

Estado del Arte sobre el Preprocesamiento de Imágenes Satelitales para el Monitoreo de la Deforestación

Villegas Noblecilla, Luis Javier

17 de julio de 2025

Resumen

El monitoreo de la deforestación es crucial para la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático. Este documento presenta un estado del arte sobre las metodologías de preprocesamiento y extracción de características de imágenes satelitales (Sentinel-2, PeruSAT-1) para su aplicación en modelos de aprendizaje profundo destinados a la detección de la pérdida de cobertura forestal. Se detalla un flujo de trabajo riguroso que abarca desde la selección de imágenes y las correcciones (geométricas, radiométricas) hasta el enmascaramiento de nubes y el escalado de datos. Finalmente, se discute la extracción de características espectrales y de textura como paso previo para alimentar modelos predictivos, sentando las bases para un sistema de monitoreo robusto y preciso.

Palabras Clave: Teledetección, Preprocesamiento, Sentinel-2, PeruSAT-1, Deforestación.

1. Conceptos Fundamentales de Teledetección

1.1. ¿Qué es la teledetección?

La ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Lillesand et al., 2015).

1.2. Proceso de la Teledetección

El proceso de teledetección consta de una secuencia estructurada: (1) planteamiento del problema y formulación de hipótesis; (2) identificación de los requisitos de datos y adquisición mediante sensores y plataformas adecuados; (3) recepción de energía electromagnética —reflejada o emitida— del objetivo, su transmisión a través de la atmósfera, su captura por un sensor y su conversión a valores de imagen digital; (4) procesamiento de imágenes, incluyendo calibración radiométrica y atmosférica, corrección geométrica y mejora visual; (5) extracción de información temática (p. ej., clasificación, detección de cambios); (6) evaluación y validación de la precisión; (7) visualización y presentación de resultados (Jensen, 2016).

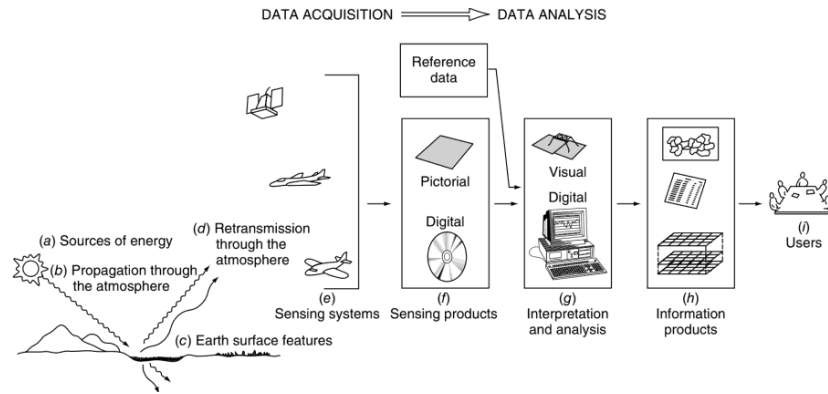


Figura 1: Proceso y Elementos de la Teledetección (Lillesand et al., 2015)

1.3. Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético (EM) es el rango continuo de radiación electromagnética, que abarca desde los rayos gamma (la frecuencia más alta y la longitud de onda más corta) hasta las ondas de radio (la frecuencia más baja y la longitud de onda más larga)... La teledetección implica la medición de energía en muchas partes del espectro electromagnético (EM). Las principales regiones de interés en la teledetección satelital son la ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas. (Campbell & Wynne, 2011).

1.4. Firmas Espectrales

El patrón característico de reflectancia o emitancia de un material en función de la longitud de onda. Esta "firma" permite distinguir diferentes tipos de coberturas terrestres —como la vegetación, el agua, el suelo o las superficies artificiales— basándose en sus respuestas espectrales únicas a través de las diferentes bandas del espectro electromagnético (Jensen, 2016).

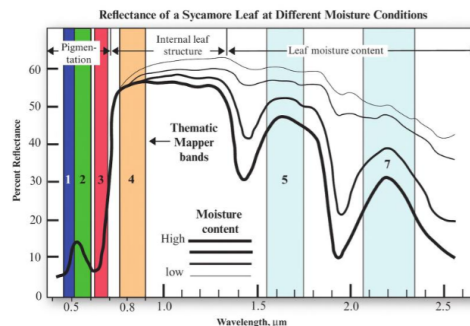


Figura 2: Cambios progresivos en el porcentaje de reflectancia de una hoja de sicómoro con diferentes niveles de humedad en peso seco al horno (Jensen, 2016)

1.5. Resolución Espacial

La medida del objeto más pequeño que puede ser resuelto por un sensor, o el área en el terreno representada por cada píxel en una imagen. Una alta resolución espacial implica que los píxeles representan un área terrestre pequeña (p. ej., 1 metro), permitiendo la

identificación de detalles finos, mientras que una baja resolución implica que los píxeles cubren un área mayor (p. ej., 30 metros) (Schowengerdt, 2012).

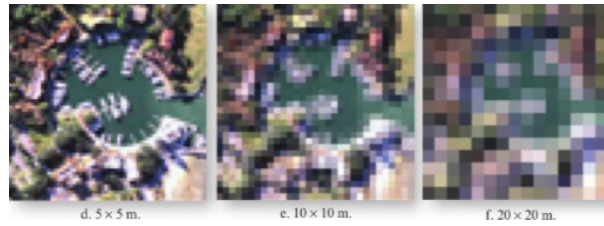


Figura 3: La imagen original de Harbor Town, SC, se recogió a una resolución espacial nominal de 0.3 x 0.3 m (aproximadamente 1 x 1 pies) utilizando una cámara de marco digital. Las imágenes originales se volvieron a muestrear para derivar las imágenes con las resoluciones espaciales simuladas que se muestran. (Jensen, 2016).

1.6. Resolución Espectral

La capacidad de un sensor para definir intervalos de longitud de onda finos. Se describe por el número y el ancho de las bandas espectrales que el sensor puede medir. Una resolución espectral alta implica un mayor número de bandas, más estrechas y contiguas (como en los sensores hiperspectrales), lo que permite una caracterización más detallada de las firmas espectrales de los objetos (Thenkabail & Lyon, 2016).

1.7. Resolución Temporal

La frecuencia con la que un sistema de teledetección adquiere imágenes de una misma área de la superficie terrestre. Se conoce comúnmente como "tiempo de revisita". Una alta resolución temporal (p. ej., revisita diaria) es crucial para monitorear fenómenos dinámicos como el crecimiento de cultivos, la deforestación o la respuesta a desastres naturales (Campbell & Wynne, 2011).

1.8. Resolución Radiométrica

La sensibilidad de un sensor para detectar diferencias sutiles en la intensidad de la energía electromagnética. Se cuantifica por el número de niveles de brillo que un sensor puede registrar, determinado por el número de bits utilizados para representar la energía medida (p. ej., un sensor de 8 bits registra 256 niveles de brillo, mientras que uno de 12 bits registra 4096). Una mayor resolución radiométrica permite una mejor diferenciación entre objetos con reflectancias similares (Jensen, 2016).

2. Plataformas Satelitales de Interés

2.1. Satélite Sentinel-2

El satélite Sentinel-2, compuesto por dos satélites gemelos, ofrece imágenes multiespectrales de alta resolución para el monitoreo terrestre. Cuenta con 13 bandas espectrales con resoluciones espaciales de entre 10 m y 60 m, y un ancho de barrido de 290 km.

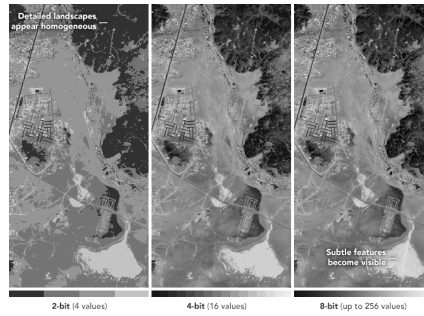


Figura 4: Nasa Earth Observatory (2017). Space Archaeology: In the Realm of Resolution. Recuperado de: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/91071/space-archaeology-in-the-realm-of-resolution>

Su resolución radiométrica es de 12 bits, lo que permite una mayor precisión en la captura de datos. Los satélites gemelos vuelan en la misma órbita pero están escalonados a 180° , y la especificación completa de la misión está diseñada para proporcionar una alta frecuencia de revisión de 5 días en el Ecuador. Estos datos son útiles en agricultura, gestión de emergencias, cambio climático y silvicultura, y están disponibles de forma gratuita para el público (Copernicus Data Space Ecosystem, 2023). Para el satélite Sentinel-2, actual-

| Band | Resolution | Central Wavelength | Description |
|------|------------|--------------------|----------------------------------|
| B1 | 60 m | 443 nm | Ultra Blue (Coastal and Aerosol) |
| B2 | 10 m | 490 nm | Blue |
| B3 | 10 m | 560 nm | Green |
| B4 | 10 m | 665 nm | Red |
| B5 | 20 m | 705 nm | Visible and Near Infrared (VNIR) |
| B6 | 20 m | 740 nm | Visible and Near Infrared (VNIR) |
| B7 | 20 m | 783 nm | Visible and Near Infrared (VNIR) |
| B8 | 10 m | 842 nm | Visible and Near Infrared (VNIR) |
| B8a | 20 m | 865 nm | Visible and Near Infrared (VNIR) |
| B9 | 60 m | 940 nm | Short Wave Infrared (SWIR) |
| B10 | 60 m | 1375 nm | Short Wave Infrared (SWIR) |
| B11 | 20 m | 1610 nm | Short Wave Infrared (SWIR) |
| B12 | 20 m | 2190 nm | Short Wave Infrared (SWIR) |

Figura 5: GISGeography. (2024). Sentinel 2 Bands and Combinations. Recuperado de: <https://gisgeography.com/sentinel-2-bands-combinations/>.

mente, los dos principales niveles de producto distribuidos a los usuarios son el Nivel-1C y el Nivel-2A:

- **Nivel-1C (Level-1C): Reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA)**
Copernicus, 2025
 - **Definición:** Proporciona imágenes de reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA), representando la energía solar reflejada antes de ser corregida por los efectos atmosféricos.
 - **Características:**
 - Imágenes ortorrectificadas en sistema de coordenadas UTM/WGS84.
 - Distribución en teselas (tiles) de 110x110 km.

- Resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 metros.
- **Uso:** Producto base para usuarios que desean realizar sus propias correcciones atmosféricas.
- **Nivel-2A (Level-2A): Reflectancia en la Superficie (BOA)** Copernicus, 2025
 - **Definición:** Producto estándar listo para el análisis que proporciona la reflectancia de la superficie (BOA), ya que ha sido corregido atmosféricamente con el algoritmo sen2cor.
 - **Características:**
 - Derivado del Nivel-1C tras aplicarle la corrección atmosférica.
 - *Nota importante:* Es generado sistemáticamente por el segmento terreno de Copernicus y se distribuye como un producto estándar global.
 - Incluye capas auxiliares como el Mapa de Clasificación de Escena (SCL), el Mapa de Espesor Óptico de Aerosoles (AOT) y el Mapa de Vapor de Agua (WV).
 - **Uso:** Recomendado para la mayoría de aplicaciones temáticas (agricultura, vegetación, etc.) al representar fielmente las propiedades de la superficie.

2.2. Satélite Perusat-1

“PeruSAT-1 es un sistema de satélite óptico de observación terrestre de resolución submétrica, que proporciona imágenes pancromáticas GSD de 0.7 m y datos de imágenes multiespectrales GSD de 2.8 m entre otros atributos técnicos que permiten el uso del satélite en diversas aplicaciones. El PeruSAT-1 se lanzó a una órbita terrestre baja sincrónica al sol el 16 de septiembre del 2016 y se espera que su vida operativa supere los 10 años. Actualmente PeruSAT-1 se dedica a atender a los usuarios públicos del Estado Peruano.

El satélite peruano observa la Tierra a través de la cámara óptica NAOMI de muy alta resolución, diseñada y desarrollada por Airbus Defence and Space. Este instrumento óptico de carburo de silicio proporciona imágenes en resolución alta o muy alta” (Zúñiga et al., 2019).

Además tiene una resolución temporal de aproximadamente 26 días (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2017).

| ÍTEM | DETALLE |
|--------------------------|--|
| Entidad responsable | CONIDA |
| Misión | Observación de la Tierra (Óptica) |
| Órbita | Helio-síncrona (694km) |
| Resolución espacial | 0.7m en Pancromático, 2.8m en Multiespectral |
| Dimensiones | 1.0 m x 1.0 m x 1.7 m |
| Fecha de lanzamiento | 16 de setiembre del 2016 - (Kourou, Guyana Francesa) |
| Tiempo de vida de diseño | 10 años |
| Ancho de barrido | 14.5 Km. |
| Banda espectral | 01 Banda Pancromática: 0.45 – 0.75 μm |
| Bandas espectrales | 04 Bandas Multiespectrales: Blue: 0.45 – 0.52 μm Green: 0.53 – 0.60 μm Red: 0.62 – 0.69 μm NIR: 0.76 – 0.89 μm |
| Resolución radiométrica | 12 bits |

Figura 6: Características del satélite peruano PERUSAT-1. Fuente: CONIDA, 2016. Recuperado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2017.

La banda pancromática y la técnica de *pansharpening* Zhang et al., 2023

Una imagen **pancromática (PAN)** es aquella que, debido a las limitaciones intrínsecas de los sensores, puede proporcionar una alta resolución espacial. Se compone de una sola banda, lo que la convierte en una imagen en escala de grises que es visualmente más clara que su contraparte multiespectral (MS).

Por otro lado, la fusión de estas imágenes, denominada **pansharpening**, es el proceso de combinar la información espacial de la imagen PAN con la información espectral de la imagen MS. El objetivo es generar una imagen fusionada con mayor resolución tanto espacial como espectral, la cual es más confiable para tareas posteriores en comparación con cualquiera de las imágenes de origen. Tras este proceso, se obtiene una imagen multiespectral de alta resolución (HR MS).

2.2.1. Productos y Niveles de Procesamiento

El sistema PeruSAT-1 ofrece distintos tipos de productos y niveles de procesamiento para adaptarse a las necesidades del usuario. La selección de estos parámetros es el primer paso en el flujo de trabajo para la obtención y análisis de las imágenes.

■ Tipo de Producto:

- *Pancromático*: Imagen en blanco y negro de alta resolución espacial.
- *Multiespectral*: Imagen a color (resolución espacial media) con varias bandas espectrales.
- *Pancromático + Multiespectral*: Entrega de ambos productos por separado.
- *Pan-sharpened*: Producto fusionado que combina la alta resolución espacial de la imagen pancromática con la información de color de la multiespectral.

■ Nivel de Procesamiento:

- *Imagen Ortorectificada*: Producto corregido geométricamente y georreferenciado, listo para su uso en Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- *Imagen Primaria (Sensor Level)*: Datos del sensor sin georreferenciación, que requieren un procesamiento adicional por parte del usuario.

2.3. Cuadro comparativo

| Aspecto | PeruSAT-1 | Sentinel-2 |
|-------------------------|---|---|
| Agencia operadora | CONIDA (Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial, Perú) | ESA (Agencia Espacial Europea) |
| Resolución espacial | Pancromática: 0.7 m Multiespectral: 2.8 m | 10 m (RGB y NIR) 20 m (Red Edge, SWIR) 60 m (bandas atmosféricas) |
| Resolución espectral | 4 bandas: - Azul (450–520 nm) - Verde (530–590 nm) - Rojo (620–690 nm) - NIR (770–890 nm) | 13 bandas: - Visible (RGB) - Red Edge (4 bandas: 705–783 nm) - NIR (842 nm) - SWIR (2 bandas: 1610 y 2190 nm) - Bandas atmosféricas (443 y 945 nm) |
| Resolución temporal | 26 días | 5 días (con los dos satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B) |
| Disponibilidad de datos | Acceso restringido: se debe solicitar a CONIDA | Gratuita: disponible a través de Copernicus Open Access Hub |
| Resolución radiométrica | 12 bits | 12 bits |

Cuadro 1: Comparación entre los satélites PeruSAT-1 y Sentinel-2

2.3.1. Ventajas del PeruSAT-1

- Mayor resolución espacial: “En la siguiente figura se observa que las imágenes de las imágenes de Sentinel-2 describen la escena con una menor resolución espacial comparadas con las imágenes de PeruSat-1, presentando también algunos problemas cuando se trata de bordes, texturas y algunos otros detalles que se visualizan al hacer zoom en las imágenes” (Pineda et al., 2020).

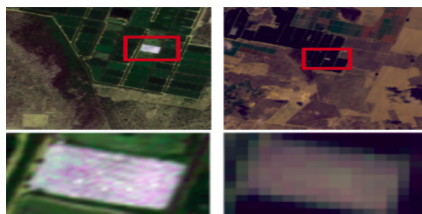


Figura 7: Diferencia de la resolución espacial entre PeruSat-1 y Sentinel-2. a) Imagen del satélite PeruSat-1 con 2,8 metros de resolución por píxel, b) Imagen del satélite Sentinel-2 con 10 metros de resolución por píxel. Recuperado de: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B1-2020/9/2020/>.

2.3.2. Limitaciones del PeruSAT-1

- **Baja resolución espectral:** Una de las principales limitaciones de PeruSAT-1 es su reducida resolución espectral, especialmente por la ausencia de bandas en el infrarrojo de onda corta (SWIR), esenciales para estudios de contenido hídrico en vegetación y suelo. Sin estas bandas, su precisión en la detección de disturbios forestales puede caer hasta un 19–26 % (Li et al., 2022). Como se detalla en la tabla comparativa, PeruSAT-1 carece de sensores SWIR, lo que restringe su capacidad para evaluar estrés hídrico o madurez de cultivos en comparación con plataformas como Sentinel2.
- **Baja Resolución Temporal:** El periodo de revisita de 26 días de PeruSAT-1 dificulta el seguimiento de eventos dinámicos en superficie. Este tipo de compromiso—priorizar alta resolución espacial frente a frecuencia temporal—es común en muchos satélites (Sun et al., 2025). Para mitigarlo, se han desarrollado métodos de fusión espacio-temporal (STF), que combinan imágenes de alta frecuencia (por ejemplo, MODIS o Sentinel-2) con otras de alta resolución espacial (como Landsat) (X. Zhu et al., 2018). Modelos recientes basados en redes neuronales y GANs han demostrado mejorar significativamente la calidad de estos productos fusionados (Lian et al., 2025).

3. Preprocesamiento de las imágenes satelitales

Para la selección de los pasos en el preprocesamiento se usó como referencia: Galindo G., Espejo O. J., Rubiano J. C., Vergara L. K., Cabrera E. (2014). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. V 2.0. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C., Colombia. 27-33 pág. Recuperado de:

<https://observatorio.epacartagena.gov.co/protocolo-de-procesamiento-digital-de-imagenes-para-la-cuantificacion-de-la-deforestacion-en-colombia-v-2-0/>

“El preprocesamiento de las imágenes, consiste en hacer las correcciones de las imágenes, con el fin de eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización o radiometría de los píxeles que la componen. Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores, en el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en 4 grupos: distorsiones originadas por la plataforma, distorsiones provocadas por la rotación terrestre. distorsiones por el sensor, distorsiones provocadas por la atmósfera” (Salinero, 2008).

3.1. Selección y descarga de imágenes

El paso inicial en el flujo de trabajo es la adquisición de los datos brutos. Esto implica la selección y descarga de las imágenes satelitales que servirán como insumo para el análisis. Para ello, es necesario definir parámetros de filtrado que acoten la búsqueda a las imágenes de interés para los objetivos del estudio. Los dos parámetros esenciales son la ubicación y la fecha (Galindo et al., 2014).

- **Ubicación de estudio:** Se define un área de interés (AOI) específica, usualmente mediante un polígono o archivo vectorial, que delimita geográficamente la zona a analizar.

- **Periodo o fecha de las imágenes:** Se establece un rango de fechas concreto para la adquisición de las imágenes, lo cual es fundamental para estudios de cambio, monitoreo o análisis multitemporales.

3.1.1. Criterios de Calidad de la Imagen

Una vez preseleccionadas las imágenes por área y fecha, se aplica un riguroso control de calidad para asegurar su idoneidad. Este filtro determina si una imagen se considera “APTA” o “NO APTA” para el análisis, basándose en su consistencia geométrica y en la presencia de obstrucciones atmosféricas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2021). Los criterios principales evaluados son:

- **Consistencia entre Resolución y Escala:** La Distancia de Muestreo del Terreno (GSD) de la imagen debe ser coherente con la escala cartográfica objetivo del estudio. Por ejemplo, para una escala de 1:25.000, se requiere un GSD inferior a 2.5 metros (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2021).
- **Cobertura de Nubes:** Se establece un umbral máximo de cobertura de nubes, ya que estas ocultan la superficie terrestre e invalidan el análisis. Generalmente, se consideran de alta calidad las imágenes con menos del 10 % de nubes, mientras que aquellas con más del 30 % suelen ser descartadas para la mayoría de las aplicaciones (Whitcraft et al., 2015).

3.2. Corrección y Registro Geométrico

Una vez seleccionadas las imágenes de calidad, el paso fundamental es la **corrección geométrica**. Este proceso rectifica las distorsiones inherentes a la adquisición de la imagen, las cuales son causadas por factores como las variaciones en la altitud y actitud de la plataforma (cabeceo, alabeo y guiñada), la rotación y curvatura de la Tierra, el relieve del terreno y las características del sensor.

Estas distorsiones pueden hacer que una imagen no coincida con las coordenadas geográficas reales, lo que impide su correcta integración con mapas, sistemas de información geográfica (SIG) o datos de campo (Green et al., 2000). El objetivo final de la corrección es la georreferenciación: la asignación de una posición geográfica precisa a cada píxel.

La precisión de este paso es crítica para los análisis multitemporales. Es indispensable lograr un **co-registro exacto**, idealmente a nivel de sub-píxel, entre todas las imágenes de la serie de tiempo. Esto garantiza que cualquier cambio detectado corresponda a una modificación real en la cobertura y no a un desajuste espacial entre las escenas (Galindo et al., 2014).

Finalmente, se debe verificar la exactitud posicional del producto corregido. Este control de calidad se realiza calculando el Error Medio Cuadrático (RMSE) de la imagen respecto a puntos de control terrestre (GCPs), cartografía de referencia u ortoimágenes de mayor precisión, asegurando que cumple con los estándares requeridos para el estudio (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2021).

3.3. Apilamiento de Bandas

Una vez que las bandas individuales han sido corregidas geométricamente, se procede al apilamiento de bandas. Este paso consiste en combinar múltiples bandas espectrales en un

único archivo de imagen multibanda, asegurando que todos los píxeles están perfectamente co-registrados. Esta estructura de datos unificada es clave para cualquier análisis posterior, como clasificación, cálculo de índices espectrales o fusión de datos (Lillesand et al., 2015). Las principales ventajas de realizar este apilamiento son:

- **Cálculo eficiente de índices espectrales:** Permite calcular índices como el NDVI o NDWI directamente, ya que toda la información espectral de un píxel está contenida en una sola estructura de datos.
- **Integridad del análisis espacial:** Al trabajar con un único archivo, se elimina el riesgo de errores por desajuste espacial que podrían ocurrir si se manejaran las bandas como archivos separados.
- **Optimización de los flujos de trabajo:** Simplifica significativamente la implementación de algoritmos de clasificación, segmentación y otros análisis supervisados que requieren múltiples bandas como entrada.

Dado que la construcción de compuestos de imágenes requiere procesar un gran volumen de datos, se recomienda automatizar este paso mediante funciones de procesamiento por lotes (batch processing) o a través de scripts personalizados en lenguajes como Python o R (Galindo et al., 2014).

3.4. Conversión de los datos a superficie de reflectancia

Los valores de los píxeles en las imágenes satelitales se encuentran generalmente en unidades adimensionales conocidas como niveles digitales (DN). Para que estos datos sean físicamente significativos, el primer paso es la **calibración radiométrica**, un proceso que transforma los DN en unidades de energía, como la radiancia (Asner et al., 2013).

Posteriormente, y debido a que la radiancia medida por el sensor contiene la influencia tanto de la superficie terrestre como de la atmósfera, es indispensable aplicar una **corrección atmosférica**. Este segundo paso minimiza los efectos de dispersión y absorción causados por los componentes atmosféricos para obtener una imagen de **reflectancia de superficie**. Este producto final es esencial, ya que presenta una mayor consistencia radiométrica entre imágenes de diferentes fechas y sensores, permitiendo así la aplicación de modelos de análisis estandarizados y comparables (Hansen & Loveland, 2012).



Figura 8: (1) la imagen de entrada de reflectancia TOA de nivel 1C de Sentinel-2, (2) la imagen de reflectancia de superficie de nivel 2A corregida atmosféricamente. Fuente: ESA. Recuperado de: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-processing>.

3.5. Enmascaramiento de nubes y sombras

Incluso después de la corrección atmosférica, las imágenes pueden contener píxeles inutilizables debido a la presencia de nubes, sombras de nubes, bruma o bandeamiento del sensor. Por lo tanto, es un paso crítico depurar las imágenes mediante un enmascaramiento, que consiste en identificar y excluir estos píxeles para que el análisis se centre únicamente en la información válida de la cobertura terrestre (Galindo et al., 2014).

Para lograr un enmascaramiento robusto, a menudo se recomienda combinar los resultados de diferentes algoritmos. Por ejemplo, se ha demostrado que la combinación de herramientas como la función *Masking* de CLASlite, el reconocido algoritmo Fmask (Z. Zhu & Woodcock, 2012) y otras herramientas como ImgTools, produce resultados más satisfactorios que el uso de un solo método (Galindo et al., 2014). Es importante destacar que los productos de datos modernos, como los de Nivel-2A de Sentinel-2, ya incluyen una capa de clasificación de escena (SCL) generada automáticamente, la cual facilita enormemente este proceso.

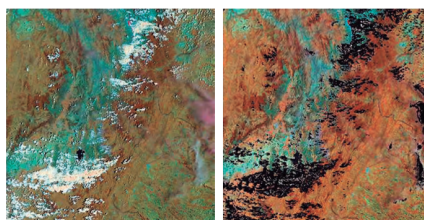


Figura 9: Izquierda: Imagen Landsat Path 7- Row 56 original en combinación RGB 453 vs la imagen reflectancia (Derecha) en la misma combinación de banda con enmascaramiento de las nubes (zonas en color Negro). Fuente: Galindo et al., 2014.

3.6. Normalización radiométrica

Aun cuando las imágenes han sido procesadas a reflectancia de superficie (corrección absoluta), pueden persistir variabilidades radiométricas entre escenas adquiridas en diferentes fechas. Estas diferencias, causadas por condiciones atmosféricas residuales, distintos ángulos de iluminación solar o variaciones en la calibración del sensor, deben ser minimizadas para poder realizar comparaciones multitemporales fiables (Olthof et al., 2005; Potapov et al., 2012).

Para ello, se aplica un proceso de normalización radiométrica relativa. Su objetivo es ajustar los valores de una imagen (denominada esclava) para que sean radiométricamente consistentes con los de una imagen de referencia (maestra), que usualmente es la de la primera fecha del análisis (Caprioli et al., 2005). Un método común para lograr esto es ajustar la media y la desviación estándar de cada banda de la imagen a normalizar para que coincidan con las de la imagen de referencia.

Para aplicaciones específicas como el monitoreo de vegetación, no siempre es necesario normalizar todas las bandas. Se ha demostrado que la información más relevante para el análisis de cambio se concentra en las bandas del rojo, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). Por tanto, el proceso puede optimizarse centrándose en ellas, idealmente de forma automatizada mediante el uso de scripts de programación (Galindo et al., 2014).

3.7. Relleno de lagunas temporales

El paso final en la preparación de una serie de tiempo densa y continua es el relleno de lagunas temporales. Después del enmascaramiento, las imágenes resultantes contienen píxeles sin datos (lagunas), principalmente en las áreas previamente cubiertas por nubes o sombras. Este proceso reemplaza dichos píxeles faltantes con valores estimados, los cuales son interpolados a partir de los píxeles válidos de las imágenes vecinas en el tiempo (fechas anteriores y/o posteriores).

Existe un amplio espectro de técnicas para estimar valores espacialmente continuos a partir de observaciones puntuales. Los enfoques deterministas más sencillos, como la interpolación lineal o la ponderación inversa de la distancia, se basan en relaciones matemáticas directas entre puntos de datos conocidos. Los métodos más sofisticados incorporan ajustes funcionales suaves (por ejemplo, splines) o modelan completamente la estructura de autocorrelación espacial mediante kriging geoestadístico (simple, ordinario o universal). Fundamentalmente, la precisión final de cualquier superficie interpolada depende no solo de la robustez teórica del algoritmo elegido, sino también de la densidad, la distribución y la calidad de las observaciones de entrada, así como del grado en que los supuestos del método se ajustan a las características de la variable ambiental en estudio. (Webster & Oliver, 2007).

4. Extracción de Características

4.1. Escalado de Datos para Modelado

Como paso final del preprocesamiento, y para asegurar la compatibilidad con la mayoría de los algoritmos de machine learning, es necesario ajustar el rango de los valores de los píxeles. Los productos de reflectancia de superficie de Sentinel-2 almacenan los valores como enteros para optimizar el tamaño del archivo, aplicando un factor de escala.

Por lo tanto, para obtener los valores de reflectancia física en el rango de $[0, 1]$, cada píxel debe ser dividido por el factor de escala cuantificador, que es 10000 (Copernicus Programme, European Space Agency, 2025). Este proceso de escalado es fundamental, ya que muchos modelos predictivos requieren entradas en este rango para un rendimiento y convergencia óptimos.

4.2. Analisis Espectral e Indices de Vegetación

Los sistemas satelitales son herramientas clave para el monitoreo del estado de la vegetación a múltiples escalas. Para traducir la información contenida en las imágenes multispectrales en parámetros cuantificables, se utilizan los índices de vegetación. Un índice de vegetación se define como un parámetro adimensional, calculado a partir de combinaciones de valores de reflectancia en distintas longitudes de onda, y está diseñado para ser particularmente sensible a la presencia, vigor y cantidad de la cubierta vegetal (Abderrazak et al., 1996).

El principio físico detrás de la mayoría de estos índices se basa en la respuesta espectral característica de la vegetación sana. Las plantas absorben fuertemente la radiación en la región del rojo del espectro (principalmente debido a la clorofila para la fotosíntesis) y reflejan fuertemente la radiación en el infrarrojo cercano (NIR) (debido a la estructura celular interna de las hojas). El uso combinado de estas dos bandas en una razón o

diferencia normalizada permite una discriminación robusta entre la vegetación y otras coberturas, a la vez que minimiza los efectos de la iluminación y el relieve topográfico (Jensen, 2016).

Es fundamental reconocer que, si bien los índices son excelentes indicadores de la cantidad relativa de vegetación, para obtener mediciones biofísicas absolutas (como biomasa o índice de área foliar), estos deben ser calibrados y validados con mediciones de campo (Abderrazak et al., 1996).

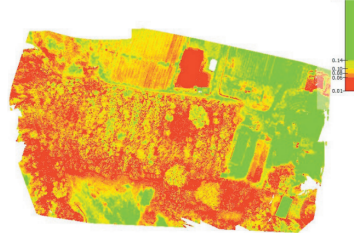


Figura 10: Ortomosaico de reflectancia del índice de vegetación normalizado diferencial (NDVI) en cultivo de cacao. Fuente: SENNOVA. Recuperado de : https://www.researchgate.net/publication/339524014_Manual_de_interpretacion_y_aplicacion_de_imagenes_multiespectrales_en_cultivos_de_importancia_agricola_en_el_norte_del_Huila.

5. Diagrama de Flujo

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que resume visualmente la secuencia completa de pasos metodológicos descritos en esta sección, desde la selección inicial de las imágenes hasta la extracción final de características.

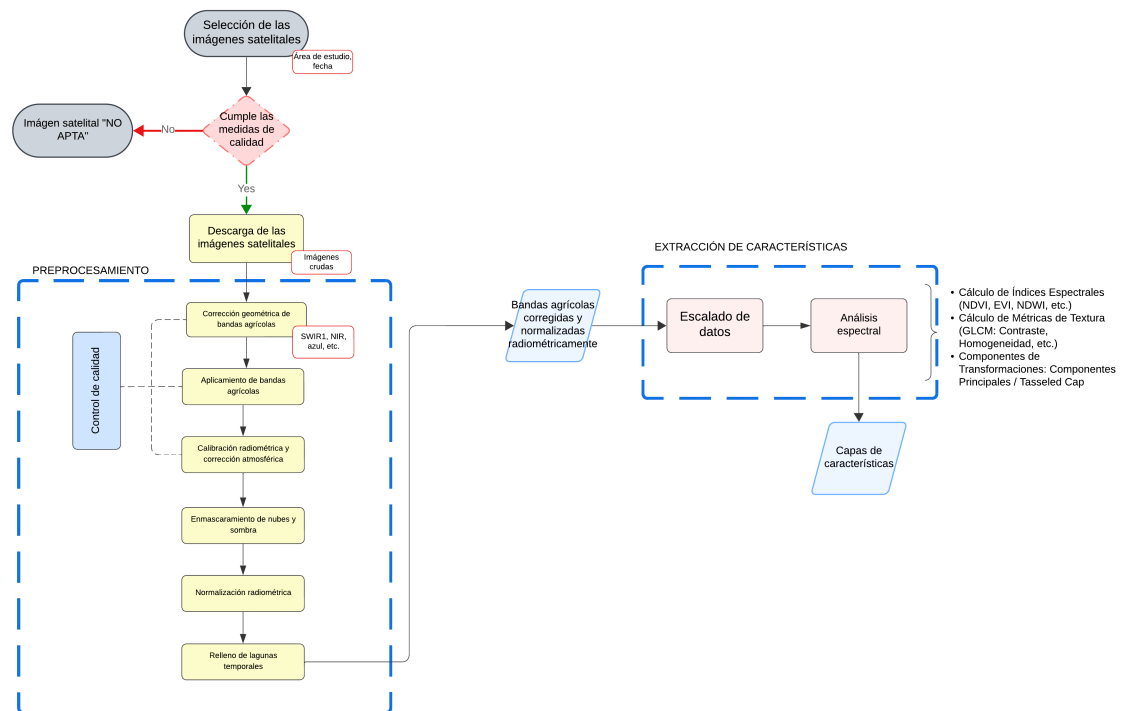


Figura 11: Tratamiento de Imágenes Satelitales. Elaboración propia.

Referencias

- Abderrazak, B., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. (1996). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Asner, G. P., Tasar, E., Sousan, S., & Knapp, D. E. (2013). *CLASlite Forest Monitoring Technology. Version 3.1 Use Guide*. Carnegie Institution for Science. Stanford.
- Campbell, J., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. Guilford Publications. <https://books.google.com.pe/books?id=NkLmDjSS8TsC>
- Caprioli, M., Figorito, B., & Tarantino, E. (2005). Radiometric Normalization of Landsat ETM Data for Multitemporal Analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(B1), CD-ROM.
- Copernicus. (2025). Sentinel-2 (S2) products [Last updated: 2025-04-14; Accessed: 2025-07-16].
- Copernicus Data Space Ecosystem. (2023). Sentinel-2 Mission within the Copernicus Data Space Ecosystem.
- Copernicus Programme, European Space Agency. (2025). *Sentinel-2 Level-2A Surface Reflectance – Data Unit Definition*. Consultado el 16 de julio de 2025, desde <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/APIs/SentinelHub/Data/S2L2A.html>
- Galindo, G., Espejo, O. J., Rubiano, J. C., Vergara, L. K., & Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. V 2.0* (inf. téc.) (Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, octubre de 2014. ISBN: 978-958-8067-63-6. Distribución Gratuita.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C., Colombia, IDEAM.
- Green, E., Clark, C., & Edwards, A. (2000, enero). Geometric correction of satellite and airborne imagery.
- Hansen, M. C., & Loveland, T. R. (2012). A Review of Large Area Monitoring of Land Cover Change Using Landsat Data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2021). *Procedimiento PC-CAR-01: Procesamiento y evaluación de imágenes provenientes de sensores remotos* (inf. téc.). Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/pc-car-01_procesamiento_y_evaluacion_de_imagenes_provenientes_de_sensores_remotos_0.pdf
- Jensen, J. (2016). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson Education, Incorporated. <https://books.google.com.pe/books?id=IWvDrQEACAAJ>
- Li, X., Chen, Y., Jiang, S., Wang, C., Weng, S., & Rao, D. (2022). The Importance of Adding Short-Wave Infrared Bands for Forest Disturbance Monitoring in the Subtropical Region. *Sustainability*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/su141610312>
- Lian, Z., Zhan, Y., Zhang, W., Wang, Z., Liu, W., & Huang, X. (2025). Recent Advances in Deep Learning-Based Spatiotemporal Fusion Methods for Remote Sensing Images. *Sensors*, 25(4). <https://doi.org/10.3390/s25041093>
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley. <https://books.google.com.pe/books?id=AFHDCAAQAQBAJ>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2017). *Mapeo con imágenes del satélite peruano PerúSAT-1 y clasificación de la carretera central: Tramo San Bartolomé KP 57+000 (Prov. de Huarochirí) - Matucana KP 77+000 (Prov. de Huarochirí)*

- (inf. téc.). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/Imagen_Satelital/6%20Mapeo_Imagen_PeruSat-1_PE_22_San_Bartolome_Matucana_Nov-2017.pdf
- Olthof, I., Pouliot, D., Fernandes, R., & Latifovic, R. (2005). Landsat-7 ETM+ radiometric normalization comparison for northern mapping applications. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 388-398. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.024>
- Pineda, F., Ayma, V., & Beltran, C. (2020). A GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORK APPROACH FOR SUPER-RESOLUTION OF SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2020, 9-14. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-9-2020>
- Potapov, P. V., Turubanova, S. A., Hansen, M. C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L., & Justice, C. O. (2012). Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010, with Landsat ETM+ data [Landsat Legacy Special Issue]. *Remote Sensing of Environment*, 122, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.027>
- Salinero, E. (2008). *Teledeteccion ambiental*. Ariel. <https://books.google.com.pe/books?id=aKsNXCVCtCQC>
- Schowengerdt, R. (2012). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Academic Press. <https://books.google.com.pe/books?id=nsgTC-zAI4QC>
- Sun, E., Cui, Y., Liu, P., & Yan, J. (2025). A Decade of Deep Learning for Remote Sensing Spatiotemporal Fusion: Advances, Challenges, and Opportunities. <https://arxiv.org/abs/2504.00901>
- Thenkabail, P., & Lyon, J. (2016). *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. CRC Press. <https://books.google.com.pe/books?id=B0LNBQAAQBAJ>
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. Wiley. <https://books.google.com.pe/books?id=WBwSyvIvNY8C>
- Whitcraft, A. K., Vermote, E. F., Becker-Reshef, I., & Justice, C. O. (2015). Cloud cover throughout the agricultural growing season: Impacts on passive optical earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 156, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.009>
- Zhang, K., Zhang, F., Wan, W., Yu, H., Sun, J., Del Ser, J., Elyan, E., & Hussain, A. (2023). Panchromatic and multispectral image fusion for remote sensing and earth observation: Concepts, taxonomy, literature review, evaluation methodologies and challenges ahead. *Information Fusion*, 93, 227-242. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.12.026>
- Zhu, X., Cai, F., Tian, J., & Williams, T. K.-A. (2018). Spatiotemporal Fusion of Multisource Remote Sensing Data: Literature Survey, Taxonomy, Principles, Applications, and Future Directions. *Remote Sensing*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/rs10040527>
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028>
- Zúñiga, J., Eche, H. W., Espinoza, G. A., & R., S. F. (2019). *El satélite peruano PeruSAT-1 : potencial de aplicaciones para el sector público* [Tesis de Maestría]. Universidad ESAN. Escuela de Administración de Negocios para Graduados. Consultado el 16 de julio de 2025, desde <https://hdl.handle.net/20.500.12640/1731>