



## **Apéndice - Minería**

### **Tema transversal**

### **Colección 4**

#### **Equipo responsable**

Sergio Campos  
Lucy Flores  
Katherin Ivala  
Zuley Cáceres  
Andrea Bravo  
Valeria Llactayo  
Emanuel Valero

# ÍNDICE

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                    | <b>2</b>  |
| <b>2. Marco teórico</b>                                   | <b>2</b>  |
| <b>3. Metodología</b>                                     | <b>3</b>  |
| 3.1. Área de estudio                                      | 3         |
| 3.4.1. Búsqueda y actualización de datos                  | 8         |
| 3.4.2. Preparación de los datos                           | 9         |
| 3.4.3. Muestras de entrenamiento                          | 9         |
| 3.4.4. Algoritmo de clasificación                         | 10        |
| 3.5. Post - clasificación                                 | 11        |
| 3.5.1. Llenado de vacíos de información - Filtro Gap fill | 11        |
| 3.5.2. Filtro espacial                                    | 12        |
| 3.5.3. Filtro temporal                                    | 12        |
| 3.5.4. Filtro temporal                                    | 13        |
| 3.6. Integración                                          | 14        |
| 3.7. Resumen metodológico                                 | 16        |
| <b>4. Referencias</b>                                     | <b>16</b> |

## Lista de figuras

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Mapa de acumulado de la clasificación de la clase Minería                                                                                                     | 4  |
| Figura 2: Regiones de clasificación                                                                                                                                     | 5  |
| Figura 3: Método de generación de mosaicos anuales Colección 4.0 Mapbiomas Perú                                                                                         | 7  |
| Figura 4: Tabla de coordenadas y mapa de puntos con la localización de las zonas mineras                                                                                | 9  |
| Figura 5: Polígono de zonas mineras                                                                                                                                     | 9  |
| Figura 6: Der. Mina de bauxita. Izq. Clasificación de zona minera.                                                                                                      | 10 |
| Figura 7: Polígono de Mina y No-Mina                                                                                                                                    | 11 |
| Figura 8: Esquema de funcionalidad de filtro Gap Fill                                                                                                                   | 12 |
| Figura 9: Esquema de la funcionalidad del filtro espacial                                                                                                               | 12 |
| Figura 10: Esquema de la funcionalidad del filtro temporal                                                                                                              | 13 |
| Figura 11: Esquema de la funcionalidad del filtro frecuencia                                                                                                            | 14 |
| Figura 12: Clasificación de zona minera integrada                                                                                                                       | 15 |
| Figura 13: Imágenes de referencia (resultado de la integración del tema transversal de minería en el mapa general, imagen de alta resolución de Google Earth y paisaje) | 15 |
| Figura 14. Diagrama de flujo metodológico                                                                                                                               | 16 |

## Lista de Tablas

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Tabla 1: Regiones de clasificación | 5 |
| Tabla 2: Índices espectrales       | 8 |

## **1. Introducción**

Este documento describe la metodología utilizada en la Colección 4 de MapBiomás Perú para la clasificación de las zonas mineras; definidas como todas las áreas de extracción de materiales pétreos o minerales con clara exposición del suelo, sin hacer diferenciación del tipo de actividad (industrial, artesanal, legal o ilegal).

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

## **2. Marco Teórico**

En el contexto de MapBiomás Perú, se considera como transversal de Minería a las áreas destinadas a la extracción de minerales y rocas, incluyendo canteras y otras superficies asociadas directamente con actividades extractivas, caracterizadas principalmente por la remoción de la cobertura natural y la exposición del suelo o del material geológico superficial. La clasificación comprende tanto actividades de minería metálica como no metálica, sin establecer diferenciaciones en función de su escala, modalidad de operación o condición legal, por lo que se incluyen actividades industriales, artesanales, formales e ilegales.

Desde el punto de vista de la teledetección, las áreas mineras presentan características espectrales y espaciales que permiten diferenciarlas de otras coberturas de la superficie terrestre. Entre estas características destacan la pérdida o ausencia de vegetación, la exposición de suelo y roca, la modificación de la superficie del terreno y la presencia de patrones geométricos o espaciales asociados a las actividades de extracción. Sin embargo, estas características pueden variar en función del tipo de mineral extraído, las condiciones ambientales, la escala de la operación y el entorno en el que se desarrolla la actividad minera.

La identificación mediante imágenes satelitales permite realizar un seguimiento espacial y temporal de estas áreas, facilitando la detección de superficies que presentan cambios asociados a la actividad extractiva. En este sentido, la clasificación busca representar la ocupación de la superficie por actividades mineras, sin pretender determinar aspectos relacionados con la legalidad de la operación, el método de extracción o su nivel de formalización.

### **3. Metodología**

#### **3.1. Área de estudio**

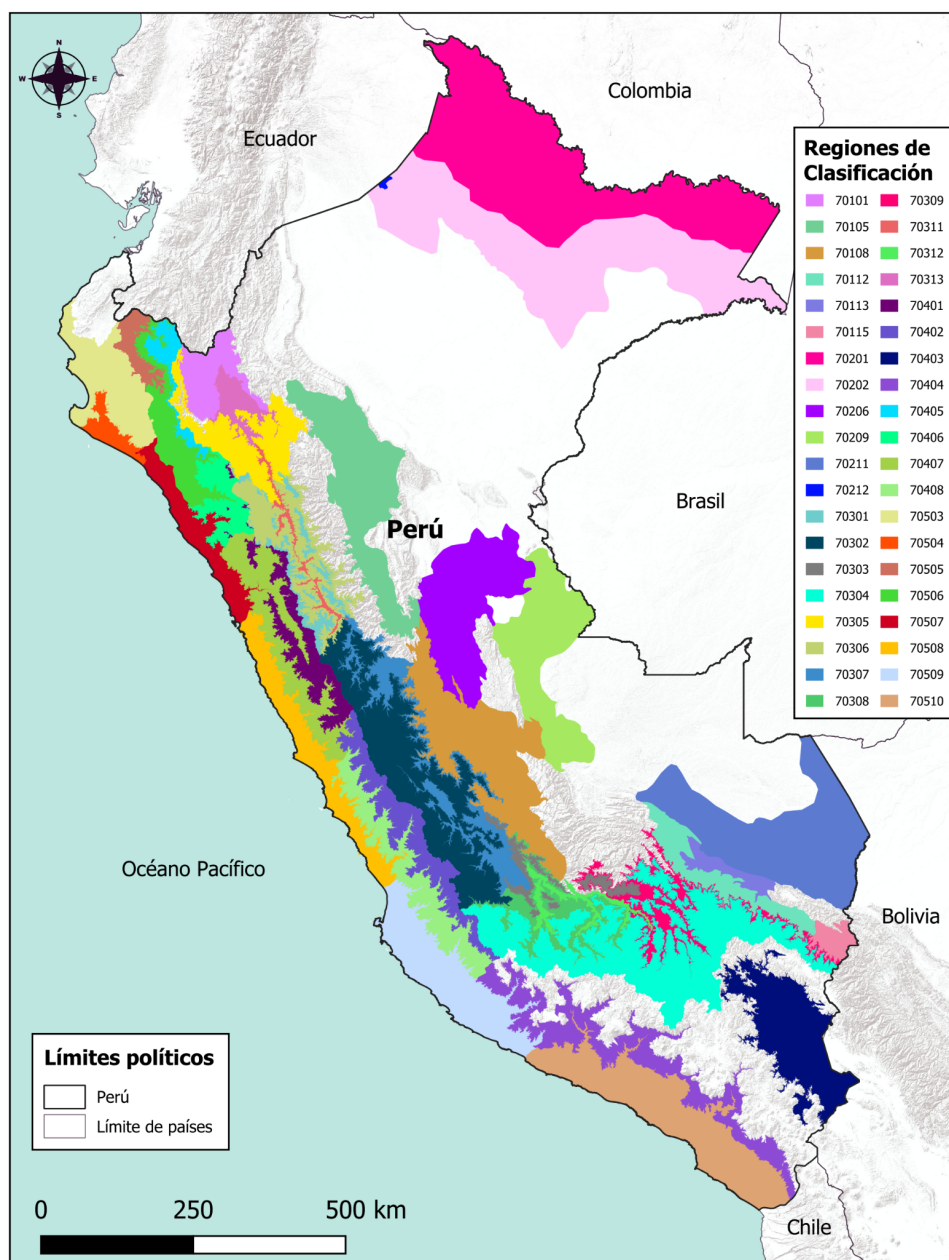
El ámbito de estudio comprende todo el territorio peruano y considera los cuatro biomas definidos para la clasificación de MapBiomas Perú: Desierto Costero, Bosque Seco Ecuatorial, Andes y Amazonía.

La clasificación de la clase de la clase Minería se realizó para toda la serie temporal de la colección actual, permitiendo identificar su distribución espacial y evolución a escala nacional. Como referencia espacial del área de estudio, la Figura 1 presenta el mapa de acumulado de la clasificación de Infraestructura Urbana para el conjunto de años analizados, donde se representa la totalidad de píxeles identificados como pertenecientes a esta clase al menos en uno de los años de la serie temporal. Esta representación permite visualizar la extensión y distribución de las áreas de playas identificadas a nivel nacional y proporciona un contexto espacial para el análisis desarrollado posteriormente.



**Figura 1.** Mapa de acumulado de la clasificación de la clase Minería (ID 30) correspondiente a toda la serie temporal (1985–2025).

Para la clasificación de minería se definieron sesenta y un (61) regiones de mapeo o clasificación, usando las mismas que en el ATBD General MapBiomias Perú. Cada región fue trabajada independientemente para cada año de la serie temporal.



**Figura 2.** Regiones de clasificación.

**Tabla 1.** Regiones de clasificación.

| Región de mosaico | Nombre de región de mosaico | Identificador | Códigos |
|-------------------|-----------------------------|---------------|---------|
| Región 701        | Amazonía Alta               | 5             | 70105   |
|                   |                             | 8             | 70108   |
|                   |                             | 9             | 70109   |
|                   |                             | 12            | 70112   |
|                   |                             | 13            | 70113   |
|                   |                             | 15            | 70115   |
| Región 702        | Amazonía Baja               | 2             | 70202   |
|                   |                             | 6             | 70206   |
|                   |                             | 9             | 70209   |

|               |                               |    |       |
|---------------|-------------------------------|----|-------|
|               |                               | 11 | 70211 |
| Región<br>703 | Andes Alto                    | 1  | 70301 |
|               |                               | 2  | 70302 |
|               |                               | 3  | 70303 |
|               |                               | 4  | 70304 |
|               | Andes Bajo                    | 1  | 70305 |
|               |                               | 2  | 70306 |
|               |                               | 3  | 70307 |
|               |                               | 4  | 70308 |
|               |                               | 5  | 70309 |
|               | Andes Bosque Seco Interandino | 2  | 70311 |
| Región<br>704 | Andes Pacífico Alto           | 1  | 70401 |
|               |                               | 2  | 70402 |
|               |                               | 3  | 70403 |
|               | Andes Pacífico Bajo           | 1  | 70404 |
|               |                               | 2  | 70405 |
|               |                               | 3  | 70406 |
|               |                               | 4  | 70407 |
|               |                               | 5  | 70408 |
| Región<br>705 | Costa Norte                   | 3  | 70503 |
|               |                               | 4  | 70504 |
|               |                               | 5  | 70505 |
|               |                               | 6  | 70506 |
|               | Costa Centro                  | 1  | 70507 |
|               |                               | 2  | 70508 |
|               | Costa Sur                     | 1  | 70509 |
|               |                               | 2  | 70510 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Generación de mosaicos anuales

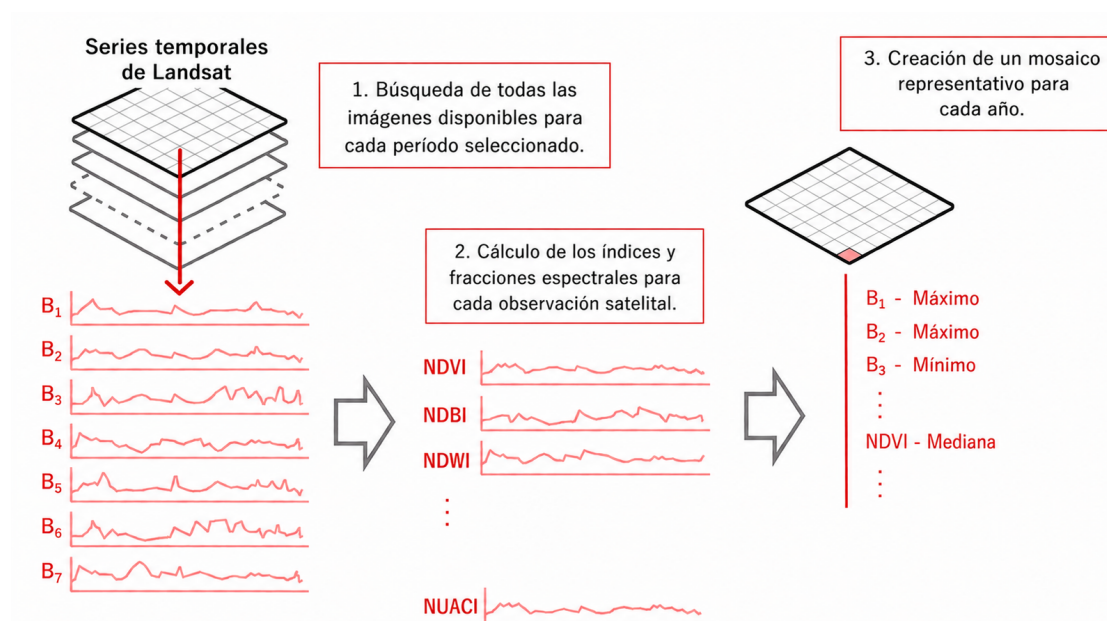
Para fines de procesamiento, la metodología de MapBiomás, divide el área del proyecto en una grilla de cartas regulares definidas con base a la grilla de las Cartas Internacionales del Mundo a la Millonésima, a escala de 1:250.000. Cada carta rectangular cubre un área de 1°30' de longitud por 1° de latitud. En la figura 1 se muestra el área de estudio.

En cada una de estas cartas o celdas de la grilla, 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. Para mayor detalle revisar la sección 3.1 del documento: [ATBD General MapBiomás Amazonia 5.0](#). En esta colección para la construcción de los mosaicos se utilizó la Landsat Collection 2, la cual presenta la versión más actualizada del reprocesamiento de los archivos de 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 construido:

- ID: Identificador o código único de la unidad carta/región
- Año: Año de la serie (comprendiendo el período 1985 a 2025) al que corresponde el mosaico.
- Carta: Código identificador de la carta
- 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.
- Sensor: El satélite y su respectivo sensor: Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI, Landsat 9 o una combinación de 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 de la construcción del mosaico.

Con esta información se construyen los mosaicos anuales de imágenes, con la herramienta Google Earth Engine. Todos los mosaicos generados se almacenan como una colección de imágenes de Google Earth Engine. Los mosaicos presentan inicialmente los valores de mediana de cada una de las bandas de los satélites Landsat. En base a estos datos, se agrega a cada mosaico bandas adicionales de índices espectrales, fracciones espectrales, variables de textura e índices topográfico-geomorfológicos derivados del modelo de elevación digital. 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 bosques aleatorios (Random Forests).



**Figura 3.** Método de generación de mosaicos anuales Colección 4.0 Mapbiomas Perú.

### 3.3. Índices espectrales

La selección de variables (de los mosaicos) para la identificación de las zonas mineras es el paso inicial para la clasificación. Se realizaron pruebas que permitieron identificar un conjunto de variables específicas para la detección de la minería. En total se usaron 18 variables, las cuales se presentan en la tabla 1 a continuación.

**Tabla 2.** Índices espectrales: Variables para la clasificación de zonas mineras de la Colección 4, MapBiomias Perú.

| Banda         | Expresión / Descripción                                                                                                | Reductor          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| blue          | Valor de la banda azul                                                                                                 | Mediana           |
| green         | Valor de la banda verde                                                                                                | Mediana           |
| red           | Valor de la banda roja                                                                                                 | Mediana           |
| nir           | Valor de la banda infrarrojo cercano (NIR)                                                                             | Mediana           |
| swir1         | Valor de la banda SWIR1                                                                                                | Mediana           |
| swir2         | Valor de la banda SWIR2                                                                                                | Mediana           |
| ndfi          |                                                                                                                        | Mediana           |
| ndfib         |                                                                                                                        | Mediana           |
| npv           |                                                                                                                        | Mediana           |
| soil          |                                                                                                                        | Mediana, Amplitud |
| evi2          | $2.5 * ((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 2.4 * \text{Red} + 1))$                                              | Mediana           |
| ndvi          | $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$                                                                | Mediana           |
| ndwi_gao      | $(\text{Green} - \text{SWIR1}) / (\text{Green} + \text{SWIR1})$                                                        | Mediana           |
| ndwi_mcfeters | $(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$                                                            | Mediana           |
| mndwi         | $(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$                                                            | Mediana           |
| gcvi          | $(\text{nir} / \text{green}) - 1$                                                                                      | Mediana           |
| nuaci         | $UNTL * (1 - \sqrt{(\text{NDWI} - a\text{NDWI})^2 + (\text{NDVI} - a\text{NDVI})^2 + (\text{NDBI} - a\text{NDBI})^2})$ | Mediana           |
| pri           | $(\text{blue} - \text{green}) / (\text{blue} + \text{green})$                                                          | Mediana           |

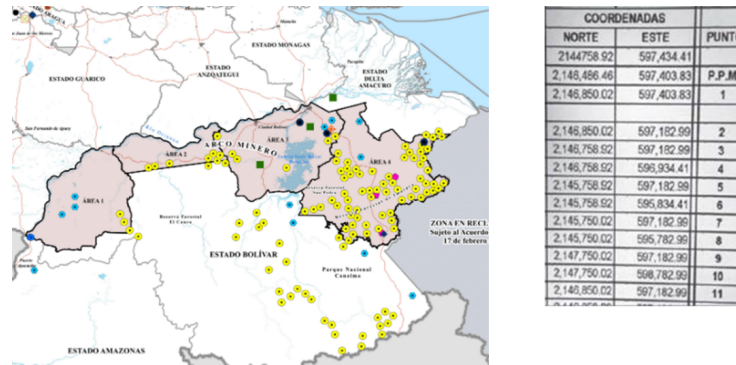
Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Clasificación

Para generar la clasificación se desarrolló un algoritmo de procesamiento en seis etapas, cuatro de las cuales corresponden al proceso de clasificación y las restantes 2 a la etapa de post-clasificación. Se generaron los resultados y se almacenaron en Google Earth Engine. El proceso involucró la definición de las áreas mineras, toma de muestras y clasificación, para luego integrar todas las minas identificadas en una capa única y, finalmente, con el mapa general (colección 4) de MapBiomias Perú. A continuación se describe cada paso asociado a la clasificación.

#### 3.4.1. Búsqueda y actualización de datos

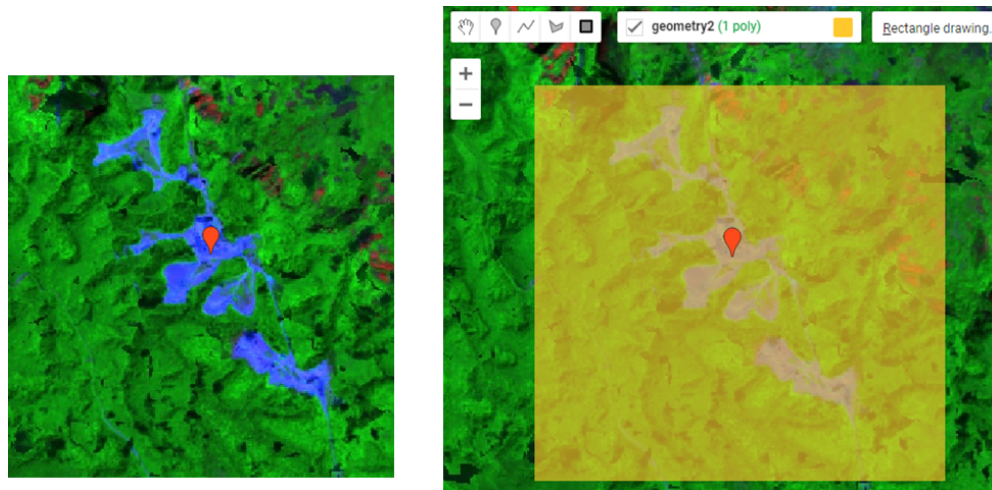
Se realizó una búsqueda de fuentes de datos auxiliares (mapas, reportes, informes, geovisores), con el objetivo de localizar las principales áreas mineras. Con ello se generó una tabla con las coordenadas de cada zona minera, que luego se exportó a una herramienta de sistemas de información geográfica (SIG) para su visualización espacial como un mapa de puntos (ver Figura 3).



**Figura 4.** Tabla de coordenadas y mapa de puntos con la localización de las zonas mineras.

### 3.4.2. Preparación de los datos

El mapa de puntos de las zonas mineras generado se importó a Google Earth Engine, como referencia espacial para delimitar las áreas mineras y la toma de muestras de entrenamiento. Como mapa base se utilizaron las imágenes de alta resolución espacial de Google Maps y los mosaicos de Landsat (ver sección 2). Usando estos datos se identificaron y generaron polígonos envolventes alrededor de las zonas mineras, pudiendo abarcar una o varias minas (ver Figura 4). Estas envolventes se delimitaron manualmente utilizando las herramientas de dibujo de Google Earth Engine, cuidando que el área de las zonas mineras y no mineras fuese proporcional, para facilitar la correcta identificación de coberturas por parte del algoritmo de clasificación. Para cumplir ese requerimiento, en ciertas regiones se dibujó una gran cantidad de polígonos.



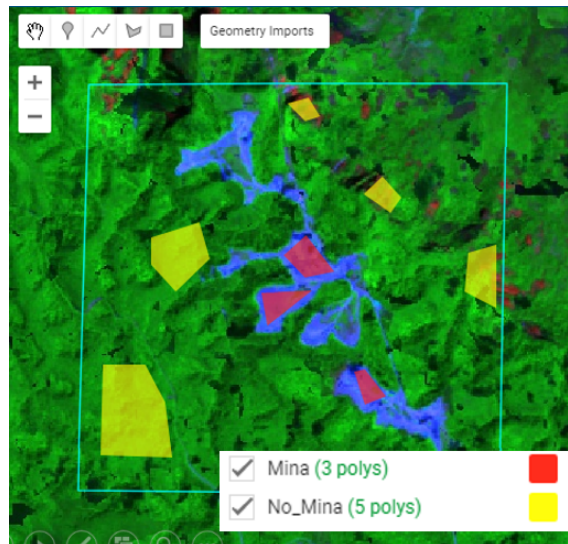
**Figura 5.** Polígono de zonas mineras

### 3.4.3. Muestras de entrenamiento

Dentro de las envolventes (polígonos) que delimitan las áreas mineras de interés (sección 4.2, ver figura 2) se definieron manualmente dos tipos de polígonos de entrenamiento: uno definido como 'Mina' (ID 30), que contiene estrictamente el área de explotación minera o la mina y el segundo definido como

'No\_Mina' (ver Figura 5) que abarca la clase 'no observado' o aquellas clases no correspondientes a minería (ID 27).

Las muestras de entrenamiento tomadas dentro del área de interés (envolventes cuadradas/geométricas) son las que se utilizan para generar la clasificación de la zona de minería. Todo lo que está fuera de la envolvente delimitada no es clasificado ya que se considera como zona no minera y/o asignada a otra clase dentro de la leyenda MapBiomás.



**Figura 6.** Polígono de Mina y No-Mina.

#### **3.4.4. Algoritmo de clasificación**

La clasificación de las zonas mineras se llevó a cabo en la plataforma de Google Earth Engine usando el algoritmo Random Forests (bosques aleatorios, de su traducción del inglés) (Breiman, 2001), con base en la metodología implementada por el equipo de MapBiomás Brasil (Solutions in Geoinformation, Solved, Brasil) para la identificación de la minería industrial de ese país.

La clasificación se ejecutó dentro de las zonas delimitadas en los polígonos dibujados según lo explicado en la sección 4.2 de este documento. El resultado fue una imagen formada por píxeles con valor binario indicando la presencia o ausencia de zonas mineras (área definida en color rojo en la Figura 6), dentro de cada cuadrícula definida previamente.



**Figura 7.** Der. Mina de bauxita. Izq. Clasificación de zona minera.

### 3.5. Post - clasificación

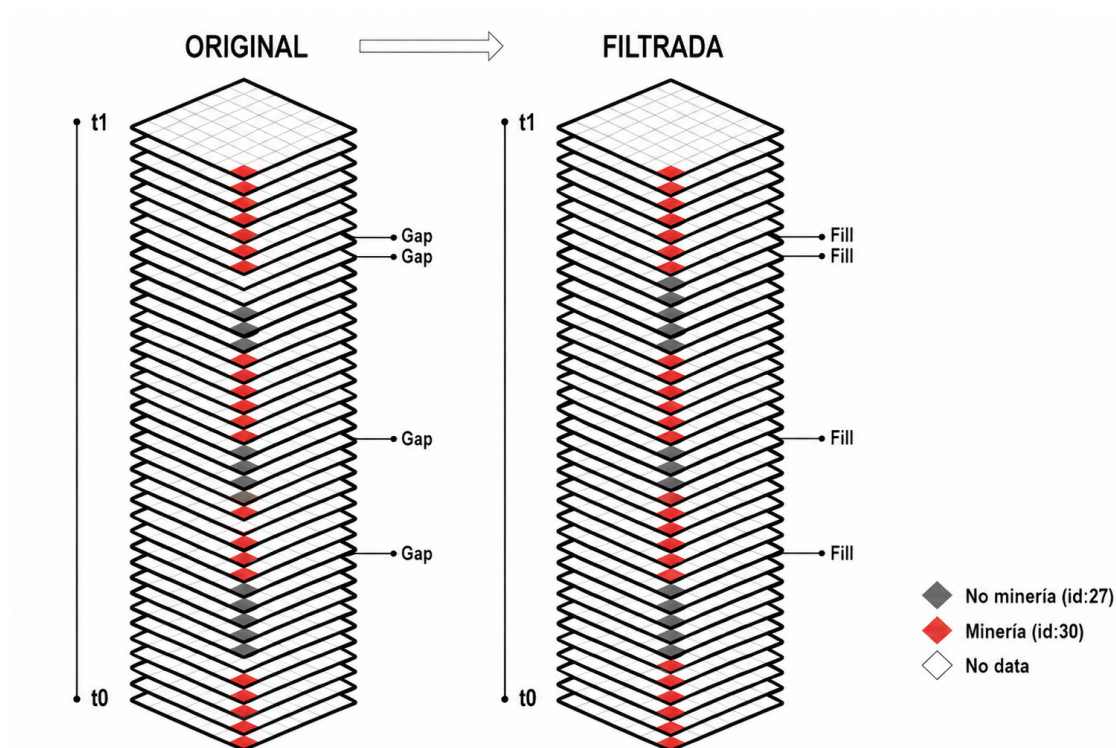
Los resultados de la clasificación se sometieron a la aplicación de una secuencia de filtros con el propósito de reducir las inconsistencias temporales, vacíos de información y otros problemas de clasificación. Para ello se utilizó un filtro espacial y uno de frecuencia.

#### 3.5.1. Llenado de vacíos de información - Filtro Gap fill

La secuencia de filtros aplicada al tema transversal de minería inicia con el relleno de vacíos de información (*Gap Fill*). Debido a la extensión territorial considerada por MapBiomás Perú y a las condiciones atmosféricas y climáticas que afectan las superficies mineras, los mosaicos anuales pueden presentar píxeles sin información o ausencia de observaciones satelitales (*gaps*). Este filtro permite reducir estos vacíos residuales mediante la asignación del valor temporalmente más próximo disponible en la serie.

El proceso realiza una revisión temporal de la clasificación mediante un barrido de “atrás hacia adelante”, en el que los píxeles sin información son completados utilizando los valores disponibles de los años más próximos que anteceden al año con ausencia de datos. Posteriormente, los vacíos que permanecen son completados mediante un barrido en sentido contrario, utilizando la información disponible de los años siguientes. De esta manera, se busca asignar a cada píxel sin información el valor válido temporalmente más cercano dentro de la serie.

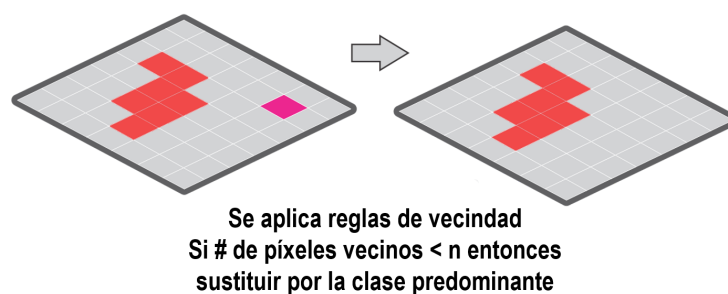
Para cada píxel cuyo valor es completado mediante este procedimiento, el cambio queda registrado en un archivo de metadatos que permite conservar el historial de las modificaciones realizadas. El proceso puede utilizar información de varios años para cubrir los vacíos existentes. Por lo tanto, las brechas de información solo persisten cuando un píxel permanece clasificado como sin información durante toda la serie temporal disponible (ver Figura 7).



**Figura 8.** Esquema de funcionalidad de filtro Gap Fill, en donde  $t_0$  representa el primer año y  $t_1$  el último año.

### 3.5.2. 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 6). Para ambas clases (ID: 27, ID: 30), la conexión mínima establecida fue de 5 píxeles (aprox. 0.5 ha) (ver Figura 8).



**Figura 8.** Esquema de la funcionalidad del filtro espacial.

### 3.5.3. Filtro temporal

Se ejecutó un filtro temporal utilizando ventanas de 3, 4 y 5 años en toda la serie de tiempo, tomando en cuenta el contexto de cada región de clasificación. El

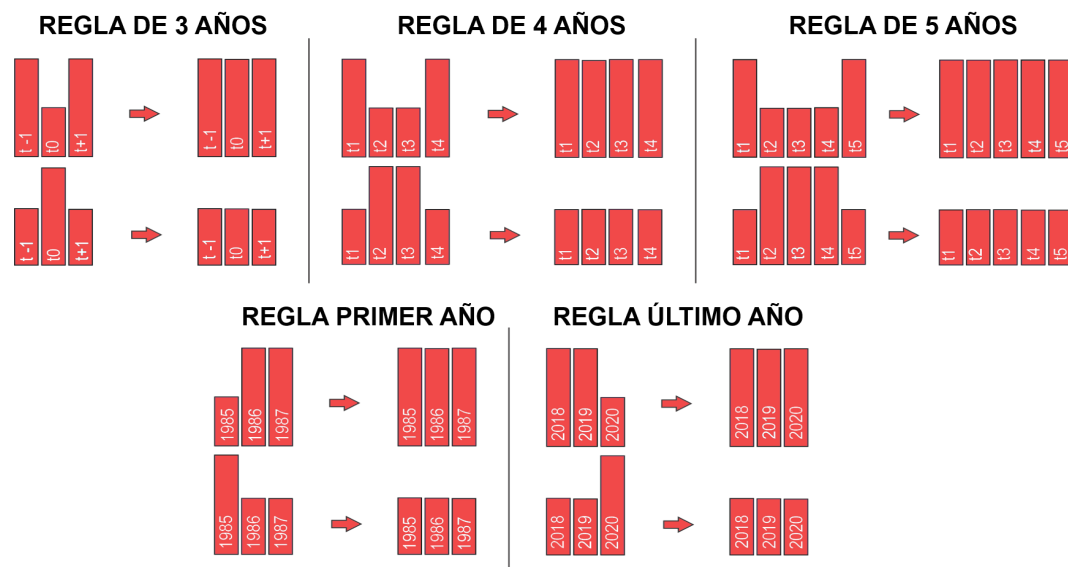
filtro inspecciona el valor de cada píxel clasificado en relación al valor de ese píxel en clasificaciones temporalmente consecutivas. Para ello emplea una ventana móvil unidireccional que toma en consideración secuencias de clasificaciones de 3 a 5 años e identifica transiciones temporales no permitidas. El filtro temporal se aplica a cada píxel de todos los años de la colección. Dependiendo del año que la regla modificará, existen tres tipos de reglas:

Reglas generales (RG). Aplicadas a píxeles de años en posiciones intermedias en secuencias de 3 a 5 años. Esta regla se aplica únicamente en casos donde hay una inconsistencia temporal; por ejemplo, cuando secuencias de años consecutivos tienen valores idénticos a excepción del píxel en posición central. En estos casos, el filtro modificará el valor del píxel central para que guarde consistencia con los píxeles que le anteceden y suceden. En el caso de secuencias de 3 años, solo existe una opción de posición central o año intermedio. En el caso de secuencias de 4 o 5 años, existen dos o tres alternativas de posiciones centrales. Esta regla modifica los valores de las clasificaciones de los años 1986 al 2024.

Reglas de primer año (RP). Aplicadas únicamente al primer año de la serie temporal. Esta regla modifica los valores de la clasificación del año 1985.

Reglas de último año (RU). Aplicada al último año de la clasificación. Esta regla modifica los valores de la clasificación del año 2025.

De este modo, los filtros temporales reducen vacíos de información e inconsistencias temporales o cambios que no son posibles o no están permitidos (ver Figura 9).

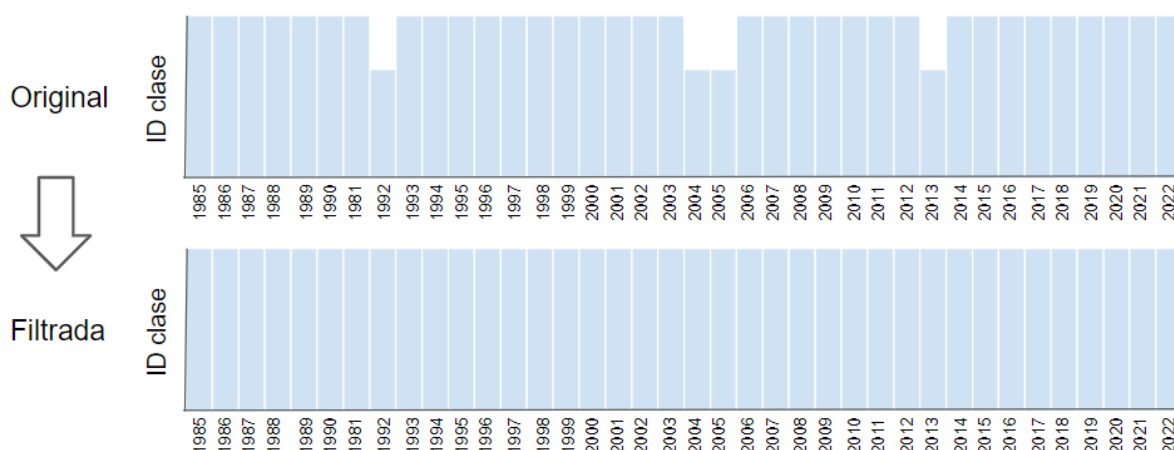


**Figura 9.** Esquema de la funcionalidad del filtro temporal.

### 3.5.4. Filtro temporal

Este filtro toma en consideración la frecuencia de ocurrencia de la clase minería (ID: 30) y no observado (ID: 27) en toda la serie temporal, para rellenar o

reemplazar por el valor de la clase correspondiente el año que cumple con el valor mínimo de frecuencia (ver Figura 10).

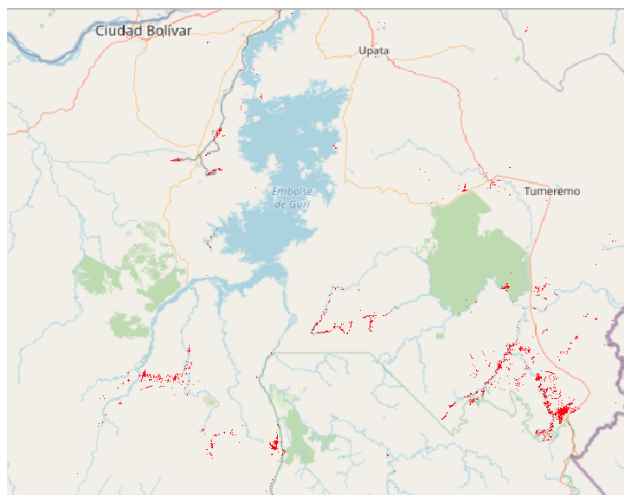


**Figura 10.** Esquema de la funcionalidad del filtro frecuencia.

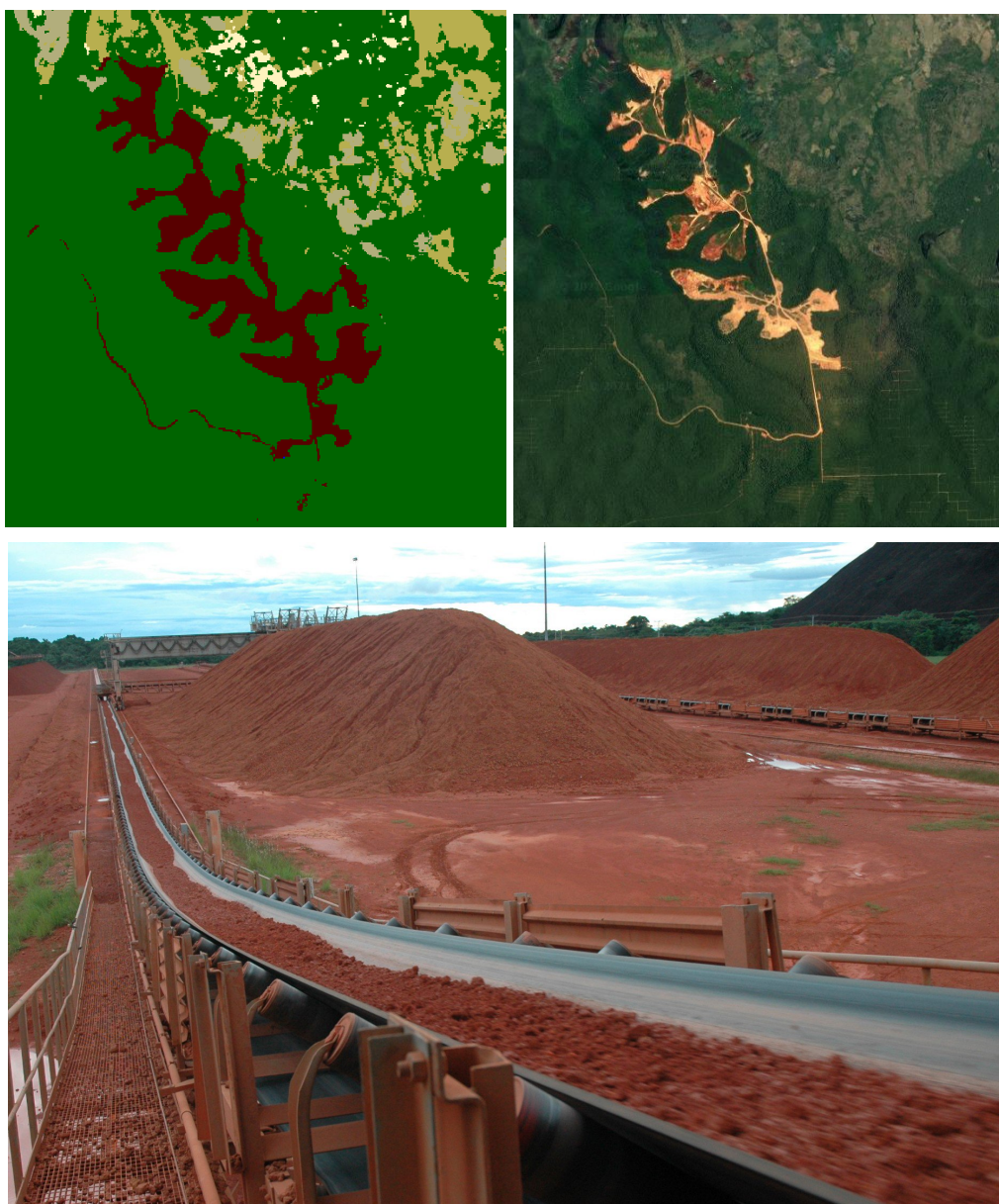
De manera complementaria, se emplearon herramientas y procedimientos adicionales de post clasificación, entre ellos procesos de unión (join) con la colección anterior (Colección 3.0), con el propósito de aprovechar y conservar información previamente validada y con buen desempeño en la clasificación. Asimismo, se aplicaron ajustes específicos de carácter temporal y espacial en función de las características y necesidades identificadas en cada región o periodo analizado. Estas herramientas permitieron resolver inconsistencias puntuales, preservar patrones de clasificación consolidados y mejorar la continuidad y coherencia de las trayectorias de cambio a lo largo de la serie temporal. En este sentido, la secuencia de post clasificación no se estableció como un procedimiento rígido y uniforme para todo el territorio, sino como un conjunto de herramientas aplicadas de manera contextual, cuya selección y configuración dependen de las condiciones espaciales y temporales de cada área, contribuyendo a optimizar la consistencia final de la clasificación.

### 3.6. Integración

Al obtener la clasificación de las zonas mineras se realizó la integración de todas las zonas identificadas con minas para todo el país (ver Figura 11), y este resultado se integró al mapa general de clasificación nacional (ver Figura 12). Esta integración se generó con base a una serie de reglas de prevalencia u orden de integración por jerarquía, para cada una de las clases dentro de la leyenda MapBiomás.



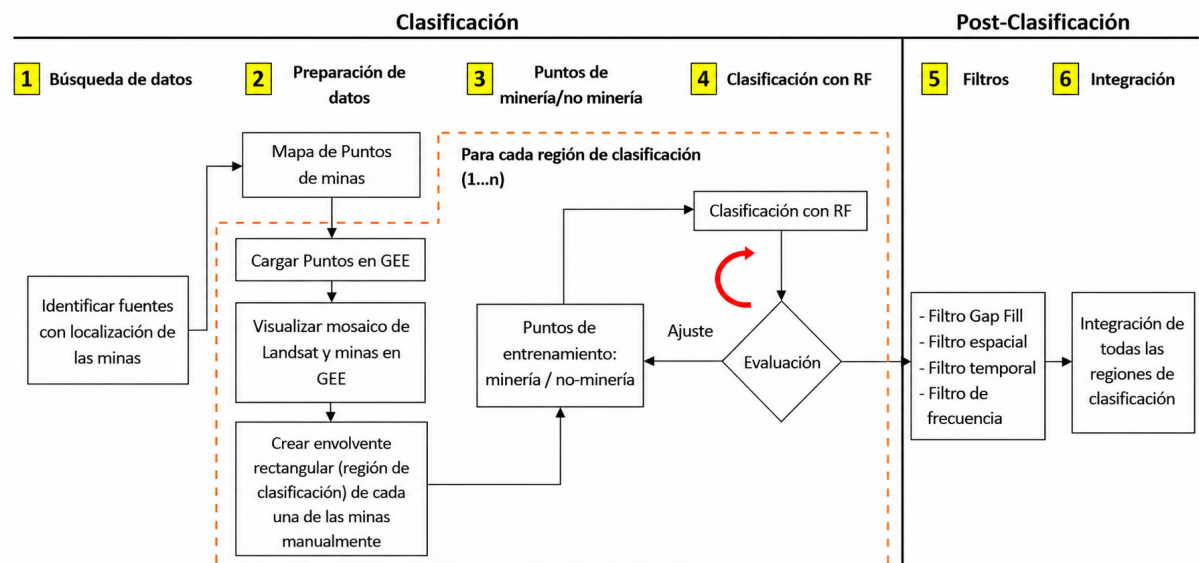
**Figura 11.** Clasificación de zona minera integrada.



**Figura 12.** Imágenes de referencia (resultado de la integración del tema transversal de minería en el mapa general, imagen de alta resolución de Google Earth y paisaje).

### 3.7. Resumen metodológico

Los 6 pasos de clasificación del tema transversal de minería se representan esquemáticamente en el siguiente gráfico. (ver Figura 13).



**Figura 13.** Diagrama de flujo metodológico.

## 4. Referencias

- 1) Breiman, Leo. "Random Forests." Machine Learning vol 45 (2001): 5–32.
- 2) Hartshorn, Scott. Machine Learning With Random Forests And Decision Trees A Visual Guide For Beginners. Amazon.com Services LLC, 2016.