de Meteorología – IDEAM. doi:<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Climatolog%C3%ADa+Trimestral+para+Colombia+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/c2825963-c373-449a-a7cb-8480874478d9>
- Argota, R. C. (2017). Desarrollo socio-económico regional: Impactos de la minería artesanal en el Bajo Cauca antioqueño. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, 4(1), 46-61. Obtenido de <https://revistas.usb.edu.co/index.php/Cooperacion/article/view/3116/2735>
- Betancur, C. B. (2018). *Agroforestry as a post-mining land-use approach for waste deposits in alluvial gold mining areas of Colombia (Tesis doctoral)*. Universitäts- und Landesbibliothek Bonn.
- Betancur-Corredor, B., Loaiza-Usuga, J. C., Denich, M., & Borgemeister, C. (20 de Octubre de 2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 199, 538-553. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.142>
- Cano-Londoño, N. C. (2023). Life cycle impacts assessment of two gold extraction systems in Colombia: open-pit and alluvial mining. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28, 380–397. doi:<https://doi.org/10.1007/s11367-023-02141-5>
- CASCDH. (s.f.). *Micrositio del CASCDH*. Obtenido de <https://seguridadyjusticia.antioquia.gov.co/centro-de-analitica-seguridad-convivencia-y-derechos-humanos/>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la teledetección espacial*. Madrid: EDICIONES RIALP, S.A.
- Clavijo Sánchez, N., Forero Perdomo, M. A., Monserrate Rojas, Y. P., Fernández Rodríguez, J. P., Isaza Vega, H. A., Romero Aguirre, M. F., . . . Sánchez Roby, D. (2023). *Resultados del cálculo de la Unidad Agrícola Familiar por Unidades Físicas Homogéneas*. Cáceres, Antioquia: Agencia Nacional de Tierras (ANT).
- Delgado, A. D. (2022). *Minería ilegal de oro y narcotráfico: efectos sobre la sostenibilidad del bajo Cauca Antioqueño durante el periodo 2015–2020*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.

- Drisya , J., Kumar D, S., & Roshni , T. (2018). Spatiotemporal Variability of Soil Moisture and Drought Estimation Using a Distributed Hydrological Model. *Integrating disaster science and management*(Capítulo 27), 451-460. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00027-0>
- ESA. (s.f.). *ESA eduspace*. (E. S. Agency, Editor) Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMPNQ3Z2OF_0.html#subhead1
- ESA, E. S. (s.f.). *Sentinel Online*. Obtenido de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- ESA, E. S. (s.f.). *Sentinel Online, Sentinel 2 Mission Guide*. Obtenido de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Gómez García, M. A. (2020). *Plan de desarrollo municipal Tarazá 2020-2023*. Tarazá.
- Ibrahim, E., Lema, L., Barnabé, P., Lacroix, P., & Pirard, E. (2020). Small-scale surface mining of gold placers: Detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93(102194, ISSN 1569-8432). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102194>
- IGN, I. G. (s.f.). *Teledetección*. España: Gobierno de España. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf#:~:text=La%20teledetecci%C3%B3n%20es%20la%20t%C3%A9cnica,informaci%C3%B3n%20interpretable%20de%20la%20Tierra.>
- Maldonado Sarmiento, I. E., & Roza Gutiérrez, L. M. (2014). Convergencia de los grupos armados organizados al margen de la ley en la minería aurífera aluvial en la subregión del Bajo Cauca antioqueño. *Revista Criminalidad*, 56(3), 119-138. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-31082014000300009&script=sci_arttext
- Medina, C. (2014). La minería en el Bajo Cauca, entre la ilegalidad y la miseria (primera parte). Colombia INFORMA. Obtenido de <https://www.colombiainforma.info/la-mineria-en-el-bajo-cauca-entre-la-ilegalidad-y-la-miseria-primera-parte/>
- MinMinas. (2014). *Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minería de oro* (Vols. Tomo 3, Capítulo 6). Obtenido de http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/cadena_de_mercurio/Cadena_Mercurio_Tomo_III.pdf

- Monroy, D. M., & Armenteras, D. (2017). Land cover change caused by alluvial mining on the Nechí river, Antioquia (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 20(1), 50-61. doi:<https://doi.org/10.15446/ga.v20n1.61513>
- Moreno Ramos, J. (2021). Análisis en la alteración a la salud ecosistémica por extracción de oro en Nechí, Colombia; una aproximación preliminar a la evaluación de impactos de minería a partir de percepción remota. *Universidad de los Andes*.
- Moscoso, P. D., Muñoz García, A. M., & González Monosalva, J. L. (2022). Uso de la teledetección para evaluar el impacto histórico y futuro de las actividades mineras a partir del cambio de características biofísicas de la superficie. Caso Margento, Antioquia (Colombia). (F. J. Vélez Hoyos, Ed.) *II Congreso Internacional de Ingeniería con Impacto Social CIHSOL 2021*, 89-93. doi:<https://doi.org/10.16925/ecam.04>
- Naranjo Bedoya, K., Aristizábal Giraldo, E., & Morales Rodelo, J. (2019). Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por lluvias en la región Andina colombiana. *Ingeniería y Ciencia*, 15(29), 11-42. doi:<https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.29.1>
- NASA. (s.f.). *Earth Data*. Recuperado el 17 de Marzo de 2024, de Open Access For Open Science: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>
- Pérez, C., & Ángel L., M. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. (C. Pérez, & Á. Muñoz, Edits.) Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Plata Hernández, M. Á., & Fuentes Rojas, J. A. (2023). *Análisis del crecimiento urbano para la identificación de cambios del uso del suelo por medio de la teledetección, datos geográficos y demográficos. Caso de estudio corregimiento de La Gabarra entre los años 2005 a 2022*. Unidades Tecnológicas de Santander.
- Programme, E. U. (s.f.). *Copernicus*. Obtenido de <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus/infraestructura/estos-son-nuestros-satelites>
- Revelo Luna, D., Mejía Manzano, J., Montoya Bonilla, B., & Hoyos García, J. (2020). Analysis of the Vegetation Indices NDVI, GNDVI, and NDRE for the Characterization of Coffee Crops (*Coffea arabica*). *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 298-312. doi:<https://doi.org/10.14482/inde.38.2.628>

-
- Sacristán Romero, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24, 13-41. Obtenido de <http://revistaaquatic.com/ojs/index.php/aquatic/article/view/212>
- Santisteban, G. (2020). *El bajo cauca antioqueño, una tierra dorada que vive en la pobreza*. Friedrich-Ebert-Stiftung. Obtenido de <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/kolumbien/17531.pdf>
- SIMCO. (s.f.). Obtenido de Sistema de información minero colombiano: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>
- UNDOC/SIMCI. (2022). *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2021*. Colombia.
- UNODC/SIMCI. (2018). *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2016*. Colombia.
- Zapata Arbeláez, B. I., & Anaya Acevedo, J. A. (2011). Los sensores remotos en los proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero. *Revista Entorno Geográfico*, 7(8), 66-83.