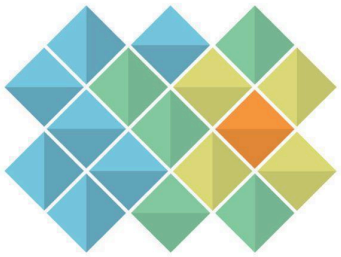
-



MAPBIOMAS
COLOMBIA

Apéndice - Minería

Tema transversal en Colección 4

Versión 1.0

Equipo responsable

Andrés Medina
Karen Andrea Huertas
Emanuel Valero
Luis Medina
Natalia García
Santiago Baquero
Laura Peña
Wendy Jaramillo
Fabián Sánchez

Julio 2026

Índice

1. Introducción 3
2. Construcción y definición de mosaicos Landsat 4
3. Metodología Transversal de minería 5
3.1. Evolución de la colección 5
3.2 Resumen metodológico 10
3.2.1 Búsqueda de referencias 11
3.2.2 Muestras de entrenamiento (minería/no minería) 13
3.2.4 Filtros 16
3.2.4.1 Join 16
3.2.4.2 Gap fill 16
3.2.4.2 Filtro espacial 17
3.2.4.3 Filtro Temporal 17
3.2.4.4 Filtro Frecuencia 19
3.2.5 Integración 19
3.3 Casos especiales 20
4. Referencias 22

Lista de figuras

Figura 1: Distribución de la cuadrícula Landsat para el transversal de minería	4
Figura 2: Comparación de las regiones de clasificación para Colombia a) colección 1 b) colección 2 - 4	6
Figura 3: Comparación clasificación de minería con y sin máscara de agua	9
Figura 4: Pasos para la clasificación de minería	11
Figura 5: Presencia de minería identificada por cada fuente de referencia	12
Figura 6: Máscara de clasificación minera para Colombia colección 4	13
Figura 7: Polígono de Mina y No-Mina Minería a cielo abierto - Cerrejón	14
Figura 8: Polígono de Mina y No-Mina - Minería Aluvial - Taparal - Chocó	14
Figura 9: Polígono de Clasificación de minería. Mina a cielo abierto - El Cerrejón.	15
Figura 10: Clasificación de minería - Mina a cielo abierto - El Cerrejón.	15
Figura 11: Esquema funcionalidad Filtro Gap Fill	16
Figura 12: Esquema de la funcionalidad del filtro espacial	17
Figura 13: Efecto del filtro temporal	18
Figura 14: Filtro temporal regla de primer y último año	18
Figura 15: Esquema de la funcionalidad del filtro de frecuencia	19
Figura 16: Resultados de clasificación de la mina de carbón El Cerrejón	20
Figura 17: Resultados de clasificación de la minería en parte del departamento de Chocó.	21
Figura 18: Resultados de clasificación de la minería en parte del departamento de Cesar.	21
Figura 19: Resultados de clasificación de la minería en parte del departamento de Amazonía.	22

Lista de Tablas

Tabla 1: Evolución colecciones MapBiomas Colombia	6
Tabla 2: Lista de variables incluidas en el feature space usadas en la clasificación del transversal de minería de MapBiomas Colombia	7
Tabla 3: Implementación de filtros	9

1. Introducción

La cobertura asociada a minería, se clasifica como un tema transversal dentro de la metodología de MapBiomas, debido a que genera confusión con otras clases de coberturas, como los centros urbanos, los bancos de arena, otras áreas naturales sin vegetación y las áreas sin vegetación. La metodología ha sido implementada previamente en varios países como Bolivia, Ecuador, Perú y Venezuela, dando resultados positivos en la identificación de las zonas asociadas a la actividad minera. En Colombia se ha implementado esta metodología de mapeo desde la colección 4 de MapBiomas Amazonía, presentada en el año 2022, y desde la colección 1 de MapBiomas Colombia, presentada en el año 2023.

Este documento describe la metodología utilizada en la colección 4 de MapBiomas Colombia, para la clasificación de las zonas mineras en el territorio colombiano; la cual es definida como todas las áreas de extracción de materiales pétreos o minerales, entendida como la sustancia cristalina generalmente inorgánica con características físicas y químicas asociadas a una agrupación atómica específica; materiales de construcción, materiales de arrastre como arenas, gravas, piedras en cercanías a los cauces y orillas de los ríos, vegas de inundación y demás terrenos aluviales, producción industrial con clara exposición del suelo, sin hacer diferenciación del tipo de actividad (industrial, artesanal, legal o ilegal) (Congreso de Colombia, 2001) (IDEAM, 2010). De igual manera como se abordó desde la colección 3 del 2025, se incluyen las áreas asociadas a las actividades petroleras como piscinas, sin considerar la infraestructura principal de esta actividad.

Es importante señalar que la metodología original para la clasificación de este transversal se basó en la experiencia previa del equipo de MapBiomas Brasil, y en especial de Cesar Diniz (Solutions in Geoinformation, Solved, Brasil), quien ofreció una presentación al equipo MapBiomas sobre la identificación de la minería industrial de dicho país. Esta metodología fue implementada en la herramienta Google Earth Engine con ajustes menores para mejorar el rendimiento y la calidad del producto.

2. Construcción y definición de mosaicos Landsat

Para fines de procesamiento, la metodología de MapBiomas, divide el área del proyecto en una cuadrícula regular definida con base a la cuadrícula de imágenes de Landsat para los biomas de Andes, Caribe, Caribe Insular, Pacífico, Pacífico Insular, Orinoquía y Valles Interandinos, cada cuadrícula cubre un área de aproximadamente 2.7 Mha. En la Figura 1 se muestra el área de estudio de Colombia conformada por 43 celdas (Figura 1).

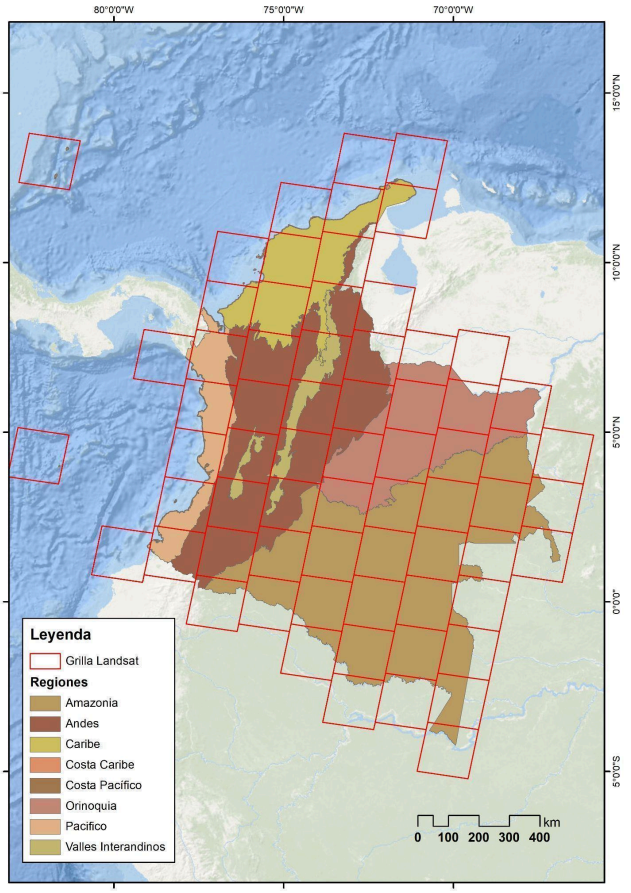


Figura 1: Distribución de la cuadrícula Landsat para el transversal de minería

En cada una de estas celdas de la cuadrícula, se construyen los mosaicos anuales de imágenes Landsat. Esto con el objetivo de generar imágenes periódicas sin nubes que permitan su clasificación e identificación de cambios[1]. Desde la colección 3 del 2025, para la construcción de los mosaicos se utilizó Landsat Collection 2, la cual presenta la versión más actualizada del reprocesamiento de los archivos Landsat, con varias mejoras en la calidad de las imágenes.

La construcción de los mosaicos se inicia con la selección de las imágenes Landsat. Para ello se construye una tabla de parametrización con los siguientes parámetros, almacenados como metadatos en cada asset construído:

[1] Para mayor detalle revisar la sección 4 del documento: Apéndice - Colombia Algorithm Theoretical Basis Document - ATBD Colección 4.0

- ID: Identificador o código único de la unidad carta/región
- Año: Año de la serie (comprendiendo el período 1985 a 2025) al que corresponde cada mosaico.
- Fecha inicial/ Fecha final: Periodo del año (fecha de inicio y final) para la selección de imágenes del catálogo de datos de imágenes Landsat de Google Earth Engine.
- Sensores: Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI, Landsat 9 o una combinación de estos (Ej: Landsat 5 y Landsat 7).
- Porcentaje de nubes: Porcentaje máximo de cobertura de nubes aceptado de cada imagen Landsat que será usado para construir el mosaico de imágenes. Este dato proviene de la metadata de las imágenes Landsat.
- Blacklist: Imágenes que por su calidad son excluidas en la construcción del mosaico.

Con esta información se construyen los mosaicos anuales de imágenes en la plataforma de Google Earth Engine. Todos los mosaicos generados se almacenan como una colección de imágenes de Google Earth Engine y están disponibles en la ruta: projects/mapbiomas-mosaics/assets/LANDSAT/LULC/COLOMBIA/mosaics-1; los cuales presentan inicialmente los valores de mediana de cada una de las bandas de los satélites Landsat. Adicionalmente, en la colección 4.0, para minimizar los efectos que el relieve del terreno tiene sobre la reflectancia registrada por el sensor, se aplicó un proceso de corrección topográfica. Este proceso consiste en ajustar los valores de reflectancia de las imágenes satelitales para compensar los efectos de la topografía del terreno, como las pendientes y la orientación de las laderas. Con el cálculo del ángulo de incidencia solar se ajusta el valor de reflectancia de cada píxel para que represente de una manera más adecuada las propiedades reales de la superficie.

Con base en estos datos, se agregaron a cada mosaico bandas adicionales de índices espectrales, fracciones espectrales, variables de textura e índices topográfico-geomorfológicos derivados del modelo de elevación digital entre otros, con la finalidad de mejorar la capacidad de detección de la minería en el país, mediante una diferenciación de presencia y ausencia de la clase de interés. Se aplica un cálculo estadístico a cada una de las bandas de los mosaicos, para generar información específica sobre: mediana, mediana estación seca (corresponde al percentil 25), mediana estación lluviosa (correspondiente al percentil 75), amplitud (rango de valores), la desviación estándar y el valor mínimo. Todos estos datos componen las variables, que se utilizan como fuente para el clasificador de random forest.

3. Metodología Transversal de minería

3.1. Evolución de la colección

El transversal de Minería se ha desarrollado para las cuatro colecciones de MapBiomas Colombia. En cada una de estas colecciones se presentan diferencias metodológicas (ver tabla 1) que reflejan variaciones en los resultados.

Tabla 1 - Evolución colecciones MapBiomas Colombia

Parámetro	COLECCIÓN			
	1	2	3	4
Serie	1985-2022	1985-2023	1985-2024	1985-2025
Regiones	79	53	53	53
Cartas	47	47	47	47
Sensor	4,5,7,8 y 9	4,5,7,8 y 9	4,5,7,8 y 9	4,5,7,8 y 9
Mosaicos	1955	2067	5155	4246
Variables	22	25	25	25

Entre los cambios más significativos, se destacan los siguientes:

Respecto a la cantidad de regiones definidas para la interpretación de minería, para la colección 1 se dividió el país en 79 regiones, partiendo de la capa de regiones de clasificación del mapa general de Colombia, y con el apoyo de las imágenes de alta resolución del basemap de Google Maps. Para la segunda colección se buscó ajustar la división y cantidad de regiones, procurando evitar dividir grandes regiones de actividad minera y agrupando zonas para facilitar la identificación, de esta manera en la segunda colección se manejaron un total de 53 regiones para la identificación de minería en el país. Este cambio se mantiene para las colecciones 3-4 en la cual no se ajustaron la cantidad ni el límite de las regiones de clasificación.

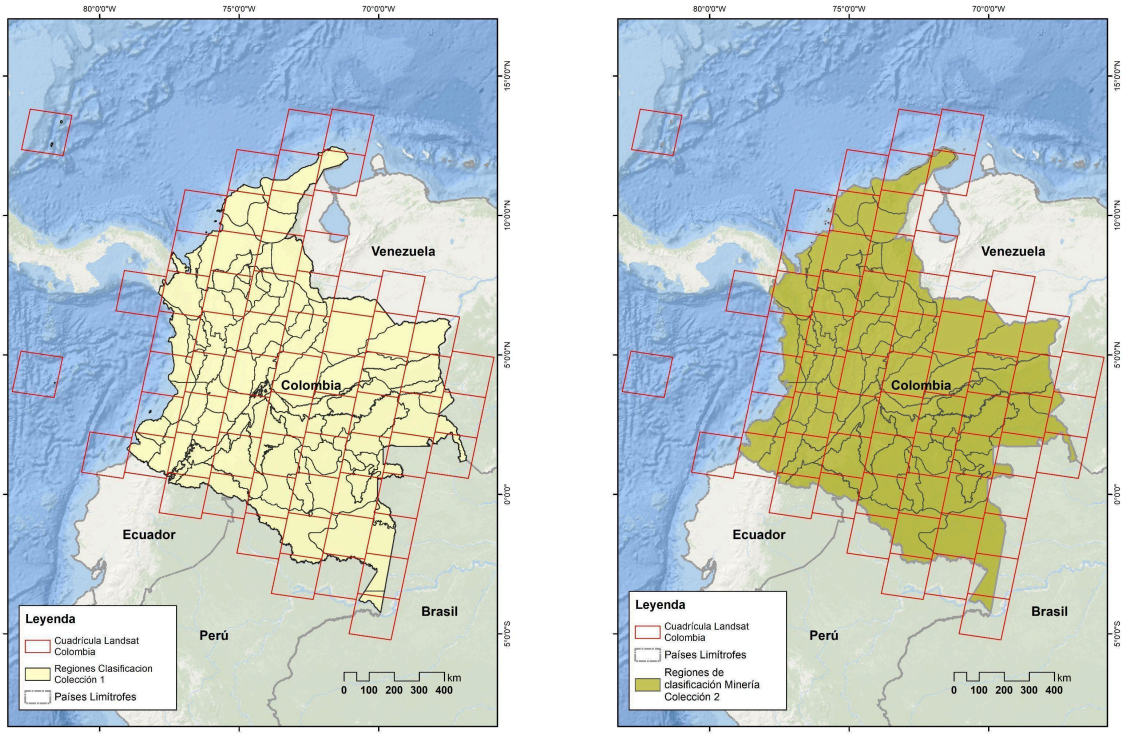


Figura 2: Comparación de las regiones de clasificación para Colombia a) colección 1 b) colección 2 - 4

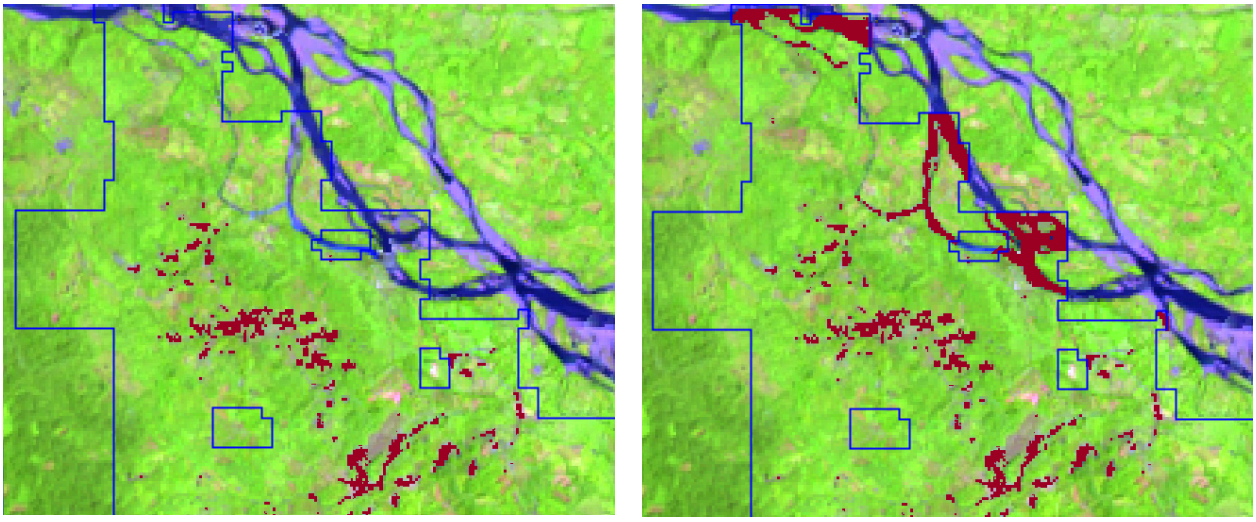
Como paso inicial para la clasificación, se realizaron pruebas que permitieron identificar un conjunto de variables específicas para la detección de la minería. En la primera colección de MapBiomas Colombia se emplearon 22 variables para la clasificación; para la colección 2, se añadieron tres índices espectrales adicionales, lo que permitió una clasificación más detallada de esta cobertura, estos índices se mantienen para las colecciones 3 y 4. Los detalles de cada variable se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2 - Lista de variables incluidas en el feature space usadas en la clasificación del transversal de minería de MapBiomas Colombia

ID	Variable	Descripción / Expresión	Reductor	Acrónimo	Grupo	Colección
0	blue	Valor de banda azul	Mediana	blue_median	Banda Landsat	1-2-3-4
1	green	Valor de banda verde	Mediana	green_median	Banda Landsat	1-2-3-4
2	red	Valor de banda roja	Mediana	red_median	Banda Landsat	1-2-3-4
3	red	Valor de banda roja	Mediana	red_wet	Banda Landsat	1-2-3-4
4	infrarrojo cercano (NIR)	Valor de banda infrarrojo cercano (NIR)	Mediana	nir_median	Banda Landsat	1-2-3-4
5	infrarrojo cercano (NIR)	Valor de banda infrarrojo cercano (NIR)	Mediana	nir_wet	Banda Landsat	1-2-3-4
6	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	Valor de banda SWIR1	Mediana	swir1_median	Banda Landsat	1-2-3-4
7	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	Valor de banda SWIR2	Mediana	swir2_median	Banda Landsat	1-2-3-4
8	Ndvi	(NIR - Red) / (NIR + Red)	Mediana	ndvi_median	Índice espectral	1-2-3-4
9	Ndvi	(NIR - Red) / (NIR + Red)	Mediana	ndvi_wet	Índice espectral	1-2-3-4
10	wefi	Índice de fracción del ecosistema forestal	Mediana	wefi_wet	Índice espectral	1-2-3-4
11	Gcvi wet	(nir/green − 1)	Mediana	gcvi_wet	Modelado de mezclas espectrales	1-2-3-4
12	Sefi	Índice de fracción del ecosistema de sabana	Mediana	sefi_median	índice de fracción	1-2-3-4
13	Soil	Índice de suelo desnudo	Mediana, amplitud	soil_median	Modelado de mezclas espectrales	1-2-3-4

14	Snow	Abundancia fraccional de nieve dentro del pixel	Mediana	snow_median	Fracción MME	1-2-3-4
15	Evi 2	2.5 * ((NIR - Red) / (NIR + 2.4*Red + 1))	Mediana	evi2_median	Índice espectral	1-2-3-4
16	Ndwi	(Green - NIR) / (Green + NIR)	Mediana	ndwi_mcfeeters_median	Índice espectral	1-2-3-4
17	Mndwi	(Green-NIR)/(Green+ NIR)	Mediana	mndwi_median	Índice de agua	1-2-3-4
18	slope	pendiente del terreno	Identidad	slope	Geomorfométrico	1-2-3-4
19	Slppost	Pendiente Estratificada	–	slppost	Variables estáticas y/o topográficas	1-2-3-4
20	Elevation	DEM	–	elevation	Variables estáticas y/o topográficas	1-2-3-4
21	Shade_mask2	Mapa de sombras	–	shade_mask2	Variables estáticas y/o topográficas	1-2-3-4
22	FM	SWIR1 / NIR	Mediana	ferrous_median	Índice espectral	2-3-4
23	CM	SWIR1 / SWIR2	Mediana	clay_median	Índice espectral	2-3-4
24	IO	Red / Blue	Mediana	iron_oxide_median	Índice espectral	2-3-4

Adicionalmente, para la colección 2 se incluyó una máscara de agua basada en la clasificación de la colección 1 de MapBiomas Colombia, y debido a la falta de datos disponibles para el año 2023, se utilizó la clasificación de Global Surface Water. Esta máscara optimizó el mapeo de minería, excluyendo los cuerpos de agua y bancos de arena de la clasificación. Para la colección 3 se incluye la máscara de la colección 2 como punto de referencia para identificar las zonas mineras y se generó un buffer entre 30 a 100 metros cuya finalidad es incluir las áreas de crecimiento minero no obstante estas áreas se ajustan de manera manual en las zonas que presentan un mayor crecimiento de actividad minera. La figura 3, a continuación, muestra un ejemplo de la implementación de la máscara de agua para el año 2023. De igual manera para la colección 4 se incluyen los datos de minería generados por el proyecto MapBiomas Alerta Colombia para los años 2020-2025.



a) Con máscara de agua b) Sin máscara de agua

Figura 3: Comparación clasificación de minería con y sin máscara de agua

Dentro del proceso de clasificación, para la colección 2 se hace la primera aproximación para la identificación de las áreas asociadas a extracción de sal, ubicadas principalmente en la región Caribe, esta aproximación continua en las colecciones 3 y 4.

En el proceso de post-clasificación se cambió el orden y la cantidad de filtros ejecutados. Para la colección 1 el orden de los filtros fue: gap, espacial y temporal; y en la colección 2 se adiciona el filtro frecuencia y el orden de los filtros quedó a criterio de cada intérprete, esta lógica se mantiene para las colecciones 3 y 4, la tabla 3 muestra el orden de filtros implementados en la colección 4.

Tabla 3 -Implementación de filtros

Región	Orden de filtros implementados								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30202	Espacial	GapFill	Frecuencia	Temporal	Temporal	Frecuencia	Frecuencia	Temporal	
30203	Espacial								
30204	Espacial	GapFill	Frecuencia	Temporal					
30205	Join	Espacial							
30207	Join	Espacial	Temporal	Frecuencia	Frecuencia				
30208	Join	Espacial							
30210	Join	Espacial	Temporal						
30213	Espacial	Temporal							
30216	Espacial	Temporal	GapFill	Frecuencia	Frecuencia				
30218	Join	Espacial	GapFill	Temporal	Temporal	Temporal	Frecuencia	Temporal	
30221	Join	Espacial	Temporal	Frecuencia	Temporal	Temporal			
30301	Join	GapFill	Espacial	Temporal	Espacial				
30302	Join	Espacial	Frecuencia	Temporal					
30303	Espacial	Temporal							
30304	Join	Espacial	Temporal						
30401	Join	Espacial	GapFill	Temporal					

30402	Join	Espacial	Frecuencia	Temporal	Espacial		
30403	Join	GapFill	Temporal	Espacial	Frecuencia		
30404	Join	GapFill	Espacial	Temporal	Espacial		
30405	Join	GapFill	Espacial	Temporal	Espacial		
30406	Join	GapFill	Temporal	Espacial	Temporal	Espacial	Frecuencia
30407	Join	Espacial	Temporal				
30408	Join	Espacial	Temporal				
30409	Join	GapFill	Espacial				
30410	Join	GapFill	Espacial	Frecuencia			
30411	Join	Temporal	Espacial				
30412	Join	Espacial	GapFill	Temporal	Espacial		
30413	Join	GapFill	Temporal	Espacial			
30414	Join	Espacial					
30501	Join	GapFill	Espacial	Temporal	Espacial		
30502	Join	GapFill	Temporal	Espacial			
30503	Join	GapFill	Espacial	Frecuencia	Temporal	Frecuencia	Frecuencia
30504	Join	Espacial	GapFill	Frecuencia	Temporal		
30505	Join	GapFill	Espacial	Temporal			
30506	Join	Espacial	Temporal	Frecuencia			
30601	Join	GapFill	Espacial	Temporal	Frecuencia		
30602	Join	Espacial	Temporal				
30603	Espacial	Temporal					
30604	Join	GapFill	Temporal	Frecuencia	Espacial		
30605	Join	GapFill	Espacial	Temporal	Espacial		
30606	Join	GapFill	Temporal	Espacial			
30607	Join	GapFill	Espacial	Temporal			
30608	Join	Espacial					

3.2 Resumen metodológico

Para generar la clasificación se desarrolló un esquema metodológico dividido en cinco etapas, tres de las cuales corresponden al proceso de clasificación y las restantes 2 a la etapa de post-clasificación; los resultados generados se almacenaron en Google Earth Engine. El proceso involucró la identificación de las áreas mineras por fuentes externas oficiales, toma de muestras y clasificación en cada una de las regiones, para luego integrar todas las áreas mapeadas en una capa única y, finalmente, con el mapa general de MapBiomas Colombia. A continuación se describe cada paso asociado a la clasificación. (Figura 4).

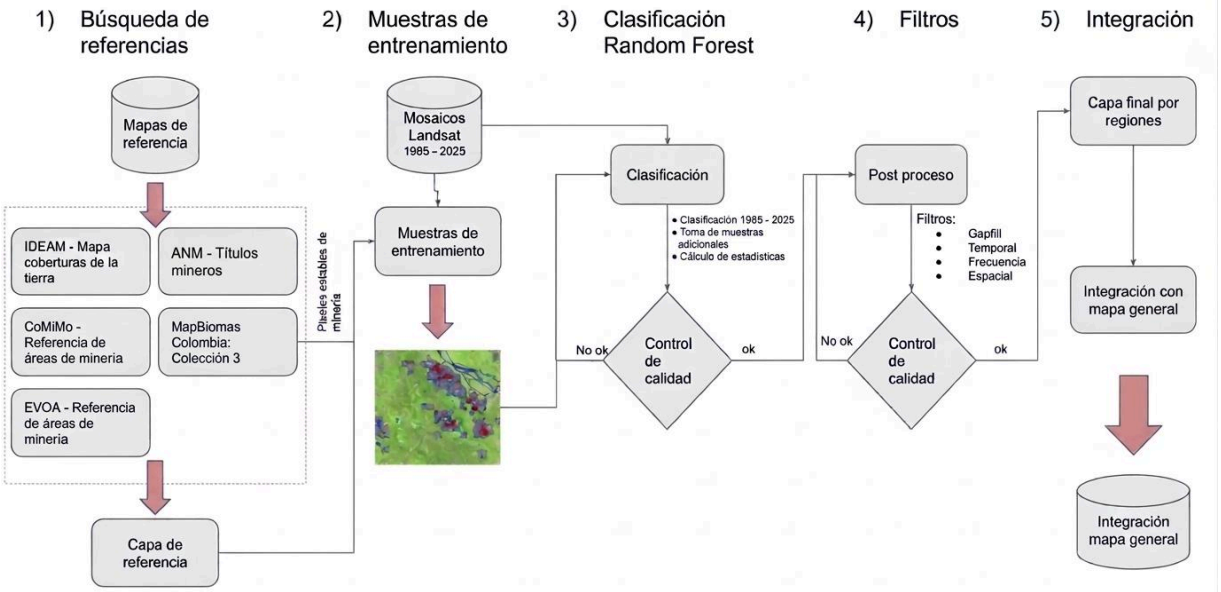
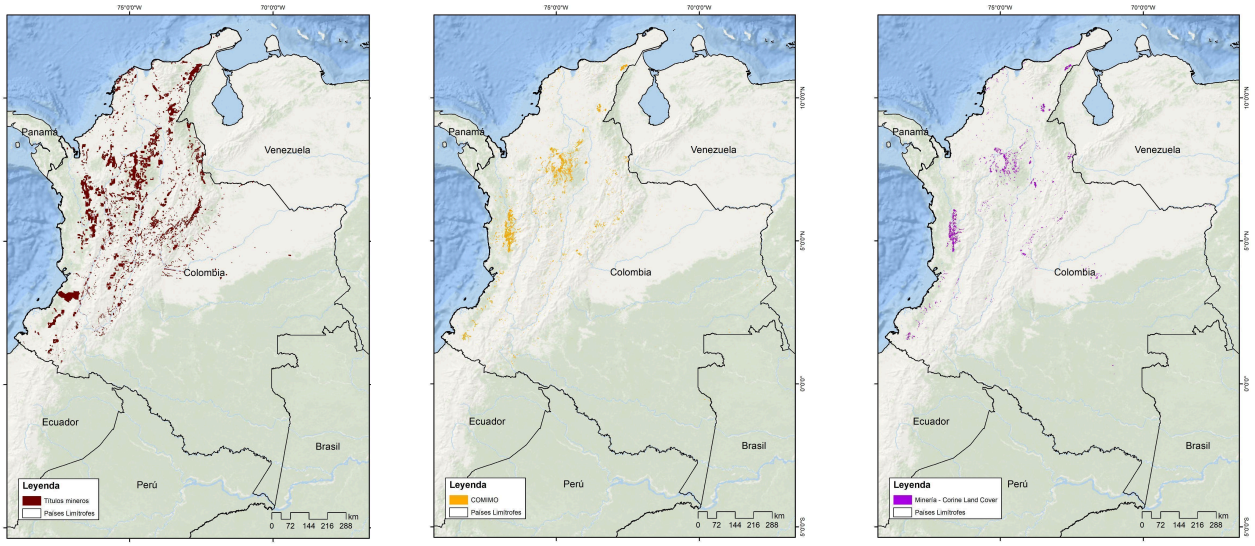


Figura 4: Pasos para la clasificación de minería

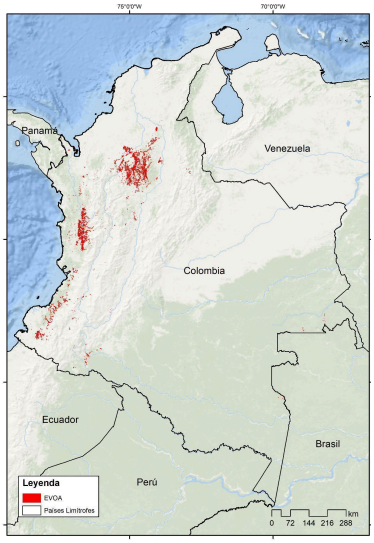
3.2.1 Búsqueda de referencias

Se realizó una búsqueda de fuentes de datos auxiliares oficiales que reportan presencia de actividad minera en diferentes rangos de tiempo, entre las cuales podemos encontrar COMIMO (Colombian mining monitoring), EVOA (Explotación de oro de aluvión), Corine Land Cover 2018, los títulos mineros (Figura 5), al igual que el mapeo realizado de la colección 1, 2 y 3. De igual manera, se incorporan los datos proporcionados por MapBiomas Alerta 2020-2025 de zonas mineras, con el objetivo de generar la máscara de referencia para la identificación de minería, la cual es usada como el punto de partida para el proceso de identificación y clasificación de la minería en el país (ver figura 6).

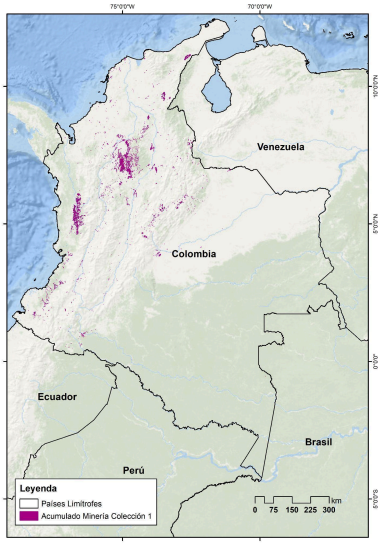
Títulos Mineros COMIMO Corine Land Cover



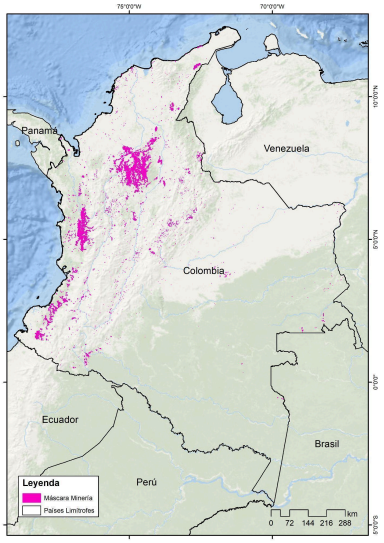
EVOA



MapBiomas Colección 1



MapBiomas Colección 2



MapBiomas Colección 3



MapBiomas Alerta 2020-2025

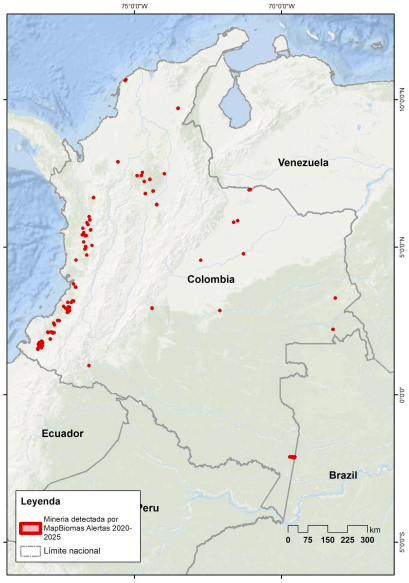


Figura 5: Presencia de minería identificada por cada fuente de referencia

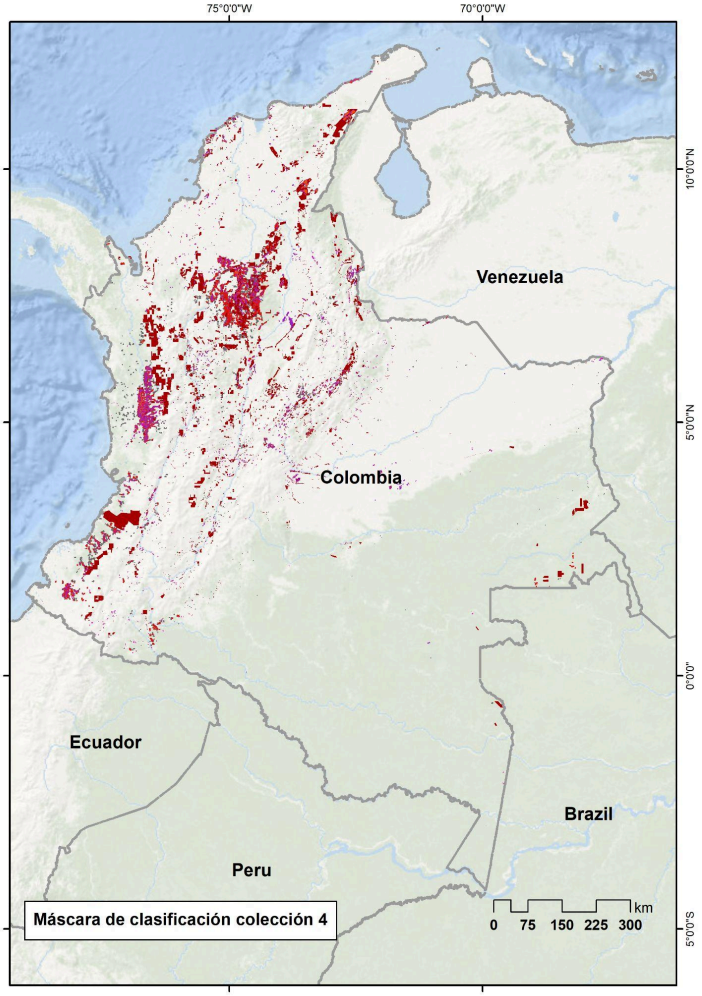


Figura 6: Máscara de clasificación minera para Colombia colección 4

3.2.2 Muestras de entrenamiento (minería/no minería)

Dentro de los polígonos que delimitan las áreas mineras de interés (Figura 9) se definieron e identificaron manualmente dos tipos de polígonos de entrenamiento: uno definido como 'Mina' (ID 30), que contiene estrictamente las zonas que hacen parte del área de explotación minera o de la mina y el segundo polígono abarca la clase 'no observado' o aquellas áreas que no corresponde a la actividad minera (ID 27) (figuras 7 y 8). Las muestras de entrenamiento tomadas dentro de la máscara son las que se utilizan para generar la clasificación de la zona de minería. Todo lo que está fuera de la zona delimitada no es clasificado ya que se considera como zona no minera y/o asignada a otra clase dentro de la leyenda MapBiomas.

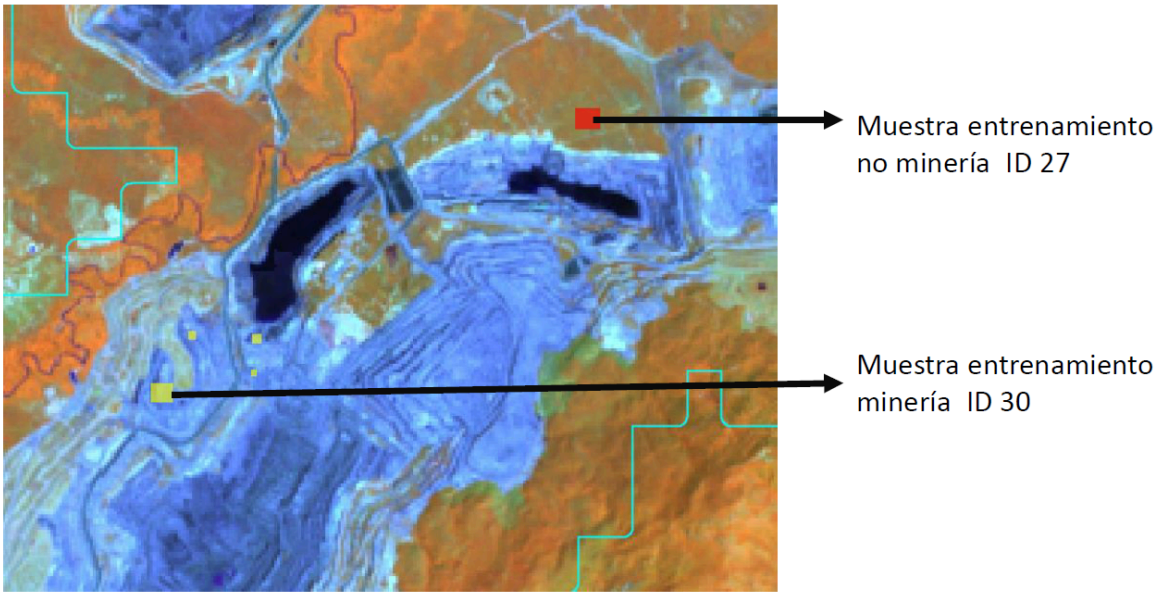


Figura 7: Polígono de Mina y No-Mina Minería a cielo abierto - Cerrejón

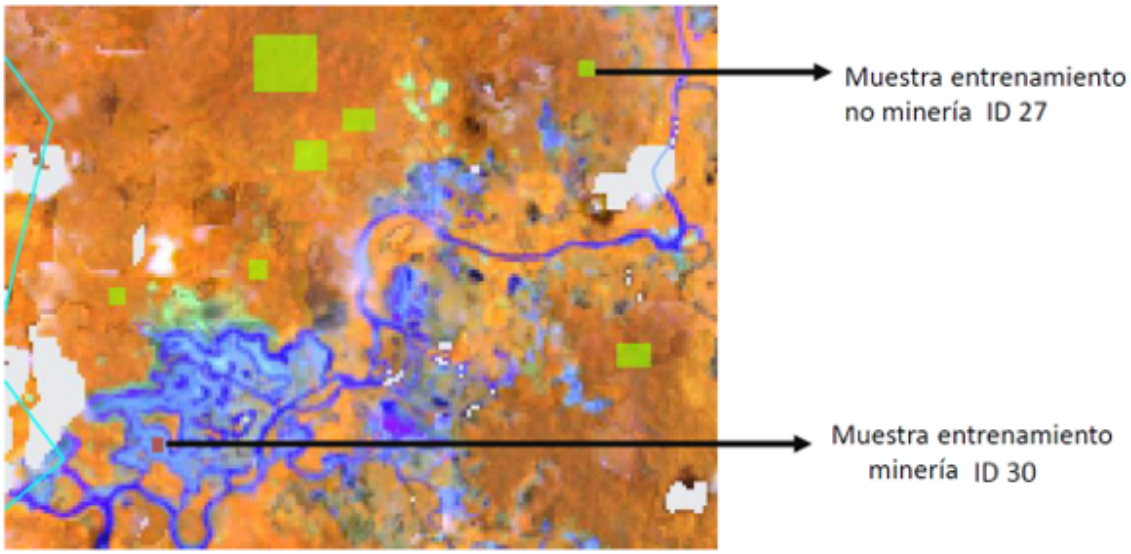


Figura 8: Polígono de Mina y No-Mina - Minería Aluvial - Taparal - Chocó

3.2.3 Clasificación con algoritmo Random Forest

El proceso de clasificación se basa en el uso del algoritmo Random Forest, un método de aprendizaje automático (Machine Learning) que permite identificar y delimitar espacialmente las áreas con presencia de minería en las regiones de estudio. Random Forest se basa en la construcción de un conjunto de árboles de decisión, cada uno de los cuales realiza particiones binarias sucesivas a partir de las variables predictoras para asignar una clase a las observaciones. La construcción de estos árboles incorpora componentes aleatorios que favorecen su diversidad y reducen la correlación entre ellos. Finalmente, las predicciones individuales se combinan mediante un mecanismo de votación mayoritaria, a partir del cual se

asigna una clase a cada píxel (Breiman, 2001). La clasificación de las zonas mineras se llevó a cabo mediante la implementación de este algoritmo en la plataforma Google Earth Engine.

La clasificación se ejecutó dentro de las áreas de interés delimitadas previamente a partir de las fuentes de referencia (Figura 9). Adicionalmente, mediante una inspección visual de los mosaicos, se identificaron posibles nuevos frentes de minería que no se encontraban referenciados en dichas fuentes. Estas áreas fueron delimitadas manualmente mediante la digitalización de nuevos polígonos, que se incorporaron a las áreas de análisis para incluirlas en el proceso de clasificación. De esta manera, se buscó ampliar la identificación espacial de las zonas con presencia de minería más allá de los registros disponibles en las fuentes de referencia. El procedimiento se realizó dentro de cada una de las regiones de estudio (Figura 2B).

Como resultado, se obtuvo una imagen ráster de clasificación binaria, en la que cada píxel representa la presencia o ausencia de zonas con características asociadas a la minería. Los píxeles clasificados como presencia de minería se representan en color rojo (Figura 10), y los resultados se encuentran restringidos espacialmente a las áreas previamente delimitadas mediante la máscara de clasificación.

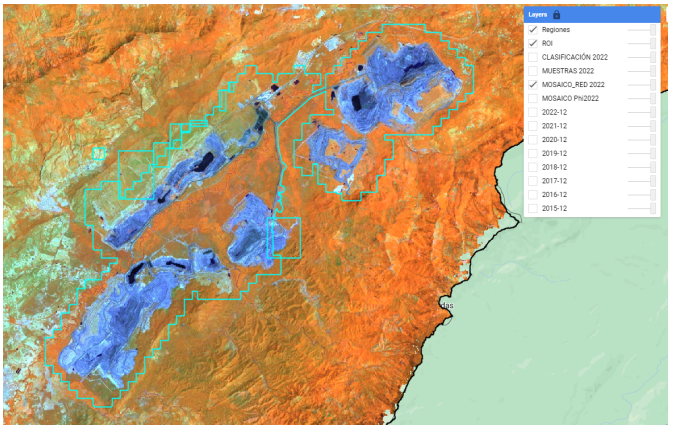


Figura 9: Polígono de Clasificación de minería. Mina a cielo abierto - El Cerrejón.

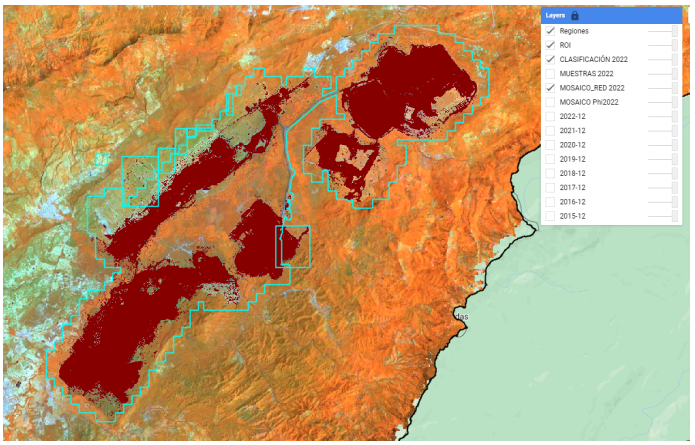


Figura 10: Clasificación de minería - Mina a cielo abierto - El Cerrejón.

3.2.4 Filtros

A los resultados de la clasificación con Random Forest se les aplicó una secuencia de filtros con el propósito de reducir las inconsistencias temporales, vacíos de información, ruidos de sobrestimación y otros problemas de clasificación. Para ello se utilizó gap fill, filtro espacial, temporal y de frecuencia. Adicionalmente se incluyó un "Join" para unir los años clasificados o reclasificados en la colección 4 con los años ya procesados de la colección 3.

3.2.4.1 Join

Para la colección 3 y 4 se implementó un paso previo a los filtros post clasificación. Este paso consiste en unir los años que se clasificaron para la colección actual (e.j 2025), con los ya clasificados y procesados en la colección anterior (e.j 1985-2024). El resultado de este paso es un solo stack de imágenes que posteriormente son procesadas con los filtros tradicionales. Adicionalmente, este paso también permitió modificar la clasificación de áreas específicas en los años procesados anteriores al 2025; esto con el fin de mejorar la calidad de clasificación en toda la serie temporal.

3.2.4.2 Gap fill

El territorio Colombiano debido a su posición geográfica y a su topografía presenta una alta presencia de nubes a lo largo del año, adicional a esto debido a los problemas de bandeamiento presentados en el sensor Landsat 7 los mosaicos presentan pérdida de información o pixeles sin información (No Data). Debido a esto, es necesario rellenar estos vacíos de información o información nula mediante el uso del Gap fill, el cual nos permite reducir estos vacíos con el valor de píxel temporalmente más cercano.

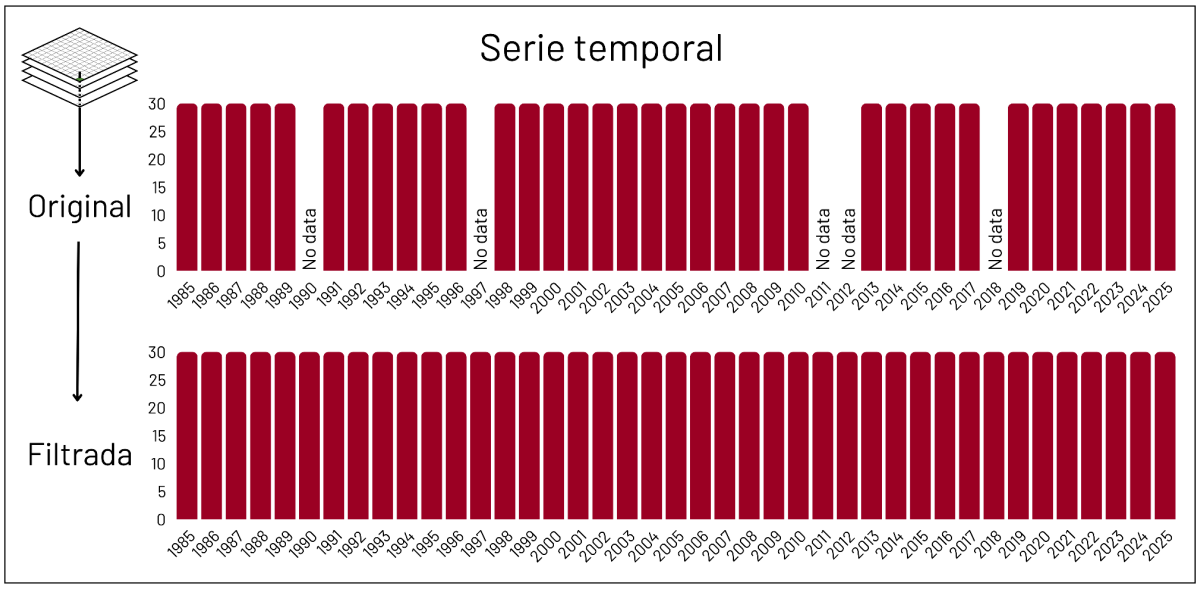


Figura 11: Esquema funcionalidad Filtro Gap Fill

3.2.4.2 Filtro espacial

El filtro espacial está basado en la función "connectedPixelCount" de Google Earth Engine, que identifica al conjunto de píxeles vecinos que comparten un mismo valor. Utilizando esta función y considerando una cantidad mínima preestablecida de píxeles idénticos, aquellos que no

presentan conexión (valores diferentes) se consideran píxeles aislados y fueron reclasificados (Figura 12). Para ambas clases (ID: 27, ID: 30), la conexión mínima establecida fue de 3 píxeles (aprox. 0,3 ha).

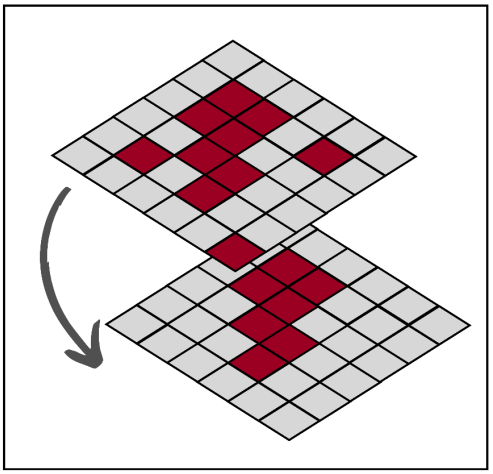


Figura 12: Esquema de la funcionalidad del filtro espacial

3.2.4.3 Filtro Temporal

Este filtro consiste en el reemplazo de los píxeles denominados como ruido o efecto sal y pimienta, los cuales representan inconsistencias que se generan en la clasificación de las coberturas respecto a su cambio paulatino año a año y la falta o distorsión de información en un mosaico. En este sentido, se utilizan 3 de filtros dentro del filtro temporal, entre ellos los de año intermedio, primer y último año, explicados a continuación.

Año intermedio: El filtro se ejecuta teniendo en cuenta el primer y último píxel de la serie temporal, cambiando la clasificación de los píxeles ubicados en los años intermedios a los clasificados en los extremos de la serie temporal (1985-2025). En la parte inferior de la figura figura 13, se puede observar que para la regla de 3 años se tiene un pixel clasificado como presencia de la clase de interés en color verde (bosque, agricultura, minería, etc) en los años t1 y t3, y para t2 se presenta la ausencia de la clase de interés en color beige en este sentido, después de aplicar el filtro, éste estabiliza los cambios abruptos en la clasificación, cambiando el pixel intermedio a los clasificados por sus pares iniciales y finales. Del mismo modo, este se aplica para series temporales de 4 y 5 años, y de forma inversa como se explica en la parte superior de la Figura 13. Es importante aclarar que para los años de inicio y fin del periodo analizado en este caso 1985 y 2025, no se aplica la regla de año intermedio debido a que no existen años para comparar.

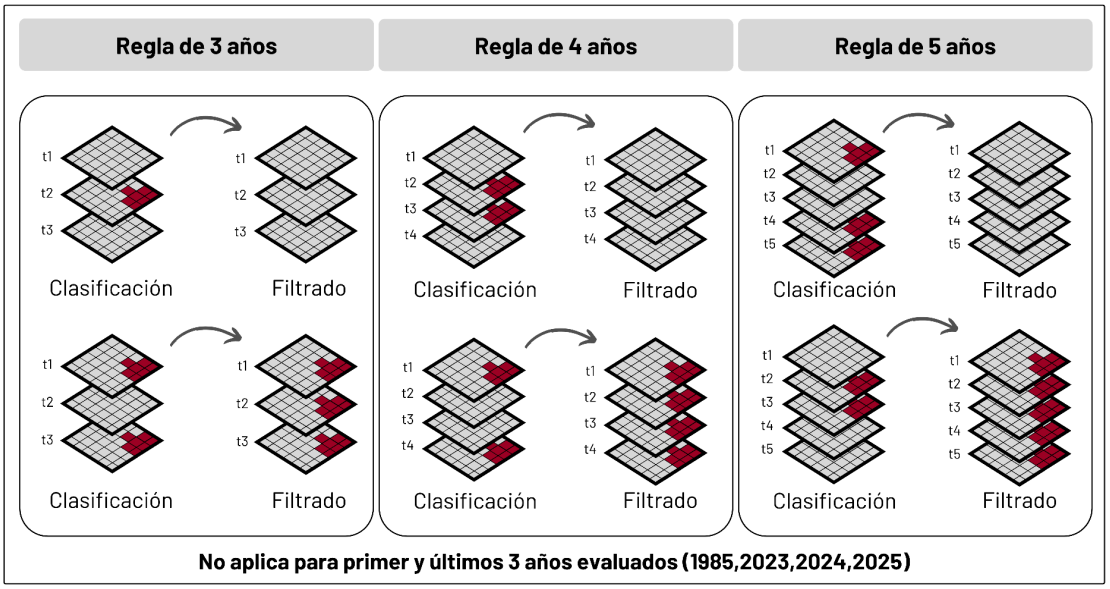


Figura 13: Efecto del filtro temporal

Año intermedio del primer y último año: La regla de primer año corrige inconsistencias de la serie temporal debido a falta de información para el año de 1985. El ejemplo enseguida muestra una transición de ausencia de áreas de la clase de interés (minería) para el primer año a presencia de áreas mineras en el primer año.

La regla de último año corrige el pixel mal clasificado al final de la serie temporal (2025) por cambios abruptos como el mencionado anteriormente, en la Figura 14, se observa como el filtro actúa con el píxel clasificado al final de la serie temporal como presencia de minería (en verde) y después de ejecutado el filtro, este es reclasificado ausencia de minería homogeneizando la serie.

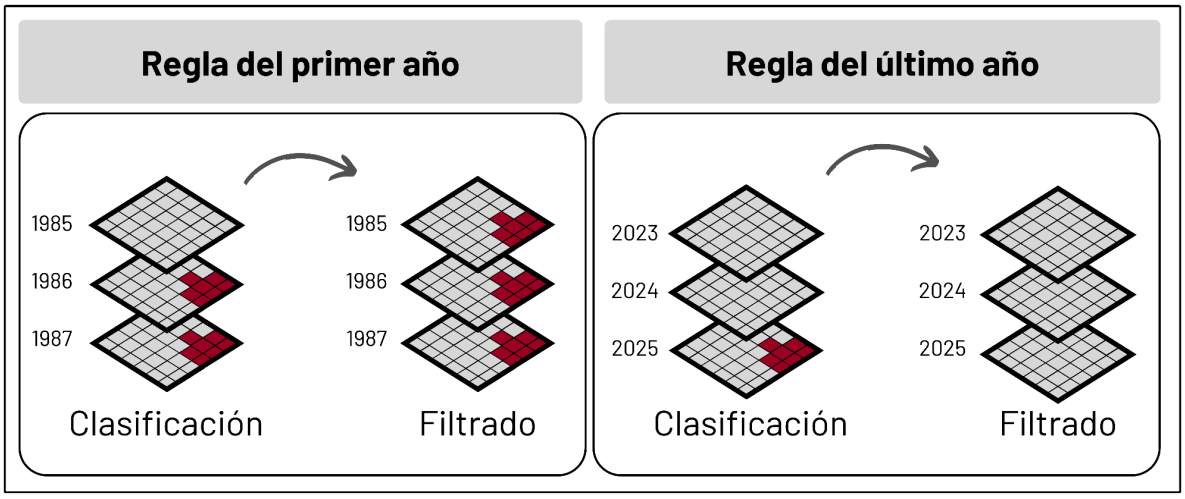


Figura 14: Filtro temporal regla de primer y último año

Debido a la naturaleza de la clase de minería, la cual puede aparecer y desaparecer en determinadas zonas a causa de que esta puede ser ilegal y no contar con los permisos para su funcionamiento constante a lo largo del tiempo, el intérprete evalúa en qué situaciones ejecutar este filtro y su respectiva configuración para de esta forma evitar la sobrestimación o subestimación de la clase a lo largo de la serie temporal. Para concluir, el objetivo principal de

este set de filtros es tener una serie temporal estable, sin saltos inconsistentes que puedan afectar los reportes estadísticos y la clasificación en sí misma, de igual manera se pueden excluir años de la serie temporal para ajustar más el comportamiento a lo observado en los mosaicos, esto ocurre principalmente en años intermedios, cuando una serie de años se encuentra estable pero en otros periodos específicos no.

3.2.4.4 Filtro Frecuencia

El filtro de frecuencia permite completar los vacíos en la clasificación a partir de la recurrencia temporal de los píxeles identificados como minería a lo largo de toda la serie de imágenes. Para ello, se calcula la frecuencia con la que cada píxel fue clasificado como minería durante el periodo de análisis. Cuando esta frecuencia alcanza o supera un umbral previamente establecido (por ejemplo, el 60 % de las observaciones), los vacíos asociados a ese píxel se rellenan con la categoría de minería. De esta manera, se aprovecha la consistencia temporal de las clasificaciones para reducir discontinuidades espaciales y mejorar la continuidad de las áreas identificadas como minería.

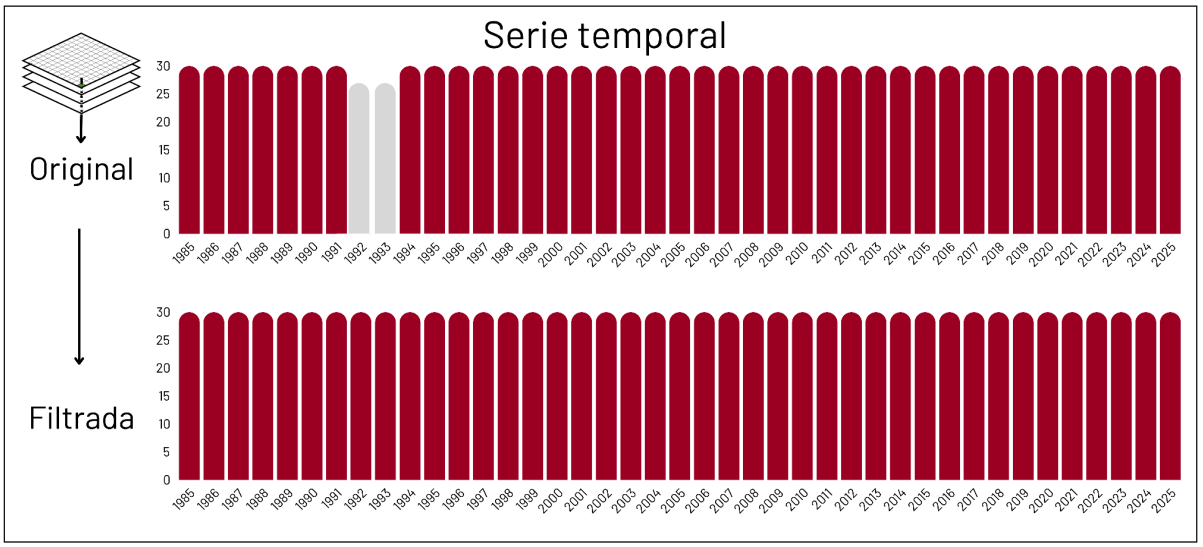


Figura 15: Esquema de la funcionalidad del filtro de frecuencia

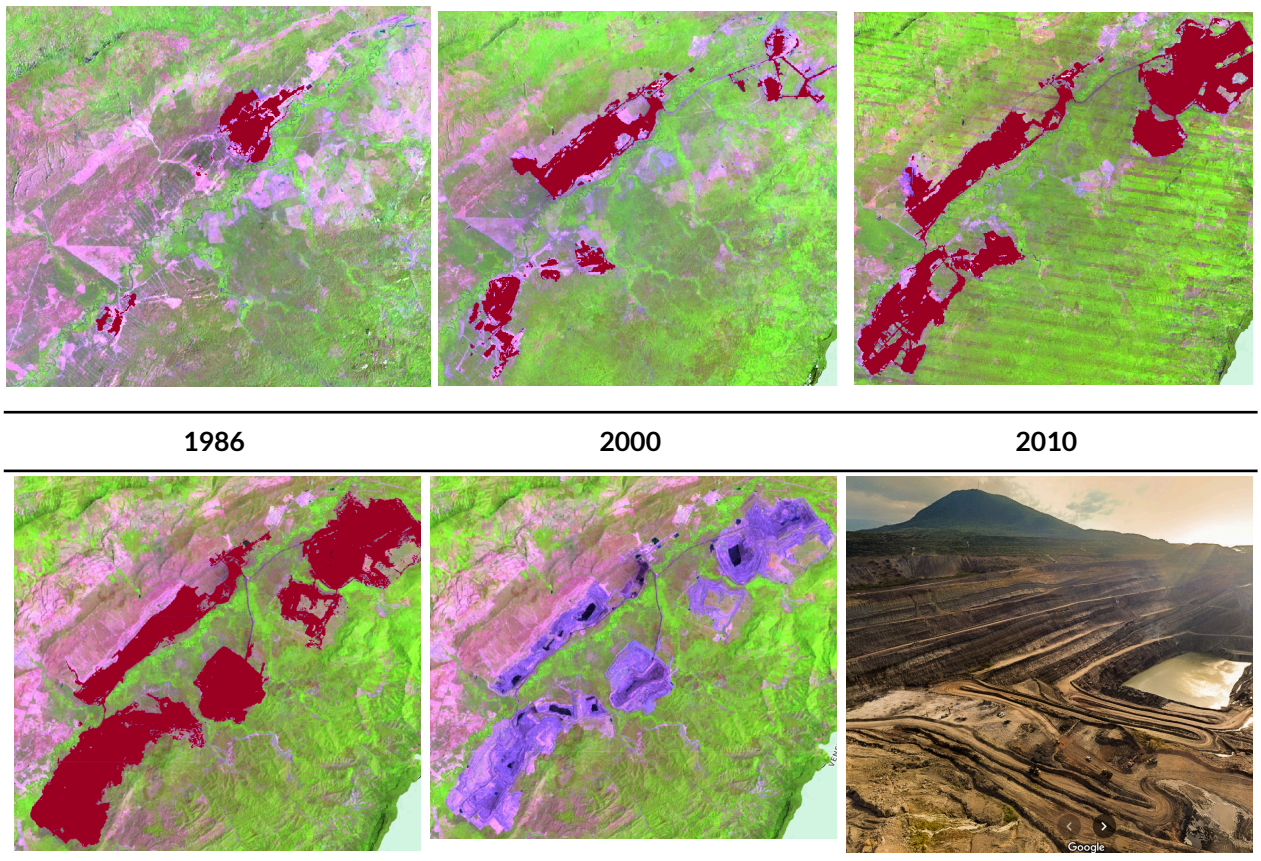
3.2.5 Integración

Con la clasificación final de las zonas mineras se hizo una primera integración de todas las regiones a nivel nacional, y este resultado se integró al mapa general de clasificación con las demás clases mapeadas. Esta integración se realizó a partir de una serie de reglas de prevalencia u orden, en la cual el transversal de minería tiene una prioridad de orden 4, por debajo de Glaciar y nival, Afloramiento rocoso y Planicie de marea hipersalina.

Teniendo en cuenta el orden de integración presentado anteriormente, se obtiene como resultado el mapa final con la presencia de minería en las diferentes zonas del país:

3.3 Casos especiales

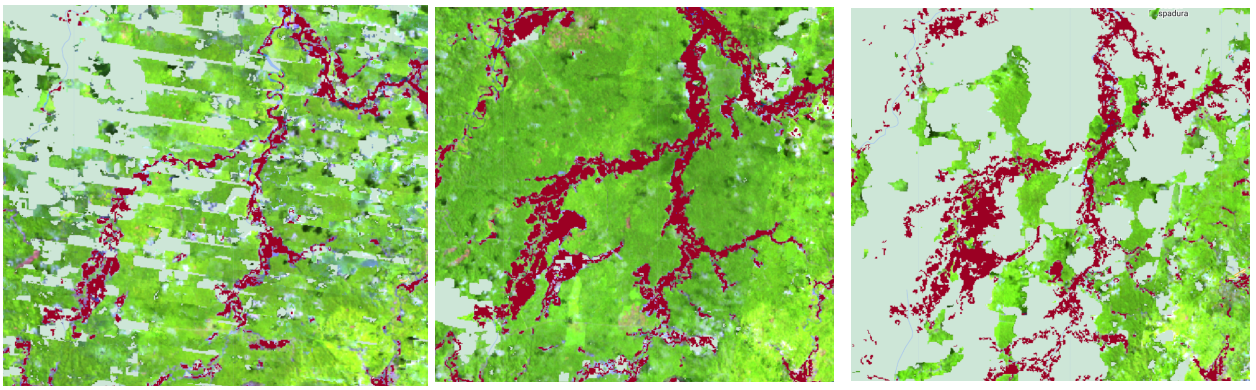
La Guajira.



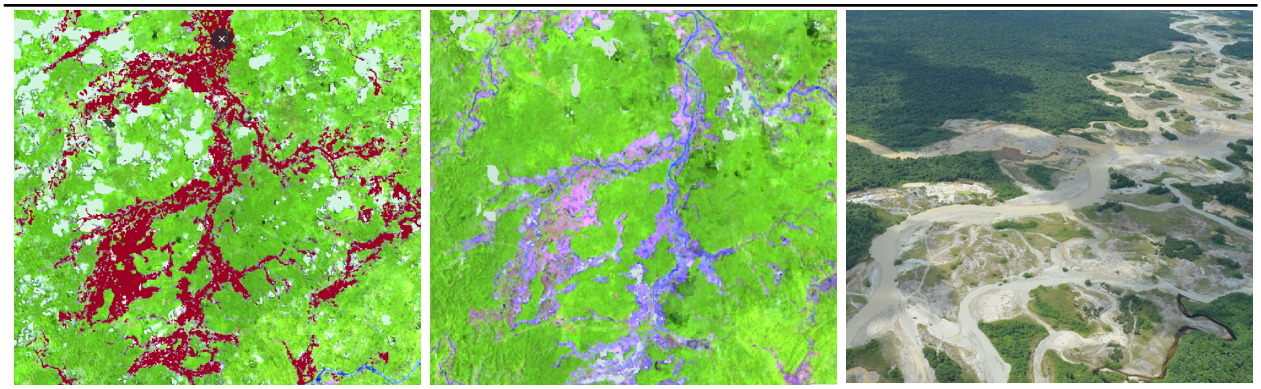
1986	2000	2010
2025	2025. RGB 654 L8	Paisaje

Figura 16
Resultados de clasificación de la mina de carbón El Cerrejón.
Albania, Barrancas y Hatonuevo - Guajira, Escala: 2 km, Coordenadas

Chocó.



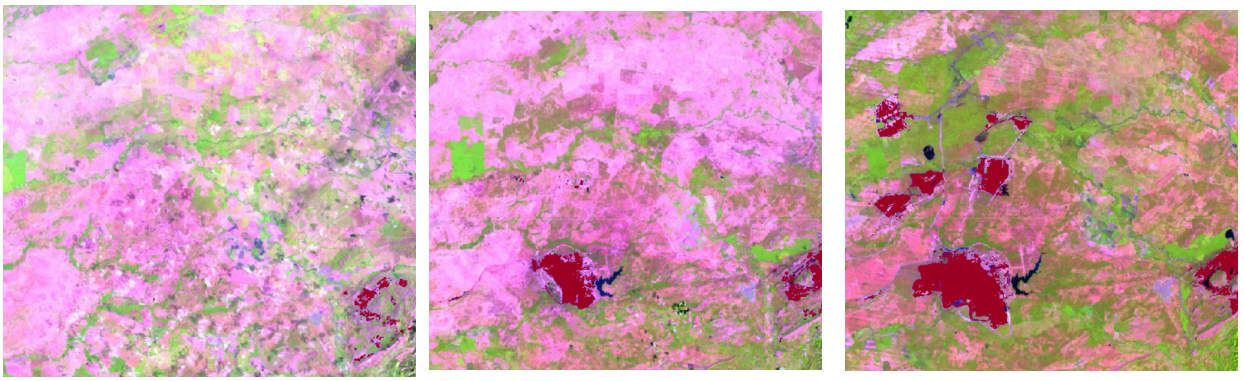
2010	2014	2018



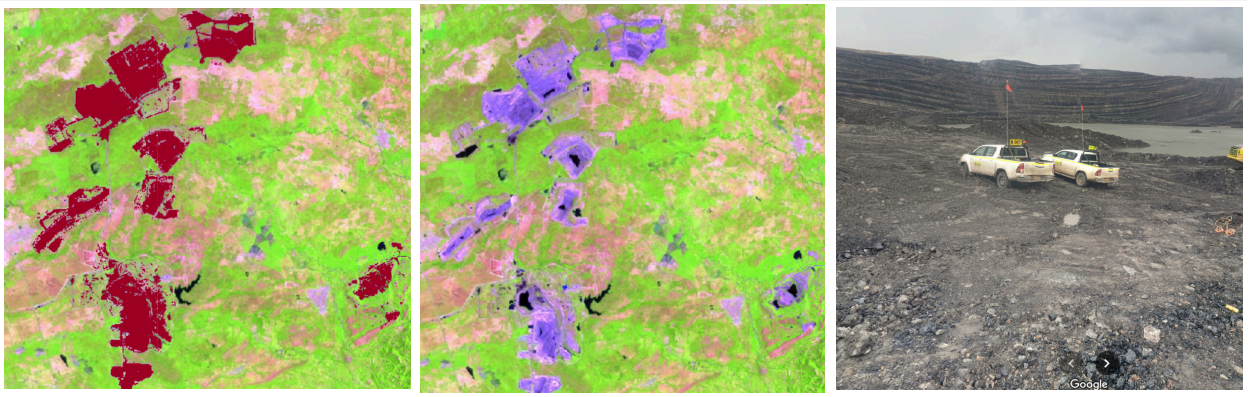
2025	2025. RGB 654 L8	Paisaje

Figura 17: Resultados de clasificación de la minería en parte del departamento de Chocó. Itsmina - Chocó, Escala: 1 km, Coordenadas: -76.72422 W, 5.20808 N.

Cesar.



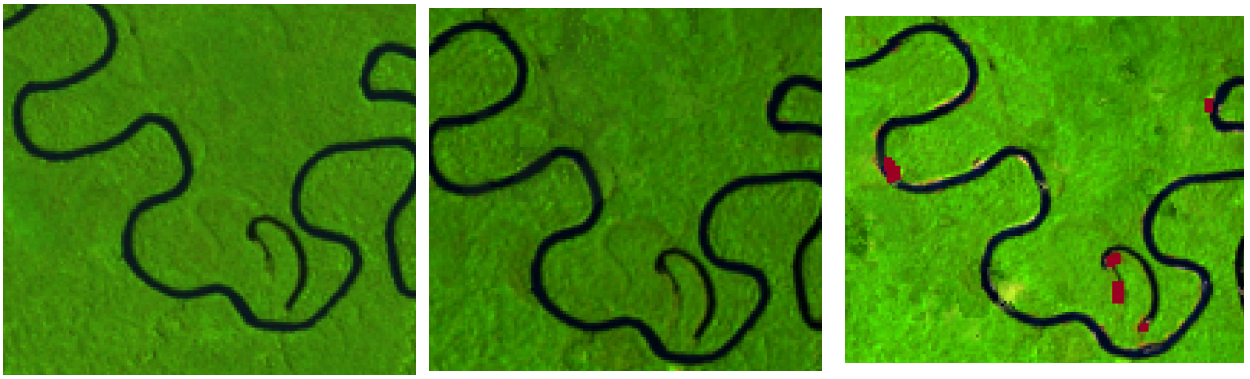
1990	2000	2010



2025	2025. RGB 654 L8	Paisaje

Figura 18: Resultados de clasificación de la minería en parte del departamento de Cesar. El Paso - Cesar, Escala: 5 km, Coordenadas: -73.4725 W, 9.6784 N.

Amazonía.



1985	2021	2023



2025	2025. RGB 654 L8	Paisaje

Figura 19: Resultados de clasificación de la minería en parte del departamento de Amazonía. Frontera entre Brasil y Colombia, Escala: 200 m, Coordenadas: -69.58185 W, -2.12594 S.

4. Referencias

Breiman, L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 45(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Congreso de Colombia. (2001). LEY 685 DE 2001 Código de Minas. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9202

IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000.