

MAPBIOMAS
BOLIVIA

Apéndice – Pastura, Agricultura y Mosaico de Uso

Tema transversal en Colección 3

Versión 1

Julio 2025

Equipo de especialistas

Sara Espinoza
Carolyn Ordoñez
Yanine Domínguez
Marcelo Char
Rodney Camargo

Especialistas en programación para teledetección

Rodney Camargo & Marcelo Char

Responsable del componente técnico

Sara Espinoza
Coordinador del proyecto MapBiomás Bolivia
Saúl Cuéllar
Gestión proyectos
Marlene Quintanilla
Institución
Fundación Amigos de la Naturaleza



Km. 7 1/2 Doble Vía a La Guardia
Santa Cruz - Bolivia
Teléfono: (591-3) 3556800
www.fan-bo.org

Cómo citar:

Documento de Base Teórica sobre Algoritmos (ATBD) - Apéndice - Pastura, Agricultura y Mosaico de Uso - MapBiomás Bolivia Colección 3

ÍNDICE

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	TRANSVERSALES ANALIZADAS.....	2
3.	METODOLOGÍA	2
3.1.	Clase Pastura (ID 15).....	2
3.1.1.	Definición de la clase.....	2
3.1.2.	Mapeo y clasificación	3
3.1.3.	Búsqueda y Preparación de los Datos	3
3.1.4.	Mosaicos de Imágenes	4
3.1.4.1.	Preprocesamiento de imágenes	5
3.1.4.2.	Definición del periodo de imágenes	5
3.1.5.	Muestras de pastura/no pastura	5
3.1.6.	Estrategias complementarias previas a la clasificación	7
3.1.7.	Resumen metodológico	8
3.1.8.	Clasificación	10
3.1.8.1.	Variables de clasificación.....	11
3.2.	Clase Agricultura (ID 18).....	12
3.2.1.	Definición de la clase.....	12
3.2.2.	Mapeo y clasificación	13
3.2.3.	Búsqueda y Preparación de datos	14
3.2.4.	Mosaicos de imágenes	14
3.2.4.1.	Preprocesamiento de imágenes	14
3.2.4.2.	Definición del periodo de imágenes	15
3.2.5.	Clasificación	16
3.2.6.	Variables de Clasificación	18
3.2.7.	Muestras de Entrenamiento	19
3.2.8.	Clase Soya (ID 39) – Versión beta.....	20
3.2.8.1.	Definición de la clase	20
3.2.8.2.	Mapeo y clasificación.....	20
3.2.8.3.	Variables de Clasificación	21
3.2.8.4.	Muestras de Entrenamiento	22
3.3.	Clase Mosaico de Uso (ID 21).....	23
4.	POST – CLASIFICACIÓN.....	23
4.1.	Filtro temporal.....	24
4.2.	Filtro espacial.....	24
4.3.	Filtro de frecuencia	24
5.	INTEGRACIÓN	25
6.	REFERENCIAS.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cinco operaciones utilizadas: media, desviación estándar, mínimo, máximo y amplitud	11
Tabla 2. Análisis de percentiles en seis bandas y tres índices espectrales.....	11
Tabla 3. Índices de apoyo	12
Tabla 4. Parámetros de selección de imágenes para las bandas base	15
Tabla 5. Variables empleadas para este transversal y sus reductores.....	18
Tabla 6. Variables estáticas	19
Tabla 7. Variables complementarias para la identificación del cultivo de soya.....	22
Tabla 8. Leyenda para la Colección 3 de MapBiomás Bolivia.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Análisis de las transversales: Pastos (ID 15), Agricultura (ID 18) y Mosaico de Uso (ID 21)	2
Figura 2. Identificación de la clase “Pastura” en algunos Biomas	3
Figura 3. Información recabada de las características que tiene la clase “Pastura”	4
Figura 4. Puntos de colecta de clase Pastura (ID 15)	4
Figura 5. Áreas de entrenamiento asignadas para la inspección visual e identificar Pastura y no-Pastura	5
Figura 6. Áreas de entrenamiento con las clases consolidadas de Pastura y no-Pastura. En círculo las áreas detectadas como pastura	6
Figura 7. Actividad ganadera en Santiago de Moxos en la llanura de inundación - Bolivia	6
Figura 8. Importancia de variables - Clase Pastura (ID: 15)	7
Figura 9. Resultado de la clasificación de clase Agricultura (ID 18 - color rosado) y Pastura (ID 15 - color naranja)	8
Figura 10. Pasturas en San Javier (Santa Cruz - Bolivia), Landsat (swir,nir,red). Clasificación de pastura (ID 15) con transversal de agricultura	8
Figura 11. Pasos para la clasificación de Pastura	9
Figura 12. Imágenes Landsat vs área utilizada para Pastura	10
Figura 13. Clase Pasto identificado en las imágenes satelitales y su clasificación	12
Figura 14. Identificación de la clase “Agricultura” en algunos Biomas	13
Figura 15. Puntos de colecta de clase Agrícola (ID 18)	14
Figura 16. Proceso de generación de mosaicos anuales de imágenes Landsat	15
Figura 17. Puntos de muestras de Agricultura y no-Agricultura	16
Figura 18. Diagrama de flujo metodológico para la obtención de mapas de mosaico de agricultura	17
Figura 19. Colocación de muestras por rango temporal	18
Figura 20. Ejemplo de muestras complementarias por rango de años	19
Figura 21. Identificación de la clase “Soya” en algunos Biomas	21
Figura 22. Ejemplo de muestras complementarias por rango de años	22
Figura 23. Identificación de la clase “Mosaico de Uso” en algunos Biomas	23
Figura 24. Efecto de la aplicación del filtro temporal	24
Figura 25. Efecto de la aplicación del filtro espacial	24
Figura 26. Efecto de la aplicación del filtro frecuencia	25
Figura 27. Resultado de la integración - Colección 3, año 2024	25
Figura 28. Resultado de la integración - Colección 3, Clase Agropecuario Nivel 1	26

1. INTRODUCCIÓN

A escala global, se estima que la demanda de alimentos aumentará en un 60 % hacia 2050, mientras que la demanda de productos de origen animal crecerá cerca de un 50 %, según proyecciones de la FAO. En este contexto, Bolivia desempeña un papel importante dentro del sector agropecuario de América Latina (Producción Sustentable, 2023).

El presente documento expone la metodología utilizada para el mapeo de las clases “Pastura” y “Agricultura”, describiendo la dinámica de ocupación del suelo. Esta información contribuye a una mejor comprensión de los complejos procesos asociados a los cambios en el uso y cobertura del suelo en Bolivia.

En cuanto al sector ganadero, y para entender la dinámica de los pastizales, datos de 2022 señalan que Bolivia contaba con aproximadamente 10,65 millones de cabezas de ganado bovino, con una tasa de crecimiento anual del 3,5 %. El departamento de Santa Cruz concentra más del 70 % de esta población, superando los 3 millones de cabezas y registrando un crecimiento interanual del 3 %. A nivel nacional, la tasa de crecimiento fue del 3,4 % (Tridge summary, 2024). A este contexto se suma el acuerdo suscrito con China en 2019, que permitió incrementar las exportaciones de carne bovina desde 1.000 toneladas hasta casi 130.000 toneladas anuales (Lane, 2024). Estos factores explican el aumento de la superficie destinada a pastos a nivel nacional.

Por otra parte, la agricultura constituye una actividad estratégica tanto para la seguridad alimentaria como para la economía nacional. En 2022, el 35,8 % del territorio boliviano estaba destinado al uso agrícola, abarcando tierras arables y otras con vocación productiva, de las cuales aproximadamente 5,56 millones de hectáreas se consideran cultivables (Banco Mundial, 2022; Trading Economics, 2025).

La identificación y el mapeo de las actividades agropecuarias mediante información satelital georreferenciada y herramientas digitales facilitan el acceso a datos actualizados para la toma de decisiones. Los mapas generados sobre cambios en el uso y cobertura del suelo permiten monitorear el estado y evolución de estos territorios. Al integrarse con información climática y socioeconómica, esta herramienta contribuye a fortalecer las decisiones estratégicas en el sector.

En este sentido, MapBiomias Bolivia ha realiza un monitoreo continuo de la cobertura y uso del suelo, poniendo la información a disposición de diversos usuarios durante el periodo 1985-2024. En las Colecciones 1 y 2, el mapeo se realizó de manera general, agrupando áreas en clases amplias como “Mosaico de uso”, “Agricultura” y “Pastura”, las cuales incluyen cultivos perennes, semiperennes y anuales, junto a áreas ganaderas con pasturas nativas (festucas, stipas, muhlenbergias, adesmias, entre otras) y pastos cultivados (sorgo forrajero, caña forrajera, avena forrajera, cebada, alfalfa, brachiarias, panicum, entre otros). En la Colección 3, con un conocimiento más detallado de los parámetros y fuentes de información, estas clases se desagregaron y abordaron como temas transversales, permitiendo un análisis más específico de las dinámicas territoriales.

2. TRANSVERSALES ANALIZADAS

Las transversales analizadas, corresponden al **Nivel 1 Agropecuario**; estas son áreas donde la vegetación natural ha sido modificada, eliminada o reemplazada por otros tipos de cubiertas vegetales de origen antrópico. Comprende áreas que fueron taladas y hoy convertidas en cultivos agrícolas y pastura (pastos cultivados); en actividad y en descanso.

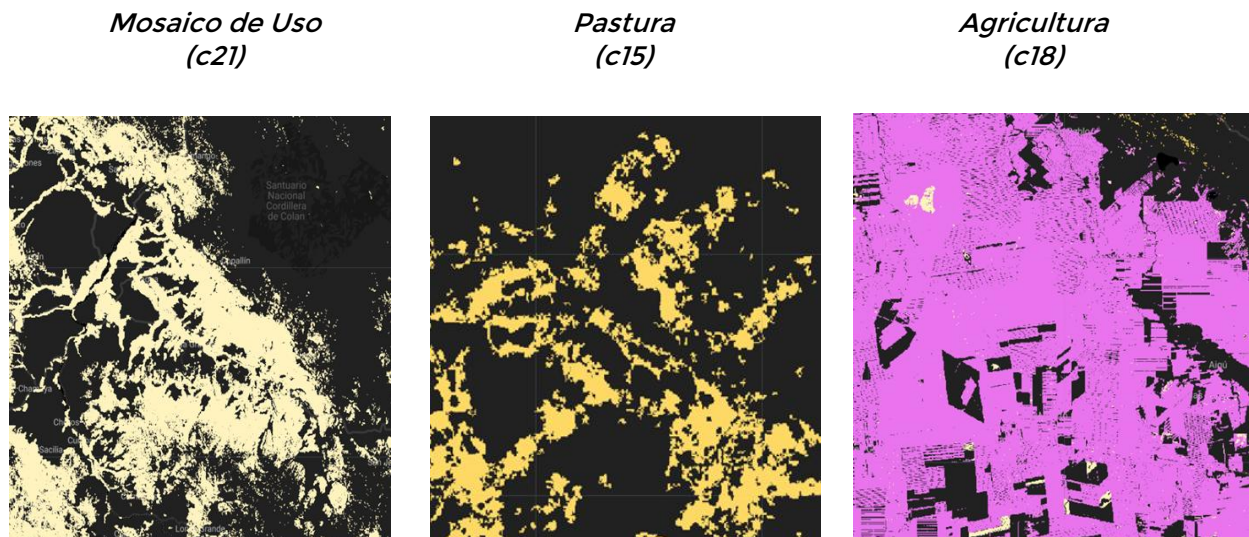


Figura 1. Análisis de las transversales: Pastos (ID 15), Agricultura (ID 18) y Mosaico de Uso (ID 21)

3. METODOLOGÍA

3.1. Clase Pastura (ID 15)

Para generar la clasificación de Pastura (áreas de pastoreo o zonas ganaderas), se desarrolló una ruta de proceso formada por cuatro etapas (scripts) que permitieron separar áreas de pastura y no pastura a partir de mosaicos Landsat previamente definidos y almacenados en Google Earth Engine. Estas etapas del proceso involucran la identificación de las áreas de pastura y su clasificación, adaptando las herramientas para la recolección de datos.

3.1.1. Definición de la clase

Esta clase de cobertura está definida como áreas donde la cobertura original ha sido modificada o reemplazada por pastura (plantas gramíneas, leguminosas, brachiarias, festuca, raigras, etc. principalmente) que se desarrollan en campo y sirven para fines pecuarios. Área de pastura (pastos cultivados), vinculadas a actividad agropecuaria, para alimento de ganado.

3.1.2. Mapeo y clasificación

Con la base de datos recopilada por cada bioma, se procedió a añadir la fecha de inicio que se tenía de cada muestra y así obtener el inicio de esta actividad en el territorio. Para esta clasificación se consideraron la particularidad del bioma, el uso de la cobertura y la información adicional consultada para la clase.

Clase:

Pastura

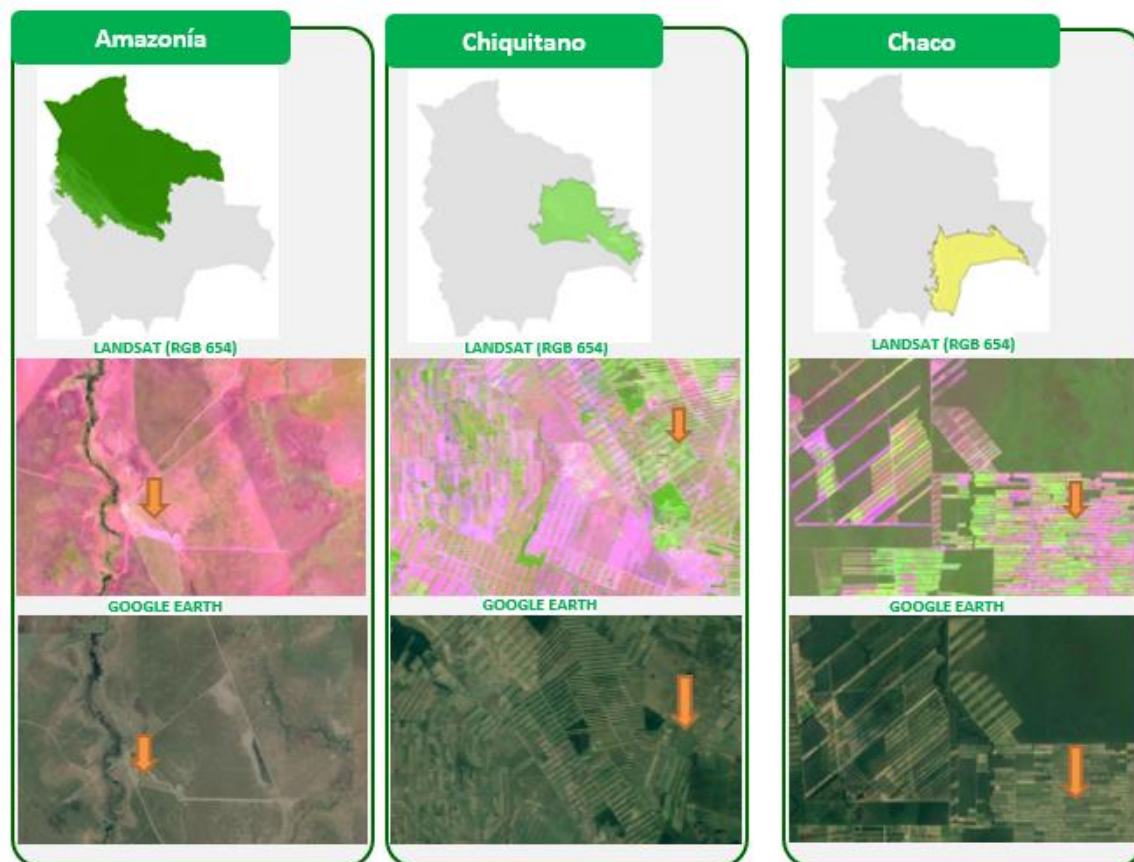


Figura 2. Identificación de la clase “Pastura” en algunos Biomas

3.1.3. Búsqueda y Preparación de los Datos

En esta etapa se realiza una búsqueda de fuentes de datos (mapas, reportes, informes), con el objetivo de localizar las principales áreas y características donde se realiza la actividad de interés.

Con la base de datos recopilada, se procede a añadir el dato en el tiempo, basado en la fecha que se tenía de cada muestra y así obtener el inicio de esta actividad en el territorio, tomando como base los mosaicos Landsat, y así adquirir en lo posible la temporalidad, necesario para clasificar año a año. Con ello se genera una capa de puntos de observado y no observado, utilizando una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para su visualización espacial como mapas de puntos.



Figura 3. Información recabada de las características que tiene la clase “Pastura”

El mapa de puntos generado es importado al Google Earth Engine, para su visualización. El mapa de puntos ingresa como input de datos de la presencia y no presencia, también se utilizaron las imágenes de alta resolución espacial para generar el mapa de la transversal correspondiente.



Figura 4. Puntos de colecta de clase Pastura (ID 15)

3.1.4. Mosaicos de Imágenes

Para la clasificación del tema transversal, se utilizaron las bandas base (bandas de reflectancia) de las imágenes Landsat generadas para el mapa general de la Colección 3 y se utilizaron índices particulares a partir de imágenes Landsat con un periodo temporal y estacional específico.

3.1.4.1. Preprocesamiento de imágenes

Los conjuntos de datos Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9 se obtuvieron a partir de imágenes de reflectancia de superficie corregidas atmosféricamente. En el caso de Landsat 5, se utilizaron imágenes del sensor TM; para Landsat 7, del sensor ETM+; mientras que los datos de Landsat 8 y Landsat 9 provienen de los sensores OLI/TIRS. Todas las imágenes utilizadas tienen una resolución espacial de 30 metros.

3.1.4.2. Definición del periodo de imágenes

La serie de tiempo se normalizó a valores de reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) y filtrados con banda de evaluación de calidad, cuyo objetivo es eliminar los valores de píxeles contaminados por nubes y / o sombras de nubes (Roy et al., 2014).

Apuntando a un mayor número de observaciones disponible para este proceso, la ventana de tiempo elegida fue de 24 meses, para garantizar la prevalencia de observaciones de buena calidad para un año específico (por ejemplo, el espacio de características 2015 consideró imágenes del último semestre de 2014 y primer semestre de 2016).

3.1.5. Muestras de pastura/no pastura

Usando estos datos se generó una capa de polígonos envolventes alrededor de la nube de puntos como **Área de Interés - AOI** (figura 5, 6 y 7) para cada región, cabe señalar que se utilizó información de las otras clases como puntos de **No Interés**.

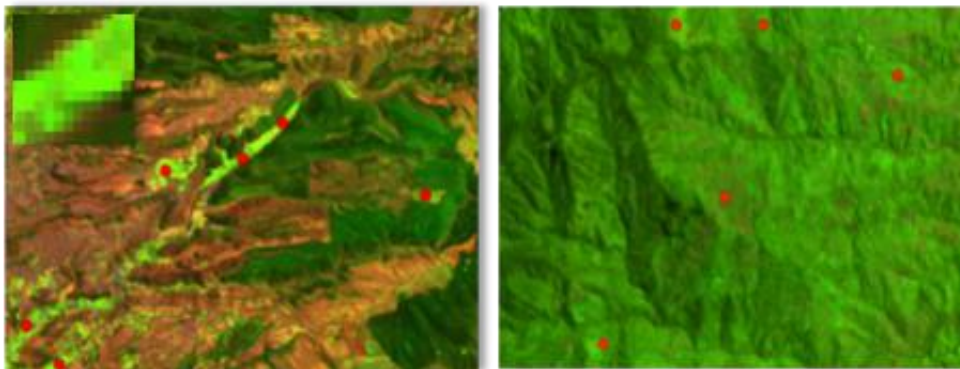


Figura 5. Áreas de entrenamiento asignadas para la inspección visual e identificar Pastura y no-Pastura

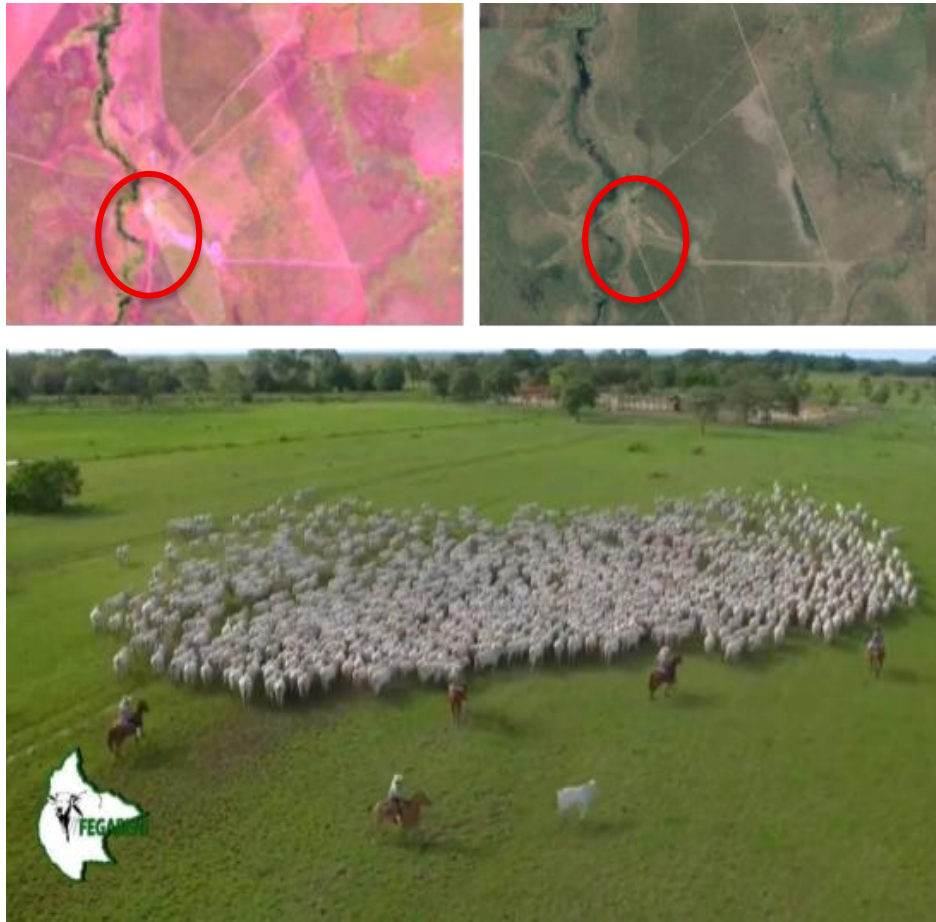


Figura 6. Áreas de entrenamiento con las clases consolidadas de Pastura y no-Pastura. En círculo las áreas detectadas como pastura



Figura 7. Actividad ganadera en Santiago de Moxos en la llanura de inundación - Bolivia

Un paso que apoyo en la clasificación fue, identificar la importancia relativa de variables, la cual presenta los predictores en el orden de su efecto en la mejora del modelo de clasificación para el transversal de pastura, si bien el método tiene la posibilidad de incluir un gran número de variables input este paso permite identificar la variable con la puntuación de mejora más alta e importante, y las otras variables siguen en orden de importancia.

Entonces, la importancia relativa se define como la mejora porcentual con respecto al predictor más importante, donde los valores de importancia relativa de variables oscilan entre 0 % y 100 %. (ver figura 8).

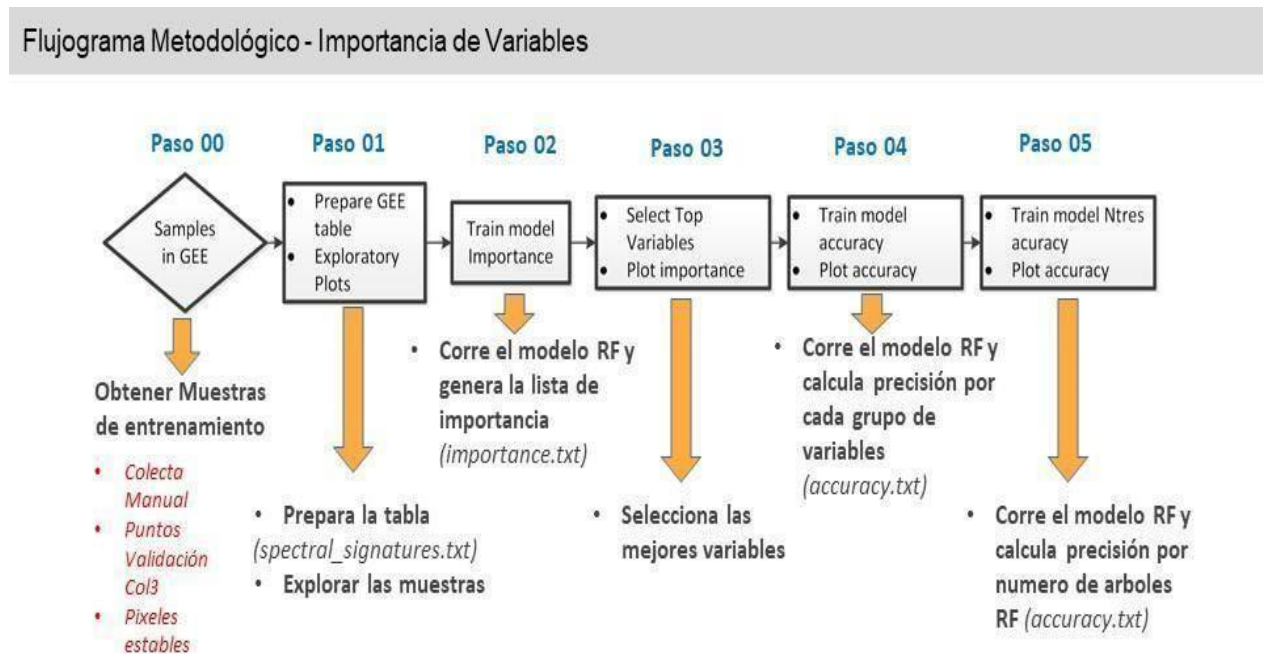


Figura 8. Importancia de variables - Clase Pastura (ID: 15)

3.1.6. Estrategias complementarias previas a la clasificación

La pastura forrajera perenne es una especie que requiere siembra y tiene una duración de 4, 5 o más años, manteniendo el suelo cubierto todo el año. No obstante, es necesario realizar cortes aproximadamente cada 60 días, dependiendo del tipo de pastura.

Debido a este comportamiento se logró una mejor precisión utilizando la transversal de agricultura en comparación a la transversal de pastura para algunas regiones donde la dinámica de estas clases era son similares (figura 9).



Figura 9. Resultado de la clasificación de clase Agricultura (ID 18 - color rosado) y Pastura (ID 15 - color naranja)

Los valores de la reflectancia y los índices de vegetación que presentan las pasturas son similares a la de algunos cultivos, como, por ejemplo, el del trigo en sus primeras fases de desarrollo. Por esta razón empleando la transversal de agricultura, el clasificador logró separar los píxeles de esta cobertura. Sin embargo, la detección no es de las más precisas, es por eso por lo que se deben realizar ajustes principalmente de temporalidad en los mosaicos y en el trabajo de campo para mejorar la detección de la clase pastura (ver figura 10).



Figura 10. Pasturas en San Javier (Santa Cruz - Bolivia), Landsat (swir,nir,red). Clasificación de pastura (ID 15) con transversal de agricultura

3.1.7. Resumen metodológico

En este documento, presentamos una descripción de la metodología aplicada para el mapeo de pasto, el proceso completo se dividió en 4 etapas. (ver figura 11).

Flujograma Metodológico-Clasificación

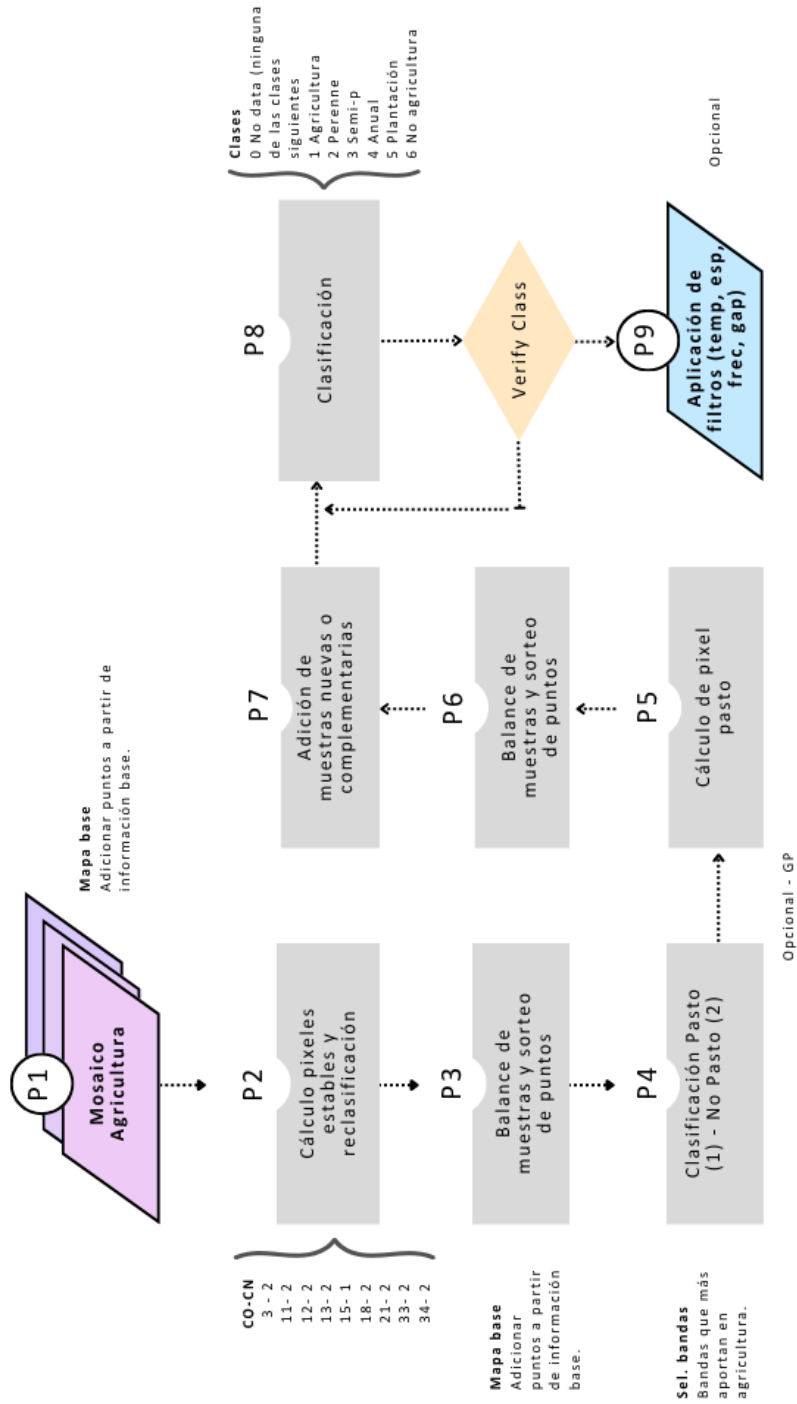


Figura 11. Pasos para la clasificación de Pastura

3.1.8. Clasificación

La clasificación automática de los mosaicos Landsat se realizó íntegramente en la plataforma Google Earth Engine, basada en el clasificador Random Forest (Breiman, 2001). El proceso de clasificación se realizó siempre considerando sólo dos clases posibles para cada píxel, Pastura (clase de interés) y la clase no-Pastura (todo lo diferente a la clase de interés).

Para la clasificación supervisada de los mosaicos Landsat, se utilizaron muestras de entrenamiento basadas en puntos de actividad pecuaria, apoyado de la herramienta de inspección visual temporal y los mosaicos de la Colección (ver figura 12), que permite la recuperación de Landsat imágenes, a través de Google Earth Engine (Nogueira et al., 2017), y la determinación, para todos los puntos, a lo largo de los 40 años considerados en este estudio, de la respectiva clase de cobertura / uso de la tierra y eventuales cambios.



Figura 12. *Imágenes Landsat vs área utilizada para Pastura*

Considerando que las áreas de pastos son muy susceptibles a variaciones climáticas interanuales (Ferreira et al., 2013) y presentan diferentes características biofísicas y de manejo (Aguiar et al., 2017; Ferreira et al., 2013b), se realizó ajuste a la metodología para que pueda ser empleada en el territorio de análisis, este enfoque permitió al modelo de clasificación una mejor identificación.

La heterogeneidad del territorio, y el hecho de que esta actividad se encuentra realizada muchas veces en comunión con la agricultura se vio la necesidad de mapear ambas clases en la Transversal Agricultura, donde se obtuvieron resultados que fueron evaluados y posteriormente comparados con los resultados de Transversal Pastos, si bien para algunas regiones los resultados obtenidos reflejaron el desarrollo de esta actividad, en algunas zonas se evidencio confusión entre ambas clases.

3.1.8.1. Variables de clasificación

En los valores de píxeles resultantes, se aplicaron cinco operaciones (media, desviación estándar, mínimo, máximo y amplitud) en seis bandas espectrales (verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta 1 e infrarrojo de onda corta 2) y tres índices espectrales: NDVI (Normalizado Índice de Vegetación de Diferencia, Huete et al., 1997), NDWI (Normalizado Diferencia del Índice de Agua, Gao, 1996) y CAI (Absorción de celulosa Index, Nagler et al., 2003). Ver las siguientes tablas:

Tabla 1. Cinco operaciones utilizadas: media, desviación estándar, mínimo, máximo y amplitud

Índice	Wet min	Wet max	Wet median	Wet amp	Wet stdDev
green	x	x	x	x	x
red	x	x	x	x	x
nir	x	x	x	x	x
swir1	x	x	x	x	x
swir2	x	x	x	x	x
NDVI	x	x	x	x	x
NDWI	x	x	x	x	x
CAI	x	x	x	x	x

Se aplicó análisis de percentiles en seis bandas espectrales (verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta 1 e infrarrojo de onda corta 2) y tres índices espectrales: NDVI (Normalizado Índice de Vegetación de Diferencia).

Tabla 2. Análisis de percentiles en seis bandas y tres índices espectrales

Índice	Wet p10	Wet p25	Wet p75	Wet p90
green	x	x	x	x
red	x	x	x	x
nir	x	x	x	x
swir1	x	x	x	x
swir2	x	x	x	x
NDVI	x	x	x	x
NDWI	x	x	x	x
CAI	x	x	x	x

Tabla 3. Índices de apoyo

Índice	dato
Elevación	x
Pendiente	x
Longitud	x
Latitud	x

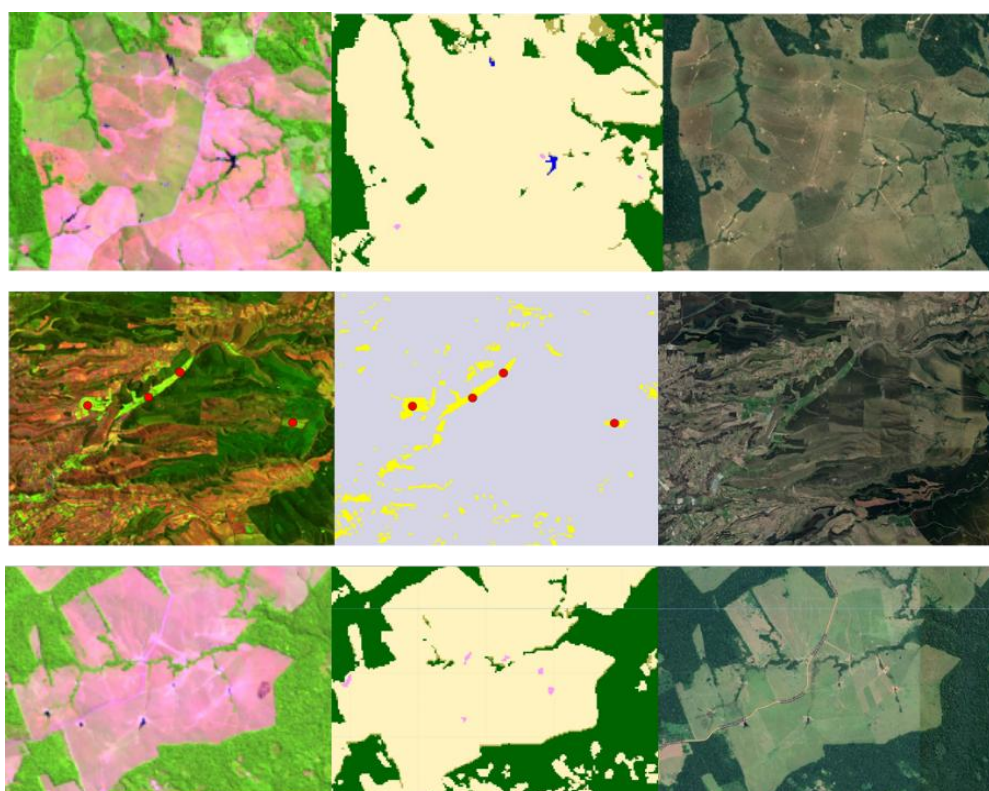


Figura 13. Clase Pasto identificado en las imágenes satelitales y su clasificación

3.2. Clase Agricultura (ID 18)

En la metodología del transversal "Agricultura" se comenzó a trabajar para obtener una versión mejorada para luego, en lo posible proceder a la separación de clases, sin embargo, no se logró este objetivo en su totalidad, quedando como "Mosaico de uso" las regiones que causaron confusión en su clasificación. Es también menester señalar que para la colección 3, se ha llegado a discriminar el cultivo de "Soya" (en su versión beta) de "Otros cultivos", en las superficies cultivadas.

3.2.1. Definición de la clase

Esta clase está definida como áreas donde la cobertura original fue modificada o reemplazada por la actividad agrícola. Dependiendo el bioma se observan diferentes tipos de

cultivos y de acuerdo con la complejidad del terreno (terrenos: en serranías, con ondulaciones, en planicie y otros), también se observa diferentes tipos de mecanización que se utiliza en la preparación, siembra, labores culturales y cosecha del suelo, así como los sistemas de riego empleado.

Clase:

Agricultura

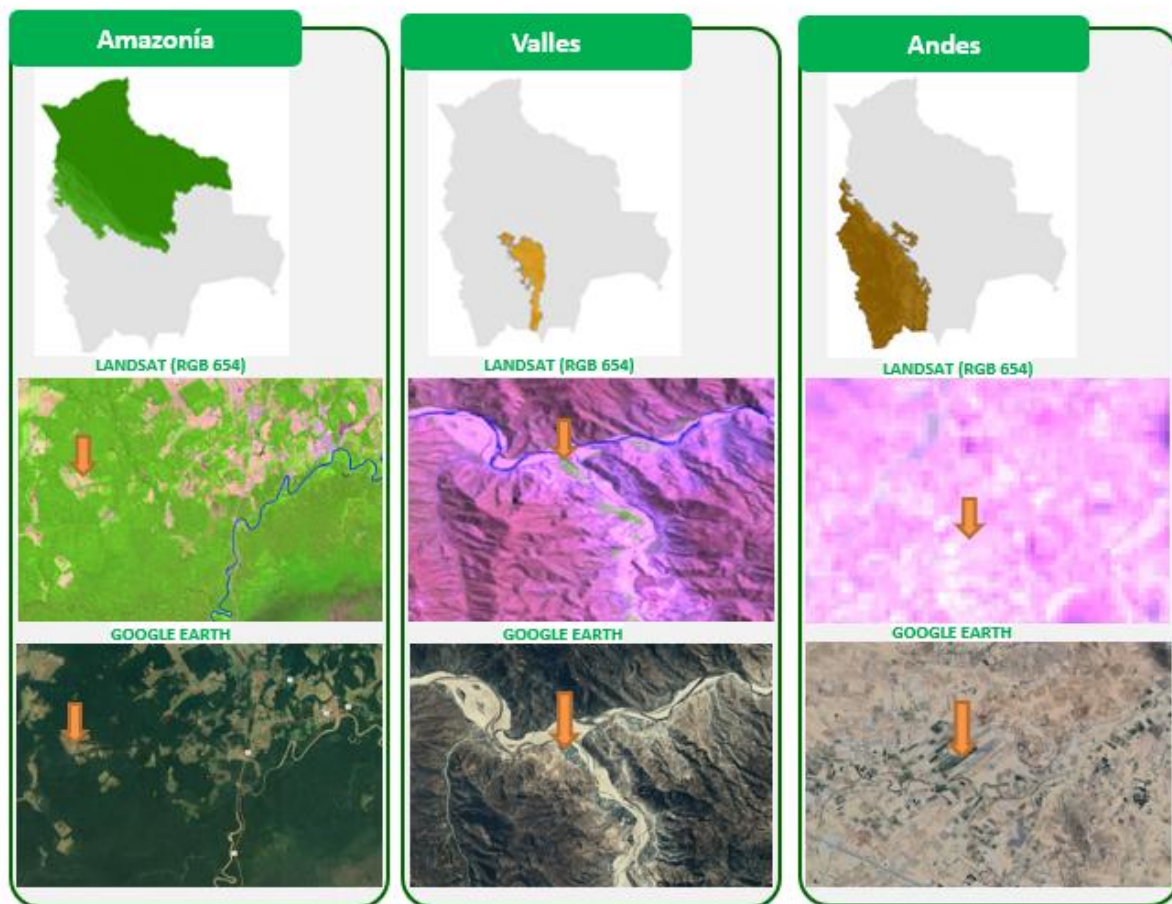


Figura 14. Identificación de la clase “Agricultura” en algunos Biomas

3.2.2. Mapeo y clasificación

Dentro la metodología se adaptaron procesos particulares que permitieron llegar a una mejora, como por ejemplo tomar muestras estables por año, definiendo poligonales de áreas productivas y/o utilizando mapas base del área de interés. Cabe resaltar que se trabajó en los biomas de: Amazonía, Andes, Chaco, Chiquitano, Tucumano Boliviano y Valles; considerando en cada una de ellas sus diferentes particularidades.

Dentro de esta clase de mapeo de **Nivel 2 “Agricultura”** para la Colección 3, se llegó a clasificar un cultivo específico correspondiendo a la Clase “**Soya**” que correspondiendo a un nivel 3 de clasificación y será explicada más adelante.

3.2.3. Búsqueda y Preparación de datos

En esta etapa se realizó una búsqueda de datos (mapas, reportes, informes), de acuerdo con cada bioma y las limitaciones de los cultivos que se producen de acuerdo con las características altitudinales de los biomas.

Con la base de datos recopilados, se procedió a añadir el dato en el tiempo, basado en la fecha que se tenía de cada muestra y así obtener el inicio de esta actividad en el territorio, tomando como base los mosaicos Landsat, y así adquirir en lo posible la temporalidad, necesario para clasificar año a año, generando una capa de puntos de observado y no observado. Posteriormente se analiza con el apoyo de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica).

El mapa de puntos generado se importó a Google Earth Engine, para su visualización. El mapa de puntos ingresa como input de datos de la presencia y no presencia (mapa de fondo), también se utilizaron las imágenes de alta resolución espacial para generar el mapa de la transversal correspondiente y posteriormente esta incorporarla a la colección 3.



Figura 15. Puntos de colecta de clase Agrícola (ID 18)

3.2.4. Mosaicos de imágenes

Para la clasificación del tema transversal Agricultura, se utilizaron las bandas base (bandas de reflectancia) de las imágenes Landsat generadas para el mapa general de la Colección 3 y se utilizaron índices particulares a partir de imágenes Landsat con un periodo temporal y estacional específico para este transversal.

3.2.4.1. Preprocesamiento de imágenes

Los conjuntos de datos Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9 se obtuvieron a partir de imágenes de reflectancia de superficie corregidas atmosféricamente. En el caso de Landsat 5, se utilizaron imágenes del sensor TM; para Landsat 7, del sensor ETM+; mientras que los datos de Landsat 8 y Landsat 9 provienen de los sensores OLI/TIRS. Todas las imágenes utilizadas tienen una resolución espacial de 30 metros.

3.2.4.2. Definición del periodo de imágenes

La serie de tiempo se normalizó a valores de reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) y filtrados con banda de evaluación de calidad, cuyo objetivo es eliminar los valores de píxeles contaminados por nubes y / o sombras de nubes (Roy et al., 2014).

Apuntando a un mayor número de observaciones disponible para este proceso, la ventana de tiempo elegida fue de 24 meses, para garantizar la prevalencia de observaciones de buena calidad para un año específico (por ejemplo, el espacio de características 2015 consideró imágenes del último semestre de 2014 y primer semestre de 2016). En la tabla, se resumen las métricas más sobresalientes:

Tabla 4. Parámetros de selección de imágenes para las bandas base

País	Periodo de imágenes seleccionadas	Cobertura máxima de nubes (%)	Total, de imágenes excluidas
Bolivia	Enero - diciembre 82%	0 - 30 (91%) / 31 - 100 (9%)	2.868

En la columna, "Periodo de imágenes seleccionadas", se detalla simplemente el periodo con mayor configuración de rango temporal de cada mosaico. Para la columna cobertura máxima de nubes, simplemente separamos en 2 rangos o categorías, la primera categoría que contempla un rango máximo de nubes de 0 a 30 %, y la segunda categoría contempla un rango de 31 a 100 % de cobertura de nubes que puede llegar a estar presente en cada imagen Landsat utilizada para generar mosaicos. Finalmente, la columna "Total de imágenes excluidas", contempla la cantidad total de imágenes que se excluyeron para conformar los mosaicos. Sin embargo, los índices particulares de estas transversal se generan de acuerdo con un único rango temporal que incluyen todas las imágenes de enero a diciembre para cada año, con un porcentaje de nubosidad máxima del 30 %, para separar en dos periodos estacionales que denominamos época seca (dry) y época húmeda (wet), dando lugar a utilizar reductores particulares en estas dos épocas para cada índice.

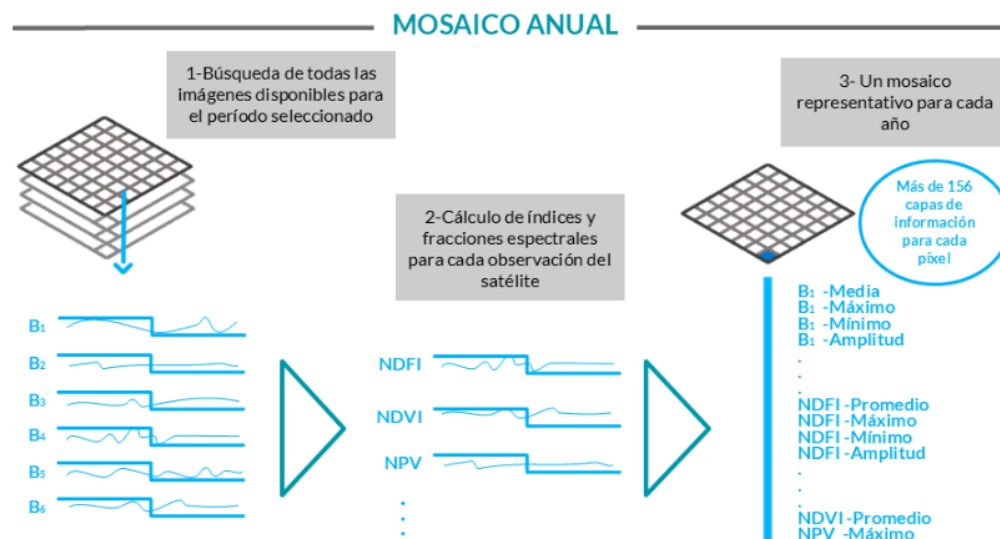


Figura 16. Proceso de generación de mosaicos anuales de imágenes Landsat

Usando estos datos se generó una capa de polígonos envolventes alrededor de la nube de puntos como **Área de Interés - AOI** para cada región, cabe señalar que se utilizó información de las otras clases, como puntos de **No Interés**.

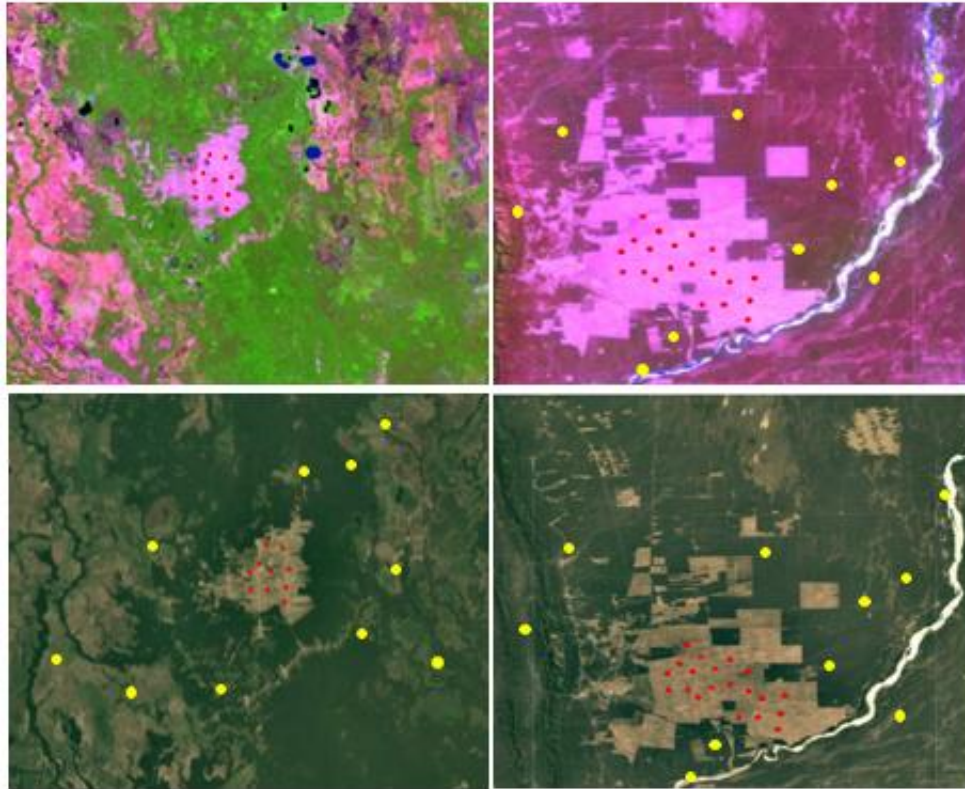


Figura 17. *Puntos de muestras de Agricultura y no-Agricultura*

3.2.5. Clasificación

La clasificación automática de los mosaicos Landsat se realizó íntegramente en la plataforma Google Earth Engine, basada en el clasificador Random Forest (Breiman, 2001) con dos etapas bien marcadas y con diferente abordaje.

La primera etapa se realizó utilizando como base la Colección 2 para estimar las clases que mantienen una estabilidad a lo largo de los años analizados, sin embargo, la clasificación de esta colección se reduce a solamente tres clases posibles para cada píxel, la clase de interés, la clase de No interés y la clase no data (píxeles con vacíos de información).

Flujograma Metodológico-Clasificación

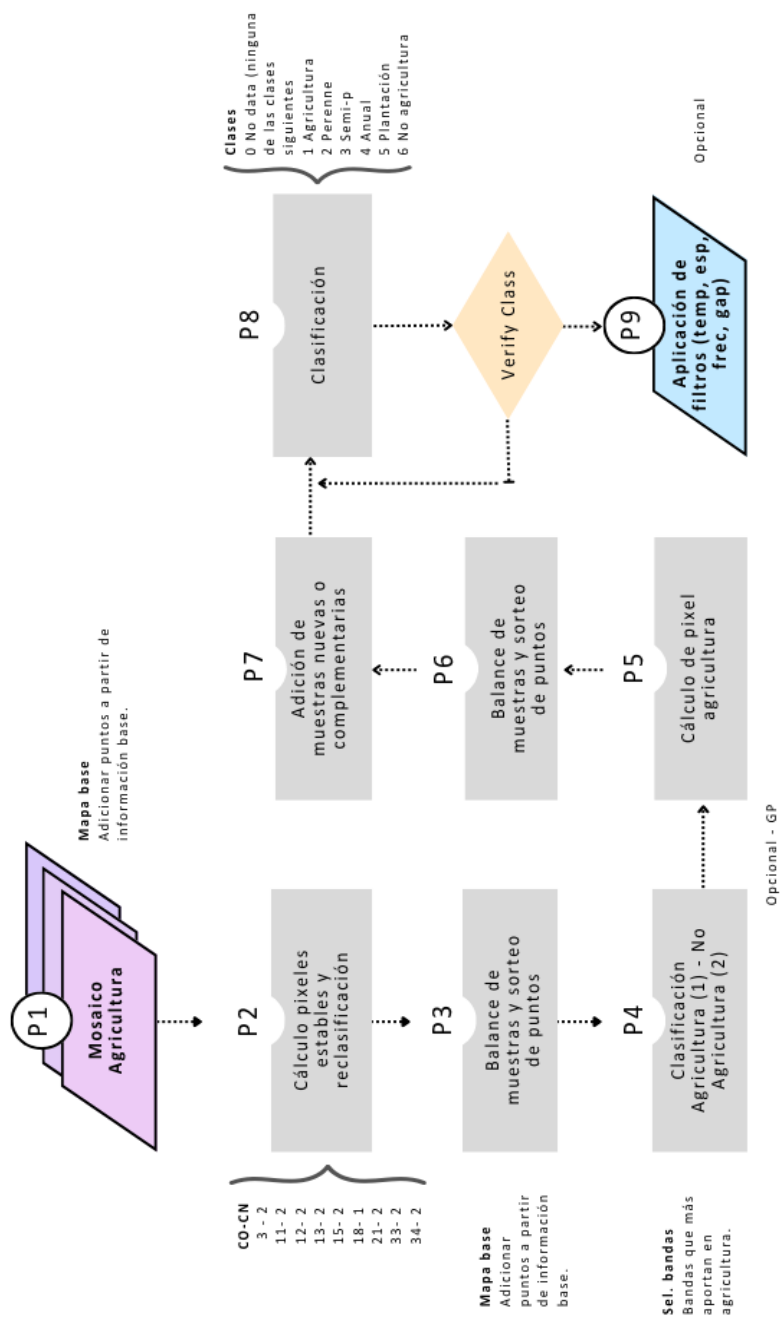


Figura 18. Diagrama de flujo metodológico para la obtención de mapas de mosaico de agricultura.

La segunda parte o ciclo, para la clasificación supervisada de los mosaicos Landsat, se utilizaron muestras de entrenamiento basados en los resultados de la etapa anterior, además de complementarlos con muestras de entrenamiento generados sobre mapas de referencia. Los detalles de los parámetros, los mapas de referencia utilizados para la clase de interés y el conjunto de variables producido para cada clasificación se presentan en las secciones siguientes.

Con la tarea de mejorar los resultados de clasificación, en la segunda etapa se desarrollaron o aplicaron funciones complementarias como la colecta de puntos de muestras a partir de geometrías dibujadas manualmente, además de permitir la personalización de un rango temporal para las muestras (Paso 4).

The screenshot shows a software interface for sample collection. It includes a 'Name' field with the text 'Muestras_adicionales_02', an 'Import as' dropdown menu set to 'FeatureCollection', and a 'Properties' section. The 'Properties' section contains a table with two columns: 'Property' and 'Value'. The table has three rows: 'reference' with value '1', 'Plni' with value '2015', and 'PFin' with value '2020'.

Figura 19. Colocación de muestras por rango temporal.

Finalmente, dicha metodología permitió separar la clase Agrícola, del resto de conjunto de clases que se tiene en esta colección.

3.2.6. Variables de Clasificación

En los valores de píxeles resultantes, se aplicaron cinco operaciones (media, desviación estándar, mínimo, máximo y amplitud) en seis bandas espectrales (verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta 1 e infrarrojo de onda corta 2) y tres índices espectrales: NDVI (Normalizado Índice de Vegetación de Diferencia, Huete et al., 1997), NDWI (Normalizado Diferencia del Índice de Agua, Gao, 1996) y CAI (Absorción de celulosa Index, Nagler et al., 2003). Ver las siguientes tablas:

Tabla 5. Variables empleadas para este transversal y sus reductores

Bandas	min	median	max	qmo
green_dry		x		x
red_dry	x	x	x	x
nir_dry		x		x
swir1_dry		x	x	x
swir2_dry	x	x		x
green_wet	x	x		x
red_wet			x	
nir_wet		x		x
swir1_wet	x	x	x	x

Bandas	min	median	max	qmo
swir2_wet		x	x	x
NDWI_wet	x	x	x	x
CEI_wet	x			
NDWI_dry	x			

Adicionalmente se utilizaron las variables estáticas o topográficas.

Tabla 6. Variables estáticas

Variables	Uso
Altitude (altitud)	x
Slope (pendiente)	x
Latitude (latitud)	x
Longitude (longitud)	x

3.2.7. Muestras de Entrenamiento

Las muestras de entrenamiento utilizadas para la clasificación fueron obtenidas a partir de las muestras que mantienen una estabilidad y no cambian, a lo largo del periodo analizado, tomando como apoyo la Colección 2 (periodo 1985 - 2023).

El script utilizado para la clasificación, dependiendo de la fase o pasos en los que se encuentran, tiene la posibilidad de incluir muestras adicionales, a partir de coberturas base o ingresando manualmente geometrías que se necesitan, utilizando un algoritmo de identificación y no identificación; por ejemplo, clase agricultura (1) y el resto de las clases que no es agricultura (2).

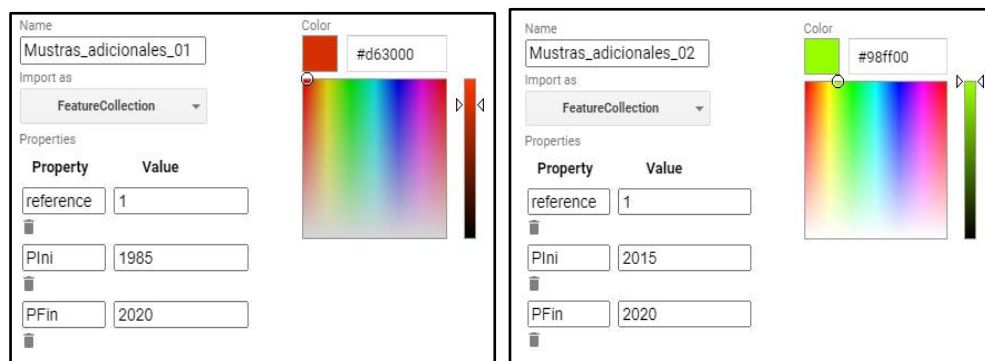


Figura 20. Ejemplo de muestras complementarias por rango de años

3.2.8. Clase Soya (ID 39) – Versión beta

3.2.8.1. Definición de la clase

El cultivo de soya en Bolivia se desarrolla en distintas regiones, incluyendo zonas de transición entre las tierras bajas y las del sur, abarcando los biomas de: Amazonía, Chaco, Chiquitano y Tucumano-Boliviano (en los departamentos de: Beni, Chuquisaca, Santa Cruz y Tarija), mostrando un crecimiento sostenido. El cultivo se desarrolla en tierras de pendientes moderadas, suelos frágiles y de alta diversidad ecológica, lluvias irregulares, altas temperaturas, riesgo de erosión y otros que tradicionalmente fueran destinadas a la producción agrícola. El cultivo de soya introducida en sistemas de rotación con caña de azúcar, maíz o sorgo, utilizando producción mecanizada y semillas adaptadas al estrés hídrico.

3.2.8.2. Mapeo y clasificación

Para la clasificación de soya se tomó en cuenta el comportamiento del cultivo de acuerdo con el Bioma, este cultivo tiene diferente comportamiento. Es así como en regiones de Amazonía y chiquitano puede ser producida hasta dos veces al año, campaña de verano, desde el mes de noviembre hasta el mes de abril y en la campaña de invierno de mayo a septiembre (no necesariamente de forma consecutivas), mientras que, en la región del chaco, solo se observa una campaña que comienza en el mes de enero y se cosecha para el mes de mayo.

Clase:

Soya

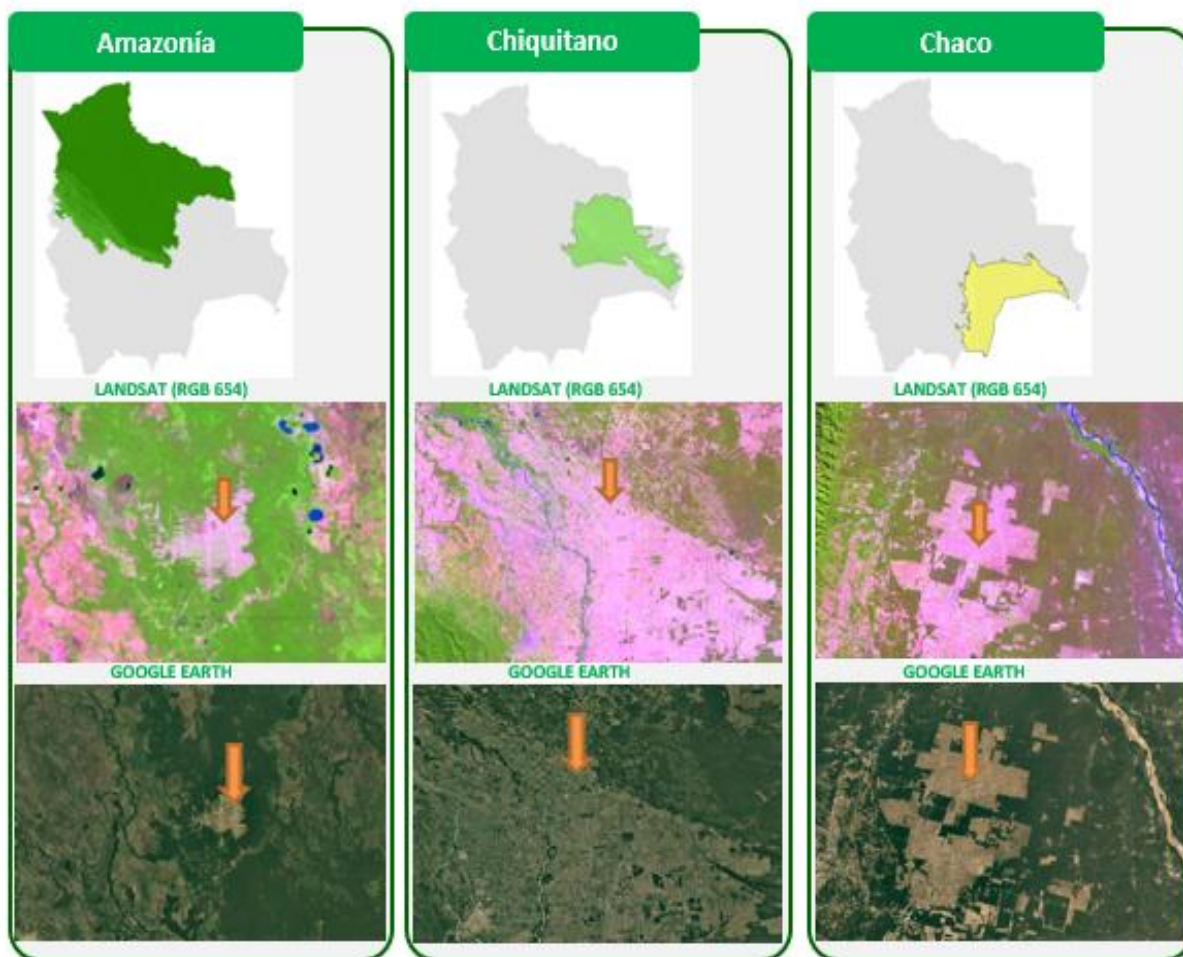


Figura 21. Identificación de la clase “Soya” en algunos Biomas

3.2.8.3. Variables de Clasificación

Para la clasificación de la clase soya (ID 39), versión beta, se adicionaron otros índices que ayudaron a mejorar la clasificación, los cuales fueron calculados en mínima, media, máxima, desviación estándar y se aplicó análisis de percentiles al 80 %. A continuación, se enumeran los índices y sus características:

Tabla 7. Variables complementarias para la identificación del cultivo de soya

Índices	min	median	max	stdDev
EVI	x	x	x	x
EVI2	x	x	x	x
NDVI	x	x	x	x
NDWI	x	x	x	x
MNDWI	x	x	x	x
CAI	x	x	x	x
LAI	x	x	x	x
AWEI_NSH	x	x	x	x
AWEI_SH	x	x	x	x
MSAVI2	x	x	x	x
BSI	x	x	x	x
CEI	x	x	x	x
GNDVI	x	x	x	x
MVI	x	x	x	x
SR	x	x	x	x
CMRI	x	x	x	x
MMRI	x	x	x	x
SAVI	x	x	x	x
GCVI	x	x	x	x
HALLCOVER	x	x	x	x
PRI	x	x	x	x
GRVI	x	x	x	x
RDVI	x	x	x	x

3.2.8.4. Muestras de Entrenamiento

El script utilizado y para la clasificación, tiene la posibilidad de incluir muestras adicionales, a partir de coberturas base o ingresando manualmente geometrías que se necesitan, utilizando un algoritmo de **identificación y no identificación**; por ejemplo, clase Soya (1) y el resto de las clases que no Soya (2).

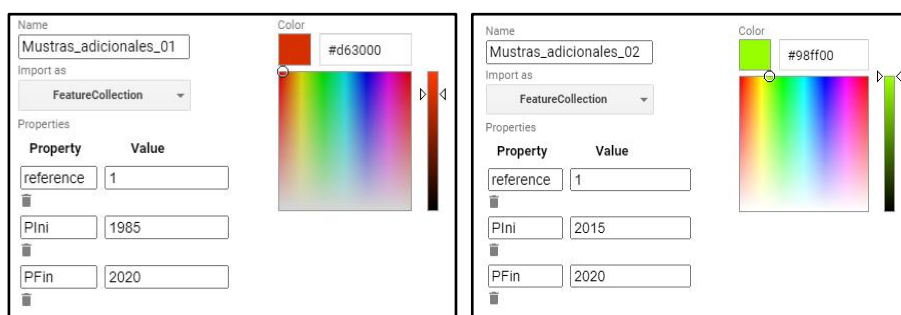


Figura 22. Ejemplo de muestras complementarias por rango de años

3.3. Clase Mosaico de Uso (ID 21)

Para la clase de “Mosaico de Uso” se consideran terrenos empleados a la agropecuaria y por su dinámica de uso, es que reciben esta distinción, por ejemplo, pueden ser pastos naturales de pastoreo, especialmente en superficies donde se observa ramoneo, presencia de estercoleros, atajados, rutas para el ganado e infraestructura ganadera. Por otra parte, esta clasificación también incluye terrenos que no son sembrados frecuentemente, como aquellos dejados en descanso (Andes), o parcelas que no fueron cultivadas y permanecen en barbecho por una campaña (por fenómenos climáticos), como ocurre en los biomas Amazónico y Chiquitano o simplemente se quedan en preparación del terreno para futuras campañas.

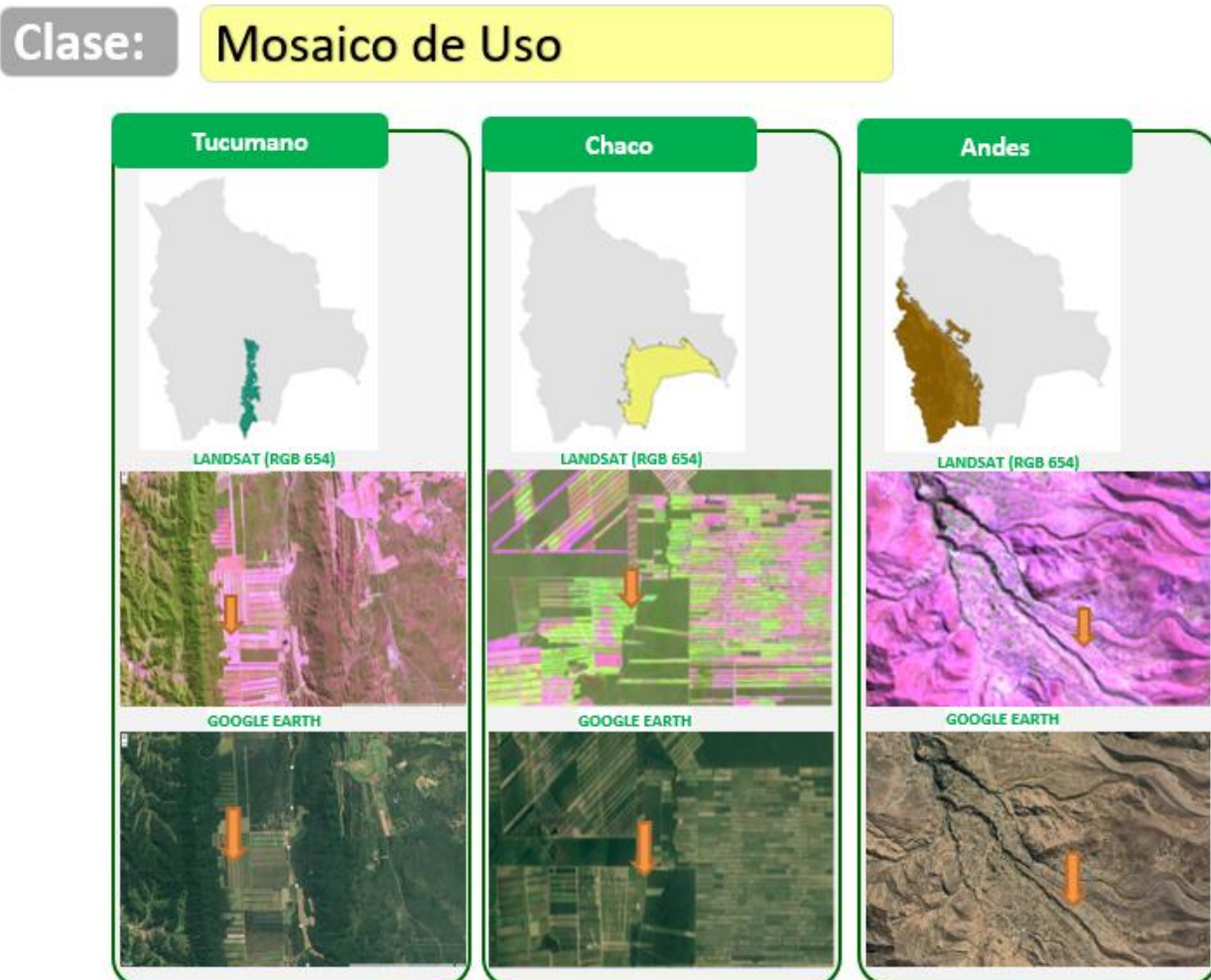


Figura 23. Identificación de la clase “Mosaico de Uso” en algunos Biomas

4. POST - CLASIFICACIÓN

Para homogeneizar mejor los resultados, se aplicó los filtros: espacial, temporal y frecuencia, capaz de minimizar abruptos y a veces variaciones irreales, considerando simultáneamente estas las dimensiones espacio y tiempo.

4.1. Filtro temporal

El filtro temporal utiliza clasificaciones secuenciales en una ventana móvil unidireccional de 3, 4 o 5 años para identificar transiciones temporalmente incoherentes. Basado en una sola regla genérica (RG), el filtro temporal inspecciona la posición central de los años consecutivos, y si los extremos del análisis son idénticos pero la posición central no lo es, entonces el píxel central se reclasifica hacia la clase del vecino temporal. (ver figura 24)

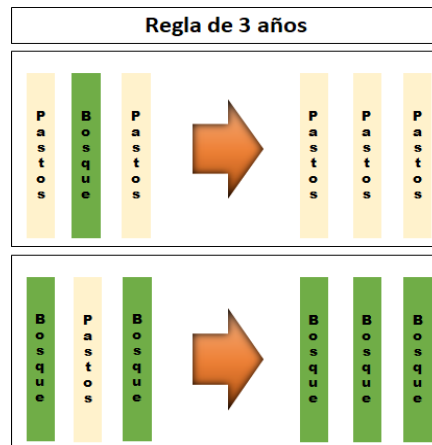


Figura 24. Efecto de la aplicación del filtro temporal

4.2. Filtro espacial

A continuación, se aplica un filtro espacial basado en la función "connectedPixelCount", que identifica al conjunto de píxeles (vecindario) que comparten un mismo valor de píxel. En consecuencia, sólo los píxeles que no presentan conexión considerando una cantidad mínima predefinida de píxeles idénticos son definidos como píxeles aislados y reclasificados. (ver figura 25).



Figura 25. Efecto de la aplicación del filtro espacial

4.3. Filtro de frecuencia

El último filtro, frecuencia, considera la ocurrencia de la clase a lo largo de la serie temporal para limpiar el resultado de la clasificación. (ver figura 26)

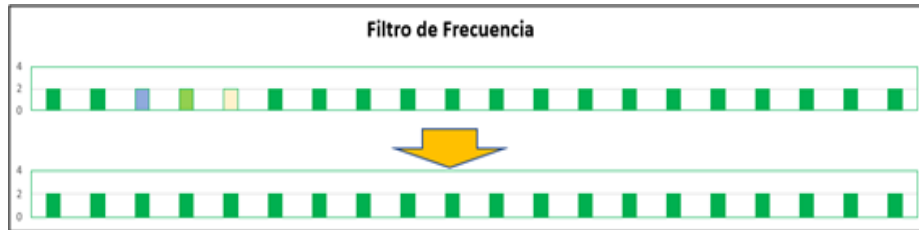


Figura 26. Efecto de la aplicación del filtro frecuencia

5. INTEGRACIÓN

Luego de la aplicación de la secuencia de filtros en la etapa de post clasificación, los temas transversales y los mapas generales de cada bioma son integrados. Esta integración depende de una serie de reglas jerárquicas específicas que asignan un orden de prevalencia a cada clase. Como resultado de esta etapa se obtienen los mapas anuales de cobertura y uso de la tierra. (ver figura 27 y 28)

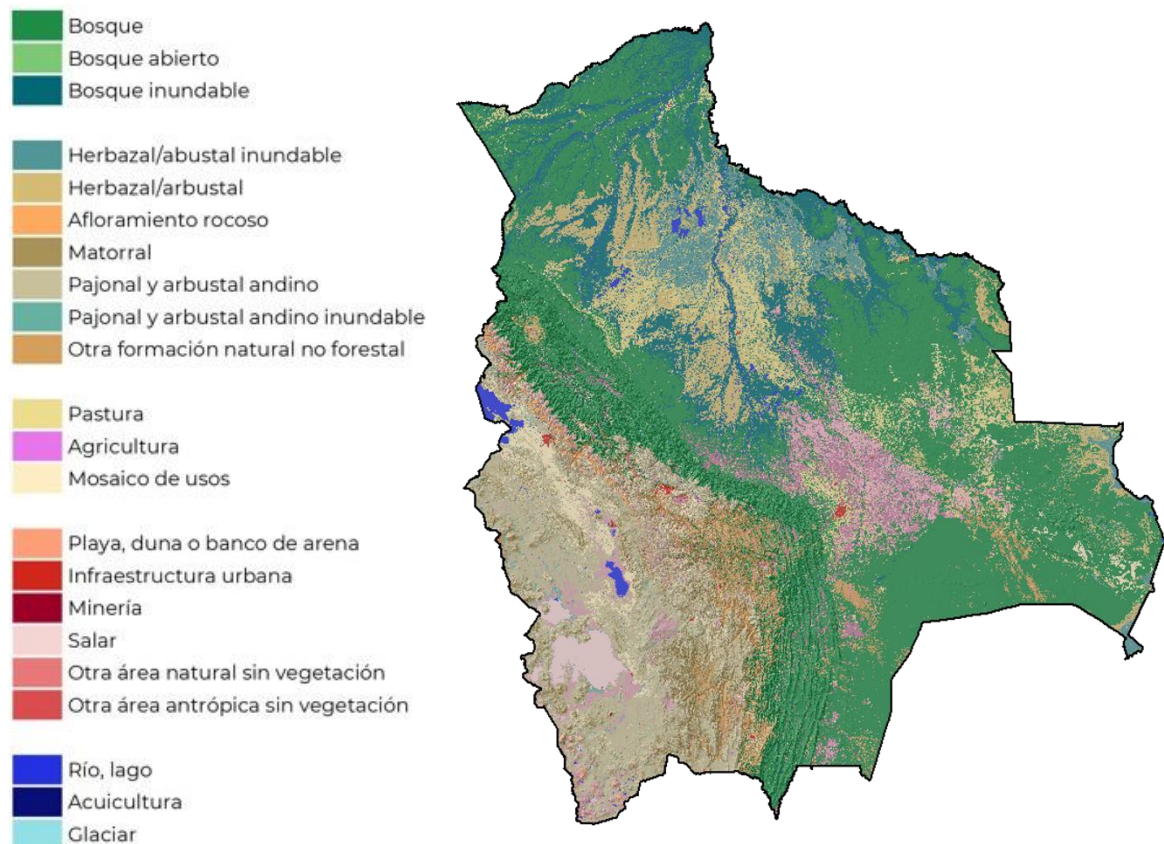


Figura 27. Resultado de la integración - Colección 3, año 2024

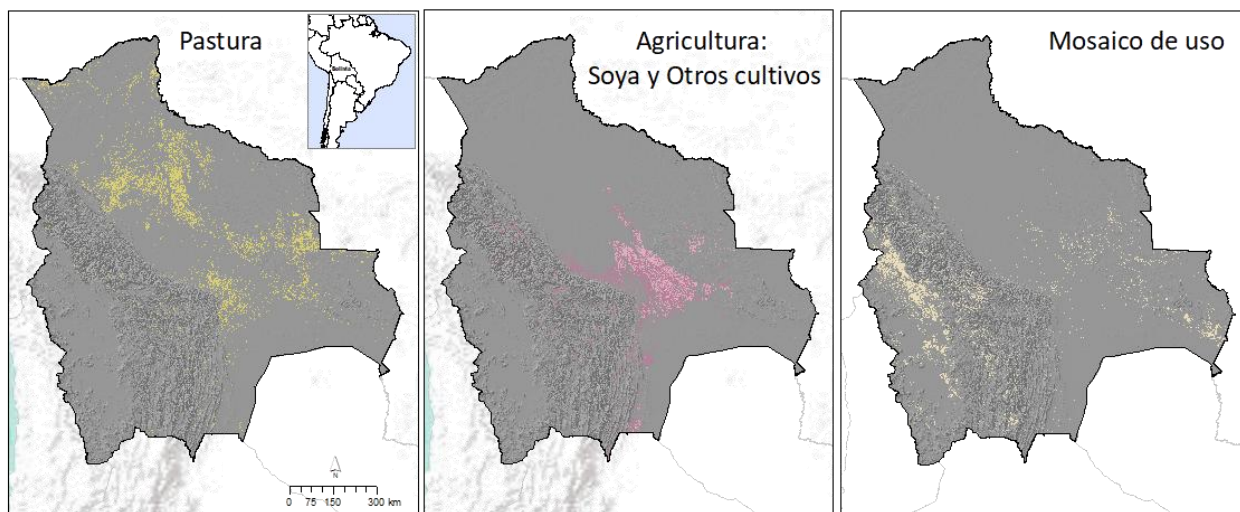


Figura 28. Resultado de la integración - Colección 3, Clase Agropecuario Nivel 2

Tabla 8. Leyenda para la Colección 3 de MapBiomias Bolivia

Clase	ID	Hexadecimal code	Nuevo color
1. Formación boscosa	1	#1f8d49	
1.1. Bosque	3	#1f8d49	
1.2. Bosque abierto	4	#7dc975	
1.3. Bosque inundable	6	#026975	
2. Herbazal y arbustal	10	#d6bc74	
2.1. Herbazal/abustal inundable	11	#519799	
2.2. Herbazal/arbustal	12	#d6bc74	
2.3. Afloramiento rocoso	29	#ffaa5f	
2.4. Matorral	66	#a89358	
2.5. Pajonal y arbustal andino	81	#c8c099	
2.6. Pajonal y arbustal andino inundable	82	#66b2a3	
2.7. Otra formación natural no forestal	13	#d89f5c	
3. Agropecuario	14	#ffefc3	
3.1. Pastura	15	#edde8e	
3.2. Agricultura	18	#e974ed	
3.2.1. Soya (<i>Beta</i>)	39	#f5b3c8	
3.2.2. Otros cultivos	72	#c1799c	
3.3. Mosaico de usos	21	#ffefc3	
4. Área sin vegetación	22	#d4271e	
4.1. Playa, duna o banco de arena	23	#ffa07a	
4.2. Infraestructura urbana	24	#d4271e	
4.3. Minería	30	#9c0027	
4.4. Salar	61	#f5d5d5	
4.5. Otra área natural sin vegetación	68	#e97a7a	
4.6. Otra área antrópica sin vegetación	25	#db4d4f	

Clase	ID	Hexadecimal code	Nuevo color
5. Cuerpo de agua	26	#2532e4	
5.1. Río, lago	33	#2532e4	
5.2. Acuicultura	31	#091077	
5.3. Glaciar	34	#93dfe6	
6. No observado	27	#ffffff	

6. REFERENCIAS

- FAO. (1978). Mapa de cobertura y uso de la tierra,1978. Geobolivia. Recuperado de: <https://geo.gob.bo>
- Lane, A. (12 de 11 de 2024). Acerca de Chinese demand for Bolivian livestock drives deforestation. Obtenido de Environment: https://entornodiario.com/en_GB/articles/gc4/features/2024/11/12/feature-01?utm_source=chatgpt.com
- Nagler, P., Inoue, Y., Glenn, E., Russ, A., & Daughtlry, C. (15 de 09 de 2003). Remote Sensing of Environment. Obtenido de ELSEVIER: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425703001883?utm_source=chatgpt.com
- Opio, C. y Sangoluisa Rodriguez, P. 2022. Innovaciones en el sector ganadero - Compendio de experiencias en América Latina y el Caribe 2021. Panamá, FAO e IICA.
- Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022 / CEPAL, FAO e IICA. – San José, C.R.: IICA, 2021
- Producción Sustentable. (20 de 09 de 2023). Producción Sustentable. Obtenido de Producción Sustentable: https://www.produccionsustentable.com/index.php/2023/09/20/la-produccion-mundial-de-alimentos-debera-aumentar-un-60-hacia-el-ano-2050-y-la-tecnologia-es-la-clave-para-una-ganaderia-sustentable/?utm_source=chatgpt.com
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote Sensing of Environment, 145, 154–172. doi:10.1016/j.rse.2014.02.001.
- Superintendencia Agraria (2001). Mapa de cobertura y uso actual de la tierra Bolivia, 2001. Recuperado de: <https://geo.gob.bo>
- Trading Economics. (12 de 05 de 2025). Bolivia - Agricultural Land. Obtenido de Trading Economics : <https://tradingeconomics.com/bolivia/agricultural-land-percent-of-land-area-wb-data.html>
- Tridge summary. (27 de 05 de 2024). Acerca de Bolivia: Santa Cruz exceeds 3 million registrered cattle. Obtenido de Bolivia: Santa Cruz exceeds 3 million registrered cattle: https://www.tridge.com/news/santa-cruz-exceeds-3-million-registered-catt-gjqhdq?utm_source=chatgpt.com