



MAPBIOMAS

PERÚ

Cobertura y uso del suelo

Manual general

Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Colección 2.0

Diciembre 2023

Equipo de Especialistas

Andrea Bravo

Nicole Moreno

Zuley Cáceres

Kathrin Hopfgartner

Especialista en programación para Teledetección

Efraín Turpo

Equipo de Asistentes de interpretación

Valeria Llactayo

Joaquín Romualdo

Coordinadora del proyecto MapBiomás Perú

Sandra Ríos

Institución

Instituto del Bien Común



Jr. Mayta Cápac 1329

Jesús María, Lima II. Perú

Teléfonos: (51-1) 3732268 - (51-1) 3732296 - (51-1) 373-2284

www.ibcperu.org

Resumen Ejecutivo

El Instituto del Bien Común (IBC) es una asociación civil peruana sin fines de lucro fundada en 1998 que trabaja para lograr el cuidado de los bienes comunes. Por bienes comunes entendemos los recursos y espacios de propiedad o uso compartido, tales como ríos, lagos, bosques, recursos pesqueros, áreas naturales protegidas y territorios de las comunidades. Como estos recursos y espacios son cruciales para el bienestar de los pueblos amazónicos, particularmente en la actual era de cambio climático, nuestro trabajo en pro de la conservación y el uso sostenible contribuye al bienestar de estas comunidades y de todos los peruanos.

El IBC, es el miembro peruano de la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), donde se genera este tipo de información de manera coordinada con los demás países de la cuenca, para alcanzar los mismos objetivos. Desde el 2009, en el marco del trabajo con la RAISG, se inició la construcción de mapas de deforestación de la Amazonía peruana aplicando herramientas de procesamiento de datos satelitales cada vez más avanzadas. En búsqueda de nuevas alternativas para la automatización de los procesos y la generación de información temporalmente oportuna, en marzo del 2017, la RAISG en acuerdo con la Coordinación General de MapBiomass Network, crean la iniciativa MapBiomass Amazonía, de la que IBC es miembro.

MapBiomass es la iniciativa de una red de colaboración conformada por organismos no gubernamentales, universidades y empresas de Brasil, organizadas con el objetivo de utilizar una tecnología de calidad y de menor costo para producir series anuales de mapas de cobertura y uso del suelo (de 1985 en adelante).

Como parte del trabajo con la RAISG y MapBiomass, el IBC presenta su *Colección 2.0 de Mapas Anuales de Cobertura y Uso del Suelo* de todo el territorio peruano. Gracias a este esfuerzo colaborativo será posible contar con estos mapas en una plataforma interactiva para el país de la iniciativa MapBiomass Perú.

El objetivo de este Documento Base Teórico de Algoritmos (ATBD, por sus siglas en inglés) es proporcionar a los usuarios la comprensión de los pasos metodológicos y algoritmos computacionales para producir la *Colección 2.0 de Cobertura y Uso*, que contempla el mapeo anual de la cobertura y uso del suelo entre los años 1985 y 2022.

Índice

Lista de Tablas	4
Lista de Figuras	4
1. Introducción	5
1.1. Alcance y contenido del documento	5
1.2. Visión general	5
1.3. Área de estudio	6
1.4. Aplicaciones	9
2. Información básica y antecedentes	10
2.1 Contexto institucional	10
2.1.1. Instituto del Bien Común - IBC	10
2.1.2 MapBiomias	11
2.2 Datos de Percepción Remota	11
2.3. Google Earth Engine y MapBiomias Amazonía	12
2.4. Otras iniciativas de mapeo	12
2.4.1. Fuentes mundiales	12
2.4.2. Fuentes para la región Amazónica	14
2.4.3. Fuentes para el territorio nacional	15
3. Metodología	16
3.1 Generación de mosaicos anuales	17
3.1.1. División del espacio de análisis en cartas	17
3.1.2. Parametrización de mosaicos anuales	20
3.2. Variables de clasificación o feature space	22
3.3 Clasificación	26
3.3.1. Leyenda	26
3.3.2. Regiones de clasificación	32
3.3.3. Random Forest	35
3.3.4. Colecta de muestras	35
3.3.5. Temas transversales	36
3.4. Post clasificación	36
3.4.1 Llenado de vacíos de información (Gap Fill)	37
3.4.2 Filtro Temporal	37
3.4.3 Filtro Espacial	39
3.4.4 Filtro de frecuencia	40
3.4.5 Filtro de incidencia	40
3.4.6. Reclasificación	41
3.5. Integración	41
3.6 Mapas de transiciones	43
3.7 Estadísticas	43
4. Validación	43
5. Consideraciones prácticas y desafíos	46
6. Referencias	47
7. Apéndices	48

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de la cobertura y uso del suelo de los biomas peruanos

Tabla 2. Resumen del número de cartas MapBiomias por región y país

Tabla 3. Resumen de parámetros utilizados en la construcción de los mosaicos

Tabla 4. Descripción de bandas y variables empleadas para la Colección 2.0

Tabla 5. Leyenda general de cobertura y uso del suelo en la Colección 2.0

Tabla 6. Memoria descriptiva para la leyenda

Tabla 7. Regiones de clasificación definidas en el marco del proyecto

Tabla 8. Parámetros utilizados en el clasificador Random Forest

Tabla 9. Reglas de prevalencia por bioma para la fase de integración.

Lista de Figuras

Figura 1. Límite de biomas identificados para Perú

Figura 2. Síntesis metodológica de la Colección 2.0

Figura 3. Grilla de cartas MapBiomias, grilla de imágenes Landsat y límite nacional

Figura 4. Mapa de las cartas-región para la generación de mosaicos de imágenes para el Perú

Figura 5. Esquema de la aplicación de un reductor a una colección de imágenes (Google, 2020)

Figura 6. Proceso de cálculo de bandas que componen los mosaicos anuales de imágenes Landsat.

Figura 7. Mapa de regiones de clasificación para la Colección 2.0

Figura 8. Funcionalidad del filtro de Gap Fill

Figura 9. Funcionalidad del filtro temporal

Figura 10. Funcionalidad del filtro espacial

Figura 11. Funcionalidad del filtro de frecuencia

Figura 12. Funcionalidad del filtro de incidencia

1. Introducción

1.1. Alcance y contenido del documento

El objetivo de este documento es describir la base teórica, la justificación y los métodos aplicados para producir mapas anuales de cobertura y uso del suelo desde el año 1985 hasta 2022 de la Colección 2.0 de Mapas Anuales de Cobertura y Uso de suelo de MapBiomias Perú.

Este documento cubre los métodos de clasificación de imágenes Landsat (L4, L5, L7, L8, L9), la arquitectura de procesamiento de imágenes y el enfoque para integrar los biomas y regiones presentes en el país. También se presenta un contexto histórico y antecedentes, así como una descripción general del conjunto de datos de imágenes satelitales y del método de evaluación de precisión aplicado.

Los procedimientos específicos aplicados en cada tema transversal se encuentran en los apéndices (<https://peru.mapbiomas.org/en/download-of-atbds>). Los algoritmos de clasificación están disponibles en el Github de MapBiomias Perú (<https://github.com/raisgmb/mapbiomas-peru>).

1.2. Visión general

El proyecto MapBiomias Perú inicia en julio de 2021 con el propósito de apoyar el entendimiento de la dinámica de la cobertura y uso del suelo (LULC, por sus siglas en inglés) en todo el territorio nacional. El proyecto se desarrolla gracias a: i) avances tecnológicos que permiten el procesamiento en la nube de grandes cantidades de datos espaciales mediante algoritmos albergados en la plataforma Google Earth Engine; ii) la implementación de métodos de procesamiento de imágenes enfocados en el monitoreo de LULC de MapBiomias; iii) el equipo técnico multidisciplinario que con su experiencia lleva a cabo el mapeo del territorio; y iv) el apoyo de instituciones y financiadores visionarios que respaldan el proyecto.

Los productos de MapBiomias Perú están compuestos de mapas temáticos anuales de 30 metros de resolución espacial para todo el país, en su metodología utiliza mosaicos anuales de imágenes de satélite conformadas por capas de información (bandas espectrales, índices derivados, variables físicas); también se obtienen estadísticas derivadas de los mapas por departamento, provincia, distrito, bioma, cuenca hidrográfica, territorios indígenas, unidades de conservación, entre otros.

El mapeo de MapBiomias Perú, a la fecha, presenta su primera colección de mapas anuales; la cual irá evolucionando en metodología, período de análisis, detalle de coberturas mapeadas en el tiempo y una mejora en calidad de los mismos.

Colección 2.0: Mapeo de coberturas y usos entre los años **1985 y 2022**. La metodología utilizada fue *machine learning (Random Forest)*, con 156 capas de información (bandas landsat originales, información fraccional y de textura derivada de las mismas e índices). Se utilizó la imágenes Landsat C2, que presenta la versión más actualizada del reprocesamiento de los archivos de Landsat. Los mapas generados cuentan con un total de **20 clases**.

Las colecciones MapBiomias pretenden contribuir al desarrollo de un método rápido, fiable colaborativo y de bajo coste para procesar conjuntos de datos a gran escala y generar series

temporales históricas de mapas anuales de cobertura y uso del suelo. Todos los datos, mapas de clasificación, códigos estadísticas y otros análisis son de libre acceso a través de la plataforma MapBiomias Perú (<http://peru.mapbiomas.org>)

Los productos de la Colección 2.0 son los siguientes:

- Rasters anuales de clasificación de todo el territorio peruano;
- Rasters de transiciones anuales entre las clases y años elegidos por el usuario;
- Mosaicos preprocesados generados a partir de colecciones de archivos Landsat (Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9);
- Infraestructura y algoritmos de procesamiento de imágenes (scripts en Google Earth Engine y código fuente);
- Estadísticas anuales y de transición LULC con diversas unidades de análisis;
- Evaluación de la calidad de los mosaicos Landsat. Cada escena puede tener una proporción de nubes y otras interferencias. Así, cada píxel de un año determinado se clasifica según el número de observaciones disponibles, variando de 0 a 38 observaciones por año. La evaluación de la calidad de los mosaicos Landsat está disponible en el sitio web de MapBiomias.
- Mapa mural de Cobertura y Uso del suelo en el Perú al 2022;
- Infografía nacional sobre las coberturas y usos de la tierra;
- Documento de hallazgos claves en el análisis de los resultados;
- Documentos técnicos para conocimiento de los procesos por temática.

1.3. Área de estudio

El ámbito de trabajo es toda la extensión territorial del Perú, excluyendo la superficie insular (0.01%). Esto contempla una extensión aproximada de 1 '294,306.15 km². Dentro de este, se definieron cuatro biomas: el bioma Amazonía, bioma Andes, el bioma Desierto Costero y el bioma Bosque Seco Ecuatorial.(Figura 1).



Figura 1. Límite de biomas identificados para Perú

Para ello se emplearon criterios técnicos sobre la distribución de ecosistemas a partir de mapas nacionales de referencia y a la experiencia de las colecciones anteriores. Las coberturas utilizadas fueron:

- Mapa de cobertura vegetal (MINAM, 2015)
- Mapa de Ecorregiones del Perú (SIGMINAM-DGOTA, 2017)
- Mapa Fisiográfico del Perú (INRENA, 2002)
- Mapa de Regiones Hidrográficas del Perú (MINAM-ANA)
- Mapa de Vegetación Natural Remanente de los Andes del Norte y Centro (Comunidad Andina - CAN)
- Modelo digital de elevación SRTM de 90 m
- Mapa de humedales del Perú (MINAM, 2010)

Tabla 1. Características de la cobertura y uso del suelo de los biomas peruanos

Bioma	Área (km2) (% país)	Descripción	Amenazas
Bosque seco ecuatorial	46,026.95 (3,55%)	La extensión de este bioma se define en primer lugar por la extensión del bosque seco, tanto de llanura como de colina y montaña, por la costa noroeste del país. Aproximándose a la ecorregión "Bosque Seco Ecuatorial" de Brack, está sujeto a la influencia del Mar Tropical y corrientes marinas cálidas, relacionados al fenómeno del Niño. El bioma se caracteriza por un clima mixto tropical/subtropical con vegetación de bosques secos latifoliados, además de contar con la presencia de los únicos manglares del Perú.	Sobre los bosques secos existe una presión fuerte que no se ha visualizado a nivel nacional por falta de información. Están sujetos a la extracción forestal (tala de algarrobos para leña y carbón), el sobrepastoreo (principalmente ganado caprino) y cada vez a mayor medida deforestados para permitir la expansión agrícola, sobre todo en manos de la industria agroexportadora. También aumenta la presión sobre el agua del subsuelo por la creciente construcción de pozos para la agricultura. A la vez, años de sequía amenazan a los bosques secos cuya regeneración está ligada al fenómeno del Niño y la presencia de lluvias.
Desierto costero	84,991.20 (6,57%)	Fuertemente influenciado por la corriente fría de Humboldt que proviene de Chile, el clima subtropical árido de la costa centro-sur peruana solamente permite poca vegetación y predomina el desierto. A pesar de ello, se suele formar neblina que favorece ecosistemas únicos como las lomas y tillandsiales. La mayor parte de la vegetación y uso agropecuario se concentra en los valles fluviales, dependientes de los ríos que se forman en las partes altas de los Andes.	En la parte desértica, una fuerte presión sobre ecosistemas como los humedales costeros, las lomas y tillandsiales proviene de la expansión urbana descontrolada de las ciudades ubicadas a lo largo del litoral. Otra amenaza constante es la falta de agua para la agricultura en los valles fluviales, tanto por la ausencia de lluvias debido a cambios climáticos que afectan las reservas acuáticas, como también por la creciente demanda a causa de la expansión de la agroindustria.
Andes	378,533.71 (29,25%)	Esta región geográfica divide al Perú en dos vertientes, la del atlántico (oriental) y la del pacífico (occidental). En la vertiente occidental, los Andes comienzan desde los 750 aproximadamente hasta los 6788 msnm para luego descender por la vertiente oriental hasta los 3500 msnm para dar paso a la Selva Alta. Selva Alta o Yunga.	Se ve fuertemente amenazado por la compactación de suelos que genera la crianza de ganado, así como la extracción de turba de los humedales altoandinos y la agricultura extensiva que abastece de productos de primera necesidad a los principales centros poblados y ciudades del país. Las quemadas agrícolas e incendios forestales son escenarios frecuentes en un bioma donde los ecosistemas

		<p>Predominan las formaciones herbáceas, con pequeñas inclusiones de arbustales y de pequeños bosques. Resalta en este bioma la ocurrencia de glaciares, como las principales fuentes de agua para las cuencas de las vertientes atlántico y pacífico del Perú que originan, además, lagos y coberturas altoandinas inundadas como los bofedales. También resaltan los valles interandinos conocidos por su alta productividad agrícola.</p>	<p>predominantes se caracterizan por climas con un bajo contenido de humedad relativa y vegetación con alto potencial combustible.</p>
Amazonía	784,754.29 (60,63 %)	<p>De acuerdo con la ecorregiones de Brack, este bioma alberga en su mayoría las extensiones de la Selva Alta y Selva Baja; caracterizadas por presentar una variedad de paisajes boscosos que difieren en su composición en función a su ubicación, altitud, relieve, clima y vegetación.</p>	<p>Principalmente por la agricultura extensiva, la ganadería, la tala y la minería a tajo abierto. Cultivos industriales como la palma aceitera reportan su crecimiento en la zona norte y centro del bioma, ocasionando la tala de bosques primarios. Por su parte, la zona sur del país se ve afectada principalmente por la expansión de la minería aurífera en los ríos caudalosos de la llanura amazónica.</p>

Fuente: Elaboración propia

1.4. Aplicaciones

Las aplicaciones científicas pueden derivarse de un historial anual de series temporales de los mapas de LULC producidos, incluyendo:

Los productos de MapBiomás Perú muestran un potencial en el monitoreo anual de áreas amenazadas por la conversión de la cobertura y con riesgo de deforestación. Asimismo, la serie temporal de mapas pueden ser de utilidad como complemento de estudios de estimación de emisión de gases de efecto invernadero por cambio de uso y cobertura del suelo en el país. Otros ejemplos de aplicación son la caracterización de dinámicas de uso del suelo, la cuantificación de transiciones de cobertura y uso del suelo, de pérdidas y ganancias de bosques, el monitoreo de la regeneración, de cambios en los recursos hídricos, de la expansión urbana y agropecuaria, la planificación regional, y la gestión de áreas protegidas.

MapBiomás Perú no sólo complementa los esfuerzos ya existentes nacional y globalmente, trae consigo ventajas adicionales como son: 1) los mapas de MapBiomás Perú han sido construidos empleando la colección completa de datos Landsat (38 años) con una temporalidad anual; 2) el producto entero comparte una misma metodología, leyenda, resolución temporal y espacial, permitiendo así comparaciones entre regiones; 3) el producto es preparado por expertos conocedores de la realidad nacional, generando un producto con miras a aplicaciones de carácter local; 4) MapBiomás Perú pone a disposición del público sus métodos, herramientas y productos a través de una plataforma de consulta pública en internet.

2. Información básica y antecedentes

2.1 Contexto institucional

2.1.1. Instituto del Bien Común - IBC

El Instituto del Bien Común es una asociación civil peruana sin fines de lucro fundada en 1998 que trabaja para lograr el cuidado de los bienes comunes. Por bienes comunes entendemos los recursos y espacios de propiedad o uso compartido, tales como ríos, lagos, bosques, recursos pesqueros, áreas naturales protegidas y territorios de las comunidades. Como estos recursos y espacios son cruciales para el bienestar de los pueblos amazónicos, particularmente en la actual era de cambio climático, nuestro trabajo en pro de la conservación y el uso sostenible contribuye al bienestar de estas comunidades y de todos los peruanos.

Toda la información sobre los proyectos del IBC y las publicaciones generadas desde los inicios de la institución están disponibles en la página web <https://ibcperu.org/>.

2.1.2 MapBiomias

La Red Global MapBiomias (MapBiomias Network) actualmente está compuesta por seis iniciativas que mapean la cobertura y el uso del suelo en Brasil, en el Amazonas, Chaco, Bosque Atlántico Trinacional, Pampa Trinacional y también en Indonesia. Estas iniciativas son redes colaborativas multi institucionales, conformada por ONG, universidades y empresas de tecnología que utilizan procesamiento en la nube y clasificadores automatizados desarrollados y operados con la plataforma Google Earth Engine para contribuir a la comprensión de los cambios en la cobertura y uso del suelo. Todos los datos y métodos generados por el proyecto son públicos, transparentes y están disponibles en las plataformas <https://mapbiomas.org/>.

En 2022 la red sumó la iniciativa en Chile y la extensión de los países en: Argentina, Bolivia, Colombia, Paraguay, Ecuador, Perú y Venezuela, todos ellos involucrando a instituciones locales. El objetivo principal es producir colecciones de mapas anuales de cobertura y uso del suelo que reflejan la dinámica de las transformaciones en los diferentes biomas en América del Sur y otras regiones tropicales y subtropicales.

El objetivo de la Red Global MapBiomias es producir y promover el uso de información calificada para la custodia del uso y cobertura del suelo en América del Sur y otras regiones tropicales y subtropicales. Esta Red presenta una serie de prácticas comunes en todas sus iniciativas y productos de MapBiomias:

- Plataforma de datos fácil de usar, de fácil acceso y uso para aplicaciones
- Transparencia metodología y tecnología
- Datos abiertos y gratuitos
- Experiencia local y conocimiento temático de Uso y Cobertura del Suelo
- Procesamiento en la nube (Plataformas Google Earth Engine)
- Conocimientos técnicos en teledetección y programación
- Independencia para la publicación de datos
- Colecciones que permiten una evolución y mejora constante
- Redes distribuidas y descentralizadas
- Espíritu colaborativo
- Comprometidos con la solidez técnico-científica
- Promoción del desarrollo de capacidades

2.2 Datos de Percepción Remota

Los datos para mapeo de la Colección 2.0 fueron obtenidos de las imágenes satelitales del periodo 1985 a 2022 de los sensores Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor (OLI-TIRS) y Operational Land Imager 2 and Thermal Infrared Sensor 2 (OLI-2 - TIRS 2), a bordo de los satélites Landsat 4 (L4, para cobertura de vacíos de información al inicio de la serie y en 1988 principalmente), Landsat 5 (L5, para los años 1985-2012 de la serie), Landsat 7 (L7, para los años 2000-2022), Landsat 8 (L8, 2013 en adelante) y Landsat 9 (L9, 2021 en adelante).

Las imágenes de reflectancia de superficie (Surface Reflectance) pertenecen al catálogo de datos Landsat¹ C2 con nivel de corrección Tier 1, que fueron sometidas a calibración radiométrica,

¹ <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat/>

ortorrectificación basada en puntos de control en tierra y modelos de elevación digital para asegurar un registro a nivel de píxel y una corrección atmosférica. El catálogo de imágenes Landsat de 30 metros de resolución espacial fueron accedidas a través de la plataforma Google Earth Engine, provistas por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

2.3. Google Earth Engine y MapBiomias Amazonía

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma en la nube para el análisis científico de conjuntos de datos geoespaciales a escala global. Los principales componentes de GEE son: 1) Catálogos de datos de sensoramiento remoto públicamente disponibles, 2) Infraestructura de procesamiento computacional en la nube a escala petabyte, 3) APIs para JavaScript y Python para interactuar con los servidores del GEE, y 4) un ambiente de desarrollo integrado (IDE) en línea que permite el desenvolvimiento de aplicaciones mediante scripts² denominado el Code Editor³.

Los componentes mencionados hacen de GEE la herramienta idónea para el procesamiento de grandes cantidades de datos que requiere la clasificación de imágenes satelitales con fines de mapeo de la cobertura, uso y cambio del uso del suelo. Adicionalmente, GEE provee un ambiente que facilita la colaboración entre equipos regionales (como en el caso de la RAISG) y la aplicación de metodologías compartidas a un mismo set de datos, y la replicación de procesos por terceros interesados en evaluar conceptos o metodologías.

La cadena de procesamiento de MapBiomias está basada enteramente en tecnología de Google y, como tal, la iniciativa MapBiomias Perú se ha apoyado en GEE para 1) procesar imágenes satelitales en infraestructura computacional en la nube, 2) desarrollar códigos (scripts) en Javascript y Python, 3) almacenar los datos generados usando almacenamiento en la nube, y 4) desplegar los resultados (mosaicos, mapas anuales de uso del suelo, análisis de transición, estadísticas por clase y por transición, información metodológica, entre otros) a través de una plataforma web de consulta pública accesible en <http://plataforma.peru.mapbiomas.org>.

2.4. Otras iniciativas de mapeo

En los últimos años se han desarrollado diversas herramientas para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en la Amazonía, algunas de ellas de alcance global, con enfoques cada vez más robustos. Todos tienen en común su interés en aportar en uno de los temas más urgentes actualmente: conocer el estado actual de los tipos de cobertura terrestre y el monitoreo de los cambios en los mismos. Estas iniciativas han aportado a la detección de la deforestación, el monitoreo de los ecosistemas terrestres y acuáticos, y a fortalecer la detección de la degradación forestal, la conservación, la detección de focos de calor, etc. A continuación enlistamos las iniciativas más relevantes.

2.4.1. Fuentes mundiales

- **GLC 2000 - Global Land Cover mapping for the year 2000**, el proyecto fue una asociación internacional de unos 30 grupos de investigación coordinados por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, con el objetivo de producir una base de datos global de cobertura de la tierra para el año 2000. La base de datos contiene mapas de cobertura del suelo con leyendas de mapas detallados y relevantes a nivel regional y un producto global que combina todas las clases regionales en una leyenda coherente.

² <https://developers.google.com/earth-engine/>

³ code.earthengine.google.com

- **Intact Forest Landscapes** (IFL), es una base de datos espacial global a escala 1: 1,000,000, que muestra la extensión de los paisajes forestales intactos (IFL) para los años 2000, 2013 y 2016. El primer mapa global de IFL, del año 2000, se preparó en 2005-2006 bajo el liderazgo de Greenpeace, con contribuciones de: Biodiversity Conservation Center, International Socio-Ecological Union y Transparent World (Rusia), Luonto Liitto (Finnish Nature League), Forest Watch Indonesia, y Global Forest Watch, una red iniciada por el Instituto de Recursos Mundiales. Posteriormente se generó la versión del 2013 y por último se actualizó el mapa a 2016 con el apoyo de la Universidad de Maryland, Wildlife Conservation Society, Greenpeace y Transparent World.
- **Global Forest Watch** (GFW) - En colaboración entre el laboratorio GLAD (Global Land Analysis & Discovery) en la Universidad de Maryland, Google, USGS y NASA, mide las áreas de pérdida de cobertura arbórea en toda la Tierra (excepto la Antártida y otras islas del Ártico) en resolución de 30 × 30 metros. Su proyecto se centra en el desarrollo de productos de datos globales de cambio de la cubierta de árboles basados en imágenes satelitales de Landsat, disponibles en la plataforma web Global Forest Watch 2.0. Incluye el cambio anual de cobertura de bosques (ganancias y pérdidas) desde el 2000 al 2020.
- **GlobeLand30**, es una iniciativa del National Geomatics Center of China, que comprende conjuntos de datos espaciales recopilados a una resolución de 30 metros. Esta colección considera diez tipos de cobertura terrestre, incluidos bosques, superficies artificiales y humedales, para los años 2000 y 2010. Se extrajeron a partir de más de 20,000 imágenes satelitales de Landsat y del satélite chino HJ-1.
- **ESA CCI Land cover**, la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) y la Iniciativa de Cambio Climático (CCI por sus siglas en inglés) pone a disposición mapas globales anuales de cobertura terrestre, que describen la superficie de la tierra en 22 clases. La serie de mapas globales anuales de cobertura terrestre abarcan el período desde 1992 a 2018.
- **CORINE Land Cover**, el inventario CORINE Land Cover (CLC) se inició en 1985 (año de referencia 1990). Se han realizado actualizaciones en 2000, 2006, 2012 y 2018. Consiste en un inventario de cobertura terrestre en 44 clases. CLC utiliza una Unidad Mínima de Mapeo (MMU) de 25 hectáreas (ha) para fenómenos de área y un ancho mínimo de 100 m para fenómenos lineales. Las series de tiempo se complementan con capas de cambio, que destacan los cambios en la cobertura del suelo con una MMU de 5 ha.
- **ESRI 2020 Global Land Use Land Cover de Sentinel-2:** Esta capa muestra un mapa global de uso del suelo / cobertura del suelo (LULC) del año 2020. El mapa se deriva de imágenes ESA Sentinel-2 con una resolución de 10 metros y contiene 10 clases. Este mapa fue producido por un modelo de aprendizaje profundo entrenado con más de 5 mil millones de píxeles Sentinel-2 etiquetados a mano, muestreados en más de 20,000 sitios. distribuidos en los principales biomas del mundo.
- **ESA WorldCover 2020 y 2021:** Es un producto de cobertura terrestre global de referencia con una resolución espacial de 10 m, generado a partir de imágenes de Sentinel-2 y Sentinel-1 con 10 clases de cobertura terrestre y una precisión general de 75%. La leyenda incluye 11 clases genéricas que describen adecuadamente la superficie terrestre: "Cobertura arbórea", "Matorral", "Pastizales", "Tierras de cultivo", "Construido", "Vegetación desnuda/escasa", "Nieve y hielo" , "Cuerpos de agua permanentes", "Humedal herbáceo", "Manglares" y "Musgos y líquenes".
- **Dynamic World** es un conjunto de datos de cobertura de suelo global de uso de la tierra con una resolución de 10 m casi en tiempo real, generado a partir de imágenes de Sentinel-2, producido mediante aprendizaje profundo, disponible gratuitamente y con licencia abierta. La leyenda presenta las probabilidades por píxel en 9 clases de cobertura terrestre: Agua, Formación forestal, arbusto y matorral, herbazales, vegetación inundables, cultivos, construcciones, suelo desnudo, nieve y hielo. Estos datos son el resultado de una asociación

entre Google y el Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute) para producir un conjunto de datos dinámicos del material físico en la superficie de la Tierra.

2.4.2. Fuentes para la región Amazónica

- **Ecological Systems of Latin America and the Caribbean**, presenta y esboza la base conceptual para una unidad de clasificación de los sistemas ecológicos. Estos representan grupos recurrentes de comunidades biológicas que se encuentran en entornos físicos similares y están influenciados por procesos ecológicos dinámicos similares, como incendios o inundaciones. El objetivo fue proporcionar una unidad de clasificación de "mesoescala" que sea fácilmente mapeable, a menudo a partir de imágenes de satélites, y fácilmente identificable en el campo. El proyecto fue desarrollado por NatureServe y sus programas miembros, con fondos de The Nature Conservancy, completando una clasificación funcional de los sistemas ecológicos terrestres en América Latina y el Caribe. El informe resume los casi 700 sistemas ecológicos que actualmente se clasifican y describen, enfatizando la porción natural del paisaje.
- **Land Cover Map Of South America**. Mapa digital de la cobertura terrestre de América del Sur con base a imágenes satelitales tomadas entre 1995 y el año 2000. La escala de mapeo tiene una resolución espacial de 1 km. Este mapa se produjo como parte del proyecto Global Land Cover - "GLC 2000".
- **Mapa de cobertura terrestre de América Latina y el Caribe en el marco del proyecto SERENA**, es un mapa de cobertura terrestre para América Latina y el Caribe (ALC) para el año 2008. Fue desarrollado en el marco del proyecto Red Latinoamericana de Monitoreo y Estudio de Recursos Naturales (SERENA). El mapa de cobertura del suelo SERENA para ALC integra: 1) la experiencia local de los miembros de la red SERENA para generar los datos de capacitación y validación, 2) una metodología para el mapeo de la cobertura del suelo basada en árboles de decisión que utilizan series de tiempo MODIS y 3) estimaciones de membresía de clase para tener en cuenta los problemas de heterogeneidad de píxeles.
- **Deforestación en la Amazonía**, estudio realizado por RAISG, que analiza las tendencias históricas y recientes de la deforestación, por quinquenio desde el 2000 al 2015. El dato de deforestación fue producido por los socios de la RAISG utilizando una metodología propia, estandarizada, que permitió elaborar análisis a nivel regional, sin dejar de lado las diferencias nacionales. El tema se analiza en diferentes recortes: toda la Amazonía, la Amazonía de cada país, las Áreas Naturales Protegidas, los Territorios Indígenas y la escala de cuencas hidrográficas.
- **Mapbiomas Amazonia Colecciones de Cobertura y Uso**, es un estudio a partir de imágenes de satélite Landsat que genera mapas anuales de cobertura y uso del suelo en la Amazonía, con una resolución espacial de 30m. El proyecto fue desarrollado por la red RAISG y sus socios en los países amazónicos. A la fecha utiliza el catálogo de imágenes C2 de Landsat y presenta una leyenda de 20 clases mapeadas.

2.4.3. Fuentes para el territorio nacional

- **Mapa Fisiográfico del Perú** (2002) del Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA. Se considera una leyenda de 21 clases. Escala de publicación de 1:250,000.
- **Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela** (2009) Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, LTA-UNALM, IAvH, ICAE-ULA, CDCUNALM, RUMBOL SRL. Lima. Unidades de vegetación

natural remanente, áreas transformadas, así como las áreas naturales protegidas a nivel país de los Andes del Norte y Centro por la Comunidad Andina. Escala de publicación de 1:4'100,000

- **Mapa de humedales del Perú** (2010) del Ministerio del Ambiente - MINAM. El mapa muestra información nacional sobre la distribución de los humedales en el Perú comprendido por 04 grandes unidades: 1) Aguajales y pantanos; y 2) manglares. 3) Bofedales y 4) Humedales costeros. Con una escala de publicación de 1:1'000,000
- **Mapa del Patrimonio Forestal Nacional** (2010) del Ministerio del Ambiente - MINAM. El mapa fue elaborado por el Ministerio del Ambiente a través de la Dirección de Evaluación, valoración y financiamiento del patrimonio natural y la Dirección General de Ordenamiento Territorial. Con una escala de publicación de 1:2'000,000
- **Mapa de bosque - no bosque y pérdida de bosque húmedo amazónico 2000 - 2014** (2015) elaborado por el Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático muestra las áreas y porcentajes de bosque - no bosque y pérdida de la cobertura de bosque a nivel nacional. Leyenda de 4 clases y escala de publicación de 1:6'000,000-
- **Mapa de cobertura vegetal** (2015) del Ministerio del Ambiente - MINAM que considera una leyenda de 76 clases y una escala de publicación de 1:100,000
- **Mapas de Uso y Cambio de Uso 2000-2005, 2005-2011, 2011-2013, 2013-2016**, elaborados por el Programa Nacional de Conservación de Bosques y Mitigación del Cambio Climático. Disponible en la plataforma GeoBosques del Ministerio del Ambiente en formato raster y vector. Utilizan la clasificación IPCC en un primer nivel y otro más detallado al que denominan Subclases.
- **Mapa Nacional de Ecosistemas** (2018) elaborado por el Grupo de Trabajo para el Mapa Nacional de Ecosistemas y la Dirección de Monitoreo y Evaluación de los Recursos Naturales del Territorio (DMERNT) a una escala de publicación de 1:2'000,000.
- **Mapa de Bosque Estacionalmente Seco** (2018). Línea de base de los bosques secos de la costa norte del Perú, elaborado por Geobosques y el Ministerio del Ambiente.
- **Mapa de Lomas** (2020) obtenido de Moat et al., "Seeing through the clouds - Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile".
- **Superficie agrícola nacional** (2020). Elaborado por el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. GEOMIDAGRI
- **Monitoreo de cultivos de arroz** (2021). Elaborado por el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. GEOMIDAGRI.

3. Metodología

La cadena de procesamiento adoptada para la generación de la Colección 2 MapBiomias Perú se encuentra sintetizada en la **Figura 2** y es detallada en las siguientes secciones: Generación de mosaicos anuales (sección 3.1), Clasificación (sección 3.2), Post clasificación (sección 3.3) y Validación (sección 3.4).

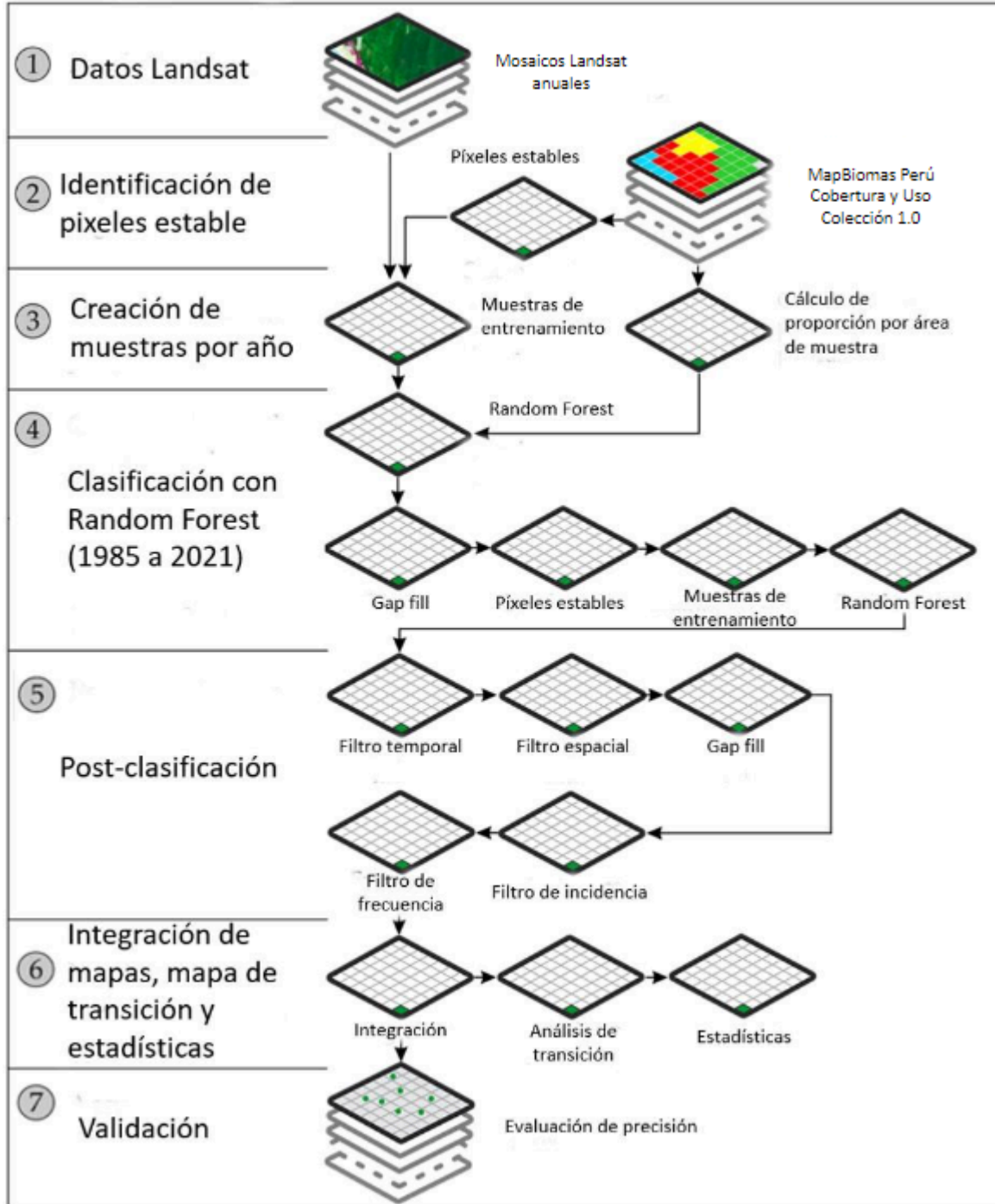


Figura 2. Síntesis metodológica de la Colección 2.0

3.1 Generación de mosaicos anuales

3.1.1. División del espacio de análisis en cartas

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. Un total de **107 cartas** cubren el territorio peruano.

La división regular del espacio producto de la aplicación de la grilla de Cartas Internacionales, implica que cada carta requiera de una combinación total o parcial de imágenes Landsat, dado que la grilla de imágenes Landsat es oblicua a la grilla de cartas de MapBiomás (**Figura 3**).

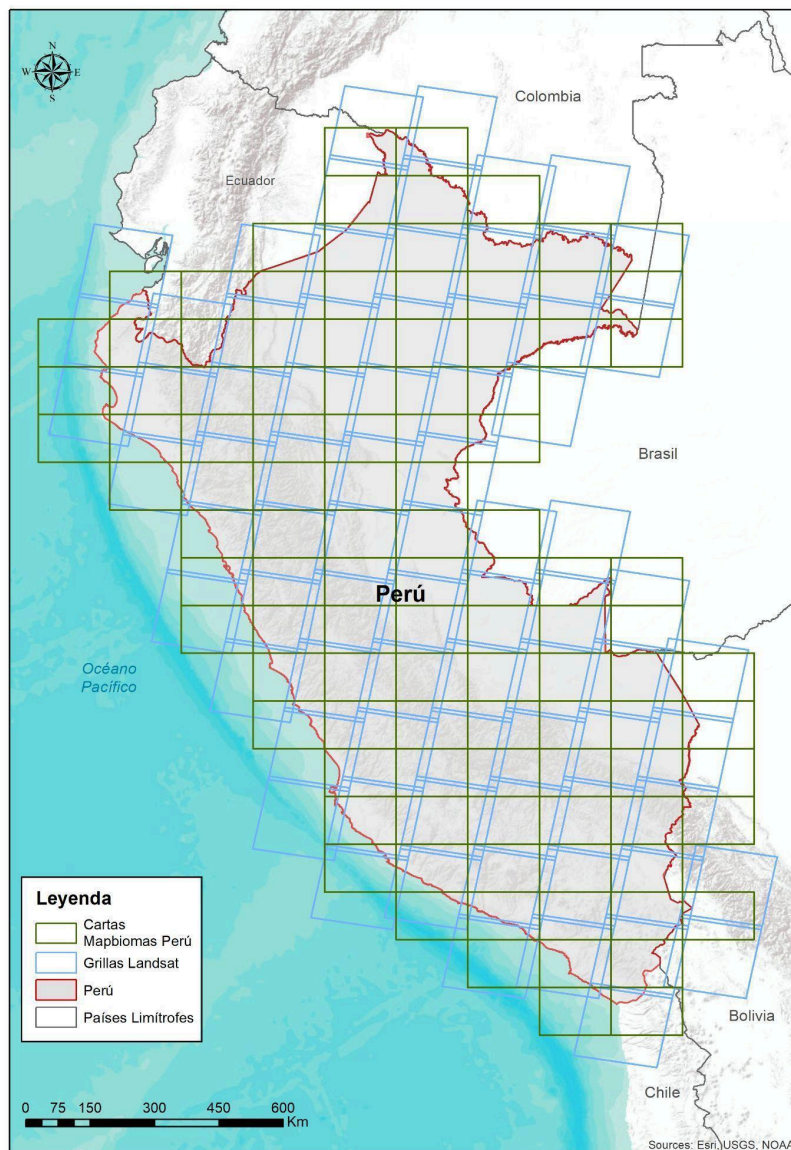


Figura 3. Grilla de cartas MapBiomás Perú (verde) y grilla de imágenes Landsat (azul) y límite nacional (rojo).

Fue imprescindible subdividir las cartas por regiones de mosaico⁴ (Figura 4) para facilitar la construcción de los mosaicos mediante una parametrización ajustada a las especificidades de cada porción. Como consecuencia, se generaron mosaicos anuales de píxeles de imágenes Landsat independientes para cada carta o subdivisión, cada uno de los cuales fue procesado por separado. La **tabla 2** resume el número de cartas existentes a nivel país (sin subdivisión), el número final de subdivisiones (cartas/región) y el total de mosaicos procesados y generados.

Tabla 2. Resumen del número de cartas MapBiomias Perú por región y país

Región de mosaico	Biomias que abarca	Cartas/Región de mosaico	Total de mosaicos (x38 años)
Región 701	Amazonía (zona montañosa de selva alta)	31	1178
Región 702	Amazonía (zona de planicie de selva baja)	59	2242
Región 703	Andes (cuenca del atlántico)	32	1216
Región 704	Andes (cuenca del pacífico y titicaca)	35	1330
Región 705	Bosque seco ecuatorial y desierto costero	35	1330
Total		192	7296

Fuente: Elaboración propia

⁴ Las “**regiones de mosaicos**” se usan específicamente en la construcción de mosaicos y son diferentes a las “**regiones de clasificación**” que son usadas específicamente para el proceso de clasificación.

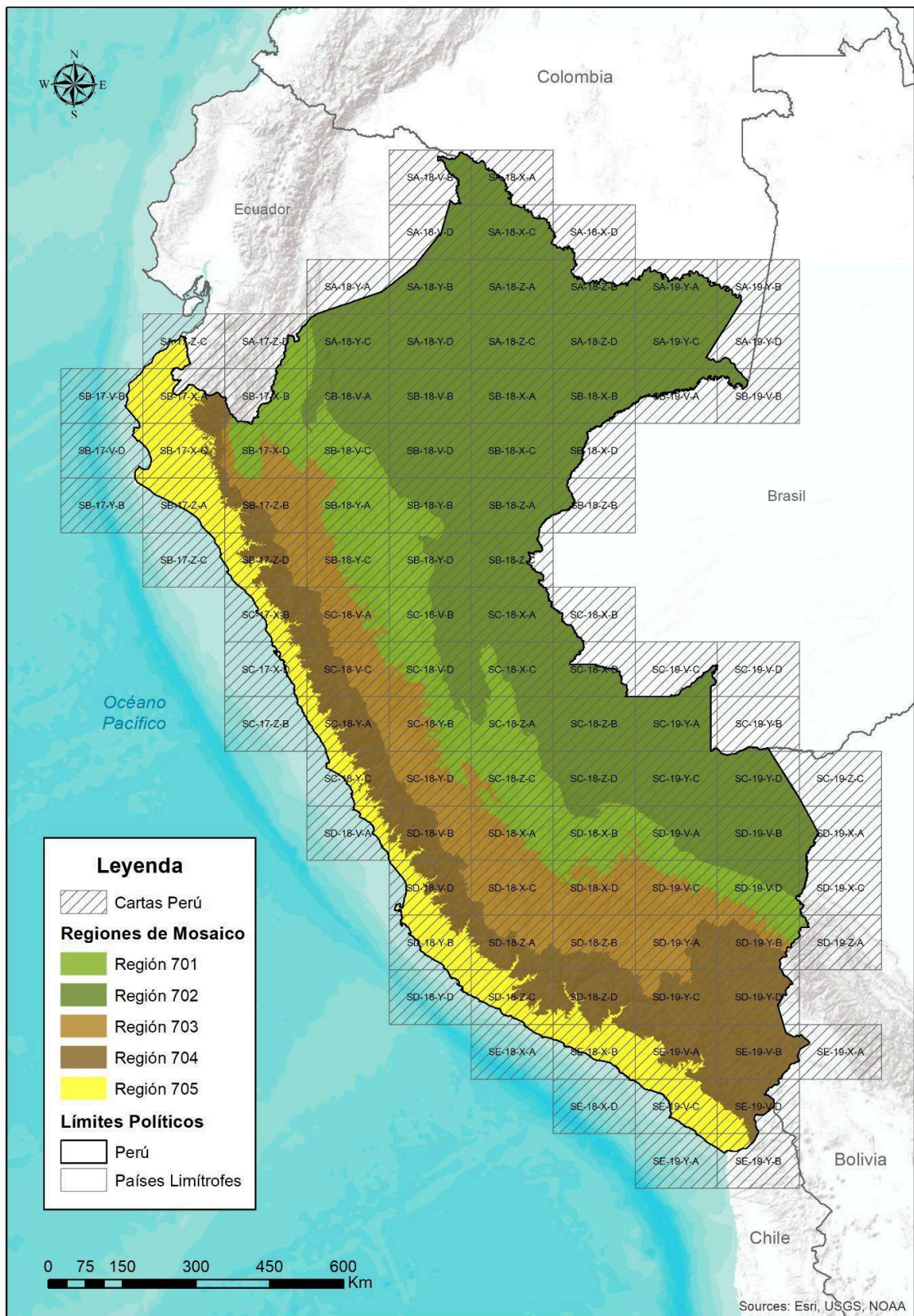


Figura 4. Mapa de las cartas-región para la generación de mosaicos de imágenes para el Perú.

3.1.2. Parametrización de mosaicos anuales

Un mosaico anual es la agregación de píxeles de varias imágenes Landsat a partir de los que se genera un mosaico representativo para un año, construido a partir de los siguientes parámetros:

- ID: Identificador único de la unidad carta-región
- Año: Año de la serie (1985 a 2022) 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 4 TM, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI o una combinación de Landsat 5 y Landsat 7, Landsat 9 OLI-2 TIRS-2 .
- Nubosidad: 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.
- Probabilidad de nubes:
- shadowSum: Es un parámetro de TDOM para detección de sombra de nube. Un número inferior enmascara menos píxeles con nube.
- cloudThresh: Es un parámetro de CloudScore para detección de nubes. Los números más bajos aumentan el enmascaramiento, los números más altos disminuyen el enmascaramiento. La disminución del enmascaramiento puede ser útil en zonas de suelo descubierto cuya alta reflectancia genera una detección errónea de nubes.
- Blacklist: Imágenes que por su calidad son excluidas de la construcción del mosaico. Algunos problemas de calidad están relacionados con píxeles de nieve en regiones no glaciares, nubes que no han sido enmascaradas

Los parámetros de construcción de mosaicos anuales son definidos por el intérprete y representan los criterios de selección de imágenes disponibles en el catálogo de datos Landsat a partir de los cuales se construye el mosaico anual. Las imágenes seleccionadas por año fueron *reducidas* a una imagen individual, o mosaico anual, empleando operadores llamados *reductores* existentes en Google Earth Engine, como se ilustra en la Figura 5.

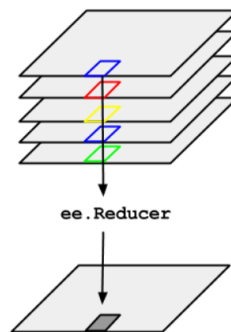


Figura 5. Esquema de la aplicación de un reductor a un set de imágenes (Google, 2020⁵).

Al momento de parametrizar los mosaicos se consideró que se puede alcanzar valores de precisión mayores al utilizar mosaicos de imágenes satelitales cuyos datos cuenten con la menor cantidad de ruidos. Es por ello que se buscó que cada mosaico tenga la menor presencia de nubes e interferencias posible y la mayor extensión de cobertura de datos Landsat disponible dentro del periodo definido. En

⁵ Tomado de: https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_image_collection

casos excepcionales se dio el caso de que no hubo imágenes disponibles para el período seleccionado, donde se optó por extender el periodo de búsqueda de imágenes.

Nubes y sombras de nubes son enmascaradas previamente para que únicamente píxeles libres de nubes y sombra de nubes sean seleccionados de las imágenes disponibles. Los métodos de enmascaramiento de nube y sombra de nube fueron el Cfmask y CloudScore.

La **tabla 3** presenta un resumen de los parámetros más frecuentemente utilizados por cada región por bioma.

Tabla 3. Resumen de los parámetros utilizados en la construcción de los mosaicos

Región	Satélite	Año	Período	Max % nube
Región 701 Amazonía (zona montañosa de selva alta)	L5	1985-1999, 2003-2011	15 junio - 15 noviembre	20 - 90
	L7	2002, 2012		
	L5/L7	2000-2001		
	L8	2013-2021		
	L9	2022		
Región 702 Amazonía (zona de planicie de selva baja)	L5	1985-1999, 2000, 2003-2011	01 junio - 31 octubre	10 - 80
	L7	2002, 2012		
	L5/L7	2001		
	L8	2013-2021		
	L9	2022		
Región 703 Andes (cuenca del atlántico)	L5	1985-2001,2003-2011	01 abril - 30 agosto	30 - 95
	L7	2002,2009,2010,2012		
	L8	2013-2021		
	L9	2022		
	Región 704 Andes (cuenca del pacifico y titicaca)	L5	1985-2001,2003-2011	01 abril - 30 agosto
L7		2002,2009,2010,2012		
L8		2013-2021		
L9		2022		
Región 705 (B.S. ecuatorial y desierto costero)		L5	1985-1999	01 enero- 31 diciembre
	L7	2000-2012		
	L8	2013-2021		
	L9	2022		

Fuente: Elaboración propia

3.2. Variables de clasificación o feature space

Se calcularon variables (*feature space*) a partir del mosaico anual que representan los insumos del proceso de clasificación. Las bandas Landsat, junto con las variables de clasificación se encuentran consolidados en archivos ráster compuestos por 156 bandas en total⁶ que incluyen: las bandas landsat espectrales, índices espectrales, información fraccional y de textura derivada de las mismas e índices de las fracciones espectrales.

Adicionalmente se usaron 7 variables estáticas: HAND, shademask2, slppost, altitud, pendiente, latitud y longitud; que ayudaron a la clasificación de clases que espectralmente son muy similares pero se logran diferenciar por estos aspectos topográficos.

A las imágenes disponibles en cada año, se aplicó el cálculo de **reductores estadísticos** para generar los valores de cada píxel. El proceso de representa en la **Figura 6**. Estos reductores son:

- Mediana: Mediana⁷ de todos los valores disponibles en el mosaico anual para esa ubicación (píxel).
- Mediana época seca: Cálculo de la mediana estadística aplicada a los píxeles del cuartil 25 (con los menores valores) de NDVI (proxy de época seca).
- Mediana época húmeda: Cálculo de mediana estadística aplicada a los píxeles del cuartil 75 (con los mayores valores) de NDVI (proxy de época lluviosa).
- Amplitud: Extensión de la variación entre todos los píxeles disponibles en el mosaico anual.
- Desviación estándar: Desviación estándar de los valores de todos los píxeles disponibles en el mosaico anual para una ubicación determinada.
- Mínimo: Menor valor de todos los píxeles disponibles en el mosaico anual en una ubicación determinada.
- Máximo: Mayor valor de todos los píxeles disponibles en el mosaico anual en una ubicación determinada.
- Mínimo del periodo seco: Cálculo del menor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los menores valores de NDVI (proxy de época seca).
- Mínimo del periodo húmedo: Cálculo del menor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los mayores valores de NDVI (proxy de época lluviosa).
- Máximo del periodo seco: Cálculo del mayor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los menores valores de NDVI (proxy de época seca).
- Máximo del periodo húmedo: Cálculo del mayor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los mayores valores de NDVI (proxy de época lluviosa).
- QMO del periodo seco: El valor más alto que tiene la banda en el índice evi2 en la estación seca.
- QMO del periodo lluvioso: El valor más alto que tiene la banda en el índice evi2 en la estación húmeda.

⁶ Disponibles para descarga en la plataforma MapBiomias Perú.

⁷ Mediana es el valor que separa la mitad superior de la mitad inferior de una muestra de datos o una población. [Documentación](#) de la herramienta en Google Earth Engine.

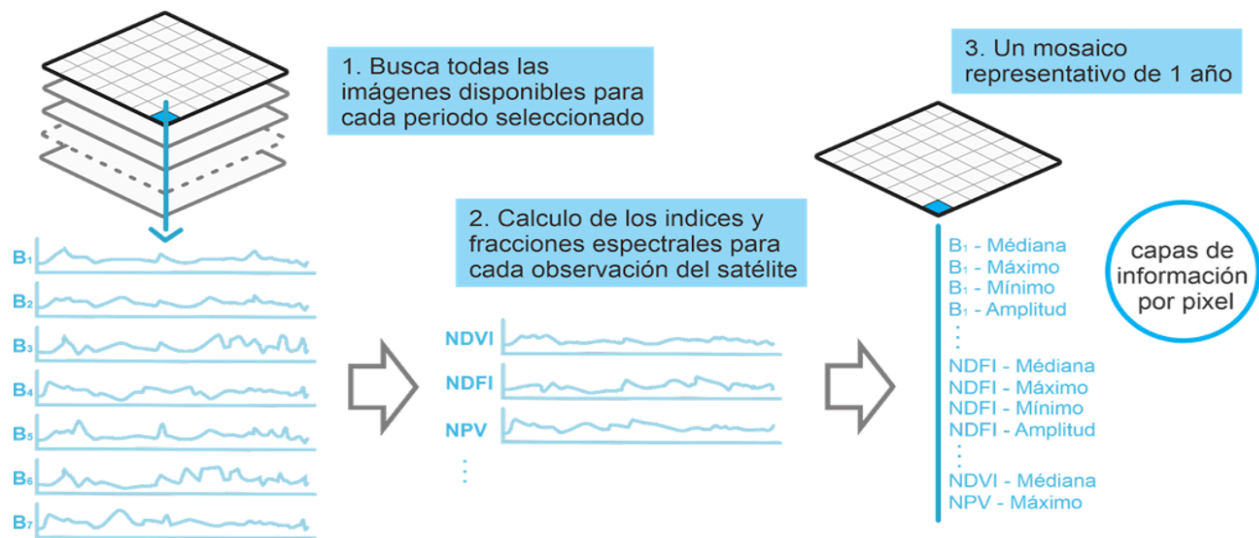


Figura 6. Proceso de cálculo de bandas que componen los mosaicos anuales de imágenes Landsat.

La **tabla 4** muestra el listado completo de bandas de los mosaicos finales o *feature space*. Cada banda representa una variable de entrenamiento del clasificador.

Tabla 4. Descripción de bandas y variables empleadas para la Colección 2 MapBiomás Perú.

Tipo	Nombre	Fórmula	Descripción	Reductor ⁸												Banda de Calidad ⁹		
				Median	Media n_dry	Media n_wet	am p	stdD ev	Mí n	Ma x	Dry_min	Dry_max	Wet_min	Wet_max	Dry_qmo	Wet_qmo		
Banda	blue	B1 (L5 y L7); B2 (L8)	Espectro visible azul	X														
	green	B2 (L5 y L7); B3 (L8)	Espectro visible verde	X	X					X				X		X	X	
	red	B3 (L5 y L7); B4 (L8)	Espectro visible rojo	X	X	X				X		X	X		X	X		
	nir	B4 (L5 y L7); B5 (L8)	Infrarrojo cercano	X	X	X		X	X								X	X
	swir1	B5 (L5 y L7); B6 (L8)	Infrarrojo de onda corta 1	X	X	X			X			X	X	X	X	X	X	X
	swir2	B7 (L5); B8 (L7); B7(L8)	Infrarrojo de onda corta 2	X	X	X			X		X			X		X	X	X
Índices	ndvi	$(nir - red)/(nir + red)$	Índice de vegetación de diferencia normalizada	X	X	X	X	X										
	evi2	$(2.5 * (nir - red)/(nir + 2.4 * red + 1))$	Modificación del índice de Vegetación Mejorado (EVI) que solo utiliza NIR y Red, obviando la	X	X	X	X	X										

⁸ Cada producto calculado con los reductores estadísticos compone una banda del producto integrado.

⁹Compone todas las imágenes de una colección, utilizando una banda de calidad (evi2) como función de ordenación por píxel.

		banda azul.															
ndwi_gao	$(nir - swir)/(nir + swir)$	Índice de agua de diferencia normalizada (gao)	X	X	X	X				X		X	X				X
ndwi_mcfeters	$(green - nir)/(green + nir)$	Índice de agua de diferencia normalizada (mcfeters)	X			X											
gcvi	$(nir/green) - 1$	Relaciones entre bandas infrarrojo cercano y verde	X	X	X												
hallcover	$(-red * 0.017) - (nir * 0.007) - (swir2 * 0.079) + 5.22$	Índice espectral de cubierta terrestre	X														
pri	$(blue - green)/(blue + green)$	Índice de reflectancia fotoquímica (Photochemical Reflectance Index)	X	X													
savi	$(1 + L) * (nir - red)/(nir + red + 0,5)$	Índice de vegetación ajustada al suelo	X	X	X		X										
textG	$(\text{'median_green'}.entropy(\text{ee.Kernel.square}(\text{radius: 5})))$	Entropía en la banda Azul	X														
nuaci	$UNTL * (1 - \sqrt{(NDWI - aNDWI)^2 + (NDVI - aNDVI)^2 + (NDBI - aNDBI)^2})$	Índice Normalizado Compuesto de Áreas Urbanas	X														
ndsi	$(green - swir1)/(green + swir1)$	Índice Diferencial Normalizado de Nieve	X					X									
cai	$(swir2 / swir1)$	Índice de Alteración del Color	X					X	X			X					
gli	$((2 * green) - red - blue) / ((2 * green) + red + blue)$	Índice de hoja verde	X	X				X	X								
mndwi	$(green - nir) / (green + nir)$	Índice de agua de diferencia normalizada	X	X	X				X								
ndbi	$(swir1 - nir) / (swir1 + nir)$	Índice acumulado de diferencia normalizada	X	X				X	X								
ndgb	$(green - blue)$	Diferencia	X	X	X		X		X								

		/ (green + blue)	normalizada Verde Azul															
	ndmi	$(nir - swir1) / (nir + swir1)$	Índice Normalizado de la Diferencia de Humedad	X	X					X								
	mdmir	$(swir1 - swir2) / (swir1 + swir2)$	Índice de infrarrojo medio de diferencia normalizada	X		X		X	X	X								
	ndrb	$(red - blue) / (red + blue)$	Diferencia Normalizada Rojo Azul			X		X	X									
	ndsi2	$(swir1 - nir) / (swir1 + nir)$	Diferencia Normalizada de suelo 1	X	X	X				X	X							
Fracción MME¹⁰	gv		Abundancia fraccional de vegetación verde dentro del píxel	X				X	X									
	npv		Abundancia fraccional de vegetación no fotosintética dentro del píxel	X					X									
	soil		Abundancia fraccional de suelo dentro del píxel	X				X	X									
	shade	$100 - (gv + npv + soil + cloud)$	Abundancia fraccional de sombra dentro del píxel	X														
	snow		Abundancia fraccional de nieve dentro del píxel	X							X							
	cloud		Abundancia fraccional de nubes dentro del píxel	X														
Índice MEM	gvs	$gv / (gv + npv + soil + cloud)$	Vegetación verde normalizada por sombra	X	X	X			X									
	ndfi	$(gvs - (npv + soil)) / (gvs + (npv + soil))$	Índice de fracción de diferencia normalizada	X	X	X	X	X										
	sefi	$(gv+npv -soil) / (gv+npv + soil)$	Índice de fracción del ecosistema de sabana	X	X				X									

¹⁰ MME = Modelo de Mezcla Espectral

	wefi	$((gv+npv)-(soil+shade))/(gv+npv)+(soil+shade)$	Índice de fracciones del ecosistema de humedales			X	X	X									
	fns	$((gv+shade) - soil) / ((gv+shade) + soil)$	Índice basada en fracciones gv, shade y soil		X			X									
	ndfib	$GV-(NPV+Soil +Snow)/ CV+(NPV+Soil +Snow)$	Adaptación del NDFI para los Andes	X			X										
Variables estáticas y/o topográficas	shademas k2		Mapa de sombras														
	slppost		Pendiente Estratificada														
	altitude		Altitud														
	slope		Pendiente														
	latitude		Latitud														
	longitude		Longitud														
	HAND (Height Above the Nearest Drainage)	hand30_100 hand30_1000 hand30_5000 hand90_1000 water_HAND_0m water_HAND_10m water_HAND_1m water_HAND_2m water_HAND_5m	Índice- Altura por encima del drenaje más cercano	---													

3.3 Clasificación

3.3.1. Leyenda

La clasificación semi automatizada se desarrolló a través de la metodología basada en random forest. La colección mapea específicamente 20 clases: Bosque (ID 3), Bosque seco (ID 4), Manglar (ID 5), Bosque Inundable (ID 6), Zona pantanosa o pastizal inundable (ID 11), Pastizal / herbazal (ID 12), Matorral y otras formaciones no boscosas (ID 13), Pasto (ID 15), Agricultura (ID 18), Plantación forestal (ID 9), Palma aceitera (ID 35), Mosaico agropecuario (ID 21), Infraestructura (ID 24), Minería (ID 30), Salina (ID 32), Otra área sin vegetación (ID 25), Río, lago o laguna (ID 33), Acuicultura (ID 31) y Glaciar (ID 34); incluyendo el No Observado serían 20 clases.

Tabla 5. Leyenda general de cobertura y uso del suelo en la Colección 2.0

ID	Clase	Hexadecima l code	Color	Natural/antrópico
1	1. Formación boscosa	#1f8d49		
3	1.1. Bosque	#1f8d49		Natural
4	1.2. Bosque seco	#7dc975		Natural
5	1.3. Manglar	#04381d		Natural
6	1.4. Bosque inundable	#026975		Natural
10	2. Formación natural no boscosa	#d6bc74		
11	2.1. Zona pantanosa o pastizal inundable	#519799		Natural
12	2.2. Pastizal / herbazal	#d6bc74		Natural
32	2.3. Salina	#fc8114		Natural
13	2.4. Matorral y otras formaciones no boscosas	#d89f5c		Natural
14	3. Área agropecuaria	#ffefc3		
15	3.1. Pasto	#edde8e		Antrópico
18	3.2. Agricultura	#e974ed		Antrópico
9	3.3. Plantación forestal	#7a5900		Antrópico
35	3.4. Palma aceitera	#9065d0		Antrópico
21	3.5. Mosaico agropecuario	#ffefc3		Antrópico
22	4. Área sin vegetación	#d4271e		
24	4.1. Infraestructura	#d4271e		Antrópico
30	4.2. Minería	#9c0027		Antrópico
25	4.3. Otra área sin vegetación	#db4d4f		Natural
26	5. Cuerpo de agua	#2532e4		
33	5.1. Río, lago u océano	#2532e4		Natural
31	5.2. Acuicultura	#091077		Antrópico
34	5.3. Glaciar	#93dfe6		Natural
27	6. No observado	#ffffff		No definido

Fuente: Elaboración propia

Como parte del proceso de descripción de las clases para cada país, se elaboró una tabla de correspondencia entre las clases de la leyenda MapBiomias y el Mapa de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015). También se realizó un taller entre distintas entidades estatales y/o educativas que permitió el intercambio de información y la aprobación de la leyenda. Con ello se presenta la siguiente **memoria descriptiva y criterios de interpretación (Tabla 6)** de cada clase de la leyenda MapBiomias Amazonía, dentro del ámbito de las coberturas del Perú.

Tabla 6. Memoria descriptiva para la leyenda MapBiomias Perú

MapBiomias CLASE (ID)	Bioma	Homologación MAPA DE COBERTURA VEGETAL (MINAM, 2015)	Descripción de la clase	Criterios de interpretación (RGB 543)
Bosque (ID:3)	B. S. Ecuatorial	Bosque subhúmedo de montaña	Pequeña extensión de bosque en la parte alta de Tumbes entre 600 y 1200 msnm. La vegetación está conformada por una mixtura de especies típicas del bosque seco con inclusión de algunas especies propias del bosque amazónico, donde predominan las especies perennifolias sobre las caducifolias.	Alta rugosidad; tonalidad verde oscura en épocas húmedas o morado oscuro en épocas secas;
	Andes	Bosques relictos; Bosques secos de montaña; Bosques subhúmedo de montaña;	Incluye dos tipos de bosque: los bosques muy húmedos de (norte del país) y los relictos (centro y sur). Los primeros son siempre verdes, densos y con árboles que alcanzan hasta los 20 m. Los relictos se caracterizan por árboles dispersos, de porte bajo (hasta 10 m) y se ubican en laderas montañosas casi inaccesibles entre los 2800 y 3800 msnm o en zonas límites de actividad agrícola.	- En bosques ralos: baja rugosidad; tonalidad verde clara; - En bosques semidecuidos: rugosidad media; tonos verde-morado.
	Amazonía	Bosques semidecuidos de montaña; Bosques basimontanos y montanos; Plantación forestal Bosques de terrazas bajas y altas; Vegetación esclerófila de arena blanca (varillal); Bosques de colinas altas y bajas; Pacales; Plantación forestal	Incluye bosque denso, con follaje perenne o semidecuidos, de porte predominantemente arbóreo que puede alcanzar los 45 m de altura en la zona baja oriental (hasta los 500 msnm) y va disminuyendo en altura conforme la altitud alcanza los 3800 msnm. Ubicados en terrazas, colinas y montañas. Incluye bosques con paca y pacales puros; así como plantaciones forestales. Excluye los bosques densos sometidos a inundaciones permanentes o estacionales.	- En bosques densos: alta rugosidad; tonalidad verde oscura; - En bosques ralos: baja rugosidad; tonalidad verde clara; - En bosques semidecuidos: rugosidad media; tonos verde-morado.
Bosque seco (ID: 4)	B. S. Ecuatorial	Bosque seco tipo sabana; Bosque seco ribereño; Bosque seco de piedemonte; Bosque seco de lomada ; Bosque seco de colina baja; Bosque seco de colina alta; Bosque seco de montaña	Cobertura arbórea de porte pequeño, generalmente caducifolia con estrato inferior arbustivo-herbáceo. Incluye bosques secos tipo sabana dominado por árboles tipo “algarrobo” (5-8m de altura), ubicados desde próximo al nivel del mar hasta los 800 msnm. También incluye bosques secos de colina y montaña, de formación semi-densa con altura de dosel hasta 12 m, y que abarcan una altitud entre los 400 y 2000 msnm.	- En bosques ralos de sabana: baja rugosidad; tonalidad rosado-morado ; - En bosques semi-densos de colina y montaña: alta rugosidad; tonalidad verde en épocas húmedas o morado oscuro en épocas secas;
	Desierto costero	Bosque seco ribereño	Cobertura boscosa que se ubica en las zonas aledañas a los cauces de agua., dominado por árboles tipo “algarrobo” (hasta 12 m de alto) de forma densa debido a las mejores condiciones de humedad.	- Zonas cercanas al agua con tonalidad verde intenso hacia verde oscuro-morado.
	Andes	Sabanas xéricas interandinas; Bosques xéricos interandinos;	Incluye bosques secos interandinos que son árboles dispersos, se distribuyen en profundos valles interandinos y en sus laderas. Son de porte arbustivo bajo (< 8 m de alto) y de follaje caducifolio durante el periodo seco.	- Bosques ralos, varía de textura y color según la latitud. Al norte tienden al tono marrón-verde, hacia al centro y sur, tonos marrón-rosado .

Manglar (ID: 5)	B. S. Ecuatorial	Manglar	Cobertura natural arbórea densa de hoja perenne que crece en aguas costeras salinas o salobres.	- Características uniformes de textura y color, de verde oscuro a verde claro.
Bosque inundable (ID:6)	Amazonía	Bosque inundable de palmeras (aguajal); Bosques basimontanos y de terrazas inundables; Bosque de llanura meándrica	Cobertura boscosa ubicada en la gran llanura aluvial y ocupan las llanuras y terrazas periódicamente o permanentemente inundadas. Crece en suelos de pobre drenaje y abundante materia orgánica con lenta descomposición. En este bosque dominan palmeras, acompañadas de árboles como “renacales” y “pungales”.	- Presentan características uniformes de textura y color, tienden a verde-morado.
Zona pantanosa o pastizal inundable (ID: 11)	B. S. Ecuatorial Desierto costero	Albúfera; Estero; Estuario de virillá; Humedal costero	Cobertura vegetal a lo largo del litoral costero, donde predomina vegetación herbazal sujeta a inundación de forma periódica, por agua dulce, salobre o salada. Incluye zonas pantanosas inundadas temporalmente por el fenómeno del Niño.	- Variaciones anuales de extensión, colores varían según humedad entre verde brillante-morado-marrón.
	Andes	Bofedal	Vegetación siempre verde, compacta y almohadillada, ubicada en los fondos de valles fluvio-glaciales, conos volcánicos y planicies o terrazas altoandinas. Se encuentran a partir de los 3800 msnm, sobre suelos permanentemente inundados y de mal drenaje.	- Áreas húmedas naturales cerca a cuerpos de agua (lagunas). - Variaciones anual de extensión. - Tienden a verde-morado.
	Amazonía	Herbazal Hidrofítico; Sabana hidrofítica de palmeras	Cobertura vegetal ubicada en la llanura aluvial inundable, como herbazales y sabanas hidrofíticas. Caracterizada por suelos de sustratos hidromórficos, los cuales se inundan por un largo periodo del año y que al descender el nivel de inundación, aflora un denso tapiz herbáceo de porte bajo.	- Áreas húmedas naturales con variaciones de borde y color (presencia de sedimentos); Cercanía a cursos de agua.
Pastizal / herbazal (ID: 12)	Amazonía	Jalca; Páramo; Pajonal andino	Pajonales gramíneos propios de las laderas abiertas y expuestas a vientos del páramo y la jalca, zonas transitorias hacia los Andes de fuertes gradientes de humedad y temperatura	- Color rosa intenso - Rugosidad baja - Diferencia de color por período (seco: fucsia / húmedo: verde).
	Andes	Pajonal andino	Pajonales compuestos por vigorosas gramíneas y césped de puna de poca altura o casi al raz del suelo. Esta cobertura se encuentra aproximadamente entre 3000 y 4800 msnm.	Rosado intenso, se confunde con suelo desnudo (pasto seco). Cerca a zona de bofedales es un verde muy claro o amarillo.
Salina (ID: 32)	Desierto costero	Desierto costero	Áreas naturales estacionarias y producto de la acumulación de sales debido a procesos de evaporación y/o infiltración de agua de mar en el litoral.	- Tonos celestes o turquesas
Matorral y otras formaciones no boscosas (ID: 13)	B.S. Ecuatorial Desierto costero Andes Amazonía	Cardonal; Loma; Matorrales esclerófilos y arbustivos; Tillandsial	Cobertura vegetal con predominancia de herbáceas y arbustos, desde aproximadamente los 200 hasta 3800 msnm, hasta el límite de los pajonales naturales. Se distinguen tres subtipos de matorral según las condiciones climáticas: Los matorrales a partir de 300 msnm (valles y colinas en el norte del país) son influenciados por la condición de humedad del suelo árido; los de piso medio y alto, entre los 2500-3800 msnm, están dominados por arbustos caducifolios y perennifolios en condiciones subhúmedas; y los del nivel superior, entre los 2000-3500 msnm (centro del país y valles interandinos), los 3500-3800 msnm (centro occidental) y entre los 3600 y 3800 (sur del	- Rugosidad baja o media. Color rosa intenso. Puede tener diferencia de color en períodos secos y lluviosos. Baja densidad de árboles o solo arbustos pequeños. - Lomas presentan colores oscuros de tonalidad morada-guinda-marrón-verde con rugosidad media. - Tillandsial presenta colores morados en zonas desérticas..

			país), donde existe mejor condición de humedad y menores valores de temperatura. Las lomas conforman un tipo especial de vegetación estacional (se forma debido a las densas neblinas invernales) con diferentes coberturas: arbórea, arbustiva y herbácea. Se ubican desde los 100 hasta los 1000 msnm. El tillandsial se ubica a lo largo de toda la línea costera de forma dispersa, con mayor concentración en el sur. Es una formación vegetal mono genérica, compuesta por plantas rastreras del género <i>Tillandsia</i> .	
Pasto (ID: 15)	Amazonía Andes	Área de no bosque amazónico Agricultura costera y andina	Áreas de pasto, plantado o natural, vinculadas a la actividad pecuaria.	- En Amazonía baja presenta colores naranja y amarillo intenso. - En Amazonía alta y Andes presenta colores verdes bajos y tonos de amarillos, melon.
Agricultura (ID: 18)	B.S. Ecuatorial Desierto costero Andes Amazonía	Área de no bosque amazónico Agricultura costera y andina	Áreas donde la cobertura original ha sido modificada o reemplazada por cultivos anuales, temporales y perennes. Pueden estar activos o ser tierras en reposo. En el bioma B.S. Ecuatorial predomina el cultivo de arroz y cultivos de agroexportación (uva, arándano, entre otros). En el bioma Desierto costero predomina el cultivo de arroz, caña de azúcar, olivo (Tacna) y cultivos de agroexportación (uva, arándano, palto, entre otros). En el bioma Amazonía predominan cultivos de cereales, arroz y palma aceitera. En el bioma Andes predomina el cultivo de cereales, tubérculos, hortalizas, árboles frutales, paltas, ubicados en el fondo y laderas de valles interandinos.	- En B.S. Ecuatorial y Desierto costero predomina el color verde claro intenso, con colores mezclados de morado y diferentes tonos de verde, dependiendo del cultivo. - En Amazonía presenta colores de verdes claros intensos - En Andes de colores morados y verdes claros.
Plantación forestal (ID: 9)	Andes	Plantación forestal	Forestación de especies arbóreas exóticas con fines de uso y/o protección (pinos, eucaliptos, etc.)	- Color verde claro.
Palma aceitera (ID: 35)	Desierto costero Amazonía	Área de no bosque amazónico Agricultura costera y andina	Áreas donde la cobertura original ha sido modificada o reemplazada por cultivos permanentes de palma aceitera, principalmente de la especie <i>Elaeis guineensis</i> .	- Colores de verdes claros intensos de estructuras geométricas delimitadas.
Mosaico agropecuario (ID: 21)	B.S. Ecuatorial Desierto costero Andes Amazonía	Área de no bosque amazónico Agricultura costera y andina	Áreas de uso agropecuario, en las cuales no fue posible separar las clases agricultura y pasto. En los biomas B.S. Ecuatorial y Desierto costero predominan los cultivos de cereales, hortalizas y frutales. Además incluye áreas verdes en zonas urbanas. En el bioma Amazonía predomina el cambio de uso hacia la ganadería y cultivos de cereales y palma aceitera. En el bioma Andes predomina la ganadería y el cultivo de cereales, tubérculos y hortalizas, ubicados en el fondo y laderas de valles interandinos.	- Presentan colores mezclados de fucsia, guinda y verde con tonos claros. - Plantaciones agroindustriales de color verde claro similar a las purmas y bosques secundarios jóvenes. - Tamaño pequeño.
Infraestructura (ID: 24)	B.S. Ecuatorial	Área urbana; Infraestructura	Esta unidad está constituida por los espacios cubiertos por infraestructura urbana y todas aquellas áreas verdes y vías	- Rosado intenso. En algunos casos blanco (infraestructura reflectiva).

	Desierto costero Andes Amazonía		de comunicación asociadas con ellas, que configuran un sistema urbano. Excluye infraestructura rural de pequeña escala que no es percibida por la resolución de la imagen.	
Minería (ID: 30)	B.S. Ecuatorial Desierto costero Andes Amazonía	Centro minero; área de no bosque amazónico	Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales de la actividad minera a tajo abierto y minería fluvial.	- Presentan colores fucsia, guinda y morado con tonos intensos. Así como cuerpos de agua turquesas (extracción de sal).
Otra área sin vegetación (ID: 25)	B.S. Ecuatorial Desierto costero Andes Amazonía	Área altoandina con escasa y sin vegetación; Banco de arena; Desierto costero	Contempla áreas de poca o nula vegetación natural, como suelos arenosos o con afloramientos rocosos que cubren áreas extensas en el bioma Desierto costero, expandiéndose desde el nivel del mar hasta los 800 (norte), 1800 (centro) y 2500 msnm (sur). También incluye áreas de origen antrópico, tales como: Infraestructura urbana y vial; suelos expuestos por extracción forestal o minera y deslizamientos naturales; áreas quemadas; y coberturas no fotosintéticas herbáceas de pastos naturales o cultivados.	- Rosado-morado en diferentes tonalidades, incluyendo áreas de color blanco en zonas más secas. Variación en rugosidad.
Río, lago u océano (ID: 33)	B.S. Ecuatorial Desierto costero Andes Amazonía	Lagunas, lagos y cochas Río	Es cualquier extensión de agua que se encuentra en la superficie terrestre ya sean naturales como artificiales). Comprende ríos, lagos, represas, depósitos y otros cuerpos de agua.	- Dependiendo del contenido de sedimentos y la profundidad de la fuente podrían encontrarse de color negro, azul oscuro o azul claro.
Acuicultura (ID: 31)	B.S. Ecuatorial	Lagunas, lagos y cochas	Cuerpos de agua artificiales destinados a la cría de langostinos con agua marina. Esta cobertura se conforma por una serie de piscinas adyacentes por lo que se caracterizan por contar con patrón geométrico regular.	- Típicamente de color negro, pero dependiendo del momento de uso podrían presentar también diferentes tonos de azul o en años sin uso de color rosado.
Glaciar (ID: 34)	Andes	Glaciar	Cobertura de hielo y/o nieve que se genera en la Cordillera de los Andes a partir de los 4800 hasta los 6768 msnm. Es una gran masa de hielo producto de la acumulación, compactación y recristalización de la nieve por miles de años. Es la principal fuente de recursos hídricos para las cuencas hidrográficas del país.	- Tonos celestes o turquesas

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Regiones de clasificación

Para efectos de facilitar el mapeo de la diversidad de paisajes comprendidos en el área de estudio, se definieron cincuenta y nueve (59) regiones de mapeo o clasificación. Cada región fue trabajada independientemente para cada año de la serie temporal.

Las regiones fueron definidas siguiendo criterios ecosistémicos y ocurrencia de intervención antropogénica, basados en mapas de referencia como los mencionados en el apartado '*Otras iniciativas nacionales de mapeo*'. Las regiones resultantes se presentan en la figura 7 y se detallan en la tabla 7.

Tabla 7. Regiones de clasificación definidas en el marco del proyecto MapBiomias Perú

	Región de mosaico	Códigos	Motivo de separación
1	Región 701	70101	Zona norte de transición con intervención media, alrededor de Cajamarca
2		70102	Zona norte de intervención media alrededor de Amazonas
3		70103	Zona norte de poca intervención alrededor del Amazonas
4		70104	Zona norte de poca intervención alrededor de Alto Mayo y Colán
5		70105	Zona central de alta intervención a lo largo de San Martín, Huánuco, Pasco y Junín
6		70106	Zona central de transición con poca intervención. San Martín, Huánuco y Pasco
7		70107	Zona central de poca intervención y muchos deslizamientos
8		70108	Zona central de transición con poca intervención en Junín
9		70109	Zona central de alta intervención en Junín
10		70110	Zona central de intervención media en Pasco
11		70111	Zona central de transición con alta intervención
12		70112	Zona central de transición con poca intervención alrededor de Otishi
13		70113	Zona sur de alta intervención alrededor de Quincemil y Pillcopata
14		70114	Zona sur de poca intervención alrededor del Manu y Bahuaja Sonene
15		70115	Zona sur de transición con alta intervención en Puno
16	Región 702	70201	Zona norte de poca intervención alrededor del río Putumayo
17		70202	Zona norte de intervención media alrededor de ríos Amazonas y Nanay
18		70203	Zona norte de poca intervención alrededor del Pastaza y Pacaya Samiria
19		70204	Zona norte de alta intervención en Yurimaguas
20		70205	Zona central de poca intervención por Sierra del Divisor
21		70206	Zona central de poca intervención con muchos deslizamientos
22		70207	Zona central de alta intervención Pachitea
23		70208	Zona central de poca intervención alrededor del Imiria
24		70209	Zona central de alta intervención en Ucayali
25		70210	Zona sur de poca intervención cerca al Purús
26		70211	Zona sur de alta intervención en alrededor de Tambopata
27		70212	Zona norte de vegetación no boscosa en continuidad con Ecuador.
28	Región 703	70301	Zona centro norte de la vertiente del atlántico sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
29		70302	Zona centro de la vertiente del atlántico sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
30		70303	Zona centro sur de la vertiente del atlántico sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
31		70304	Zona sur sobre de la vertiente del Titicaca (este) sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
32		70305	Zona norte de la vertiente del atlántico, bosques húmedos con intervención.
33		70306	Zona centro norte de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.
34		70307	Zona centro de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.

35		70308	Zona sur de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.
36		70309	Zona sur de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.
37		70310	Zona norte de la vertiente del atlántico de bosques secos y montes espinosos
38		70311	Zona norte de la vertiente del atlántico que combina bosques húmedos, matorrales y una fuerte intervención
39		70312	Zona centro-sur de la vertiente del atlántico, bosques secos y matorrales
40		70313	Zona sur de la vertiente del atlántico, bosques secos y estepas espinosas
41		70314	Zona norte de de la vertiente del atlántico bosques húmedos andinos en continuidad con Ecuador
<hr/>			
42	Región 704	70401	Zona centro norte sobre la vertiente del pacífico, sobre los 800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
43		70402	Zona centro de la vertiente del pacífico sobre los 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
44		70403	Zona sur sobre de la vertiente del Titicaca (oeste) sobre los 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
45		70404	Zona sur de la vertiente del pacífico debajo de los 3800 msnm aprox. Colinda con la costa (Tacna, Moquegua, Arequipa).
46		70405	Zona norte de la vertiente del pacífico, presencia de bosques secos, colinda con el Bosque seco Ecuatorial.
47		70406	Zona norte de la vertiente del pacífico, zona de regular intervención agropecuaria.
48		70407	Zona centro de la vertiente del pacífico debajo de los 3800 msnm aprox.
49		70408	Zona centro sur de la vertiente del pacífico debajo de los 3800 msnm aprox.
<hr/>			
50	Región 705	70501	Zona norte del litoral límite con Ecuador con presencia de manglar y bosques secos.
51		70502	Zona norte límite con Ecuador con presencia de bosque húmedo tropical de Tumbes.
52		70503	Zona norte del litoral con presencia de bosques secos y con alta intervención urbana y agrícola.
53		70504	Desierto de Sechura con presencia de lagunas, salinas y humedales que surgen estacionalmente a partir de los impactos temporales por el fenómeno del Niño sobre la zona.
54		70505	Zona límite con Ecuador con presencia de bosques secos y regular intervención agropecuaria.
55		70506	Zona de transición de bosque seco hacia la parte andina, con regular intervención agropecuaria.
56		70507	Zona centro-norte del litoral, presencia esporádica de bosques secos y alta intervención agrícola
57		70508	Zona central del litoral, poca vegetación natural pero alta intervención urbana y agrícola.
58		70509	Zona sur del litoral, poca vegetación natural pero alta intervención agrícola. Presencia de matorrales en zonas de transición hacia parte andina.
59		70510	Zona sur del litoral, poca vegetación natural pero alta intervención urbana y agrícola. Presencia de matorrales en zonas de transición hacia parte andina.

Fuente: Elaboración propia

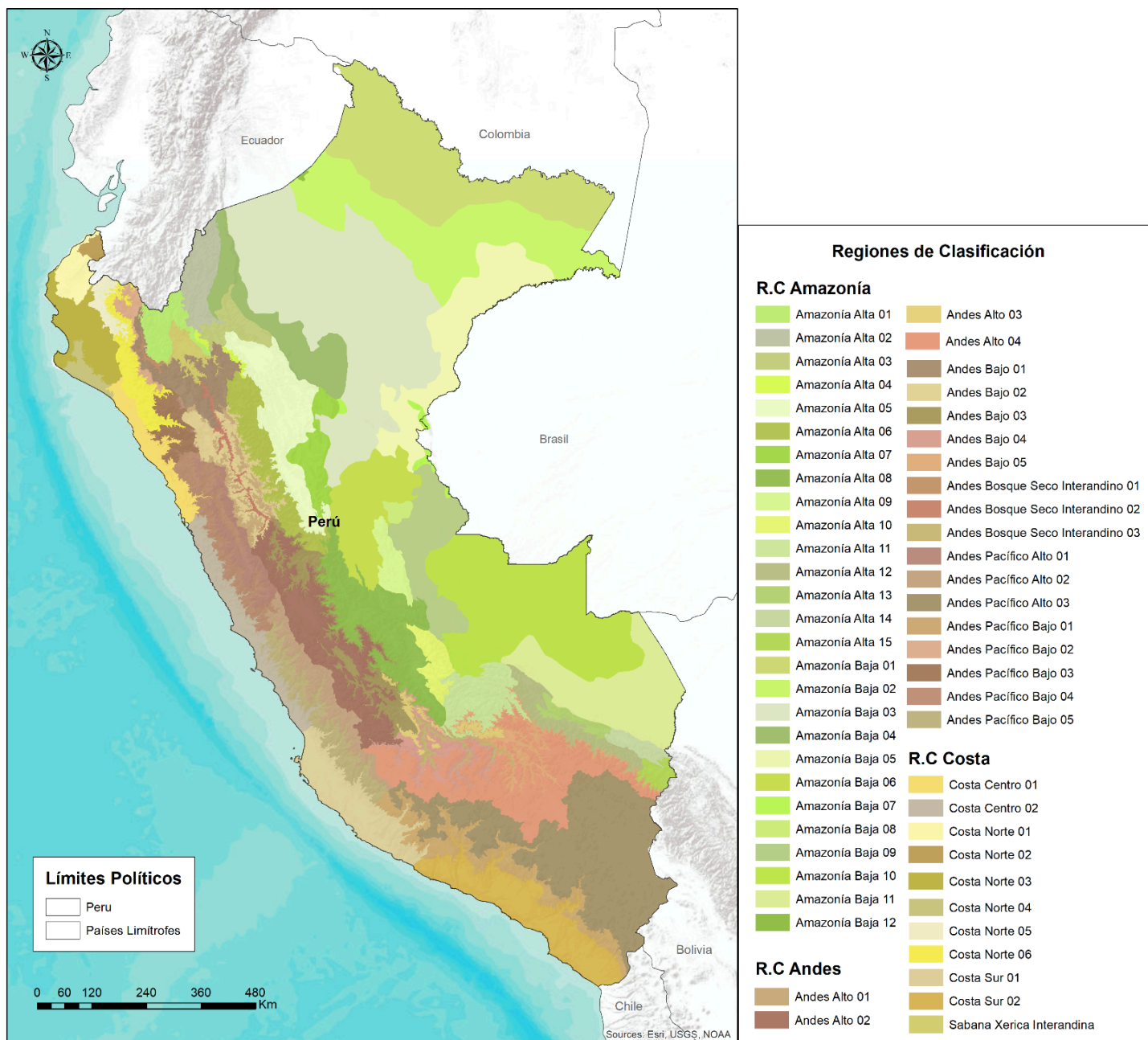


Figura 7. Mapa de regiones de clasificación para la Colección 2.0

3.3.3. Random Forest

*Random forest*¹¹ Es un método de clasificación que utiliza un algoritmo de aprendizaje de máquina (*machine learning*) y que reporta valores elevados de precisión, inclusive frente a escenarios complejos por su heterogeneidad. La base conceptual de Random Forest se basa en lo que Tumer y Ghosh (1996) encontraron al demostrar que el producto resultante de la combinación de múltiples clasificadores alcanza precisiones elevadas. Random forest utiliza datos de entrenamiento para construir múltiples árboles de decisión a partir de los cuales se asigna una clase a cada píxel. Random Forest ha ganado importancia en los últimos años, debido a su robustez frente a ruidos y valores atípicos. El algoritmo Random Forest forma parte del paquete de clasificadores de *machine learning* disponibles en la plataforma EE de Google. La metodología aplica un criterio de clasificación basado en píxeles.

Uno de los parámetros que Random Forest requiere es un número definido de árboles. Además requiere de una lista de variables (ver sección “Variables”), y contar con datos de entrenamiento (ver sección “Colecta espectral”). Para la Colección 2.0, el número de árboles varió según las necesidades y características de cada subregión de clasificación.

3.3.4. Colecta de muestras

El método de clasificación empleado fue el de random forest y utilizó fuentes de muestras distintas dependiendo de la región a clasificar.

Para las regiones de mosaico 701, 702 y 703 se realizó una colecta de muestras estables (misma clase a lo largo de la serie temporal), para cada una de las categorías de la leyenda que se buscaba mapear, a partir de los productos de MapBiomás Amazonía. A continuación se generó una clasificación preliminar para los 38 años. De este producto se vuelven a extraer muestras estables (por 38 años) para ser utilizadas como insumo de una nueva clasificación. El intérprete contribuye con la exclusión y/o inclusión de muestras para la mejora de las mismas.

Para las regiones de mosaico 704 y 705 se utilizaron las referencias nacionales disponibles. Se partió de la homologación de clases MapBiomás con las clases del mapa nacional de ecosistemas. Luego se hizo un sorteo aleatorio de muestras por clase dentro de cada región de clasificación, asumiendo una falsa estabilidad de estos puntos en los años de análisis, para lograr una clasificación preliminar. A partir de este resultado preliminar, y con la participación del intérprete, se excluyen las muestras inestables. Al igual que en el primer caso, el sorteo de puntos aleatorios está balanceado según la extensión de cada clase dentro de esa región de clasificación. Opcionalmente, se incluyó manualmente muestras adicionales a las cuales se les denominó *muestras complementarias*, empleando las herramientas para creación de geometrías directamente en el EE de Google.

La **tabla 8** presenta el resumen de muestras estables empleadas por región como insumo de los 40 a 60 árboles aplicados al clasificador.

Tabla 8. Parámetros utilizados en el clasificador Random Forest

Región de	Región de	Número de muestras estables exportadas	Número de árboles
-----------	-----------	--	-------------------

¹¹ Leo Breiman, “Random Forests,” *Machine Learning* 45, no. 1 (October 1, 2001): 5–32, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

mosaico	clasificación	Mínimo	Máximo	Random Forest
Región 701	70101 a 70115	Entre 800 y 3000	Entre 4000 y 5000	50
Región 702	70201 a 70211	Entre 500 y 2500	Entre 3000 y 5000	50
Región 703	70301 a 70314	Entre 300 y 500	Entre 4000 y 5000	50 y 60
Región 704	70401 a 70408	Entre 300 y 500	Entre 4000 y 5000	60
Región 705	70501 a 70510	Entre 100 y 500	Entre 3000 y 5000	50

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Temas transversales

Con las diferentes pruebas de clasificación se detectó una limitante en la diferenciación de ciertas clases, por lo que se tomó la decisión de clasificarlas por separado. A estas clases se les denomina Temas transversales y son mapeadas con algoritmos de clasificación binaria (clase de interés y clase “No observado”).

Esta estrategia fue aplicada, dentro del ámbito de Perú, para las clases:

- Manglar (ID = 5);
- Bosque inundable (ID = 6);
- Zona pantanosa o pastizal inundable (ID = 11);
- Pasto (ID = 15);
- Agricultura (ID = 18);
- Plantación forestal (ID = 9);
- Palma aceitera (ID = 35);
- Mosaico agropecuario (ID = 21);
- Infraestructura (ID = 24);
- Minería (ID = 30);
- Acuicultura (ID = 31);
- Río, Lago y Océano (ID = 33); y
- Glaciar (ID = 34)

Los detalles de cada metodología se encuentran en los apéndices de cada tema transversal.

3.4. Post clasificación

El resultado preliminar de clasificación fue sometido a la aplicación de una secuencia de filtros con el propósito de reducir inconsistencias temporales, reducir ruidos de clasificación menores a la unidad mínima de mapeo¹² y llenar vacíos de información. El proceso de post clasificación en esta colección no tiene un orden específico en la aplicación de los filtros, la sucesión de los mismos fue de acuerdo a la necesidad de cada región de clasificación e incluso se facilitó hacer uso repetido de los filtros; a la vez, se incluyeron excepciones dentro de cada filtro como exclusión de años y clases. Todas estas herramientas fueron implementadas en la plataforma EE de Google, empleando scripts escritos en Javascript. A continuación presentamos cada una de estas herramientas a mayor detalle. Una descripción de la adaptación de estos filtros por país puede ser encontrada en los apéndices nacionales.

¹² 5 píxeles = aproximadamente media hectárea

3.4.1 Llenado de vacíos de información (Gap Fill)

El área de estudio de MapBiomás Perú se caracteriza por ser una región que debido a sus condiciones atmosféricas y climáticas resultan en una presencia casi permanente de nubes a lo largo del año en varias partes del territorio. Como producto de ello, la composición de mosaicos anuales contienen píxeles sin observaciones o datos (*No data*).

El filtro de relleno de vacíos o Gap fill tiene la capacidad de reducir estos vacíos residuales al asignar valores a píxeles sin datos debido a ausencias de observación del satélite ("gaps").

Los píxeles en las clasificaciones sin datos ("gaps") son reemplazados por el valor temporalmente más cercano. Cuando un píxel "futuro" carece de valor (sin datos), el filtro de Gap fill le asigna el valor del año más próximo al mismo (**Figura 8**). Este filtro hace una revisión de la serie donde primero llena vacíos haciendo un barrido de "atrás hacia adelante", donde los vacíos son llenados con datos de los años próximos que anteceden al año sin datos. De haber vacíos remanentes, estos son llenados con datos del año más próximo precedente. Para cada píxel cuyo valor fue completado empleando este filtro, el cambio ha sido registrado en un archivo de metadata, donde se ha registrado el año (la historia) del píxel.

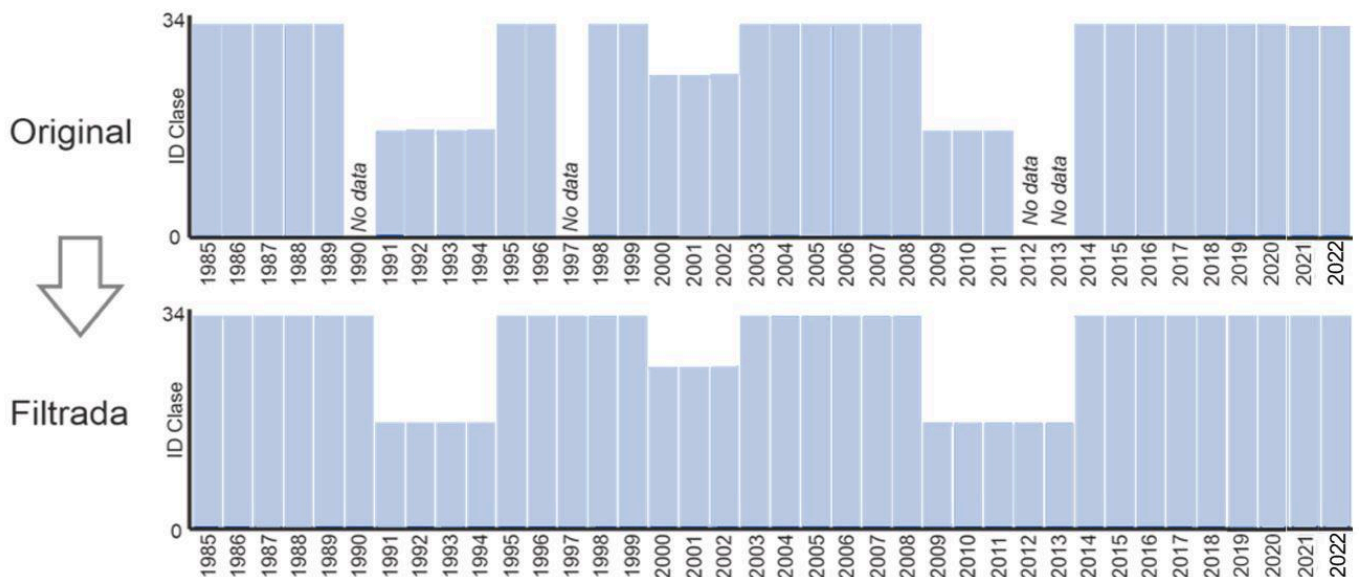


Figura 8. Funcionalidad del filtro de Gap Fill

3.4.2 Filtro Temporal

El filtro temporal 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 2020.

- 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 2022.

De este modo, los filtros temporales reducen vacíos de información e inconsistencias temporales o cambios que no son posibles o no están permitidos (**Figura 9**). Por ejemplo, si en tres años consecutivos un píxel tiene los siguientes valores: Formación Forestal > Área No Vegetada > Formación Forestal, el filtro corregirá el año intermedio. Este caso es un típico error de clasificación debido a la presencia de bruma de nubes en el mosaico del año intermedio.

La decisión de elegir el tamaño de la ventana temporal fue de cada país de acuerdo a las necesidades y características de sus coberturas y usos del suelo por subregión y/o tema transversal. Ver más detalles en los respectivos apéndices por país.

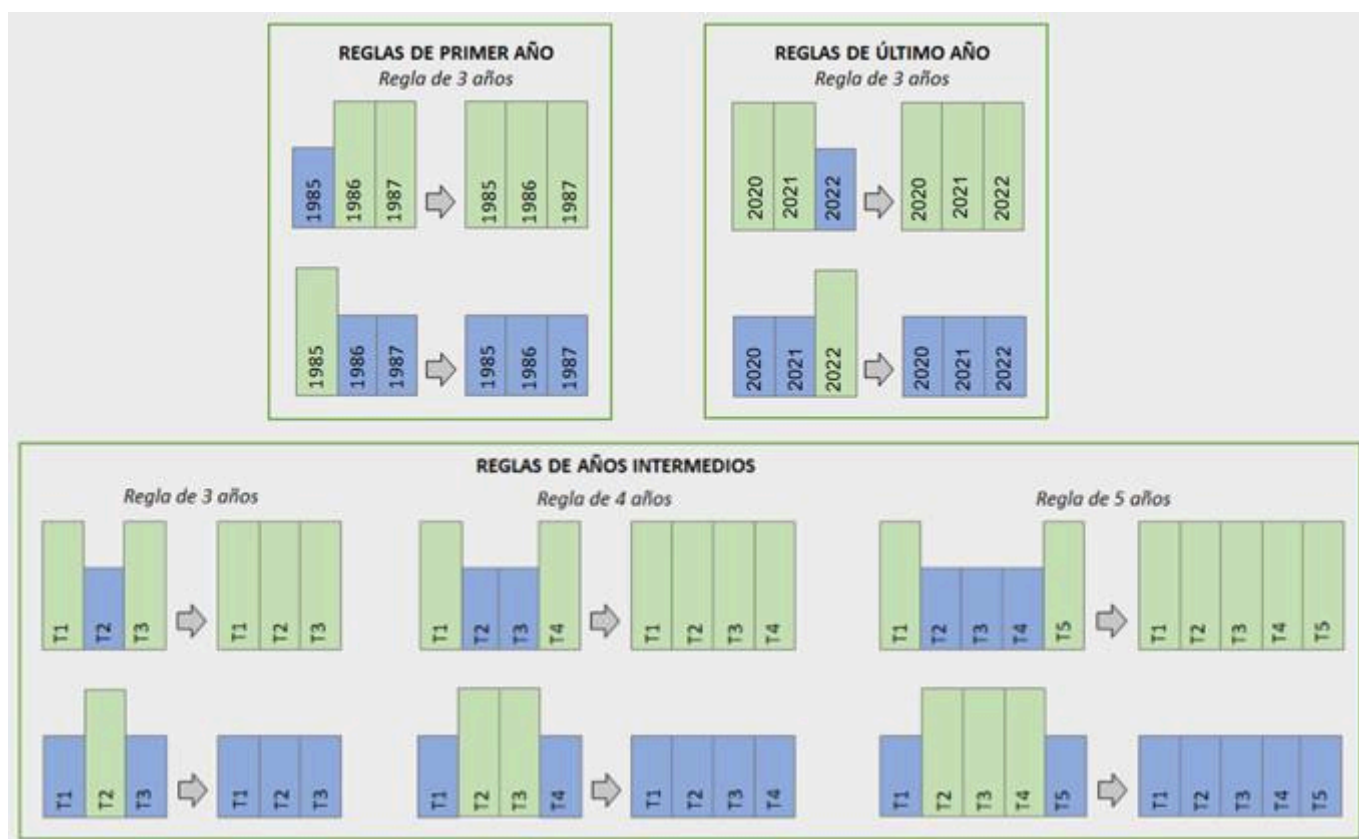


Figura 9. Funcionalidad del filtro temporal

3.4.3 Filtro Espacial

El filtro espacial se basa en la función “connectedPixelCount”, nativa del GEE. Esta función localiza píxeles conectados (vecinos) que comparten el mismo valor empleando una ventana móvil. Únicamente los píxeles que no comparten una conexión con un número predefinido de vecinos idénticos son considerados como píxeles aislados. En el caso de MapBiomás Amazonía, la unidad

mínima de mapeo fue definida como 0.5 ha (5 píxeles). Consecuentemente, se requirió que por lo menos cinco píxeles estén conectados para cumplir con el criterio de conexión mínima. De este modo, el filtro espacial allana (suaviza) diferencias locales al eliminar píxeles aislados o de borde menores a 0.5 ha, incrementando la consistencia espacial de las calificaciones (Figura 10). Cabe resaltar que algunas regiones de clasificación tuvieron excepciones de unidad mínima de 3 píxeles.

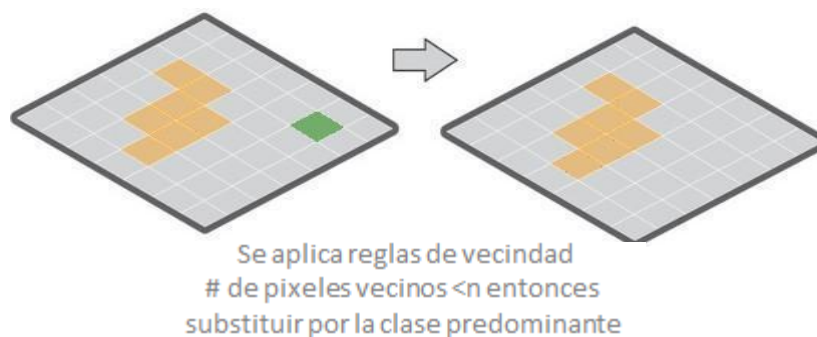


Figura 10. Funcionalidad del filtro espacial

3.4.4 Filtro de frecuencia

Este filtro toma en consideración la frecuencia de ocurrencia de clases naturales en toda la serie temporal. Por lo tanto, clases con ocurrencias menores a un porcentaje definido por el/la intérprete son reemplazadas por el valor de la clase más frecuente. Este mecanismo contribuye a reducir la oscilación temporal asociada a una clase natural, disminuyendo la frecuencia de falsos positivos y preservando trayectorias consolidadas (**Figura 11**). De acuerdo a las necesidades de cada subregión y/o tema transversal, se adecuaron los criterios del filtro por región de clasificación. Se descartó su aplicación en varias subregiones y/o países. Ver más detalles en los respectivos apéndices por país.

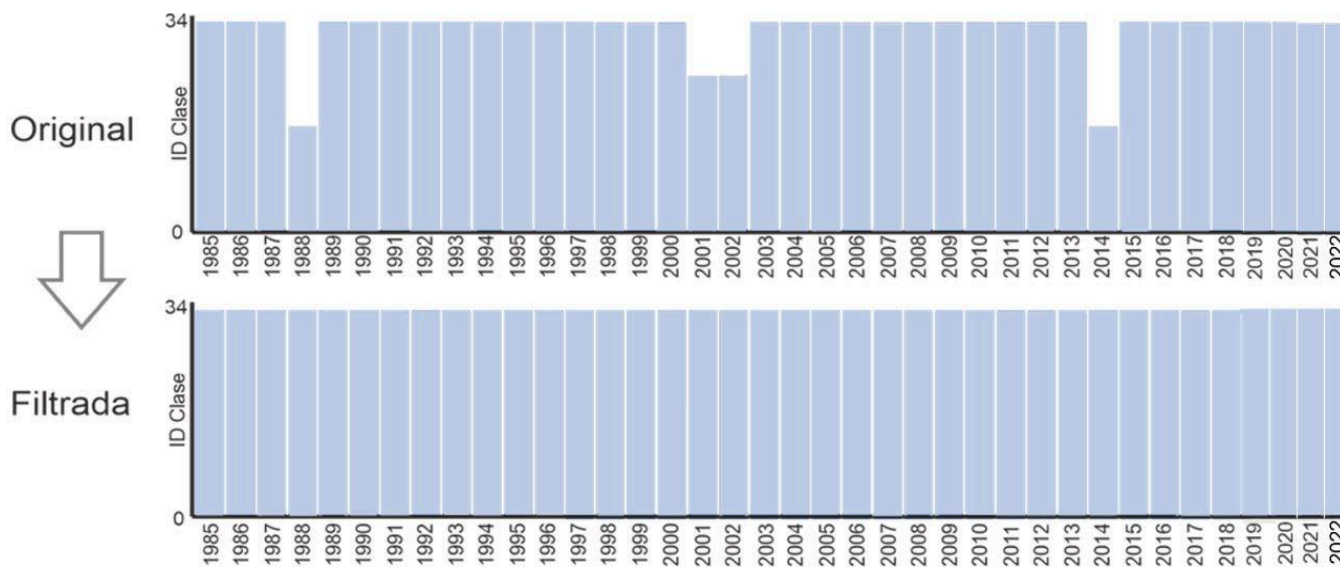


Figura 11. Funcionalidad del filtro de frecuencia

3.4.5 Filtro de incidencia

El filtro de incidencia estabiliza el valor de píxeles de clase natural que cambiaron de clase demasiadas veces a lo largo de la serie temporal de 38 años. Todos los píxeles que cambian más de una cantidad de veces definida por el usuario y que están conectados con por lo menos n píxeles, fueron reemplazados por el valor de la clase de moda de ese píxel. Esto reduce cambios a lo largo de los bordes de las clases y ayuda a estabilizar las transiciones erradas por ruidos. De acuerdo a las necesidades de cada subregión y/o tema transversal, se adecuaron los criterios del filtro (**Figura 12**). Se descartó su aplicación en varias subregiones y/o países. Ver más detalles en los respectivos apéndices por país.

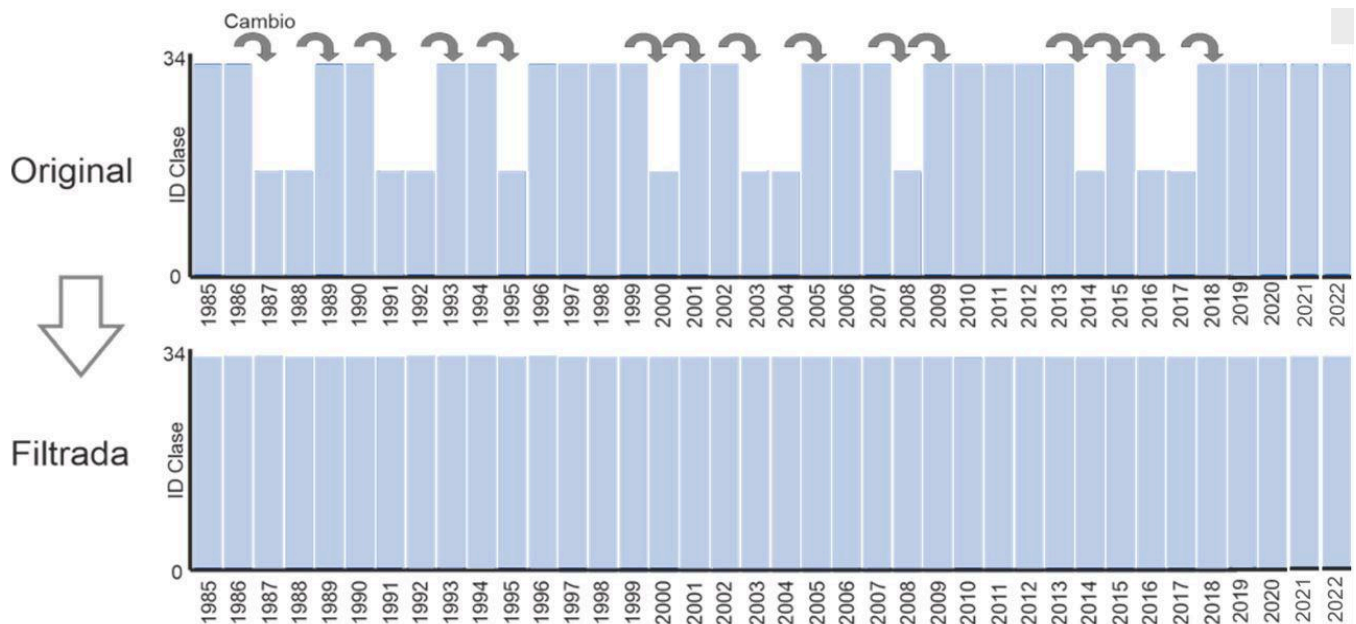


Figura 12. Funcionalidad del filtro de incidencia

3.4.6. Reclasificación

En casos muy particulares, donde no hubo continuidad de clase entre países, se optó por verificar con capas de referencia o información secundaria qué país tenía la correcta clasificación y así reclasificar la clase errónea y obtener una correcta continuidad entre biomas o países.

3.5. Integración

Los resultados de las clasificaciones anuales obtenidos para cada una de las regiones de clasificación constituyen sectores del mapa base general, los cuales requieren ser integrados en un único mapa regional anual con los temas transversales; siguiendo reglas de prevalencia o de orden de integración que definen la prevalencia de clases donde ocurra superposición de distintos valores.

La integración para Perú fue realizada por bioma y las reglas de prevalencia se muestran en la **Tabla 9**, las capas con un orden de prevalencia menor (números cercanos a uno (1)) son aquellas con una menor extensión de clasificación y que irán como capa superior en la integración. Estos órdenes de prevalencia varían según el bioma. El producto son mapas anuales de cobertura y uso por país.

Tabla 9. Reglas de prevalencia por bioma para la fase de integración

Clase	ID	Fuente	ORDEN DE PREVALENCIA DE CLASES POR BIOMA			
			Desierto Costero - Bosque Seco Ecuatorial	Andes Pacífico	Andes	Amazonía
Bosque	3	Base	13	9	9	15
Bosque seco	4	Base	12	10	10	14
Manglar	5	Base	6	-	-	-
Manglar	5	Transversal	6	-	-	-
Bosque Inundable	6	Base	-	-	-	13
Bosque Inundable	6	Transversal	-	-	-	13
Zona pantanosa o pastizal inundable	11	Base	7	11	11	6
Zona pantanosa o pastizal inundable	11	Transversal	7	-	-	6
Pastizal / herbazal	12	Base	-	12	12	5
Matorral y otras formaciones no boscosas	13	Base	14	8	8	12
Pasto	15	Base	-	6	6	9
Pasto	15	Transversal	10	6	6	9
Agricultura	18	Base	-	5	5	8
Agricultura	18	Transversal	9	5	5	8
Plantación forestal	9	Base	1	1	1	-
Plantación forestal	9	Transversal	1	-	1	-
Mosaico agropecuario	21	Base	11	7	7	10
Mosaico agropecuario	21	Transversal	11	7	7	-
Palma Aceitera	35	Base	8	-	-	-
Palma Aceitera	35	Transversal	8	-	-	7
Infraestructura	24	Transversal	3	2	2	1
Minería	30	Base	-	4	4	-
Minería	30	Transversal	5	4	4	3
Otra área sin vegetación	25	Base	15	14	14	11

Acuicultura	31	<i>Transversal</i>	2	-	-	-
Salinas	32	<i>General</i>	16	-	-	-
Río, Lago y Océano	33	Base	4	14	14	2
Río, Lago y Océano	33	<i>Transversal</i>	-	-	-	-
Glaciar	34	<i>Transversal</i>	-	13	13	-

Fuente: Elaboración propia

3.6 Mapas de transiciones

Con base a los mapas anuales de cobertura y uso integrados, se calculan las transiciones. Estas representan los cambios entre pares (2) de mapas, es decir, entre dos periodos. Los resultados están disponibles en la plataforma de MapBiomás Amazonía. Las transiciones son calculadas para diferentes periodos, como por ejemplo:

- (A) años consecutivos, anuales (por ejemplo, de 2001 a 2002, o de 2013 a 2014, etc)
- (B) períodos de cinco años (por ejemplo, 2000-2005)
- (C) períodos de diez años (por ejemplo, 2000-2010)
- (D) serie temporal completa (1985 - 2022)
- (E) períodos especiales (por ejemplo, 2000-2022)

3.7 Estadísticas

Con base a los mapas anuales de cobertura y uso integrados, se calculan las estadísticas de superficie en hectáreas (Ha) tanto zonales como anuales, de las clases mapeadas. Las unidades espaciales consideradas para el cálculo de las estadísticas son:

- País
- Bioma
- Departamento
- Provincia
- Distrito
- Cuenca hidrográfica
- Territorios indígenas
- Áreas naturales protegidas
- Región geográfica

4. Validación

La validación de mapas se realiza cada tres colecciones. A continuación se detalla el proceso de validación de la colección 1.0 de mapas anuales de cobertura y uso del Perú, que solo involucra el periodo 1985 - 2021.

El análisis de precisión evalúa la calidad de los mapas obtenidos. Este análisis ha sido realizado por una institución externa a los autores del mapa y contiene resultados de la precisión general del mapa por clases y por años y errores de omisión y comisión para cada una de las categorías clasificadas.

El análisis de precisión consideró un muestreo en el que la población (es decir, la cantidad total de píxeles) se dividió en dos dominios el Perú, dentro y fuera del límite RAISG. Dentro del límite RAISG,

fueron creados subdominios mediante la construcción de cartas¹³ agrupadas ([enlace ATBD](#)). Se construyeron 19 cartas agrupadas en región del Perú (**Figura 14**), cada una con un área de aproximadamente 70.000 km². Para cada dominios se realizó un muestreo aleatorio estratificado proporcional de una etapa, donde la estratificación se definió por la división en seis niveles de pendiente, y dentro de cada estrato se realizó un muestreo aleatorio simple de las unidades primarias de muestreo (píxel).

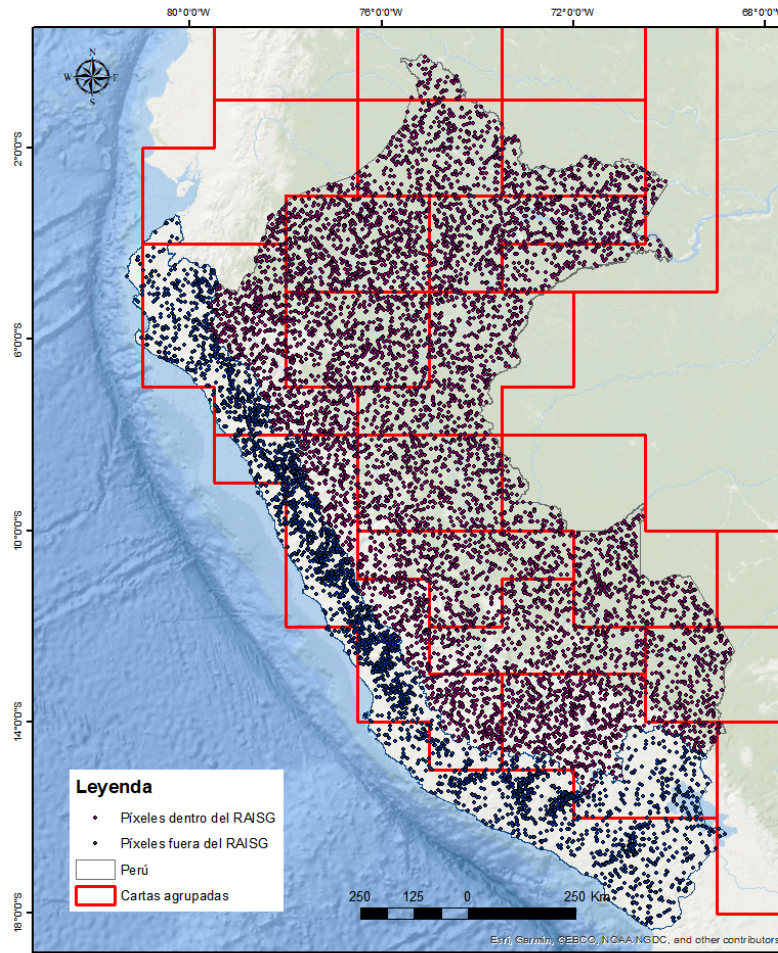


Figura 14. Distribución de puntos muestrales en dominios dentro y fuera del límite RAISG.

En cada dominio se controló la precisión y confiabilidad de las estimaciones de manera que el tamaño de la muestra garantizara un error estándar máximo del 5% en las cartas agrupadas y el 2,5% en el restante del Perú, con un nivel de confianza del 95%. En esta perspectiva, el error máximo esperado para toda el área de estudio es 0.5%. Considerando la viabilidad de tiempo e intérpretes para el proceso de inspección, se definió una cantidad mínima de 500 puntos para cada dominio. Para el cálculo del tamaño muestral también se consideró información de variabilidad y número de clases en cada carta agrupada. Así, se estableció el tamaño muestral como una función creciente en relación al número de clases y/o en relación a la variabilidad. La información de variabilidad se derivó de la varianza máxima de las clases de cobertura de uso del suelo y para considerar la información sobre el número de clases se aplicó la corrección de Bonferroni (Dunn, 1959)¹⁴, que corrige el valor

¹³ Correspondientes a las cartas del mapa Internacional del Mundo al Millón (CIM) a escalas 1: 250,000. Ver sección 3.1.1.

¹⁴ Olive Jean Dunn "Estimation of the Medians for Dependent Variables," The Annals of Mathematical Statistics, Ann. Math. Statist. 30(1), 192-197, (March, 1959)

cuantílico de la distribución normal estándar. El número total de muestras extraídas para toda el área de estudio correspondió a 7.839 píxeles dentro del límite RAISG y 3.450 fuera de RAISG.

A continuación se muestra la fórmula para el cálculo del tamaño muestral para cada dominio

$$n = \max_{p \cdot q} \left(\frac{N z_{\gamma}^2 pq}{(N - 1)E^2 + z_{\gamma}^2 pq} \right),$$

donde n es el tamaño de la muestra; N es el total de puntos; E es el máximo margen de error; $p = 1 - q$ es la proporción a estimar (para fuera de RAISG, se usó la proporción máxima de 0,25); z es el factor de la distribución normal estandarizada correspondiente al nivel de confianza ajustado $1 - g$ calculado mediante la corrección de Bonferroni, siendo $g = k - 1$ y $1 - g$ el nivel de confianza deseado; k es el número de clases de uso y cobertura del suelo (Cochran, 1977).¹⁵.

Cada muestra fue clasificada anualmente (es decir, 1985-2021) por 3 intérpretes independientes. En este estudio consideramos la clase con predominio de votos en cada observación. Este proceso involucró a un grupo de 14 personas y la validación de 18 clases presentes en la Colección 1.0.

Las inspecciones visuales se llevaron a cabo con la ayuda de la herramienta Temporal Visual Inspection (TVI - tvi.lapig.iesa.ufg.br), desarrollada por el Laboratorio de Procesamiento de Imágenes y Geoprocusamiento (Lapig) de la Universidad Federal de Goiás (UFG). Cada año evaluado, el intérprete tuvo acceso a dos imágenes Landsat (composición SWIR-NIR-RED). También se presentó información auxiliar, como coordenadas y región, además de la posibilidad de visualizar imágenes en alta resolución espacial desde el software Google Earth. Es de destacar que el uso de Google Earth se hizo para una mejor comprensión del contexto del paisaje y su respuesta espectral en imágenes Landsat.

También se realizaron reuniones entre el grupo de intérpretes y un grupo de expertos de cada país. Estas reuniones permitieron la creación de una clave de interpretación con diferentes criterios para interpretar las imágenes Landsat (e.g. color, tono, textura, homogeneidad, forma y contexto). Esta acción favoreció el conocimiento de diferentes tipos de coberturas de la región.

La evaluación de precisión se realizó utilizando métricas que comparan la clase asignada con la clase evaluada por los técnicos validadores en los datos de referencia. Las métricas utilizadas fueron: La precisión del usuario (error de comisión) que está asociadas con la confiabilidad de cada clase asignada, precisión del productor (error de omisión) que está asociadas con la sensibilidad del clasificador, es decir, la capacidad de distinguir correctamente una clase particular de otras y finalmente la precisión global que es la estimación de la proporción de corrección global de los clasificadores.

Los resultados de la validación se encuentran disponibles en la plataforma de MapBiomias.

¹⁵ William Gemmell Cochran, *Sampling Techniques*, 3d ed, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics (New York: Wiley, 1977).

5. Consideraciones prácticas y desafíos

La colección 2.0 de mapas anuales de cobertura y uso del suelo en el Perú es un instrumento de monitoreo estratégico que refleja la historia del país, en más de tres décadas. La producción de este volumen de información multianual ha dado lugar a aplicaciones para estimar tendencias en el cambio de la cobertura terrestre, así como para comprender los factores que modifican la dinámica de la cobertura terrestre.

Para el desarrollo de este proyecto, con un alcance espacial y temporal inédito, se utilizó una metodología estandarizada que es factible de ser replicada en otras áreas del planeta. El uso de las plataformas de trabajo en la nube de Google Earth Engine y la tecnología de código abierto se ha mostrado prometedor para la accesibilidad y el procesamiento de datos a gran escala.

A través del aprendizaje y la experiencia adquirida en la producción de la colección anterior, junto con el intercambio de ideas con los equipos de las diversas iniciativas de MapBiomás, fue posible lograr una mayor eficiencia en términos de tiempo y procesos. A partir del trabajo colaborativo y en red de un equipo multidisciplinario, fue posible llegar a una metodología ajustada a las necesidades particulares de cada territorio.

El uso del algoritmo Random Forest como clasificador, combinado con un protocolo de mapeo flexible, permite a cada país de las diversas iniciativas definir su espacio de características y muestras.

La aplicación de filtros de post clasificación permitió reducir los efectos asociados a la baja calidad y baja disponibilidad de imágenes de satélite que ocurren principalmente al inicio de la serie temporal. Además, la inserción de nuevos temas transversales integrados jerárquicamente hizo posible proporcionar mayor detalle temático en los mapas de uso y cobertura del suelo.

El siguiente paso de este proyecto es ampliar el nivel de detalle de leyenda, mayor precisión en el mapeo y el uso de nuevas tecnologías y herramientas de teledetección que permitan obtener un producto de mayor calidad.

6. Referencias

- Autoridad Nacional del Agua. sf. Mapa de Unidades Hidrográficas. Lima. Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/repositorio-de-mapas?page=11>
- Comunidad Andina. Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. 2009 <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-vegetacion-natural-remanente-andes-norte-centro>
- DGOTA-MINAM. Mapa Nacional de Ecosistemas. 2018 <http://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/>
- DGOTA-MINAM. Mapa de Ecorregiones del Perú. 2017 <http://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/>
- Fosnight, E. A., Shaw, J., Masek, J. G., and Roy, D. P. (2016). The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 185, 271-283.
- Google (2019, Marzo 01). Landat Collections. Accedido en <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat/>

- Google (2019, Marzo 01). Google Earth Engine API. Accedido en <https://developers.google.com/earth-engine/>
- Gorelick, Noel; Hancher, Matt; Dixon, Mike; Ilyushchenko, Simon; Thau, David; Moore, Rebecca. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 202, 18-27.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales - Oficina de Gestión Ambiental Transectorial, Evaluación e Información de Recursos Naturales. 2000. Mapa de regiones naturales del Perú. Lima. Perú.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. 2002. Mapa fisiográfico del Perú. Lima. Perú.
- Kalliola, R., Puhakka, M. y Danjoy, W. (ed.) (1993). Amazonía Peruana: Vegetación húmeda tropical en el llano subandino. Proyecto Amazonía Universidad de Turku-Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales.
- LAMPRECHT, H. 1990. Selvicultura en los trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas; posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Trad. de Antonio Carrillo. Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ). 335 pp.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. 2020. Superficie agrícola nacional oficial. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/index.php/normas>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. 2021. Monitoreo de cultivos de arroz. GEOMIDAGRI. <https://minagri-geoespacial.users.earthengine.app/view/monitoreoarrozv1>
- Ministerio del Ambiente. 2009. Mapa de humedales del Perú. Lima. Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/repositorio-de-mapas?page=11>
- Ministerio del Ambiente. 2015. Mapa de Cobertura Vegetal del Perú. Memoria Descriptiva - Perú. 108p. <https://sinia.minam.gob.pe/repositorio-de-mapas?page=11>
- Ministerio del Ambiente. 2022. Programa de Conservación de Bosques y Mitigación del Cambio Climático. Mapa de Bosque y no bosque 2000 Pérdida de bosque 2001 - 2021. Lima. Perú.
- Ministerio del Ambiente. 2018. Programa de Conservación de Bosques y Mitigación del Cambio Climático. Mapeo de los bosques estacionalmente secos y no bosque estacionalmente secos de la costa norte del Perú. Tumbes · Piura · Lambayeque. Memoria Descriptiva. http://www.bosques.gob.pe/archivo/Memoria-descriptiva_Bosques-secos-interiores-final.pdf
- Moat et al. 2020. Seeing through the clouds - Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile. Consulte el mapa en Earth Engine: <https://gstin.users.earthengine.app/view/fogoasis>. Consulte el artículo en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243421001756>
- Nature Server, IIAP, CDC-UNALM (2007). Sistemas ecológicos de la cuenca amazónica de Perú y Bolivia. Clasificación y mapeo. Lima: Nature Server, IIAP, CDC-UNALM.
- Olson, David; Dinerstein, Eric; Wikramanayake, Eric; Burgess, Neil; V. N. Powell, George; C. Underwood, Emma; A. D'amico, Jennifer; Itoua, Illanga; E. Strand, Holly; Morrison, John; J. Loucks, Colby; F. Allnutt, Thomas; Ricketts, Taylor; Kura, Yumiko; Lamoreux, John; W. Wettengel, Wesley; Hedao, Prashant ; Kassem, Kenneth. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*. Vol 51, No 11. 933-938.
- Programa Nacional de Conservación de Bosques y Mitigación del Cambio Climático. 2016. Rasters de uso y cambio de la tierra en Amazonía. Perú.
- Souza, Carlos; Roberts, Dar A.; Cochrane Mark A. (2005). Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 98, p329-343.

- Souza, Carlos; Siqueira, J.V.(2013). ImgTools: a software for optical remotely sensed data analysis. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 1571-1578.

7. Apéndices

Apéndice 1 - Transversal de manglar (a cargo de Solved)

Apéndice 2 - Transversal de cobertura inundable

Apéndice 3 - Transversal de usos agropecuarios

Apéndice 4 - Transversal de infraestructura

Apéndice 5 - Transversal de minería

Apéndice 6 - Transversal de cuerpos de agua

Apéndice 7 - Transversal de glaciár