

# PROTOCOLO METODOLÓGICO PARA LA DETECCIÓN DE LA PÉRDIDA DE BOSQUE



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente





## Índice

Índice.....	2
Glosario .....	3
1. Antecedentes .....	4
2. Introducción .....	5
3. Área de estudio.....	6
4. Datos satelitales.....	6
4.1 Landsat-5 TM (Thematic Mapper) .....	6
4.2 Landsat-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) .....	7
4.3 Landsat-8 OLI (Operational Land Imager) .....	7
4.4 Niveles de procesamiento .....	9
5. Metodología .....	10
5.1 Detección de la pérdida anual de bosques periodo 2001 – 2016.....	10
Pre-procesamiento .....	10
Clasificación de pérdida de bosque .....	11
Post-clasificación .....	13
5.2 Detección de la pérdida anual de bosques periodo 2017 - 2019 .....	16
Pre-procesamiento .....	16
Clasificación de pérdida de bosque .....	16
Post-clasificación .....	20
5.3 Comparación de metodologías .....	23
5.4 Evaluación de la exactitud .....	24
6. Resultados y discusión .....	24
7. Conclusiones y recomendaciones .....	26
8. Referencias .....	27



## Glosario

**Deforestación**, es la conversión del bosque a otro tipo de uso territorial, como la agricultura, pastizales, minería, etc.

**Degradación de bosques**, cambios que afectan negativamente la estructura y funcionamiento de los bosques, reduciendo la capacidad del bosque para brindar productos y/o servicios ecosistémicos.

**Endmembers**, son firmas espectrales que representan la mayor pureza de determinado material, por ejemplo, bosque, suelo, agua.

**Imagen de satélite**, es la representación visual de la información capturada por el sensor montado en un satélite artificial.

**Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**, es un índice de vegetación que se calcula con la siguiente expresión:  $(NIR - Rojo) / (NIR + Rojo)$  y sirve para calcular la salud de la vegetación.

**Métricas**, conjunto de datos numéricos derivados de las imágenes satelitales

**Muestras de entrenamiento**, son áreas definidas por el usuario y/o experto que son usadas por el algoritmo de clasificación para que este encuentre áreas similares en toda la imagen satelital.

**Pixel**, Unidad mínima de una imagen digital.

**Proyección**, la proyección cartográfica es un sistema de representación gráfica que establece una relación ordenada de los puntos de la curvatura de la tierra en una superficie plana (mapa, imagen satelital, otros)

**Sensor multiespectral**, es un instrumento que tiene la habilidad de captar información de un objeto en regiones específicas del espectro electromagnético. La imagen que forman no poseen un número mayor de 14 bandas espectrales.

**Reflectancia TOA**, es la relación entre la radiación incidente sobre el pixel y las propiedades reflectivas de los elementos que están conformando el pixel (no considera el efecto atmosférico).

**Resolución espacial**, se refiere al tamaño de pixeles que componen la imagen de satélite, mientras más pequeño es el pixel mayor es la resolución espacial.

**Resolución espectral**, es el número y ancho de bandas que puede registrar el sensor.

**Reproyección**, es el proceso de transformar o cambiar la proyección de un mapa o imagen satelital.



## 1. Antecedentes

Los esfuerzos para determinar el área deforestada en la Amazonía peruana usando imágenes satelitales y/o fotografías datan desde la década del 70. Específicamente en el Año 1975, el Mapa Forestal del Perú [1] reportó un área deforestada de 4 500 000 ha.

El instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), publicó el Mapa Forestal del Perú en 1995 [2], donde se cuantificó que la superficie deforestada fue de 6 948 237 ha, este dato fue obtenido mediante la interpretación visual de imágenes Landsat-MSS, Landsat-TM (Thematic Mapper) e imágenes de radar de vista lateral SLAR. En el año 1996, INRENA publicó el estudio de Monitoreo de la Deforestación en la Amazonia Peruana [3], donde se cuantificó que la superficie deforestada para el año 1985 fue de 5 642 447 ha. En el año 2000, INRENA elaboró el Mapa de Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra del Perú [4], donde se cuantificó que el área deforestada para el año de 1990 fue de 5 676 236 ha. En el año 2005, INRENA cuantificó que la superficie deforestada para el año 2000 fue de 7 172 553 ha [5]. En este estudio se usaron imágenes Landsat-TM y Landsat-ETM+ (Enhanced Thematic Mapper).

En el año 2009, El Ministerio del Ambiente publicó la versión actualizada del Mapa de Deforestación de la Amazonia Peruana - 2000 [6] previamente publicado por INRENA [5]. Posteriormente en el año 2014, la Dirección General de Ordenamiento Territorial (DGOT) del MINAM cuantificó la deforestación ocurrida para los años 2000 – 2005 – 2009 [7] y 2009 – 2010 – 2011 [8], este esfuerzo fue realizado en colaboración con el instituto Carnegie, usando imágenes Landsat y el software CLASlite 3.0. Entre el periodo 2000 – 2009 el promedio de cambio anual fue de 123 200 ha y para el periodo 2009 – 2011 el promedio de cambio anual fue de 105 975 ha.

En el año 2016, el Instituto del Bien Común (IBC) analizó la deforestación ocurrida en la región amazónica entre los años 2001 y 2015, y cuantificó que durante ese periodo se perdieron 1 947 109 ha de superficie de bosque, 7% más de lo reportado oficialmente por el MINAM.

La característica en común de estos estudios es que se usaron un número limitado de imágenes satelitales, las cuales fueron seleccionadas tomando como criterio la menor presencia de nubes presente en las imágenes, esto quiere decir que se seleccionaron imágenes de los meses de época seca, principalmente entre junio y setiembre.



## 2. Introducción

El Perú es uno de los diez países del mundo con mayor superficie de bosques, es el segundo país con la mayor extensión de bosques amazónicos. A nivel nacional los bosques ocupan más de la mitad del territorio de la República (56,9%), siendo la Amazonía la región con mayor superficie forestal seguido de los bosques andinos y secos [9].

Los bosques peruanos albergan una gran diversidad de especies de flora y fauna y proveen bienes y servicios fundamentales para el desarrollo del país y el bienestar de sus habitantes, en especial, de los pueblos indígenas u originarios que habitan en gran parte de los bosques y cuyas formas de vida dependen de los recursos que estos ofrecen. Además, los bosques húmedos amazónicos son fuente importante de servicios ecosistémicos como el almacenamiento de carbono, regulación del ciclo hidrológico y mantenimiento de alta biodiversidad [9] [10].

En los últimos años se ha producido mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de distintos sectores económicos. En el Perú, los sectores de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF) representan el 51% de las emisiones totales y estas se deben principalmente a la deforestación de los bosques húmedos amazónicos. En el año 2015, se conformó una Comisión Multisectorial<sup>1</sup>, impulsada por el PNCBMCC del MINAM y el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) del MINAGRI, para elaborar la Estrategia Nacional de Bosques y Cambio Climático (ENBCC), que define un conjunto de objetivos y acciones estratégicas para reducir las emisiones de GEI derivadas de la deforestación y degradación de los bosques, además de promover la conservación de reservas de carbono, su incremento y gestión sostenible, en el marco de las políticas ambientales en materia de bosques y cambio climático generadas en la última década [10].

En el 2018, mediante una directiva el MINAM con la finalidad de contribuir a la conservación, prevención y reducción de la deforestación y degradación asigna al PNCBMCC la administración de la información del Módulo de Monitoreo de Cobertura de los Bosques (MMCB), esto comprende el proceso de generación de información de la cobertura de los bosques tropicales del Perú y la distribución de información oficial mediante la plataforma virtual GEOBOSQUES. El MMCB consta de 5 sub-módulos: Deforestación, alertas tempranas, degradación, cambio de uso de la tierra y escenarios de referencia [11] [12]. Los sub-módulos que tienen que ver directamente con el monitoreo de la pérdida de cobertura de bosques son el de deforestación y el de alertas tempranas, el primero tiene una frecuencia anual y el segundo tiene una frecuencia aproximada de hasta 8 días.

La información de deforestación y alertas tempranas del MMCB es generada principalmente mediante el uso de datos satelitales ópticos. El principal dato satelital usado son los provenientes de los sensores satelitales Landsat-TM, Landsat-ETM+ y Landsat-OLI (Operational Land Imager), los cuales poseen una resolución espacial de hasta 30m en sus bandas multispectrales

El presente documento sistematiza las metodologías que han sido usadas para la generación de los datos anuales de deforestación en el ámbito de los bosques húmedos tropicales del Perú, los cuales son distribuidos a través de la plataforma GEOBOSQUES.

### 3. Área de estudio

El área de estudio se circunscribe al límite de los bosques húmedos tropicales del Perú, el cual cuenta con un área de 78 308 801 ha, que representan el 60,9 % del territorio peruano [13]. El Perú es un país con una gran extensión de bosques y mediana deforestación anual, pero con una tendencia creciente hacia tasas cada vez más altas de conversión del bosque por agricultura de pequeña escala, minería artesanal y agricultura industrial [14], la pérdida de bosques ocurrida entre el año 2001 al 2019 asciende a 2 433 314 ha, lo que hace un promedio de 128 069 ha por año de cobertura de bosques primarios [15].

La estación húmeda en los bosques húmedos tropicales del Perú se da entre los meses de noviembre a mayo y la estación seca entre los meses de junio a octubre. En la estación seca los métodos para la detección de alertas tempranas que usan datos Landsat reportan mayor ocurrencia de pérdida de bosques, esto se debe a la mayor disponibilidad de imágenes con poco porcentaje de presencia de nubes [16] [17].

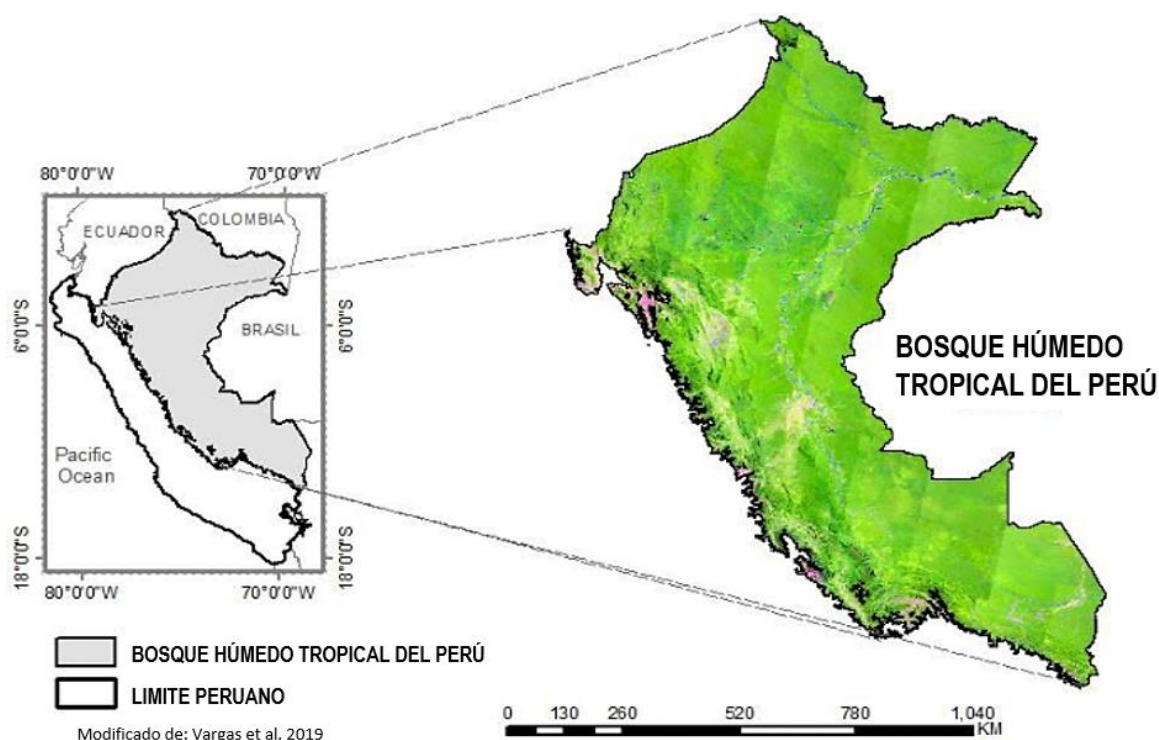


Figura 1. Ubicación del área de estudio

### 4. Datos satelitales

La información de pérdida de bosque anual (2001 – 2019) generada por el PNCBMCC en el marco del MMCB, usa datos Landsat. Entre el periodo 2001 – 2011 se usaron datos del sensor Landsat-ETM+ [18], para el periodo 2012 – 2013 se usaron datos Landsat-TM, Landsat-ETM+ y Landsat-OLI [19]. Finalmente, para el periodo 2014 – 2019 se usaron datos de Landsat-ETM+ y Landsat-OLI [20].

#### 4.1 Landsat-5 TM (Thematic Mapper)

Thematic Mapper (TM) es un sensor multiespectral a bordo del satélite Landsat 5, el cual fue lanzado en 1984 y tiene un ciclo de repetición de 16 días. Landsat 5 fue retirado el 5 de junio del 2013 y tiene el record Guinness al satélite de observación de la tierra con más tiempo operativo. El sensor

TM tiene 7 bandas espectrales que captan información del espectro visible hasta el infrarrojo termal (TIR) (Ver tabla 1). La resolución espacial o campo de visión instantáneo (IFOV) de las bandas 1 – 5 y 7 es de 30 x 30m y de la banda 6 es de 120 x 120 m. El tamaño de la imagen es de 180 km X 172 km [21].

#### 4.2 Landsat-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)

El sensor Multiespectral Enhanced Thematic Mapper (ETM+) se encuentra a bordo del satélite Landsat 7, el cual fue lanzado en 1999 y tiene un ciclo de repetición de 16 días. El sensor ETM+ tiene 8 bandas espectrales que captan información del espectro visible hasta el TIR (ver tabla 1), además ETM+ posee una banda pancromática, la cual posee una resolución espacial de 15m, la banda termal tiene 60m de resolución espacial y las demás bandas tienen una resolución espacial de 30m. El tamaño de la imagen es de 180 km X 170 km. En el año 2003, hubo un problema en el sensor que hace que varias áreas se dupliquen, las áreas duplicadas son eliminadas cuando las imágenes son procesadas y quedan unos vacíos de información en las imágenes.

#### 4.3 Landsat-8 OLI (Operational Land Imager)

El satélite Landsat-8 fue lanzado en febrero del 2013, tiene un ciclo de repetición de 16 días. Landsat-8 tiene a bordo 2 sensores: El Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), los cuales tienen 9 y 2 bandas respectivamente. El sensor OLI tiene 9 bandas espectrales que captan información del espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), a una resolución espacial de 30 m. A diferencia de sus antecesores este sensor incluye las bandas costera y cirrus (ver tabla 1). OLI capta la información en un rango dinámico de 12 bits, mejorando considerablemente a sus antecesores que captan información en 8 bits. El tamaño de la imagen es de 180 km X 170 km [22]. En la figura 5 se puede observar la comparación de las bandas espectrales de los sensores Landsat, incluido el que ira a bordo de Landsat-9, el cual sería similar a Landsat OLI y TIRS.

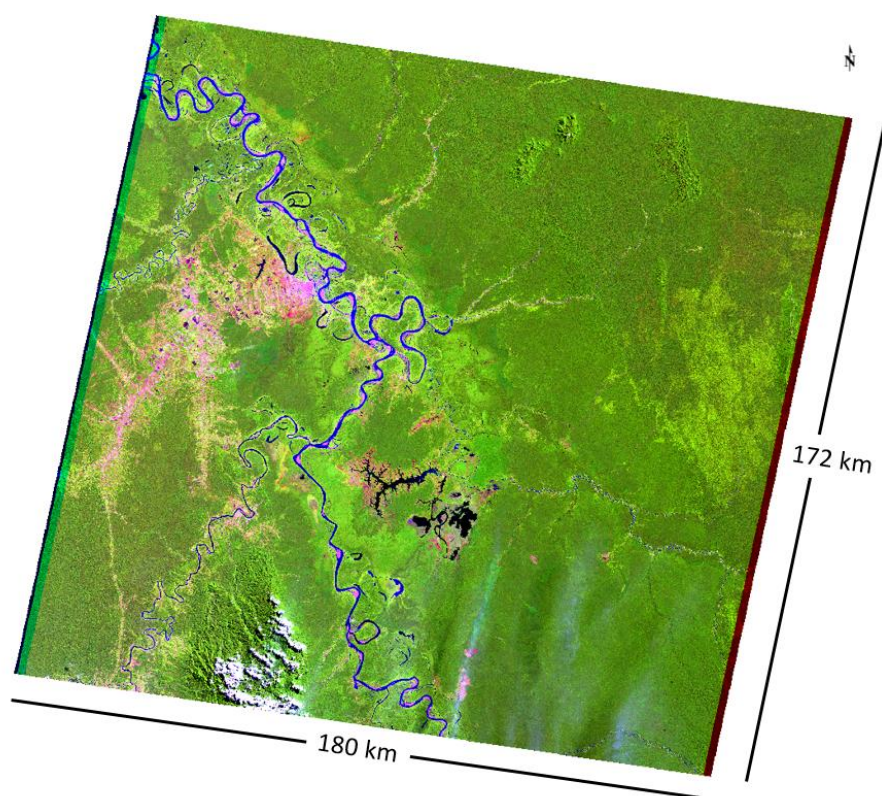


Figura 2. Combinación RGB543 de Landsat-TM

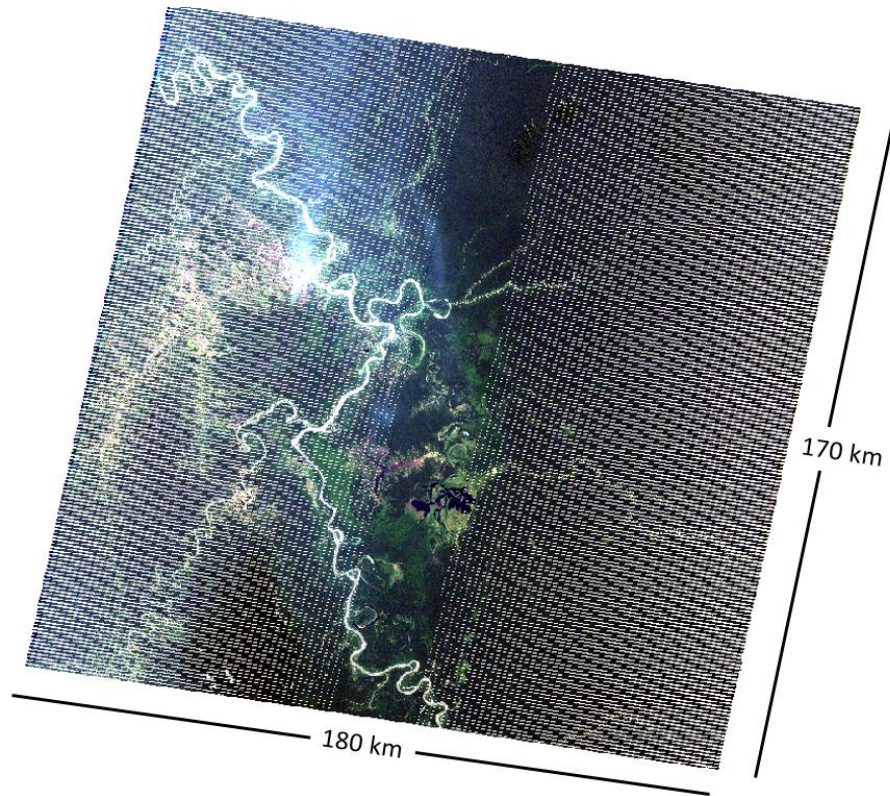


Figura 3. Imagen Landsat-ETM+ con vacíos de información por fallos en el sensor

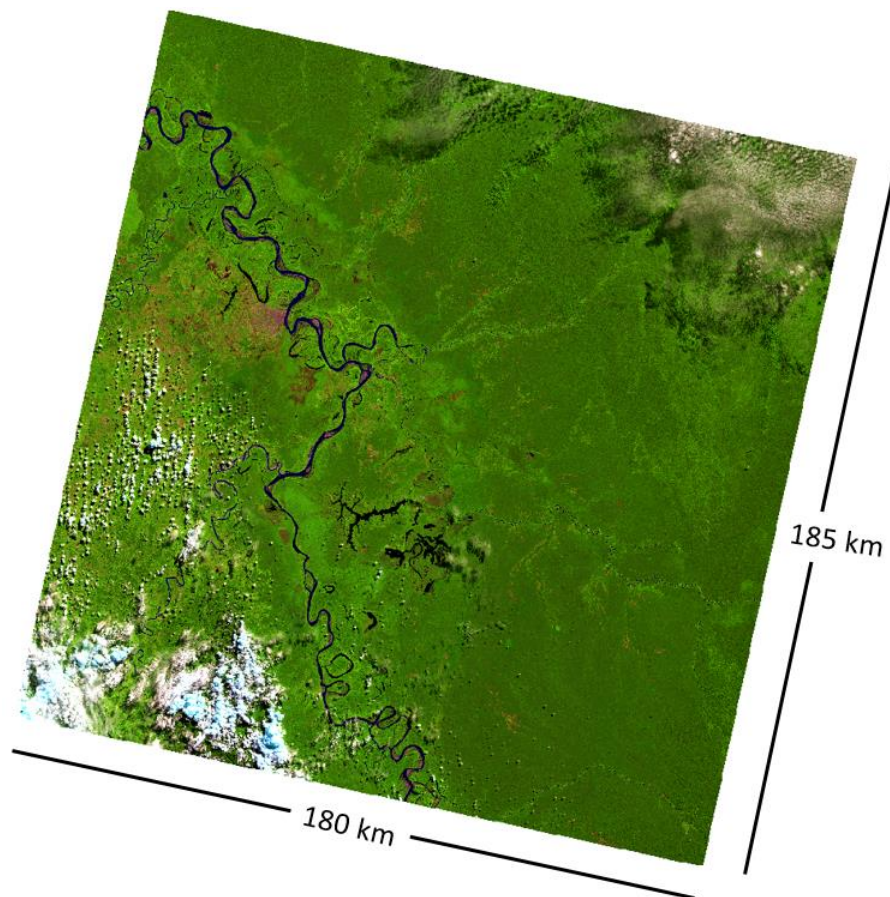


Figura 4. Combinación RGB654 de Landsat-OLI



Tabla 1. Principales características de las bandas del sensor TM

Bandas	Landsat-TM Longitud de onda ( $\mu$ )	Landsat-ETM+ Longitud de onda ( $\mu$ )	Landsat-OLI Longitud de onda ( $\mu$ )
Costera	-	-	0.43 – 0.45
Azul	0.45 – 0.52	0.45 – 0.52	0.45 – 0.51
Verde	0.52 – 0.60	0.52 – 0.60	0.53 – 0.59
Rojo	0.63 – 0.69	0.63 – 0.69	0.64 – 0.67
Infrarrojo cercano (NIR)	0.76 – 0.90	0.77 – 0.90	0.85 – 0.88
SWIR	1.55 - 1.75	1.55 - 1.75	1.57 – 1.65
TIR	10.40 – 12.50	10.40 – 12.50	10.60 – 11.19 11.50 -12.51
SWIR	2.08 – 2.35	2.08 – 2.35	2.11 – 2.29
Pancromática	-	0.52 – 0.90	0.50 – 0.68
Cirrus	-	-	1.36 – 1.38

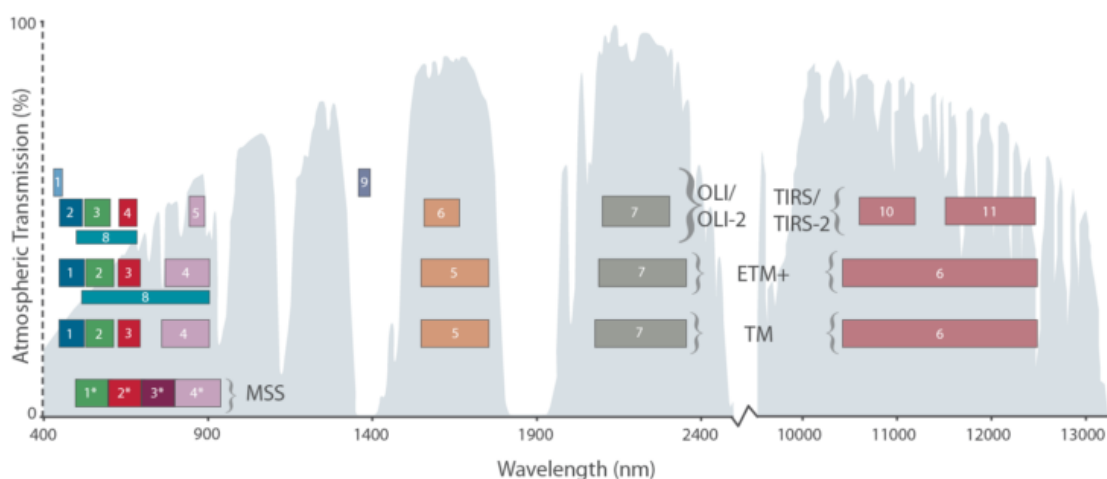


Figura 5. Comparación de bandas espectrales de los sensores Landsat

#### 4.4 Niveles de procesamiento

Los niveles de procesamiento, precisión geométrica y organización de los datos Landsat han variado con el tiempo. Probablemente la precisión geométrica es la que más modificaciones a tenido en el tiempo.

La pérdida anual de bosque para el periodo 2001 – 2011 solo uso datos ETM+ debido a que los datos TM no tenían una precisión geométrica lo suficientemente buena como para que se usen de forma combinada, esto sumado a los vacíos de información producido por fallas en el sensor ETM+ habría limitado considerablemente la correcta y exhaustiva detección de la pérdida de bosque para el periodo en mención. Para el periodo 2012 – 2013 la USGS hace una actualización de la precisión geométrica en los datos TM y se logra combinar los 3 sensores disponibles para esa fecha, en este periodo se detectaron 30 000 ha de pérdida de bosque que ocurrieron entre el 2010 – 2011 y no fueron detectados en su momento. Se asume que esto se debe a la incorporación de los datos TM (Mayor cantidad de información para detectar la deforestación y mayor probabilidad de reducir la presencia de nubes en el año), además de posibles errores en la asignación del año en que ocurrió la pérdida [19]. Para los posteriores periodos de detección se usaron los datos ETM+ y OLI.

Para el análisis de series de tiempo y aplicaciones como la detección de la deforestación y/o pérdida de bosque es necesario una buena precisión geométrica dentro (entre las bandas y bandas) y fuera (entre sensores), esto permite la integración de distintos datos en un análisis [23].

En el año 2016 la USGS reorganizó el archivo Landsat en una estructura de gestión de colecciones por niveles:

La Colección 1 esta estructura asegurando que todos los productos Landsat Nivel-1 proporcionen un archivo consistente de calidad de datos conocida mientras se controla la mejora continua del archivo y el acceso a todos los datos a medida que se adquieren. El propósito de nivel es facilitar la identificación de escenas adecuadas para el análisis a nivel de píxeles de series de tiempo y proporcionar datos temporales que se procesan inmediatamente y puedan ser usados en situaciones de emergencia. La colección 1 tiene el subnivel Tiempo Real (TR), Nivel 1 (T1) y Nivel 2 (T2), el Nivel TR, proporciona datos de ETM+ y OLI en menos de 12 horas para su descarga, el nivel T1 proporciona datos Landsat con la mayor calidad de datos disponible y se consideran adecuadas para el análisis de series de tiempo, estos datos incluyen la corrección de precisión y terreno de nivel 1 (L1TP), tienen una radiometría bien caracterizada y están intercalibrados en los diferentes sensores Landsat. El georegistro es consistente y dentro de las tolerancias prescritas de imagen a imagen +- error medio cuadrático (RMSE) radial de 12 m. Las escenas Landsat en las que no se puede tener un número de puntos de control adecuado para ser producidos, alta presencia de nubes u otros factores pasan al T2, las imágenes se procesan como Corrección Sistemática del Terreno (L1GT) o Corrección Sistemática (L1GS) y se recomienda consultar el RMSE y otras propiedades antes de considerar su uso [24].

Landsat Colección 2 marca el segundo evento importante de reprocesamiento del archivo Landsat Level-1 de USGS, lo que resulta en varias mejoras de productos de datos que aprovechan los avances recientes en el procesamiento de datos, el desarrollo de algoritmos y las capacidades de acceso y distribución de datos. Una característica principal de la Colección 2 es la mejora sustancial en la precisión de geolocalización absoluta del conjunto de datos de referencia terrestre global utilizado en el flujo de procesamiento de datos Landsat Nivel-1. Además, la Colección 2 incluye fuentes de modelado de elevación digital global actualizadas y actualizaciones de calibración y validación, así como productos basados en escenas de reflectancia de superficie y temperatura de superficie de nivel 2 global desde 1982 hasta el presente. Los productos de la colección 2 level 2 recibieron una certificación que garantiza una mayor interoperabilidad con otras plataformas como Sentinel-2 [25].

En la actualidad la pérdida de bosque anual y las alertas tempranas de la deforestación usan datos Landsat de la colección 1 nivel 1 (L1TP), esto asegura un coregistro consistente entre imágenes actuales y las usadas en los primeros periodos analizados, ya que usan como línea de base para el coregistro el Global Land Survey (GLS) 2000 y Modelos de Elevación Digital (DEM) similares a los usados en las versiones anteriores al 2016 [26] [27].

## 5. Metodología

### 5.1 Detección de la pérdida anual de bosques periodo 2001 – 2016

La detección de la pérdida anual de bosques para el periodo en mención fue realizada usando la metodología propuesta por la Universidad de Maryland (UMD) [14] [18] [19].

#### Pre-procesamiento

Las imágenes Landsat que se usaron corresponden al producto L1T, que vendría a ser el equivalente al actual L1TP, solo para el periodo 2000 – 2011 se descargaron más de 11 000 imágenes,

la proyección base de estas imágenes son la proyección UTM, las cuales son reproyectadas a la proyección Sinusoidal, esta proyección se caracteriza por mantener el pixel de 30 x 30m (1 pixel = 0.09 ha) para todo el territorio peruano, para facilitar el uso de los datos y mantener la coherencia con datos previos publicados por el MINAM se vuelven a reproyectar a la proyección UTM, Zona 18S (Para los años 2012 al 2016 la reproyección fue a coordenadas geográficas y luego a UTM Zona 18S). Todas las imágenes son calibradas a Reflectancia al Tope de la Atmósfera (TOA) a las cuales se les aplica un grupo de modelos de árbol de decisiones para detectar la presencia de nubes, sombras, neblina y agua [18], las muestras de estos materiales fueron seleccionados a partir de imágenes ETM+ del bioma tropical, el modelo de árbol de decisiones selecciona el 10% de las muestras y las usa como referencia para detectar las nubes, sombras, neblina y agua. El resultado es una imagen de probabilidad de presencia de tierra y agua libre de nubes y sombras [18] [28] [29].

Las escenas Landsat tienen variaciones de reflectancia debido a varios factores, entre ellas los ángulos de iluminación y anisotropía de la superficie, para uniformizar la reflectancia de las imágenes se usó como referencia un mosaico normalizado de imágenes MODIS [18]. Las imágenes normalizadas fueron usadas para crear métricas, para la creación de métricas solo se usan las bandas rojo, NIR y SWIRs. Las principales métricas creadas fueron:

- First: Compuesto del primer pixel libre de nubes del año base
- Medfirst: Compuesto del promedio de los 3 primeros pixeles libres de nubes del año base
- Last: Compuesto del último pixel libre de nubes del año final
- Medlast: Compuesto del promedio de los 3 últimos pixeles libres de nubes del año final
- Mínimo: Valor mínimo de reflectancia de todos los pixeles libres de nubes
- Máximo: Valor máximo de reflectancia de todos los pixeles libres de nubes
- Media: Promedio de reflectancia de todos los pixeles de nubes.
- Percentiles: Percentiles de 10%, 25%, 50%, 75%, 90% para todos los pixeles libres de nubes

Además de las métricas, también se generaron índices como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y otros. Toda esta información fue usada como dato fuente para la clasificación de la pérdida de bosque [14] [18] [19].

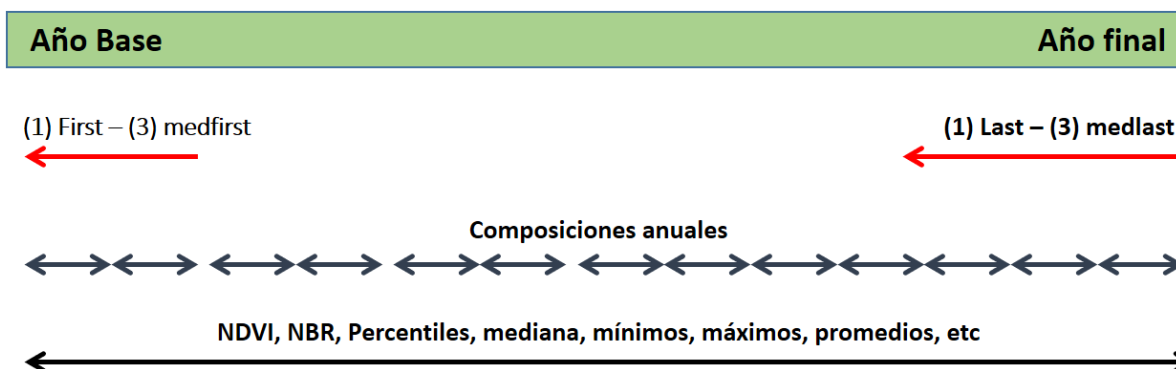


Figura 6. Conjunto de métricas creadas a partir de las bandas de Landsat

### Clasificación de pérdida de bosque

El algoritmo usado para la clasificación de la pérdida de bosque se basa en árboles de decisiones y es un algoritmo de clasificación supervisada, por lo que necesita de la creación de muestras de entrenamiento de pérdida de bosque para que el algoritmo identifique áreas similares en toda el área de estudio. Las muestras de entrenamiento fueron creadas de forma manual sobre las métricas y en base a la interpretación visual, como información auxiliar para la creación de áreas de

entrenamiento se usó Mapa de Cobertura Vegetal [13], Google Earth y otros datos satelitales disponibles.

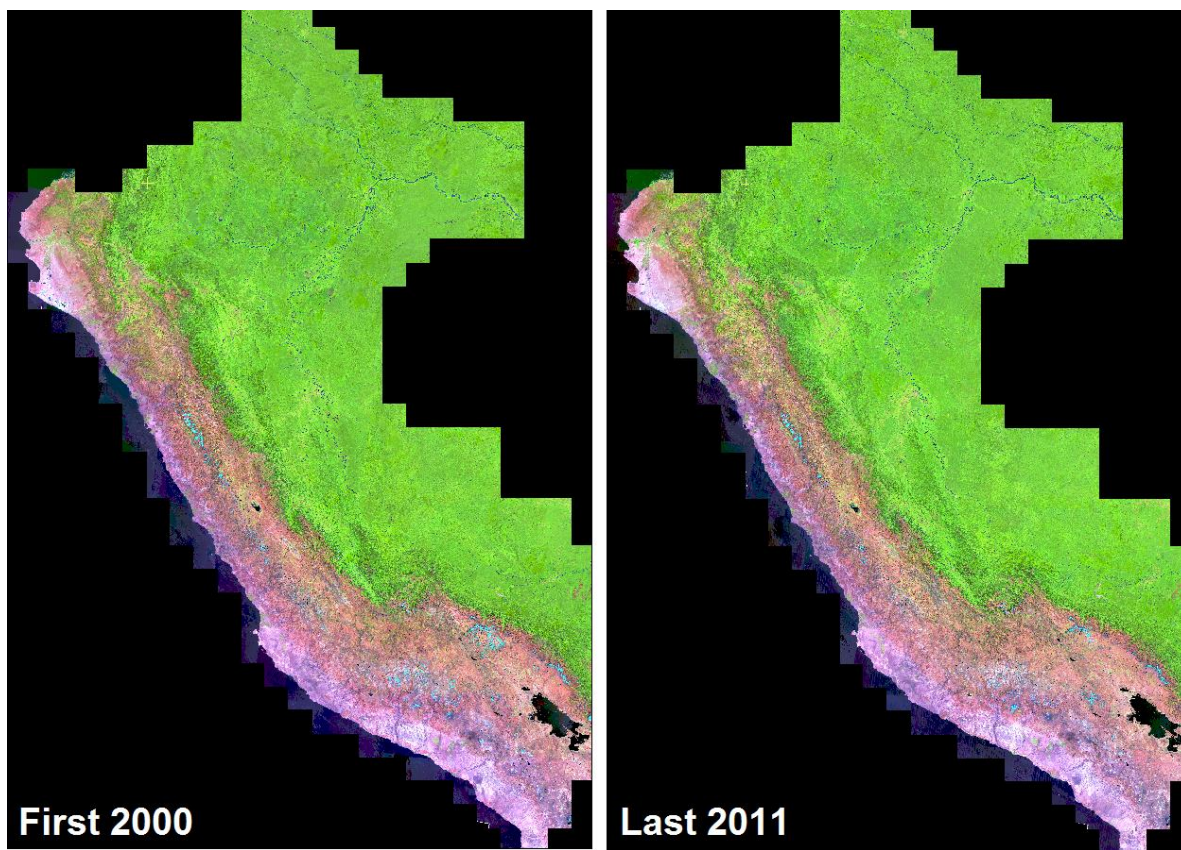


Figura 7. Comparación de métricas first y last

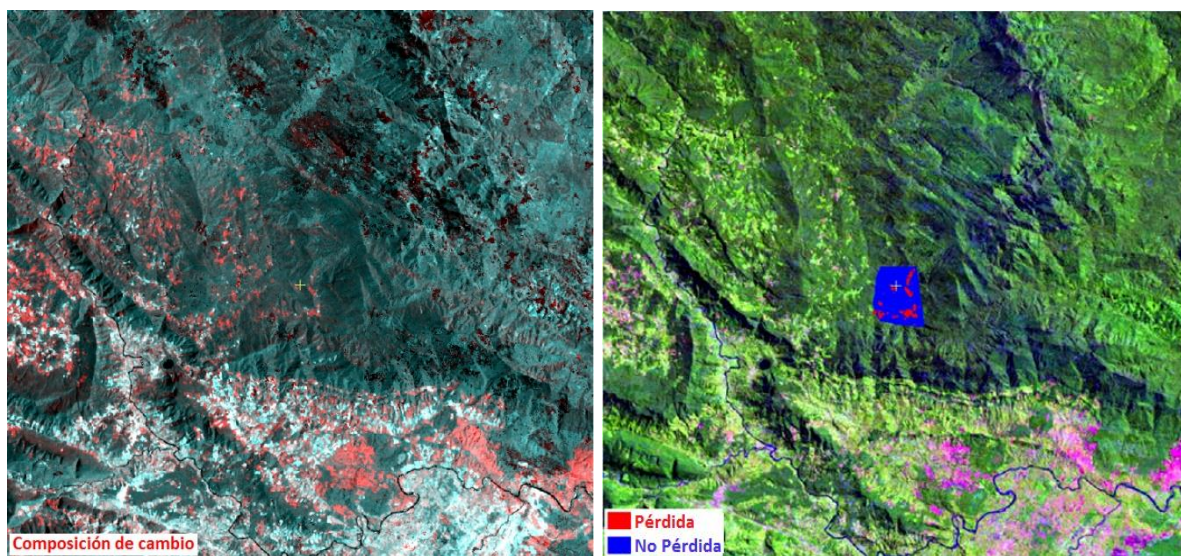


Figura 8. Ejemplo de muestras manuales creadas sobre las métricas

Una vez creadas las muestras de pérdida de bosque se procedió a ejecutar el algoritmo de clasificación. La clasificación en la metodología de la UMD es un proceso iterativo, que se basa en criterio de experto. Si el resultado de la clasificación no tiene la calidad esperada, el experto debe agregar más muestras de entrenamiento y volver a ejecutar el algoritmo de clasificación, este paso se

repite hasta tener resultados satisfactorios, para el periodo 2001 – 2011 el algoritmo fue ejecutado 15 veces [14] [18].

En esta etapa hubo unos cambios metodológicos en los periodos analizados:

- Periodo 2001 – 2011, en este periodo solo se usaron datos del sensor ETM+ y se crearon muestras basadas en interpretación visual.
- Periodo 2012 – 2013, en este periodo se usaron datos de TM, ETM+ y OLI, esto se debe a que para ese año la USGS actualizó su algoritmo de corrección geométrica de los datos TM, logrando que estos tengan coherencia con los datos ETM+ y por consiguiente estos datos puedan ser usados conjuntamente, al igual que en el periodo anterior aquí se crearon muestras manuales basados en interpretación visual.
- Periodo 2014 – 2016, en este periodo a diferencia de los dos anteriores, no se hicieron muestras manuales debido a actualizaciones del algoritmo (machine learning) y se usaron las muestras manuales del periodo anterior.

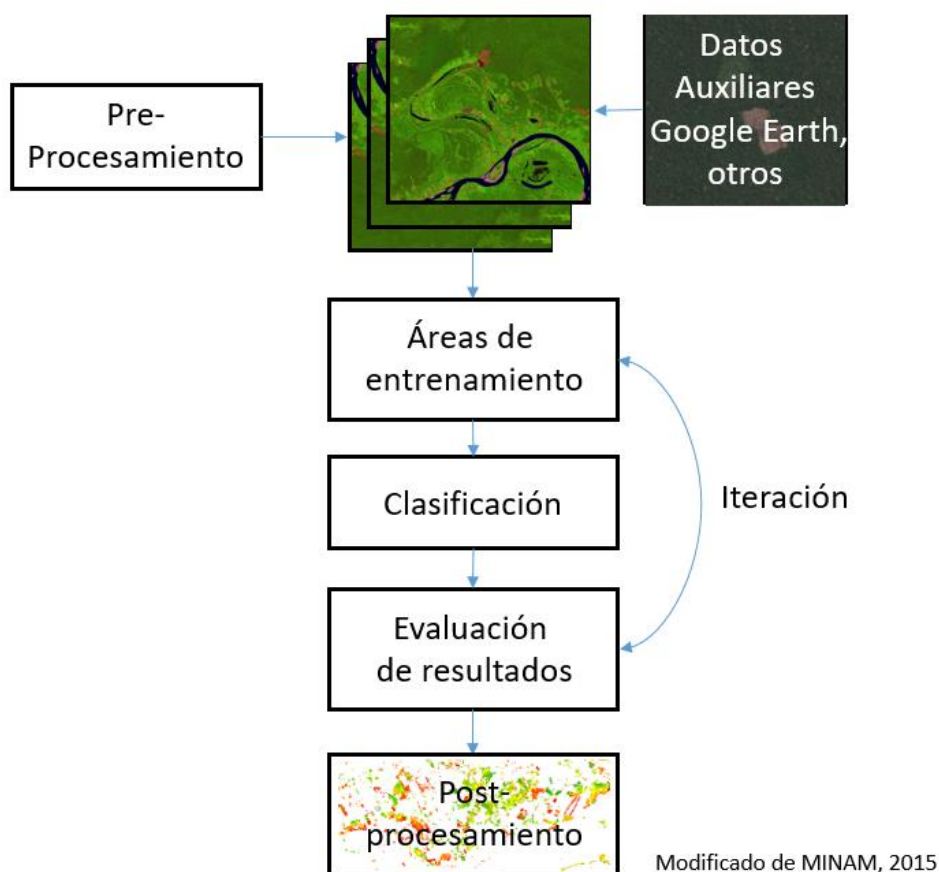


Figura 9. Flujo de trabajo para la obtención del mapa pérdida de bosques

### Post-clasificación

La etapa de post-clasificación consiste en editar los errores encontrados en la detección de la pérdida, para esto previamente la clasificación de la pérdida fue intersectada con la capa de Bosque/No bosque del año 2000 [30], el resultado de esa intersección fue el que los equipos técnicos del entonces Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA) y el PNCBMCC revisaron y editaron. Las ediciones se hicieron principalmente para agregar áreas de pérdida que no fueron detectadas y para eliminar la presencia de falsos positivos,

estos pueden darse debido a bosques caducifolios, errores por presencia de nubes no enmascaradas, entre otros. Debido a la extensión del área de estudio el proceso de edición podría tardar hasta 60 días. Para el periodo 2001 – 2011 se agregaron 51 000 ha de pérdida que no fue detectada por la clasificación y se eliminaron 31 000 ha de falsos positivos [14].

Una vez editada la capa, esta es enviada al equipo técnico de la UMD para que ellos mediante el uso de métricas anuales de NDVI extraigan el año en que ocurrió la pérdida de bosque.

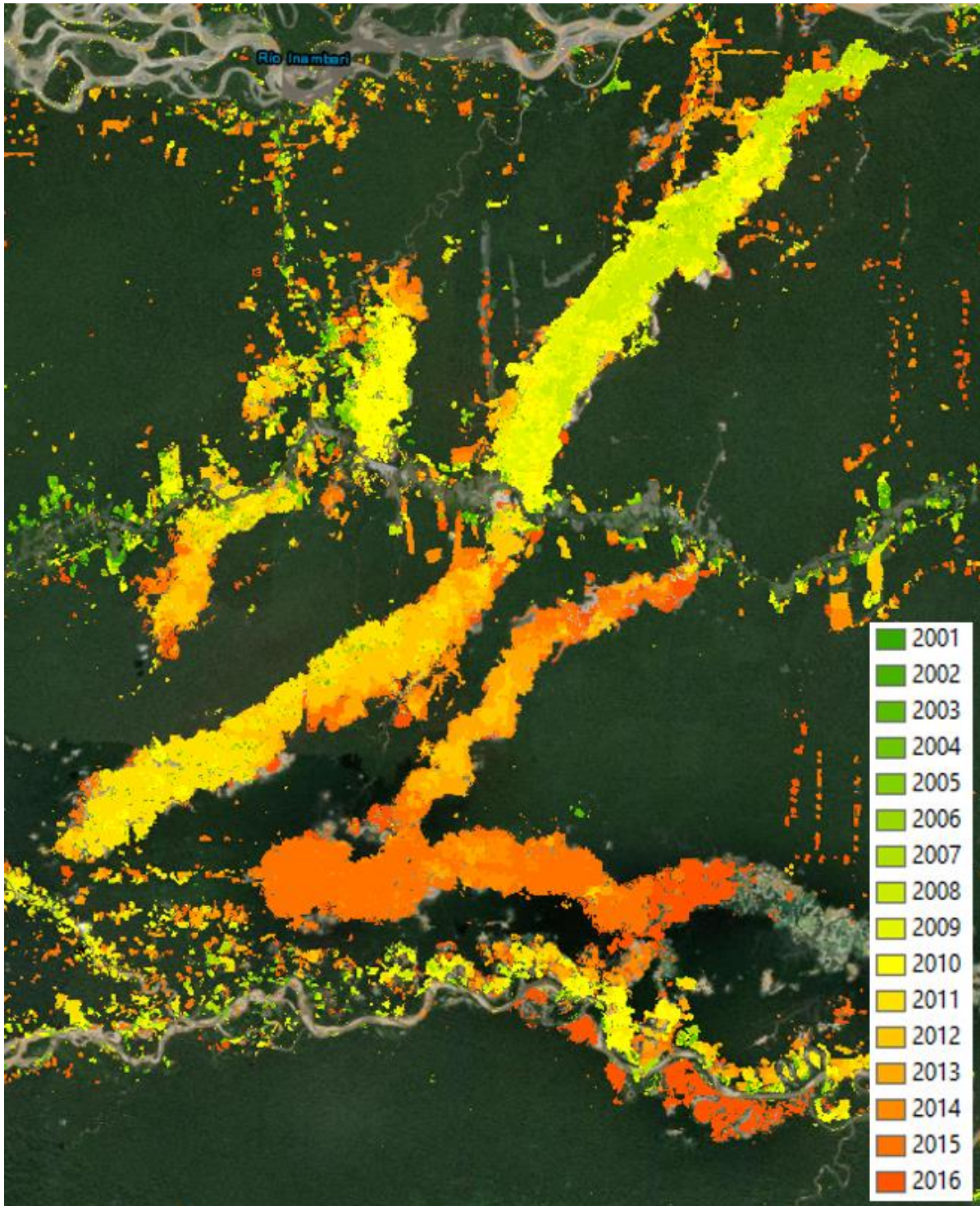


Figura 10. Pérdida de bosque por minería para el periodo 2001 – 2016 en el departamento de Madre de Dios.

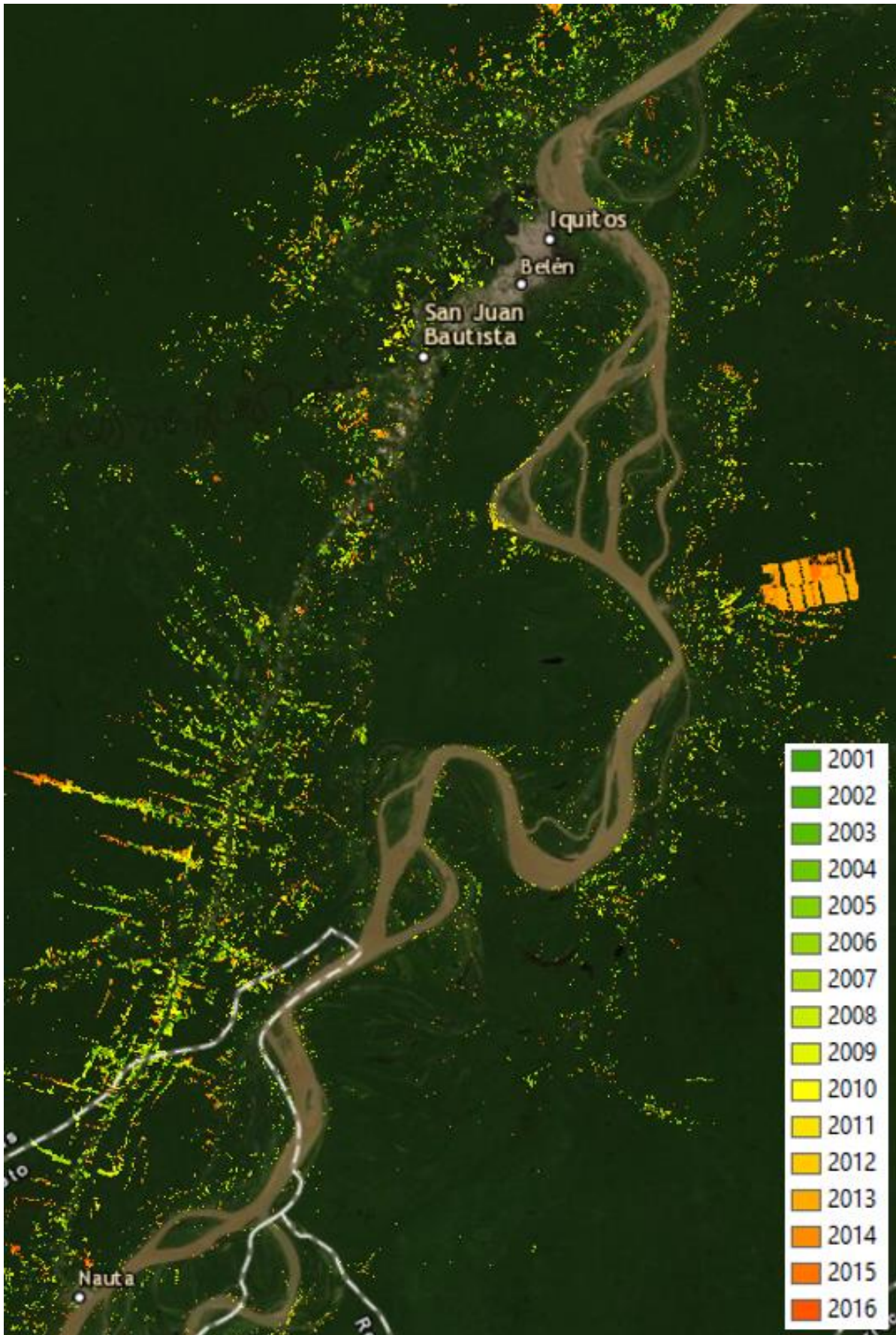


Figura 11. Pérdida de cobertura de bosques en el departamento de Loreto, periodo 2001 – 2016.

## 5.2 Detección de la pérdida anual de bosques periodo 2017 - 2019

Para la detección de la pérdida de bosque para este periodo se usa el método Desmezcla Espectral Directa (DSU), el cual también es utilizado en la generación de alertas tempranas de la deforestación del PNCBMCC [16] y al igual que con los periodos anteriores, se usan todos los datos Landsat L1TP disponibles para el periodo de estudio.

### Pre-procesamiento

Se descargaron 2 imágenes Landsat OLI con la menor presencia de nubes para cada path/row entre los años 2013 al 2016. Para los años posteriores se descargaron todas las imágenes Landsat OLI y ETM+ de la colección L1TP disponibles. Las imágenes fueron descargadas de la plataforma EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), las fueron calibradas a reflectancia TOA. La proyección base usada fue UTM, Zona 18S, por lo que las imágenes que se encontraban en Zona 17S y 19S fueron reproyectadas a Zona 18S. Las imágenes de una misma fecha fueron integradas en un mosaico para luego aplicarse un modelo de árbol de decisiones que detecta nubes, neblina y sombras. Luego se aplicó unas condiciones para discriminar las sombras de nubes de áreas con presencia de aguas oscuras y/o las sombras producidas por ángulo de toma del sensor, la posición solar y el relieve montañoso. Finalmente se aplicó la máscara de nubes y sombras a los mosaicos.

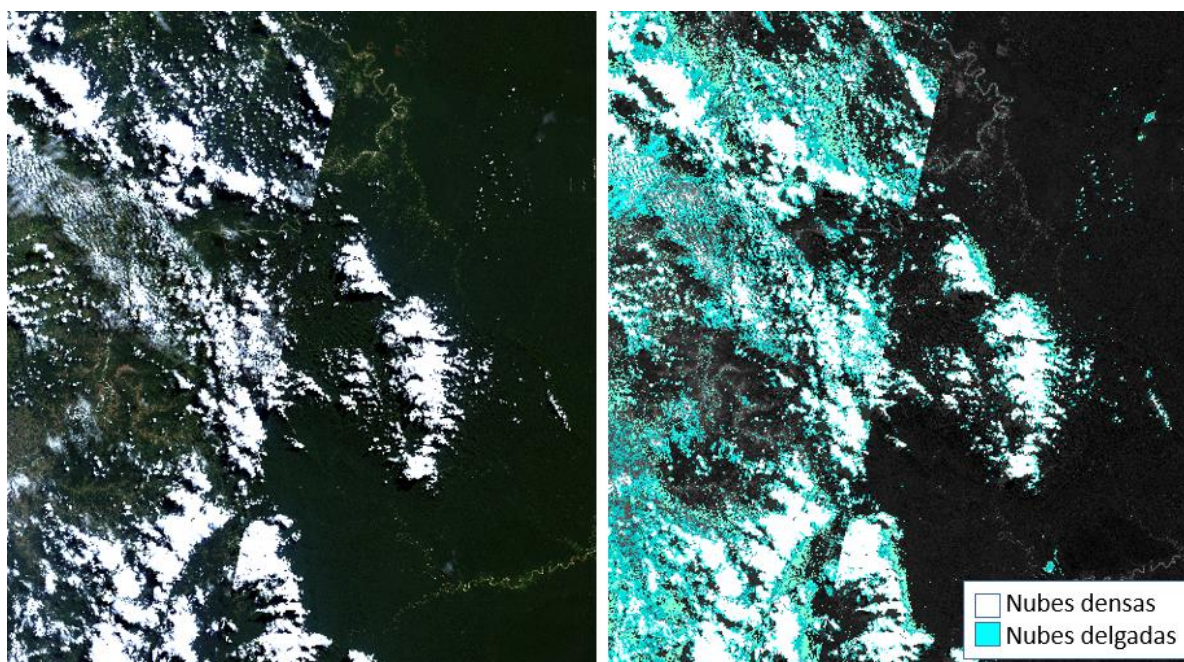


Figura 12. Detección de nubes usando árbol de decisiones

### Clasificación de pérdida de bosque

La detección de las áreas de pérdida cobertura de bosque se realizó usando un método denominado DSU, el cual se basa en un Modelo Lineal de Mixtura Espectral (MLME) que asume que la respuesta espectral del pixel es la combinación lineal de los materiales que están conformados en pixel (Endmembers) [31] [32] [33], técnicas que se basan en esto ya han sido usadas para la detección de la deforestación en bosques tropicales [16] [33] [34] [35] [36].

DSU usa los endmembers de bosque y pérdida de bosque, asume que cuando la cobertura de bosque en el pixel se pierde por causas antrópicas o naturales el resultado es un pixel de suelo desnudo, la mezcla de suelo con vegetación seca o residuos de la deforestación como troncos, que también pueden estar mezclados con bosque en pie [16].





Figura 13. Ejemplos de áreas deforestadas vistas desde imágenes de alta resolución espacial

El endmember de bosque fue obtenido calculando el promedio de muestras aleatorias de la respuesta espectral del bosque primario en las imágenes Landsat OLI del 2013 al 2016 y el endmember de pérdida de bosque, calculando el promedio de muestras aleatorias con alta probabilidad de pérdida

de bosque en imágenes de los mismos años. Estos endmembers fueron usados para crear un modelo de mezcla espectral donde se puede detectar el porcentaje de pérdida de bosque dentro del píxel [16].

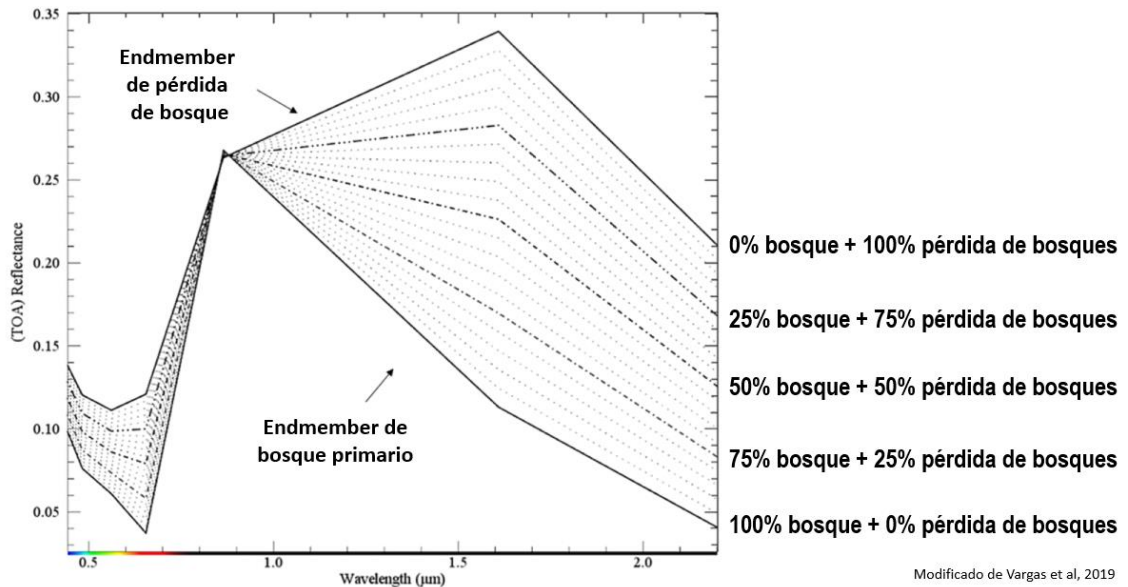


Figura 14. Modelo Lineal de Mezcla Espectral entre el bosque y la pérdida de bosque

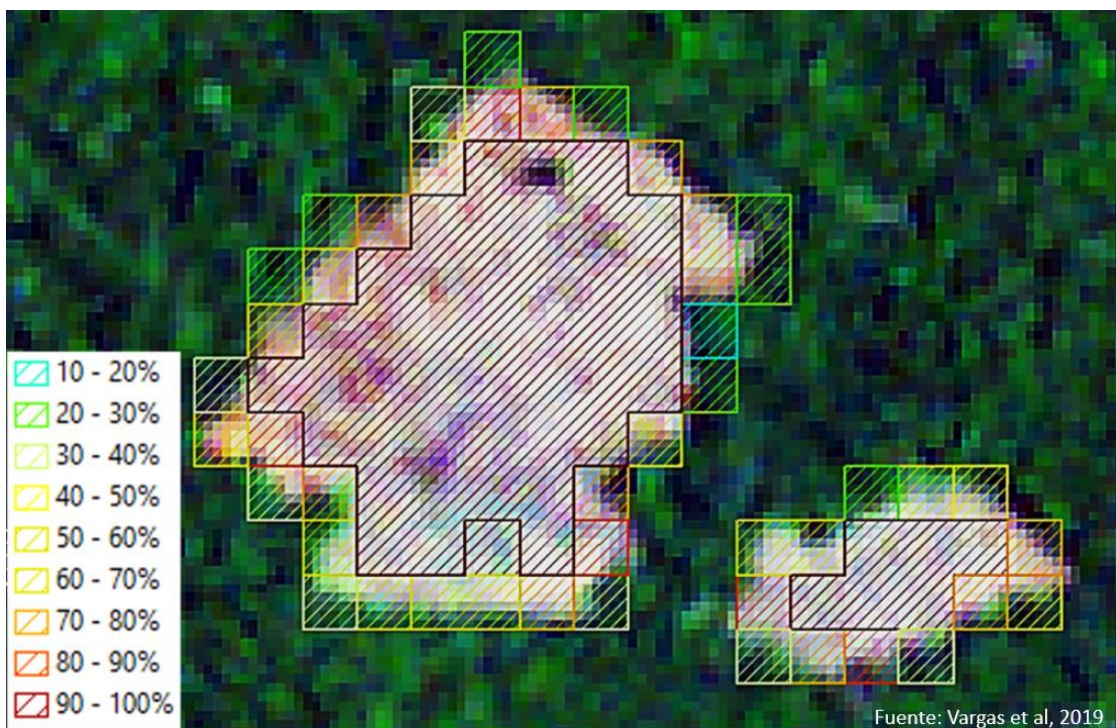


Figura 15. Detección de porcentajes de pérdida de cobertura de bosques usando DSU

A partir de este modelo se obtuvieron los umbrales correspondientes a cada porcentaje de pérdida de cobertura. Los umbrales corresponden al cociente de sus respuestas espectrales en las bandas SWIR 1 y NIR.

DSU es muy sensible y puede ser capaz de detectar eventos de degradación como la apertura de caminos, tala selectiva o perturbaciones naturales.

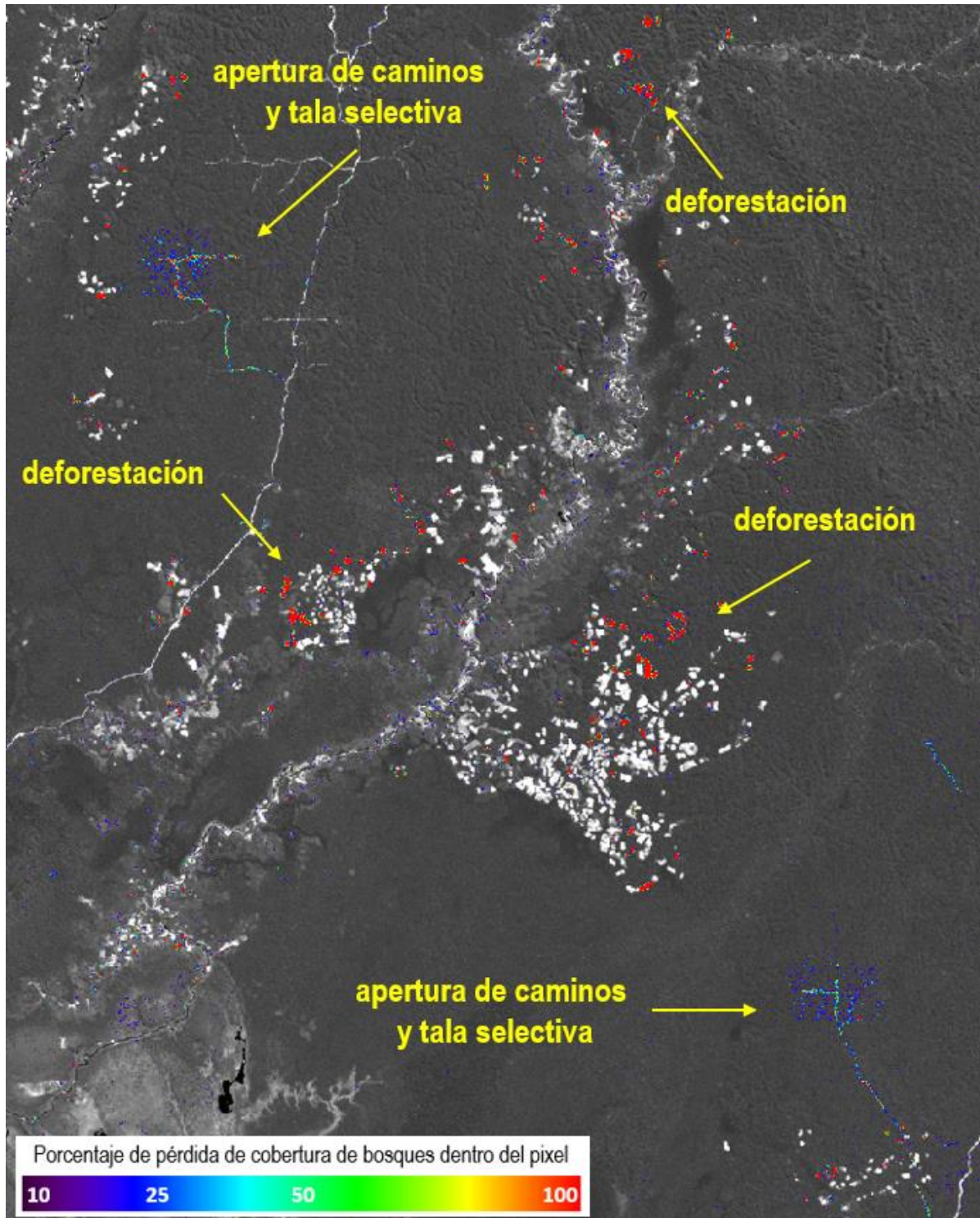


Figura 16. DSU aplicado en imagen Landsat OLI tomada el 11/09/2018

En las imágenes OLI se usaron los umbrales que detectan hasta un 25% de pérdida de cobertura de bosque para la selva baja y hasta un 35% de pérdida de bosque para las áreas de selva alta. En las imágenes ETM+ se detectó hasta un 35% de pérdida de cobertura de bosque dentro del pixel, estos criterios son similares a los que el PNCBMCC usa en la detección de alertas tempranas [16].

Los mosaicos de imágenes OLI del 2013 al 2016 se usaron para detectar pérdida de bosque que no fue detectada en su momento usando la metodología de la UMD y para detectar perturbaciones

naturales, como las que ocurren en bosques caducifolios y/o algunos aguajales. Los umbrales de detección de pérdida y perturbaciones naturales fueron integrados en un árbol de decisiones. La pérdida de bosque detectada entre el 2001 al 2016 fue usada como una capa auxiliar dentro del árbol de decisiones, esto evita duplicar la información que ya fue detectada. Las alertas tempranas detectadas por el PNCBMCC fueron integradas en la pérdida detectada en los mosaicos Landsat para cada año de estudio.

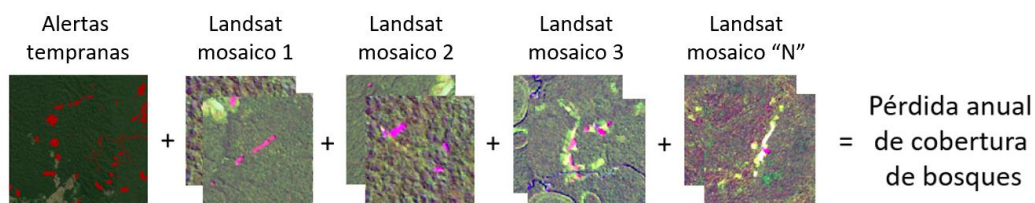


Figura 17. Obtención de pérdida de cobertura anual de pérdida de bosques

### Post-clasificación

La etapa de post-clasificación fue realizada por los equipos técnicos del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) y el PNCBMCC, la principal edición se dio en áreas donde los árboles pierden sus hojas, esto se da principalmente en la región Madre de Dios, estas áreas no se habrían secado en por lo menos los últimos 7 años. Una edición frecuente es la que se da por cambio en el curso de los ríos delgados, esto se da principalmente por pixeles mixtos de agua/bosque/suelo. La revisión a escala 1/20 000 de la capa de pérdida para todos los bosques húmedos tropicales podría tardar hasta 10 días.

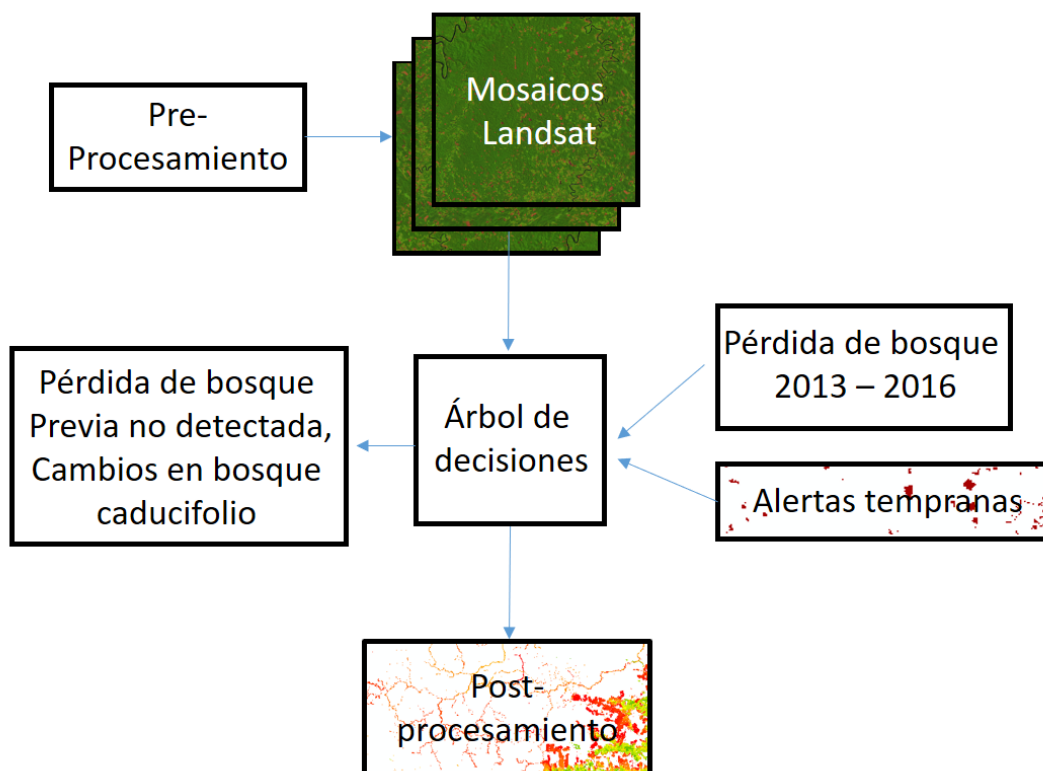


Figura 18. Flujo de trabajo para la obtención del mapa pérdida de bosques usando árbol de decisiones y DSU

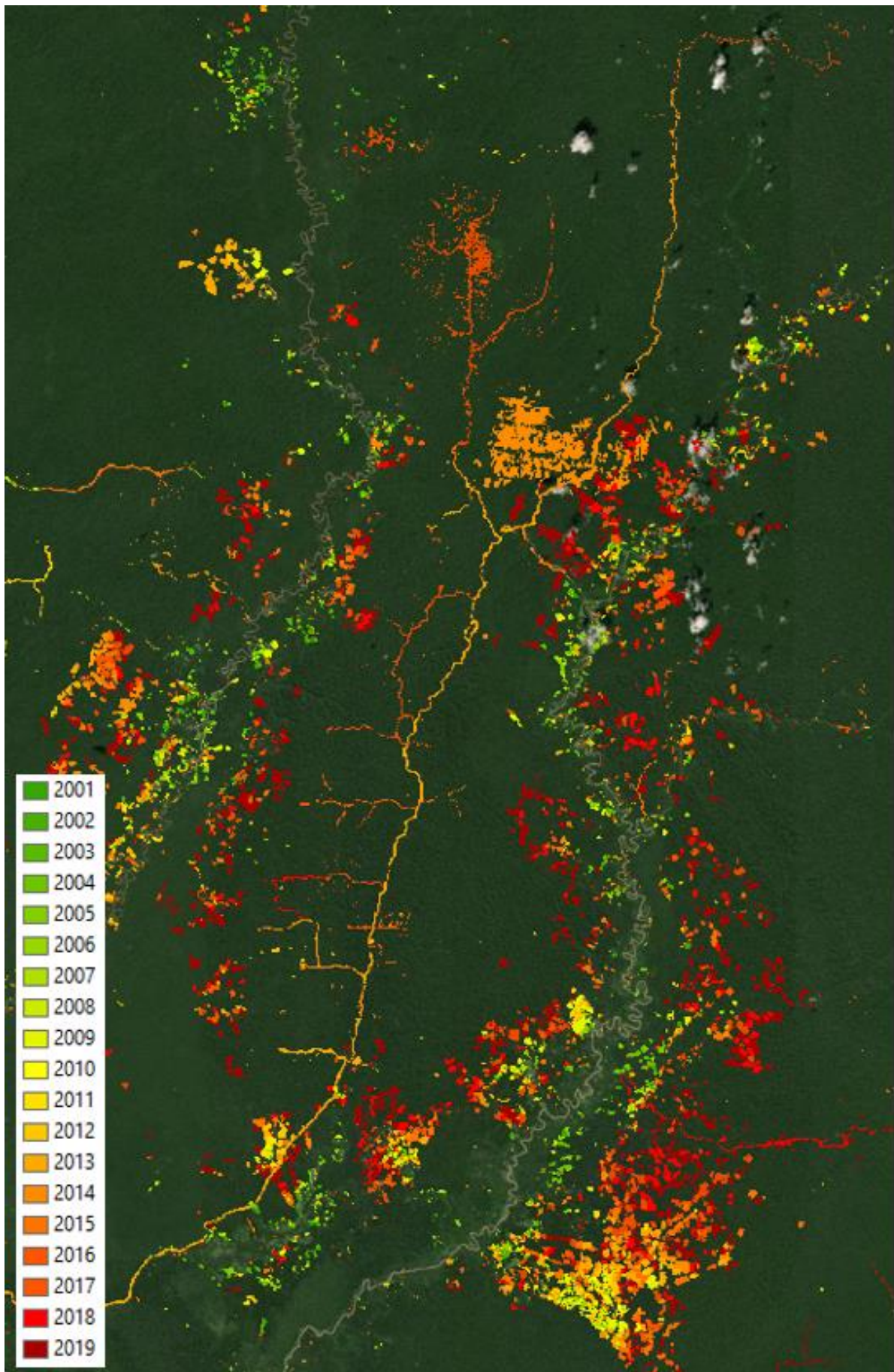


Figura 19. Pérdida de cobertura de bosques en el departamento de Ucayali, periodo 2001 - 2019

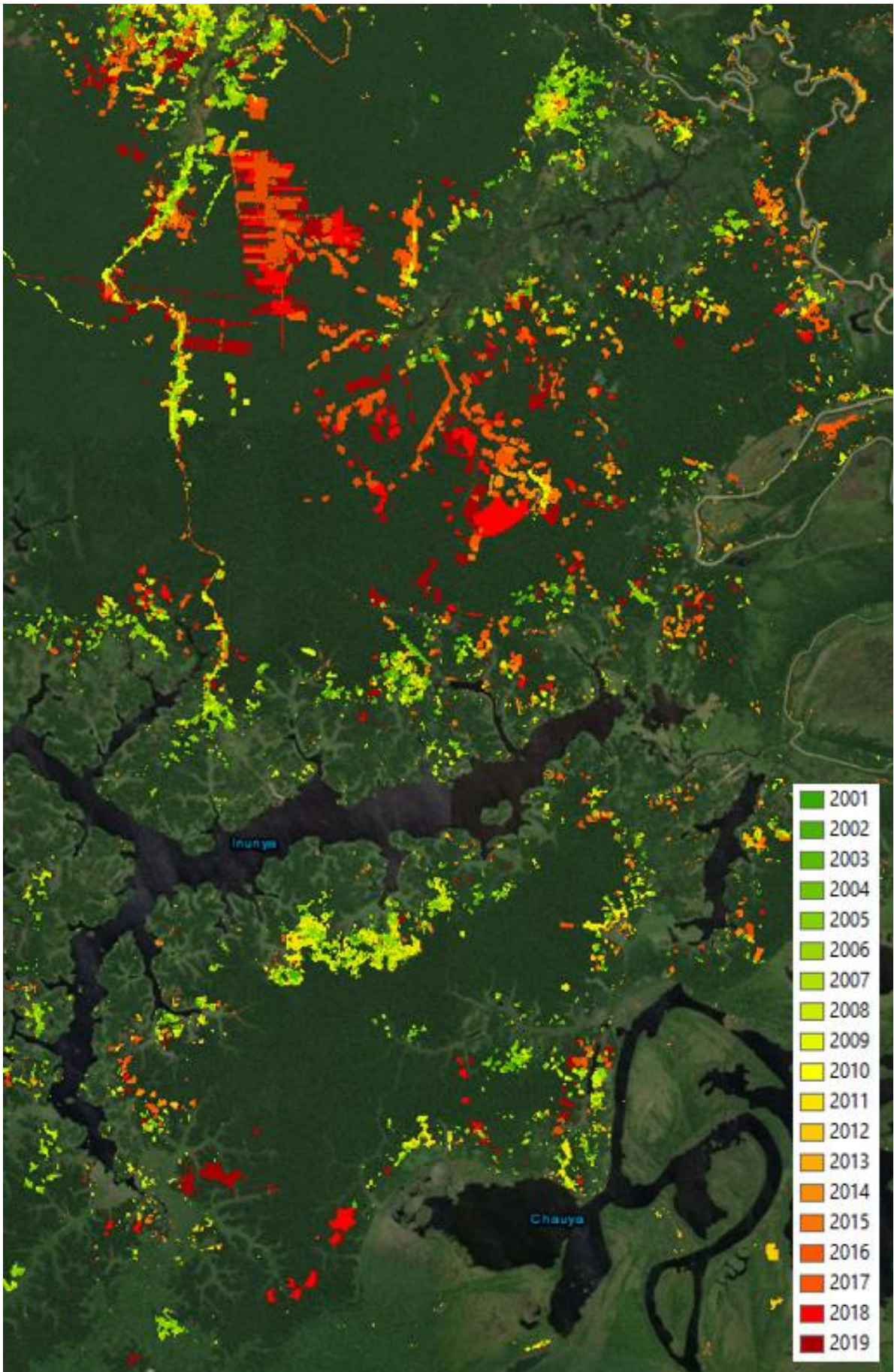


Figura 20. Pérdida de cobertura de bosques periodo 2001 - 2019 en el departamento de Ucayali

### 5.3 Comparación de metodologías

Las metodologías usadas en la detección de la pérdida de cobertura de bosques húmedos tropicales que han sido usadas de forma oficial por el Gobierno Peruano tienen coincidencias en partes fundamentales, hasta antes de la aparición de estas metodologías era muy común que para esta tarea se use una sola imagen la cual debería tener el menor porcentaje de nubes posible y las cuales eran seleccionadas principalmente entre los meses de julio y setiembre [3] [5] [7] [8], la principal característica en común de las metodologías que se usaron para la detección de la pérdida de cobertura de bosques húmedos tropicales del Perú es que ambas usan el mayor número de imágenes Landsat disponibles para cada año en estudio, esto permite detectar la mayor presencia de pérdida de cobertura de bosques durante el año, ya que al no excluir imágenes de alta presencia de nubes tomadas cerca al fin del año (Noviembre, Diciembre), se estaría detectando pérdida de cobertura de bosque que no se detectaría si solo se usaran imágenes tomadas en época seca, esto permite tener datos de pérdida más cercanos a la realidad, sin embargo podrían existir áreas no monitoreadas debido a la presencia de nubes constante en determinadas áreas, este es un problema común cuando se usan imágenes ópticas, una alternativa es incluir en estos análisis el uso de datos SAR (Radar de Apertura Sintética), las cuales podrían ayudar mucho en áreas donde la pérdida de bosques se da por actividad minera, la cual se mantiene activa durante todo el año [16] [37].

La principal diferencia entre los dos métodos es la forma como detectan la pérdida de cobertura de bosque, la metodología de UMD usa un algoritmo de clasificación supervisada, esto significa que el usuario debe crear muestras de entrenamiento de forma manual y basados en interpretación visual, esto depende del nivel de experiencia del experto encargado de crear las muestras, la experiencia de cada experto no puede ser medida y la interpretación puede ser subjetiva. La metodología usa DSU, el cual es un algoritmo basado en MLME, asume que cuando se pierde cobertura de bosque el resultado es un pixel de suelo desnudo, la mezcla de suelo con vegetación seca o residuos de la deforestación como troncos, que también pueden estar mezclados con bosque en pie, la detección es directamente sobre la imagen, el experto solo decide hasta cuánto de porcentaje de pérdida de cobertura de bosque en el pixel quiere detectar. Otra diferencia es que UMD detecta la pérdida teniendo como base las métricas derivadas de las imágenes Landsat y la metodología actual detecta directamente sobre las imágenes Landsat. En la siguiente tabla se muestra la comparación de ambas metodologías.

Tabla 2. Comparación de métodos para la detección de pérdida de cobertura de bosque

Proceso	UMD	Árbol de decisiones - DSU
<b>Imágenes base</b>	Métricas basadas en todas las imágenes Landsat L1TP disponibles	Todas las imágenes Landsat L1TP disponibles
<b>Clasificación de nubes/neblina/sombras – tiempo que toma</b>	Clasificación supervisada (Árbol de decisiones) basado en muestras del trópico húmedo - no detalla	Árbol de decisiones binario y flujo de trabajo basado en modelos - 20 días
<b>Clasificación de pérdida de cobertura</b>	Clasificación supervisada, sujeta a experiencia del experto	Desmezcla espectral
<b>Detalle de la detección</b>	No precisa	Hasta 25% de pérdida de cobertura de bosque
<b>Tiempo que toma la clasificación</b>	24 horas por iteración (15 días para el periodo 2001 – 2011)	1 día
<b>Tiempo para el post-procesamiento</b>	1 a 2 meses	1 semana

## 5.4 Evaluación de la exactitud

La evaluación de la exactitud fue realizada por personas externas que no estuvieron involucradas en el proceso de clasificación. El diseño de muestreo para la evaluación de la exactitud del periodo 2001 – 2011 fue en base a una estratificación por conglomerados donde se distribuyeron 2553, para el periodo 2012 – 2014 se usó un muestreo estratificado aleatorio donde se distribuyeron 3500 muestras [30] [38]. Para los años 2017, 2018, 2019 se usó un muestreo estratificado aleatorio donde se distribuyeron 1100 muestras para cada año [39].

## 6. Resultados y discusión

La pérdida de cobertura de bosques para el periodo 2001 – 2019 fue de 2 433 414 ha, y el promedio de pérdida anual es de 128 069.16 ha.

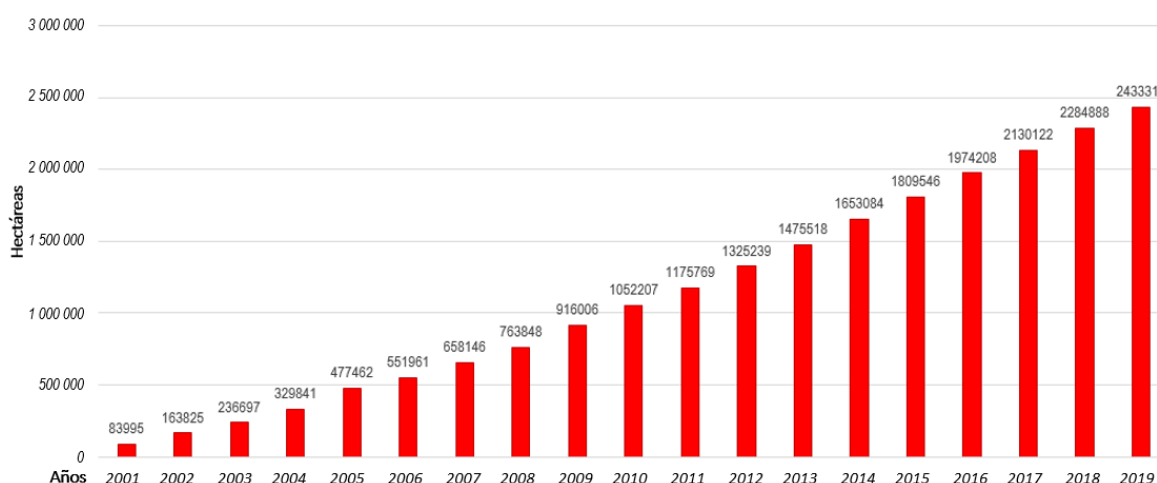


Figura 21. Pérdida acumulada 2001 - 2019

El año donde hubo menos pérdida de bosque fue el 2006 con 74 499 ha y el año donde ocurrió mayor pérdida fue el 2014 con 177 566 ha y coincide con el año donde la metodología de la UMD actualiza su algoritmo de clasificación y no se usaron muestras manuales creadas para ese año, si no las muestras del periodo anterior.

En el año 2005 el incremento de la pérdida de bosque es considerable con respecto a los años anteriores, posiblemente en este año se ha detectado pérdida de cobertura de bosque que no pudo ser detectada en años anteriores, además en este año hubo sequía, la consecuencia de la sequía es perturbaciones en los bosques más sensibles e imágenes de satélite con menor presencia de nubes de lo usual.

A partir del año 2007 se empezaron a detectar con mayor frecuencia parches de parches de deforestación mayores a 50 ha probablemente producida principalmente por la actividad agroindustrial, los parches menores a 1 ha ocupan un porcentaje alto en cada año, esta pérdida se relaciona a deforestación de pequeña escala y también es frecuente en eventos naturales.

En la tabla 3 se muestra el resumen de los resultados de la evaluación de exactitud de la pérdida de cobertura de bosques, para el periodo 2001 – 2011 la exactitud de usuario fue de 86.15% esto significa que el 13.85% (error de comisión) de las áreas detectadas como pérdida de cobertura de bosque no lo son, y la exactitud de productor fue de 67.67% esto significa que existe un 32.93% (error de omisión) de pérdida de cobertura de bosques que no fue detectada. El error de omisión puede



deberse a la falta de información disponible (producido por los vacíos de información en las imágenes ETM+) y/o deficiencias en la etapa de clasificación. El error de comisión estaría ligado directamente a la etapa de clasificación.

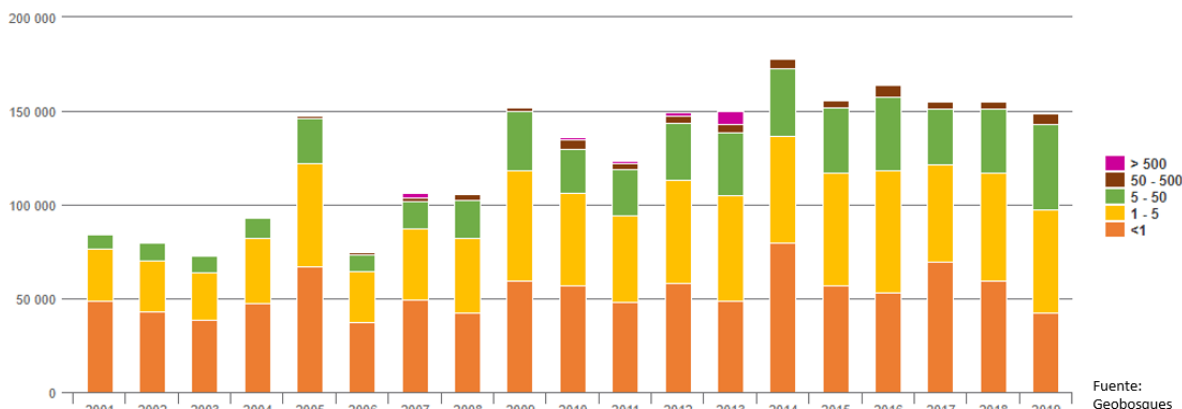


Figura 22. Tamaño de la pérdida de cobertura de bosques periodo 2001 - 2019

Para el periodo 2012 – 2014 se obtuvo una exactitud de usuario de 76.6%, la cual es menor a la obtenida en el periodo anterior. En este periodo el 23.4% de las áreas detectadas como pérdida no lo son. En este periodo se obtuvo una exactitud de productor de 77.4%, esto es más elevado que en el periodo anterior, y se debe principalmente al uso combinado de imágenes ETM+, TM y OLI al usarse mayor cantidad de imágenes existe mayor probabilidad de detectar más áreas de pérdida de cobertura de bosques.

A partir del 2017 se hace un cambio de metodología, esta metodología muestra resultados en la exactitud de usuario consistentes, para los años 2017, 2018 y 2019 se obtuvo 97.8%, 96.4% y 97.5% eso significa que no más del 3.6% de la pérdida detectada fueron errores. La exactitud de productor para los años 2017 y 2018 fue de 94.7% y 94.6% esto significa que hubo hasta un 5.4% de pérdida de bosque que no fue detectada y para el año 2019 hubo un 13.3% de pérdida que no fue detectada, esto es más bajo que en los dos años anteriores, y puede deberse a mayor presencia de nubes en las imágenes satelitales y/o algún problema en alguna de las etapas del flujo de trabajo.

Basados en la diferencia de los errores de omisión y comisión se hizo un ajuste de área de pérdida de cobertura de bosques para los distintos periodos, este ajuste es referencial, pero sería una aproximación a la pérdida real ocurrida en los periodos estudiados (ver tabla 3).

Tabla 3. Comparación de métodos para la detección de pérdida de cobertura de bosque

	2001 - 2011	2012 - 2014	2015 - 2016	2017	2018	2019
<b>Exactitud de usuario</b>	86.15%	76.6%	-	97.8%	96.4%	97.5%
<b>Error de comisión</b>	13.85%	23.4%	-	2.2%	3.6%	2.5%
<b>Exactitud productor</b>	67.67%	77.4%	-	94.7%	94.6%	86.7%
<b>Error omisión</b>	32.93%	22.6%	-	5.3%	5.4%	13.3%
<b>Exactitud global</b>	97.33%	98.6%	-	96.2%	95.5%	91.3%
<b>Área detectada (ha)</b>	1 175 769	477 315		155 914	154 766	148 426
<b>Área compensada (ha)</b>	1 399 157	465 951	-	160 747	157 551	164 456

Los errores de comisión u omisión son menores en la metodología usada en el periodo 2016 – 2019, esto demuestra el beneficio de usar la técnica DSU la cual permite al usuario elegir hasta qué porcentaje de pérdida de cobertura de bosque se quiere detectar, la metodología de UMD no permite esto, se basa en las muestras creadas por los expertos, si los expertos no logran crear muestras de la mayor variedad de tipos de pérdida que existen en el área de estudio los resultados omitirán esos tipos de pérdida en los resultados, lograr crear muestras manuales de la gran variedad de pérdida de bosque que ocurren en los bosques tropicales es una tarea prácticamente muy tediosa y siempre estará sujeto al criterio del experto, el método DSU lo resuelve de una forma práctica y evita el potencial sesgo del experto al crear las muestras manuales.

La integración de datos ETM+, TM y OLI para el periodo 2012 -2013, permitió detectar 30 000 ha de pérdida de bosque que ocurrieron entre el 2010 – 2011 [19], esta cifra es alta y nos permite tener una idea de cómo se modificarían las cifras del periodo 2001 – 2011 si se incluyeran los datos TM en el análisis de la pérdida de cobertura de bosques. En el año donde se hizo ese mapeo las imágenes TM no tenían buena correlación con los datos ETM, su desplazamiento era muy alto y no eran buenas para usarla en el análisis de series de tiempo, en la actualidad estos datos tienen una mejor correlación y podrían ser usados para actualizar y tener cifras más cercanas a la que realmente ocurrieron en ese periodo.

Si bien las fuentes de las imágenes usadas en todos los periodos estudiados corresponden a Landsat, el proceso de reproyección en cada periodo no tienen el misma secuencia y se usan softwares distintos, a pesar de que al final se re proyecta todo a UTM zona 18s, esto genera un movimiento de los pixeles dentro de la imagen, además en ese tiempo los datos Landsat no tenían el nivel de corrección L1TP, esto genera un desplazamiento X, Y de hasta 17m con respecto a la información Landsat actualizada.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

La metodología de la UMD permitió al país tener por primera vez en su historia datos anuales de pérdida de bosque (periodo 2001 – 2016). Sin embargo, con el cambio de metodología se logró obtener una exactitud de usuario y productor mucho más altas, minimizando considerablemente el error en la detección.

Se recomienda reprocesar la pérdida de cobertura de bosques ocurrida entre los años 2001 - 2016 usando la metodología que usa DSU, además se debe incluir en el proceso las imágenes TM, esto permitirá tener cifras más cercanas a las que realmente están ocurriendo y se uniformizará con un mismo nivel de procesamiento de datos Landsat para todos los años analizados. Si se reprocesa la información se recomienda que se uniformice el valor de porcentaje de pérdida de cobertura de bosque que se quiere detectar, esto debe incluir un testeo del modelo DSU en imágenes TM.

Si bien no es una práctica común, se recomienda hacer una evaluación de la exactitud por cada año analizado, esto permitirá conocer mejor cuánto de pérdida detectada fue omitida o fue un error, y tener una aproximación más cercana a la pérdida de cobertura de bosques que realmente está ocurriendo, como se hizo en los años 2017, 2018 y 2019.

Se recomienda discriminar entre la pérdida de cobertura de bosques por actividades antrópicas y naturales. Esto además de permitirnos conocer cuál es la superficie de deforestación, ayudará a conocer los potenciales efectos del cambio climático en los bosques húmedos tropicales del Perú.

Se recomienda crear capas de ríos para cada año, debido a que podrían ocurrir errores debido a pixeles mixtos entre el agua, suelo y bosque.

## 8. Referencias

- [1] J. Malleux Orjeda, Mapa forestal del Perú : memoria explicativa, La Molina: Universidad Nacional Agraria La Molina, Departamento de Manejo Forestal, 1975.
- [2] INRENA, Guía explicativa del Mapa Forestal 1995, Lima - Perú: INRENA, 1996a.
- [3] INRENA, «Monitoreo de la Deforestación en la Amazonia Peruana,» INRENA, Lima - Perú, 1996b.
- [4] INRENA, «Mapa de Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra del Perú,» INRENA, Lima - Perú, 2000.
- [5] INRENA, «Mapa de Deforestación de la Amazonía Peruana correspondiente al año 2000,» INRENA, Lima - Perú, 2005.
- [6] MINAM, «Mapa de Deforestación de la Amazonia Peruana - 2000,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2009.
- [7] W. LLactayo, K. Salcedo y E. Victoria, «Memoria Técnica de la Cuantificación de la Cobertura de Bosque y Cambio de Bosque a no Bosque de la Amazonia Peruana Período 2000 - 2005 - 2009,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2013a.
- [8] W. LLactayo, K. Salcedo y E. Victoria, «Memoria Técnica de la Cuantificación de Cambios de la Cobertura de Bosque y no Bosque por Deforestación en el Ambito de la Amazonia Peruana Período 2009 - 2010 - 2011,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2013b.
- [9] MINAM, "Estrategia nacional sobre bosques y cambio climático," Ministerio del Ambiente, Lima, Perú, 2016.
- [10] MINAM, «Estrategia de Intervención del Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático al 2030,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2020.
- [11] MINAM, «Resolución N°324-2015 MINAM,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2015.
- [12] MINAM, «Resolución N°12-2018-MINAM/VMDERN/PNCB "Regulación de la operatividad del Módulo de Monitoreo de la Cobertura de los Bosques",» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2018.
- [13] MINAM, «Memoria Descriptiva del Mapa de Cobertura Vegetal Del Perú,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2012.
- [14] P. Potatov, J. Dempewolf, Y. Talero, M. Hansen, S. Stehman, C. Vargas, E. Rojas, D. Castillo, E. Mendoza, A. Calderón, R. Giudice, N. Malaga y B. Zutta, «National satellite-based humid tropical forest change assessment in Peru in support of REDD+ implementation ,» *Environmental Research Letters*, pp. 9,13, 2014.
- [15] GEOBOSQUES, 2021. [En línea]. Available: <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>.
- [16] C. Vargas, Montalvan, Joselyn y A. León, «Early warning tropical forest loss alerts in Peru using Landsat and direct spectral unmixing,» *Environmental Research Communications*, 2019.
- [17] M. Hansen, A. Krylov, A. Tyukavina, P. Potapov, S. Turubanova, B. Zutta, I. Suspense, B. Margono, F. Stolle y R. Moore, «Humid tropical forest disturbance alerts using Landsat data,» *Environmental Research Letters*, 2016.
- [18] MINAM, «Protocolo de la clasificación de cobertura de pérdida de bosque en los bosques húmedos amazónicos entre los años 2000 - 2011,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2015.
- [19] MINAM, «Reporte de la Pérdida de los Bosques Húmedos Amazónicos al 2011-2013,» Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, 2015.
- [20] GEOBOSQUES, «<http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/servicios.php>,» [En línea]. Available: <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/servicios.php>. [Último acceso: 01 02 2021].

- [21] USGS, «Landsat 5,» [En línea]. Available: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con). [Último acceso: 01 02 2021].
- [22] USGS, «Landsat 8,» [En línea]. Available: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con). [Último acceso: 01 02 2021].
- [23] M. A. Wulder, T. R. Loveand, D. P. Roy, C. J. Crawford, Masek, J. G y C. E. Woodcock, «Current status of Landsat program, science, and applications,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 225, pp. 127-147, May 2019.
- [24] USGS, «Landsat Collections 1,» [En línea]. Available: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-1?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=1#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-1?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con). [Último acceso: 31 01 2021].
- [25] USGS, «Landsat Collection 2,» [En línea]. Available: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-2?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=1#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-2?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con). [Último acceso: 31 01 2021].
- [26] USGS, «Landsat Collection 1 vs Collection 2 Summary,» [En línea]. Available: [https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/Landsat-C1vsC2-2020-1228\\_lmws.pdf](https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/Landsat-C1vsC2-2020-1228_lmws.pdf). [Último acceso: 31 01 2020].
- [27] USGS, «Landsat levels of Processing,» 14 02 2021. [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-levels-processing>.
- [28] P. V. Potapov, S. A. Turubanova, M. C. Hansen, B. Adusei, M. Broich, A. Altstatt, L. Mane, Justice y C. O, «Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010, with,» *Remote Sensing of Environment*, n° 112, pp. 106 - 116, 2012.
- [29] P. Potapov, S. Turubanova y M. C. Hansen, «Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 2, n° 115, pp. 548 - 561, 2011.
- [30] MINAM, Memoria descriptiva del Mapa de Bosque/No bosque del año 2000 y pérdida de cobertura de Bosques Húmedos Amazónicos del Perú 2000 - 2011, Lima - Perú: Ministerio del Ambiente, 2015.
- [31] M. O. Smith, S. L. Ustin, J. B. Adams y A. Gillespie, «Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images,» *Remote Sensing of Environment*, n° 31, pp. 1-26, 1990.
- [32] A. Bateson y B. Curtiss, «A method for manual endmember selection and spectral unmixing,» *Remote Sensing of Environment*, n° 55, pp. 229-243, 1996.
- [33] Y. E. Shimabukuro, A. Egidio, V. Duarte, L. O. Anderson, L. E. O. A. F. Cruz de Aragao, R. Beuchle, D. Simonetti y R. C. Grecchi, «Monitoring deforestation and forest degradation in the Amazon basin using multi-temporal fraction images derived from Sentinel-2 sensor data,» pp. 1218-1225, 2017.
- [34] G. P. Asner, D. E. Knapp, A. Balaji y G. Paez-Acosta, «Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite,» *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 3, n° 033543, 20019.
- [35] C. M. Souza Jr, S. Hayashi y A. Veríssimo, «Near real-time Deforestation Detection for Enforcement of forest Reserves in Mato Grosso,» de *Land Governance in Support of the Millennium Development Goals: Responding to new Challenges FIG - World Bank Conference*, Washington DC - USA, 2009.
- [36] Y. E. Shimabukuro, J. R. Dos Santos, A. R. Formaggio, V. Duarte, T. Friedrich y F. Bernardo, «The Brazilian amazon monitoring program: PRODES and DETER projects,» de *Global Forest Monitoring from Earth Observation*, Boca Raton, FL-USA, CRC Press, 2012, pp. 167-183.

- [37] C. Vargas, T. Itoh, S. Tsuji, T. H. K. Koide y H. Okonogi, «Automatic deforestation detection methodology using Sentinel-1,» de *IGARSS 2019 - 2019IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama - Japon, 2019.
- [38] Proyecto REDD+ MINAM, «Validación de los mapas generados por el Proyecto REDD+ MINAM según las buenas practicas de GOF-C-GOLD - Informe de validacion del mapa de pérdida de bosques 2011 - 2014,» Proyecto REDD+ MINAM, Lima - Perú, 2016.
- [39] MINAM, «Análisis de la exactitud temática de mapas anuales de deforestación en la amazonia (años 2017, 2018, 2019),» MINAM, Lima - Perú, 2021.
- [40] USGS, «Landsat 7,» [En línea]. Available: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con). [Último acceso: 01 02 2021].
- [41] S. Tompkins, J. F. Mustard, C. M. Pieters, Forsyth y D. W., «Optimization of endmembers for spectral mixture analysis,» *Remote Sensing of Environment*, n° 59, pp. 472-489, 1997.