

# Análisis de distribución espacial del bambú – guadua en el departamento del Meta a partir de herramientas de teledetección

Síntesis realizada por

Luis Carlos Cuervo

Viviana Zamora

A partir de documento de consultoría  
elaborado por Juan Francisco Guzmán Zabala

# Análisis de distribución espacial del bambú – guadua en el departamento del Meta a partir de herramientas de teledetección

Síntesis realizada por

Luis Carlos Cuervo

Viviana Zamora

A partir de documento de consultoría

elaborado por Juan Francisco Guzmán Zabala



Publicado por el proyecto Paisajes Boscosos Productivos en Colombia (ProBosques II) de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Ulrich Hoecker  
Director residente de la GIZ en Colombia

Claudius Bredehoeft  
Coordinador ProBosques II  
Calle 125 # 19 – 24 Piso 7  
Bogotá – Colombia  
T. +57 1 756 98 37-756 98 53  
F. +57 1 756 98 94  
Giz-kolumbien@giz.de  
www.giz.de/colombia  
ISBN: 978-958-8945-79-8

Autores:  
Juan Francisco Guzmán Zabala

Revisado por:  
Sandra Viviana Zamora Rivera  
Luis Carlos Cuervo Urrea

Diseño y diagramación:

**Puntoaparte**  
Editores

[www.puntoaparte.com.co](http://www.puntoaparte.com.co)

Impresión:  
Grupo 2D

Lugar de impresión:  
Calle 63 # 70D - 74

Esta publicación es apoyada por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y sus contrapartes colombianas, por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. Las ideas vertidas en imagen y texto son responsabilidad exclusiva de los autores; para cualquier duda o aclaración relacionada con el contenido, favor, remitirse directamente a los mismos.

# CONTENIDO



1.

## Introducción

Pág. 4



2.

## Metodología

Pág 8



3.

## Conclusiones y recomendaciones

Pág. 32

## Bibliografía

Pág. 34

# 1.

# INTRODUCCIÓN

El proyecto ProBosques II, de la Agencia de Cooperación Alemana GIZ, tiene como objetivo apoyar al Gobierno colombiano en la reducción de la deforestación. Con ese propósito, ha adelantado esfuerzos por fortalecer los procesos de manejo forestal sostenible (MFS) de los bosques naturales en los departamentos de Meta, Guaviare y Caquetá de manera que se implementen adecuada, integral y sosteniblemente. Esta iniciativa se alinea con las acciones y las metas de actores clave para lograr sus objetivos. En esa medida, las organizaciones de productores locales, el Gobierno nacional y el regional, la sociedad civil y el sector privado sobresalen como aliados en el fortalecimiento de capacidades para mejorar el manejo forestal y la consolidación de cadenas de valor y servicios forestales.

ProBosques II se desarrolla en el marco de los siguientes campos de acción:

- 1. Implementación de políticas y estrategias para el manejo forestal sostenible:** Tiene como objetivo fortalecer la aplicación de políticas y estrategias en el ámbito de la gestión adecuada, sostenible e integral en paisajes forestales productivos.
- 2. Promoción cadenas de valor de productos del bosque:** Su propósito es fortalecer las cadenas de valor y los proveedores de productos y servicios deriva-

dos de una gestión forestal adecuada, sostenible e integral. Para su implementación, se busca promover la diversificación en las cadenas de valor de los productos amazónicos, incrementar los ingresos de sus integrantes y desarrollar sus canales comerciales. Para dicho fin, el proyecto se plantea potenciar las capacidades técnicas de las organizaciones involucradas, especialmente de las mujeres y de los jóvenes que forman parte de ellas.

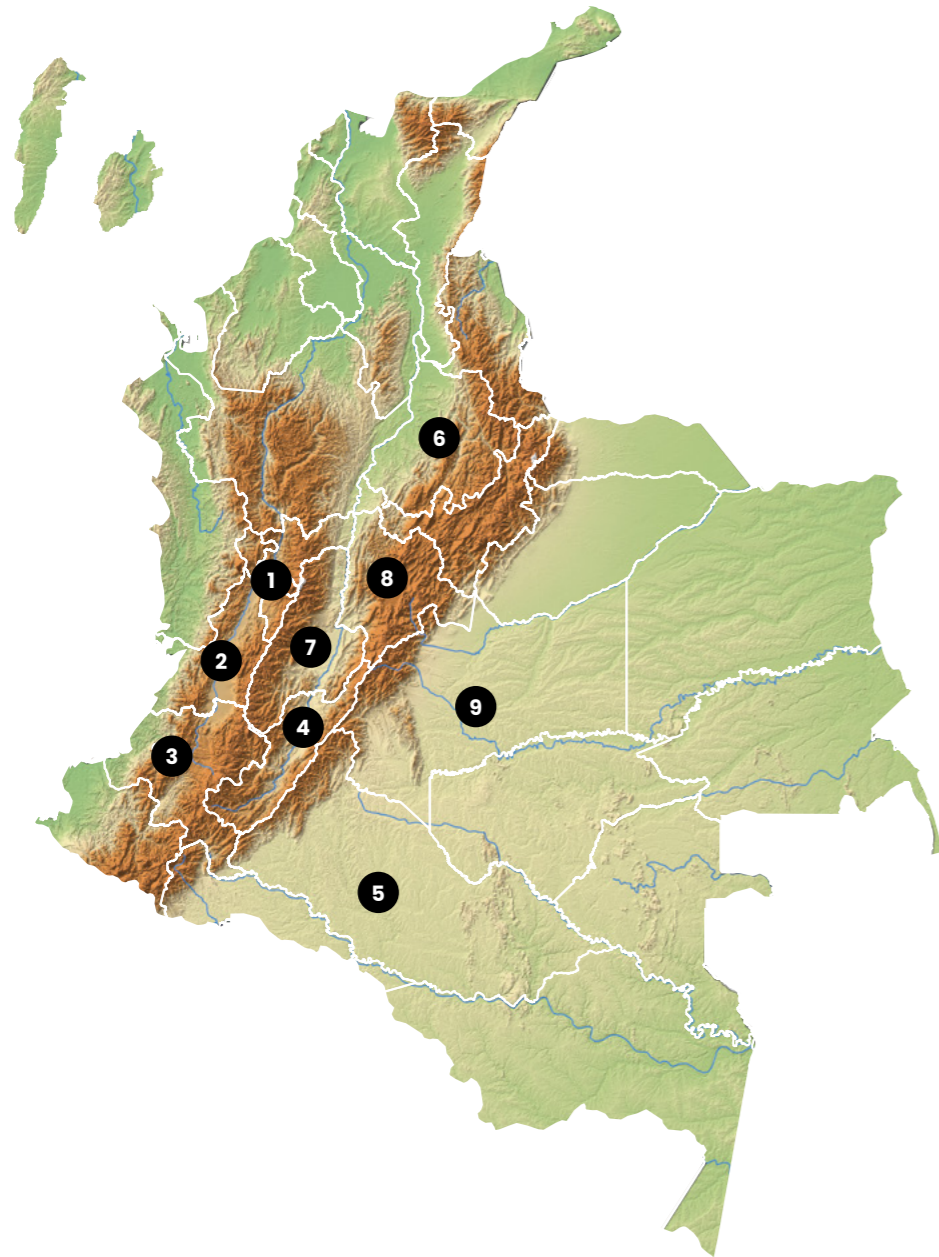
- 3. Coordinación y articulación entre actores clave:** Su finalidad es fortalecer la cooperación coordinada entre los principales agentes en el contexto de la gestión forestal adecuada, integral y sostenible de los bosques. Su implementación busca mejorar la coordinación, la articulación y la colaboración entre los principales actores involucrados en el manejo forestal sostenible.

En el caso concreto del departamento del Meta, la guadua sobresale como un recurso con potencial para el fomento y el desarrollo de actividades de manejo sostenible. Diferentes actores públicos, privados independientes o asociados, pequeños y medianos productores, organizaciones no gubernamentales (ONG), universidades, centros de investigación, entre otros, convergen en este territorio con distintas apuestas para visibilizar experiencias y buenas prácticas de manejo en torno a esta especie.

Así las cosas, el Comité de Cadena Productiva de la Guadua y el Bambú del Meta, como instancia regional de la cadena nacional de este recurso (Resolución 009 de enero 25 de 2021) (figura 1), propuso adelantar un análisis de la distribución natural de dicha especie

en el departamento. Dicho estudio recibió el apoyo de ProBosques II dada la relevancia de la guadua como elemento natural con múltiples bondades en los ámbitos social, ambiental, económico y técnico y como alternativa productiva sostenible.

**Figura 1.** Regiones incluidas en el acuerdo de competitividad de la cadena nacional de guadua



- |  |             |                |
|--|-------------|----------------|
| 1 Eje Cafetero<br>(Caldas, Quindío, Risaralda) | 4 Huila     | 7 Tolima       |
| 2 Valle del Cauca                              | 5 Caquetá   | 8 Cundinamarca |
| 3 Cauca  | 6 Santander | 9 Meta         |

En consecuencia, se realizó una revisión documental, un levantamiento de información primaria y la gestión de un espacio de diálogo regional en torno al potencial de la guadua en el Meta. Esta labor partió de la exploración de algunas metodologías que se han utilizado a nivel mundial para la detección de la especie, pasando por un registro de datos en campo para validación y mejor comprensión de la distribución natural, y concluyó con una estimación del número de hectáreas identificadas en el departamento. Este insumo permitirá impulsar el manejo sostenible del

recurso con una proyección a corto y mediano plazo, y facilitará la toma de decisiones y la gestión por parte del Comité Departamental.

En esta publicación se encontrarán los principales resultados de dicho análisis, denominado Plan de caracterización y manejo sostenible de la Guadua en el sur del Meta. Este trabajo fue financiado por el proyecto ProBosques II y ejecutado por el ingeniero forestal Juan Francisco Guzmán Zabala, consultor y director ejecutivo de la empresa Red Forestal S. A. S.







# 2.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este análisis se siguieron estas dos etapas metodológicas:

-  Revisión del estado del arte sobre metodologías utilizadas a niveles nacional y mundial para la detección espacial de guadua.
-  Caracterización espacial de la distribución actual de la guadua en el departamento a través de:

### 1.

Selección de imágenes de satélite de alta resolución u ortofotomosaicos disponibles.

### 2.

Levantamiento de información en puntos de control, parcelas en campo y vuelos con dron.

### 3.

Estimación de áreas por municipio.

## Fundamentos técnicos y resultados

### Estado del arte de metodologías de teledetección a nivel mundial

El equipo consultor realizó una revisión bibliográfica exhaustiva de fuentes secundarias para un periodo de 20 años (2005 a 2025) con el objetivo de definir la metodología apropiada para aplicar en el contexto del departamento del Meta. Como resultado, se identificó que ya se han realizado trabajos de detección de guadua en el municipio de La Macarena, los cuales estiman un área de 314 ha de bosques de esta especie, con un tamaño promedio de 350 m<sup>2</sup>, los cuales se localizan a orillas de ríos y caños, inmersos dentro de la selva, o en

la zona de transición entre potrero y selva (Londoño *et al.*, 2019). Asimismo, se observó que en Brasil, China y África ya se han probado metodologías en este sentido, según las cuales se ha establecido un índice de bambú (BI, en inglés) especializado, con un rango normal entre 0,06 y 0,08.

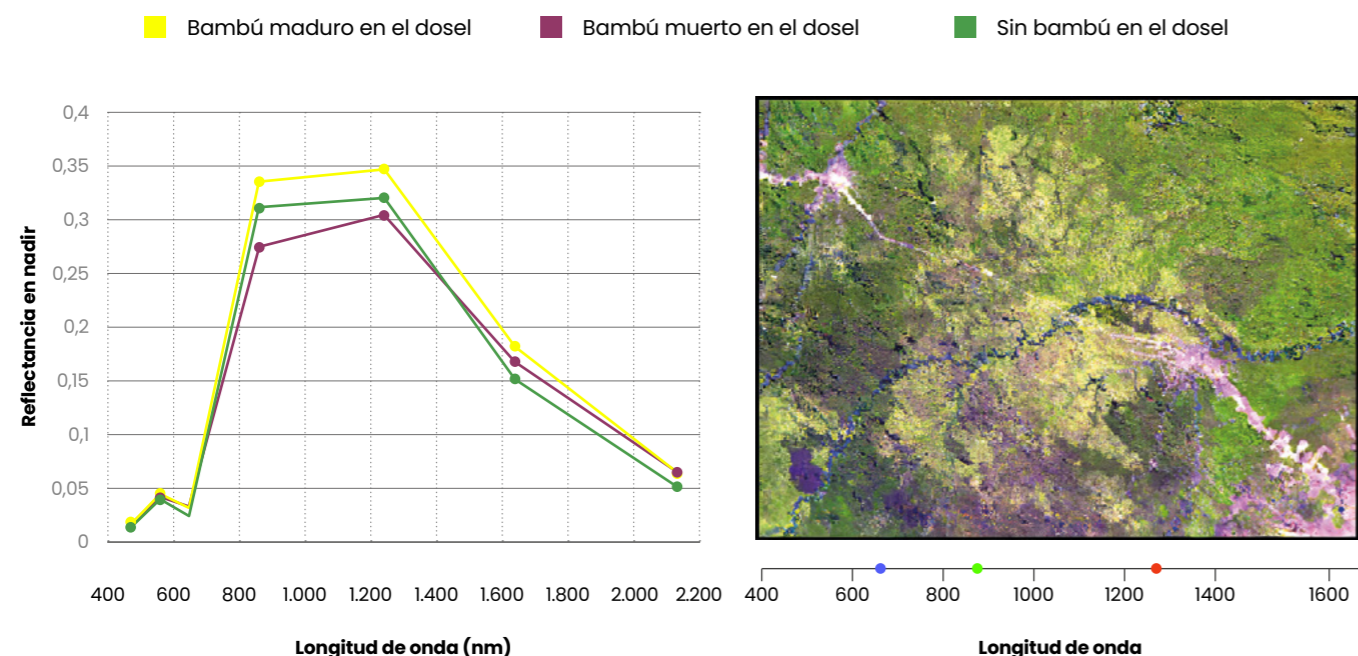
Diversos autores ya han estudiado la presencia de guadua mediante sensores remotos. Nelson y Bianchini (2005), por ejemplo, mapearon en el Amazonas peruano las configuraciones espaciales de todas las poblaciones de bambú en la etapa de vida dominante del dosel en un área de 34.700 km<sup>2</sup> para una serie de tiempo de 28 años. Estos investigadores emplearon las bandas ópticas Landsat MSS, Landsat TM y MODIS (figura 2) y reportaron un 97 % de acierto para el ciclo completo de vida de la Guadua.

El estudio de Nelson y Bianchini (2005) sugiere que, cuando el bambú domina un bosque abierto, presenta una densa capa de hojas en el nivel medio del dosel, lo que resulta en una mayor reflectancia en las bandas ópticas del infrarrojo cercano y medio en comparación con el bosque primario típico del Amazonas. Además, los autores afirman que muchas especies florecen una sola vez y mueren en sincronía, y que todas estas copas tienen un patrón espectral típico de hojas verdes.

Nelson y Bianchini (2005) también aseguran que, con las correcciones para los efectos bidireccionales y atmosféricos, la reflectancia de la superficie en la vista nadir ahora se puede comparar fácilmente para las copas de los bosques amazónicos con bambú recientemente muerto, bambú vivo dominante y bosques sin bambú. Según los investigadores, hay una mayor fracción de hojas verdes sanas iluminadas en el píxel dominado por el bambú y una mayor fracción de sombra en un píxel de bosque sin bambú.

El dosel del bosque con bambú recientemente muerto, por su parte, también tiene más sombra, pero incluye algunas ramas de bambú muertas iluminadas. Esta vegetación seca no fotosintética es evidente como una relación NIR/rojo más baja y presenta una mayor reflectancia de las dos bandas infrarrojas ópticas de longitud de onda más larga (figura 2), en comparación con el bosque sin bambú.

Figura 2. Distribución de la reflectancia con relación a la longitud de onda



**Nota. A)** Gráfico de reflectancia superficial media corregida a la vista nadir y ángulo de elevación solar constante para píxeles dentro de tres tipos de bosque. **B)** Compuesto de color de reflectancia de superficie corregida por nadir MODIS, bandas 5-2-1 (RGB) con los mismos tres tipos de bosque.

Por otro lado, en el estado de São Paulo, Brasil, Araujo *et al.* (2008) detectaron la presencia de guadua a partir de imágenes satelitales de alta resolución de QuickBird, y estimaron la posibilidad de determinar los ciclos de vida para las especies de bambú predominantes. Como resultado, lograron clasificar nueve clases de cobertura del suelo: (1) cuerpos de agua, (2) suelo desnudo, (3) pasto, (4) arbusto, (5) sucesión secundaria con predominio de bambú en etapa vegetativa o reproductiva, (6) sucesión secundaria con bambúes senescentes, (7) sucesión secundaria con secciones de bambú espaciadas, (8) sucesión secundaria avanzada y (9) bosque primario.

En el área de estudio, los autores encontraron que predominan dos especies de bambú: *Guadua tagoara* (Nees) Kunth (conocido popularmente como *taquaruçu*) y *Chusquea oxylepis* (Hack.) Ekman (conocido popularmente como *criciúma*). Estadísticamente, obtuvieron un índice de kappa de 0,85, y en general observaron que las clases presentan un comportamiento espectral típico de la vegetación, con valores bajos en las bandas 1, 2 y 3, referentes a la sección visible del espectro electromagnético, y registros altos en la banda 4, correspondiente a la

sección del infrarrojo cercano, que es más adecuada para la discriminación de estos objetivos forestales.

En Meghalaya, India, Goswami *et al.* (2010) establecieron que no se había trabajado mucho en la estimación de las áreas de cultivo de bambú utilizando sensores remotos y sistemas de información geográfica debido a la mezcla del valor de reflectancia con otras clases de bosques. Estos investigadores, sin embargo, exploraron la posibilidad de desarrollar un índice específico para el bambú utilizando bandas rojas, NIR y SWIR de imágenes IRS P6 LISS-III para identificar las áreas de cultivo de bambú de la región noreste (NE).

Goswami *et al.* (2010) indican que los datos del conjunto de entrenamiento y el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) se han utilizado para preparar el mapeo de los recursos de bambú de Tripura. Según los investigadores, la reflectancia espectral de una planta está determinada por las características de sus hojas; en especial, la absorción por los pigmentos fotosintéticos y el agua. Estos dos factores son particularmente claves en el caso de la guadua ya que esta especie posee más cloroplastos por centímetro cuadrado y absorbe más agua en su culmo.

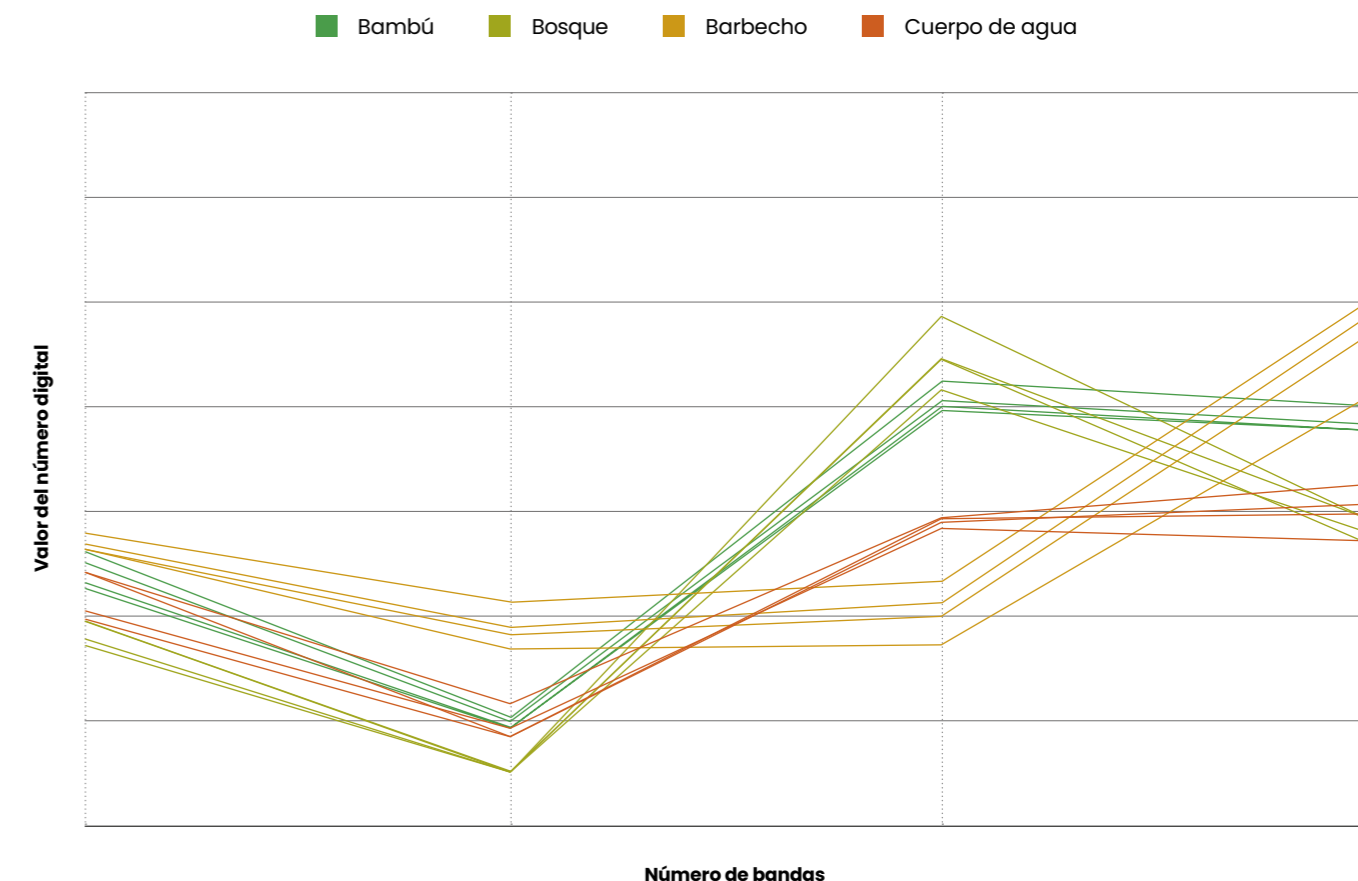
Para su estudio, Goswami *et al.* (2010) emplearon el *Linear Imaging Self Scanner* (LISS) III del sensor de los satélites *Indian Remote Sensing* (IRS), con resolución espacial de 23,5 m. Las bandas espectrales disponibles en este sensor son verde (0,52-0,59 μm), roja (0,62-0,68 μm), NIR (0,77-0,86 μm) y SWIR (1,55-1,70 μm). La figura 3 muestra que las áreas de cultivo de bambú (magenta) se pueden diferenciar espectralmente usando una combinación de bandas rojas, NIR y SWIR.

Los autores también reportan la adopción de una técnica mejorada que utiliza el NDVI como medida de la salud de la vegetación y el índice de estrés (SI, en inglés) como medida del contenido de agua de las hojas. Estos parámetros se definen así:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

$$SI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Figura 3. Perfil espectral del bambú y otras clases importantes de uso de la tierra



**Nota.** Tomado de Goswami *et al.* (2010).

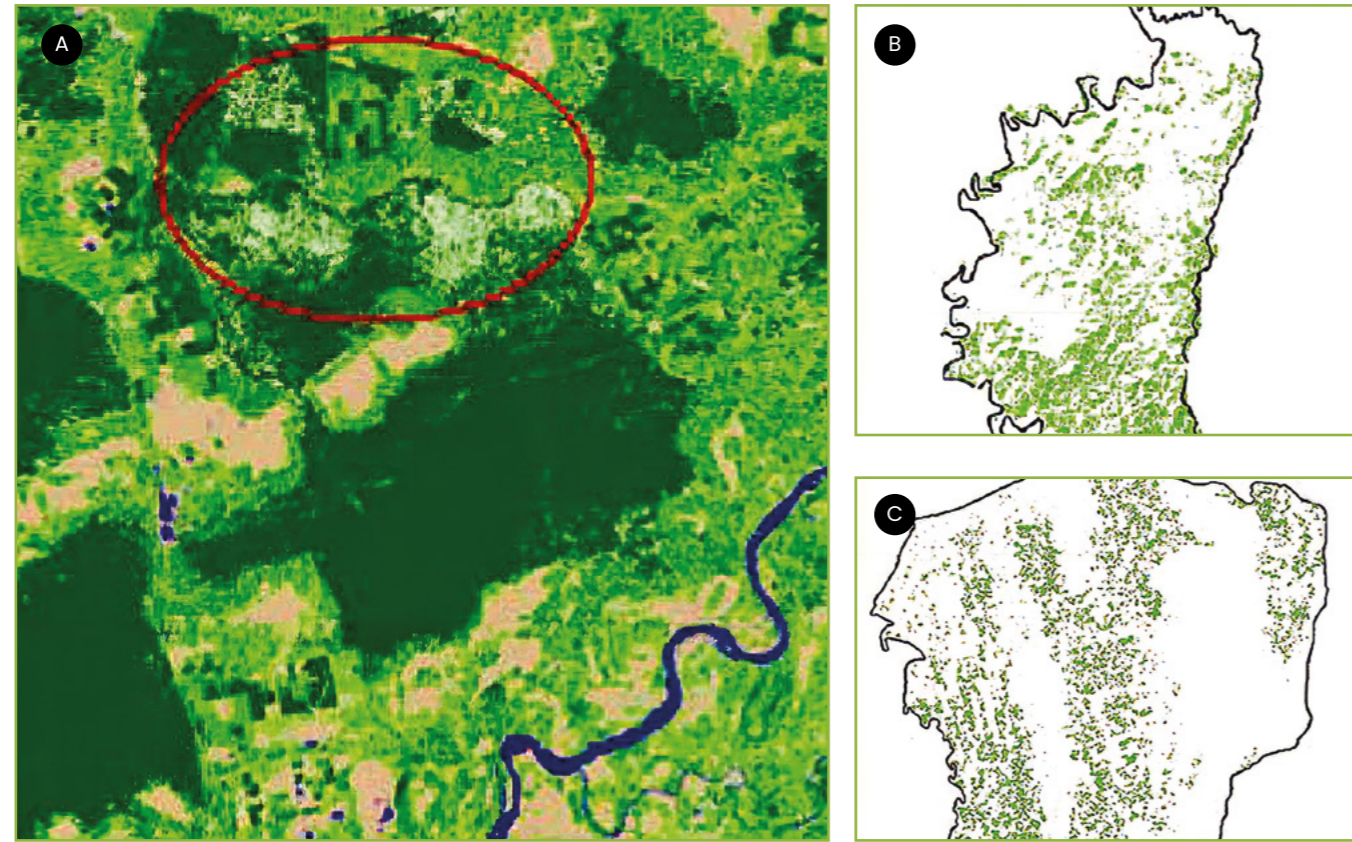
Goswami *et al.* (2010) consideraron que la delimitación de áreas de bambú mediante SI debía ser posible ya que este parámetro da cuenta del contenido de agua de las hojas de las plantas, que en esta especie en concreto resulta menor en comparación con otros tipos de bosques. Por lo tanto, los investigadores prepararon un índice de bambú de diferencia (doble) normalizado (propuesto con el nombre BI) utilizando NDVI y SI. Así, las imágenes resultantes

se utilizaron para identificar áreas de bambú según los valores de esta variable (figura 4). La combinación matemática de bandas utilizadas para generar BI es:

$$BI = \frac{NDVI - SI}{NDVI + SI}$$

Figura 4. Clasificación del área de bambú utilizando BI

■ Bambú ■ Bosque denso ■ Matorral de otra vegetación ■ Cuerpo de agua ■ Tierra en barbecho



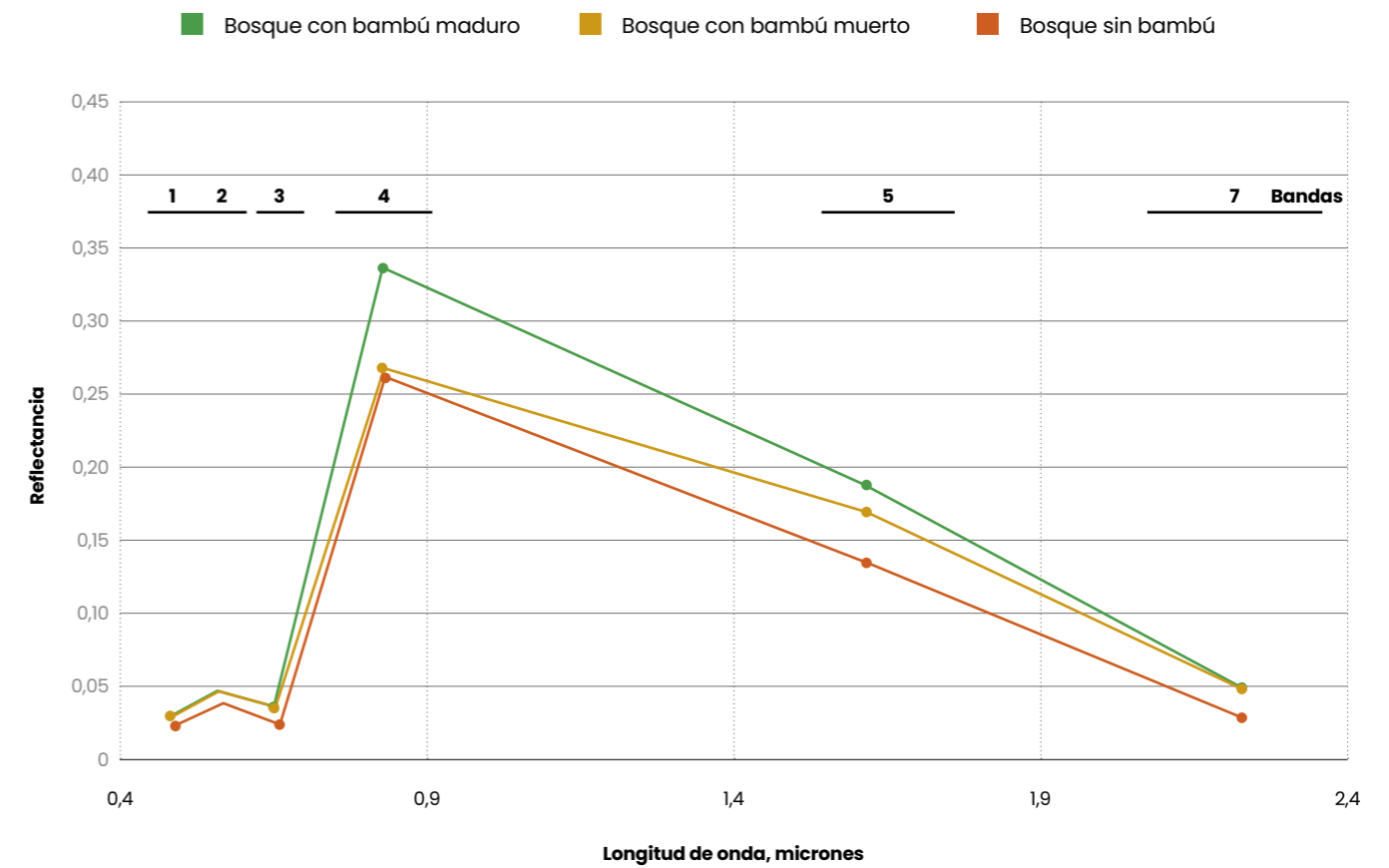
Nota. A) Bosque circular de East Assam. B) Bosque de reserva Langting Mupa. C) Bosque de reserva Dumpa. Tomado de Goswami *et al.* (2010).

Goswami *et al.* (2010) observaron que el rango normal del BI del bambú se encontraba entre 0,06 y 0,08 para todos los sitios de estudio. Al realizar una evaluación de la precisión de clasificación general entre cuatro clases (es decir, bosque, bambú, barbecho y cuerpos de agua), los autores obtuvieron un valor de 84 %, con un valor kappa de 0,79. En el suroeste de la Amazonía de Brasil, Carvalho *et al.* (2013) estimaron la reflectancia asociada al ciclo de vida de *Guadua sarmentosa*, así como su relación con el suelo. Este estudio se basó en la composición a color de imágenes Landsat entre los años 1975 y 2008 (MMS, TM5, ETM+) e imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Pectroradiometer*), a escala 1:250.000. Para estos autores, en

la zona de estudio y en algunos otros bosques tropicales y subtropicales con dosel superior dominado por bambúes, la etapa adulta y la etapa de mortalidad posfloración pueden detectarse en imágenes de sensores orbitales con bandas ópticas, como *Landsat Thematic Mapper* (TM) y el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS).

Una composición de color falso que utiliza las bandas 3-4-5 de TM distingue claramente los bosques con bambú maduro de los que contienen bambú recientemente muerto y los que no cuentan con bambú en el dosel superior (figura 5). El análisis discriminante lineal mostró que los tres espectros son distintos.

Figura 5. Espectros de reflectancia de tres tipos de bosques



Nota. Los números y las posiciones de las bandas del Landsat Thematic Mapper están encima del gráfico. Cada vértice es un promedio de 20 muestras espacialmente separadas. Tomado de Carvalho *et al.* (2013).

La coincidencia entre los límites del bambú y el tipo de suelo también es evidente en el mapa de suelos del Amazonas a pequeña escala. La conclusión de Carvalho *et al.* (2013) es que los bosques con bambú maduro, con bambú muerto recientemente y con bambú juvenil confinado al subdosel (o sin bambú) se distinguen fácilmente en compuestos de colores falsos de sensores orbitales que emplean una banda visible, una infrarroja cercana y una banda infrarroja de onda corta. Estas etapas también se pueden distinguir con el sensor MSS más antiguo a pesar de carecer de una banda infrarroja de onda corta.

En otro estudio, Muñoz y Camargo (2015) llevaron a cabo una mejora de la resolución de imágenes del Landsat 8 a 30 m con la mezcla de imágenes a 15 m pancromáticas. Estos autores informan del mejoramiento espacial a través del método Intensity, Saturation, Hue (intensidad, saturación, tono: ISH) de una imagen del año 2013 obtenida por el sensor Operational Land Imager (OLI) a bordo del satélite Landsat 8. Los dos dispositivos cuentan con bandas multiespectrales (multi) de 30 m de tamaño de píxel (900 m<sup>2</sup> sobre el terreno), y pancromáticas (pan) con resolución espacial de 15 m (225 m<sup>2</sup> sobre el terreno). Una forma de obtener imágenes de alta resolución espectral y espacial es emplear la técnica de fusión de imágenes.

En el caso de La Macarena, Meta, Londoño *et al.* (2019) llevaron a cabo trabajos de detección de guadua utilizando recursos satelitales de libre acceso, con verificación en campo y doble muestreo estratificado. De acuerdo con sus resultados, esta planta solo ocupa 1,2 % del espacio selvático del área de estudio, lo que corresponde a 314 ha. Este análisis se basó en los índices de reflectancia establecidos para la especie con el fin de generar una capa de distribución.

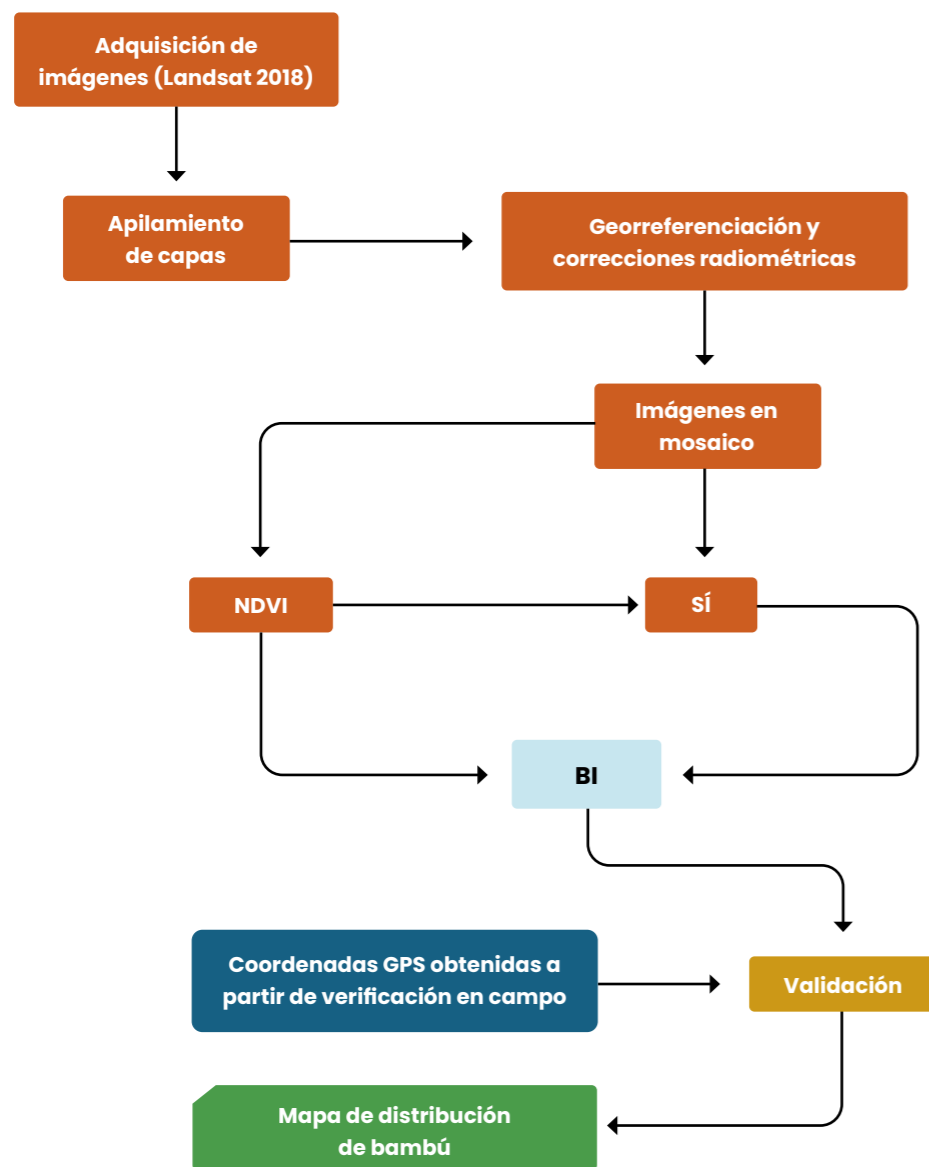
En el caso de La Macarena, Meta, Londoño *et al.* (2019) llevaron a cabo trabajos de detección de guadua utilizando recursos satelitales de libre acceso, con verificación en campo y doble muestreo estratificado. De acuerdo con sus resultados, esta planta solo ocupa 1,2 % del espacio selvático del área de estudio, lo que corresponde a 314 ha. Este análisis se basó en los índices de reflectancia establecidos para la especie con el fin de generar una capa de distribución.

Los insumos utilizados fueron imágenes Sentinel 2A con una resolución espacial de 10 m/píxel y una unidad mínima cartografiada (UMC) de 0,5 ha. Una vez detectadas las áreas, los autores emplearon drones con un GSD (*Ground Sample Distance*) de 0,32 cm de resolución espacial para validar los guaduales. El acierto logrado fue del 100 % para guadua y del 97 % para bosques.

En Camerún, África, Nfornekah *et al.* (2020) crearon mosaicos de 48 hojas de imágenes de los instrumentos Landsat 8/Operational Land Imager (OLI) y del sensor

infrarrojo térmico (TIRS) con el software Envi 5.3, y emplearon el BI para calcular las regiones donde se encontraba esta especie. Las áreas de cultivo (magenta) se diferenciaron espectralmente utilizando una combinación de bandas de rojo, infrarrojo cercano (NIR) y verde (infrarrojo de onda corta [SWIR]): banda 2: azul (0,45-0,51  $\mu\text{m}$ ); banda 3: Verde (0,53-0,59  $\mu\text{m}$ ); banda 4: rojo (0,64-0,67  $\mu\text{m}$ ) 30 m; banda 5: infrarrojo cercano (0,85-0,88  $\mu\text{m}$ ) 30 m; banda 6: SWIR 1 (1,57-1,65  $\mu\text{m}$ ); banda 7: SWIR 2 (2,11-2,29  $\mu\text{m}$ ) 30 m; y banda 8: pancromática (0,50-0,68  $\mu\text{m}$ ) 30 m, para OLI.

**Figura 6.** Adquisición, tratamiento y validación de la distribución del bambú en Camerún



**Nota.** Tomado de Nfornekah *et al.* (2020).

La precisión del bambú estudiado en las sabanas de Guinea y Sahel fue del 53 % y del 62 % respectivamente. En un bosque bimodal muy parecido al de las condiciones del Meta, los autores obtuvieron una precisión del 89,43 %, mientras que en el bosque monomodal se registró un excelente valor del 94 %. Por lo tanto, la precisión media fue del 78 %.

Por otra parte, Wang *et al.* (2021) detectaron biomasa aérea forestal (AGB, en inglés) de bambú empleando un modelo de regresión ponderada geográficamente (GWR, en inglés), una técnica que, según la investigación, funciona hasta cierto punto. Basados en imágenes OLI de Landsat 8, los autores utilizaron el método de clasificación de bosque aleatorio (RF, en inglés) para filtrar seis variables, incluidas TM457, TM543, B7, NDWI, NDVI y W7B6VAR. Luego construyeron el modelo GWR para estimar el AGB del bosque de bambú, y compararon los resultados con los de los modelos cokriging (COK) y de mínimos cuadrados ortogonales (OLS). En este caso, la precisión de predicción ( $R^2$ ) del modelo propuesto fue de 0,74, esto es, 9 % y 16 % superior a la de los modelos COK y OLS, respectivamente, mientras que su error (RMSE) fue 7 % y 12 % inferior.

En la provincia de Sichuan, China, Zhou *et al.* (2022) identificaron especies de bambú empleando el aumento de gradiente extremo (XGBoost) a partir de imágenes satelitales obtenidas de la órbita hiperespectral de Zhuhai-1. Este modelo registró mayores valores de precisión general (80,6 %), coeficiente kappa (0,708) y puntuación F1 media (0,805) que el método del mapeador de ángulo espectral (SAM, en inglés). Las características óptimas que fueron importantes y no estaban correlacionadas para la precisión de la clasificación incluyeron la banda azul (B1, 464-468 nm), la banda del infrarrojo cercano (B27, 861-871 nm), la banda verde (B5, 534-539 nm), la elevación, la característica de textura media, la banda verde (B4, 517-523 nm) y la banda de borde roja (B17, 711-720 nm).

Zhou *et al.* (2022) seleccionaron un total de 48 variables de características para el estudio. Entre ellas, 32 fueron de atributos espectrales; cuatro correspondieron al índice de vegetación (NDVI, índice de diferencia [DVI], índice de proporción [RVI] e índice de carotenoides [CRI]); cuatro representaron particularidades topográficas (elevación, pendiente, orientación y posición de la pendiente); y ocho

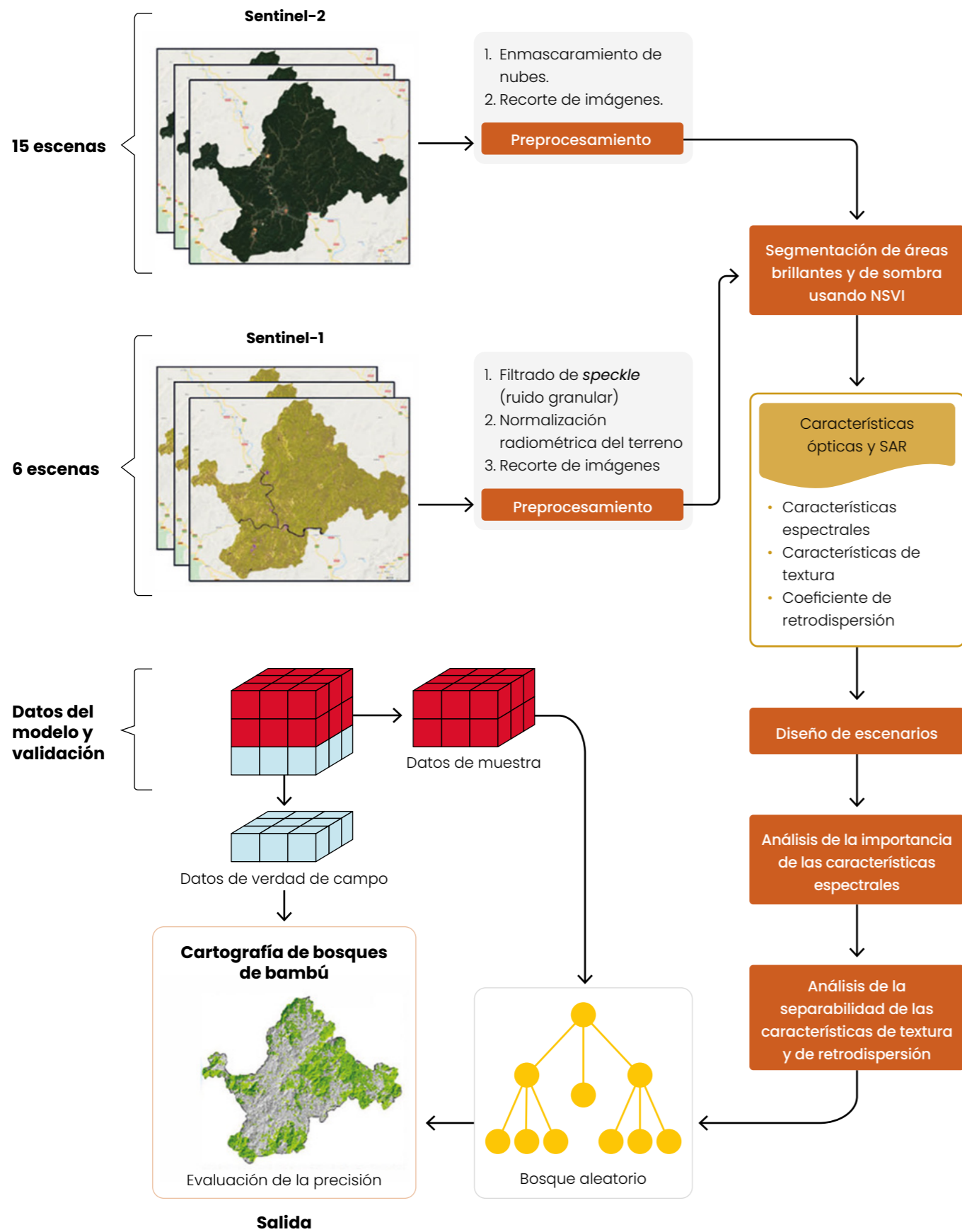
estuvieron asociadas a textura (media, varianza, homogeneidad, contraste, disimilitud, entropía, segundo momento y correlación).

Asimismo, la máquina de vectores de soporte (SVM) se ha utilizado a menudo para identificar especies de bambú utilizando datos hiperespectrales porque puede superar eficazmente el fenómeno de Hughes en datos de alta dimensión. Por ejemplo, Chen *et al.* (2011) emplearon un espectrorradiómetro ASD FieldSpec Pro FR para obtener datos hiperespectrales de *Phyllostachys edulis*, *Phyllostachys violascens* y *Bambusa multiplex*, e identificaron las especies mediante el SVM con una precisión promedio mayor al 90 %. Igualmente, los autores detectaron 12 especies de bambú usando infrarrojo cercano a curvas hiperespectrales (900-1700 nm) y SVM, con una precisión promedio superior al 95 %. Ahora bien, el problema del SVM radica en el consumo de poder computacional al requerir equipos bien dotados de unidades de procesamiento gráfico (GPU, en inglés) u otras.

Otro estudio de mapeo de bambú registrado en China es el de Xiang *et al.* (2023), quienes obtuvieron 34 características de imágenes ópticas de Sentinel-1 SAR y Sentinel-2 utilizando la plataforma Google Earth Engine. Estos autores evaluaron diferentes atributos de diversas fuentes de datos para extraer información del bosque de bambú en las áreas brillantes y de sombra, y después utilizaron el algoritmo RF para extraer dicha cobertura.

Xiang *et al.* (2023) concluyeron que las bandas infrarrojas de borde rojo y de onda corta de las imágenes ópticas de Sentinel-2 y sus correspondientes índices de vegetación son importantes en la extracción de información sobre los bosques de bambú. De igual modo, determinaron que la disimilitud y la homogeneidad de las características de textura de Sentinel-2 en el área brillante y la disimilitud en el área de sombra, las características de retrodispersión de Sentinel-1 en el área brillante y VV (polarización vertical/vertical) y VH (polarización vertical/horizontal) en el área brillante y VV-VH en el área de sombra tienen cierta variabilidad entre los bosques de bambú y los que no son de esta especie. Tales variaciones pueden usarse como parámetros efectivos para detectar bambú con una precisión de clasificación de 87,96 % y coeficiente kappa de 0,7435.

Figura 7. Diagrama de flujo del método propuesto de extracción de información del bosque de bambú



Nota. Tomado de Xiang *et al.* (2023).

Los autores del estudio evaluaron la precisión de clasificación basados en una investigación de campo y 465 puntos de muestra recopilados en Google Earth. También utilizaron una matriz de confusión para establecer esta variable con modelos de características, incluidas la precisión del productor (PA), la precisión del usuario (UA), OA y el coeficiente kappa.

En Chad, África Central, Tchoutezou *et al.* (2024) utilizaron una serie de imágenes Landsat multitemporales con una resolución espacial de 30 m para identificar bambú en 23 provincias. La única especie identificada de esta forma fue *Oxytenanthera abyssinica* (A. Rich.). En este caso se ensamblaron casi 90 capas de imágenes Landsat 8 OLI-TIR en un mosaico mediante el software Envi 5.3. Para las validaciones, se emplearon ubicaciones GPS del bambú e imágenes de alta resolución espacial provistas por Google Earth, con un acierto del 87,85 % y un coeficiente kappa de 0,83.

Finalmente, Bo *et al.* (2024) llevaron a cabo un estudio en la provincia de Zhejiang, China, que se centró en la similitud espectral de las especies de bambú. Para

dicho fin, los autores desarrollaron un nuevo marco de clasificación que integró mediciones in situ y la Global Ecosystems Dynamics Investigation (GEDI), que utiliza LIDAR e imágenes multispectrales de series temporales de Sentinel-2 en un algoritmo de clasificación de red convolucional densa (DenseNet) de doble canal, empleando 4.055 muestras (70 % para entrenamiento y 30 % para validaciones).

Bo *et al.* (2024) realizaron experimentos exhaustivos y evaluaron el rendimiento del mapeo del bosque de bambú del DenseNet de doble canal propuesto con regularización DropBlock optimizada para ballenas, con lo cual lograron una mejora del 5 % de la clasificación. El método propuesto demuestra un alto nivel de precisión en la identificación del bambú, con precisión de 90,81 %, recuperación (precisiones del productor y del usuario) del 91,86 % y puntuación F1 de 91,33 %. En consecuencia, esta propuesta puede proporcionar resultados más detallados y precisos que estudios anteriores, especialmente en regiones donde el terreno es complejo o el bambú está entremezclado con otra vegetación.



## Caracterización espacial de la distribución de guadua

### 1 Selección de imágenes satelitales y uso de índices

Para la selección y el procesamiento de imágenes satelitales, es importante considerar las diversas fuentes de las que provienen estos insumos, tanto públicas como privadas. También es preciso tener en cuenta las necesidades de registro, dentro de las cuales están:



**Resolución:** Los satélites varían significativamente en sus resoluciones espacial (el tamaño del píxel en el suelo), espectral (las bandas de color que capturan) y temporal (la frecuencia con la que revisitan un área).



**Tipo de sensor:** Algunos satélites utilizan sensores ópticos (similares a una cámara), mientras que otros utilizan radar de apertura sintética (SAR), que puede ver a través de las nubes y durante la noche.



**Propósito:** Los satélites están diseñados para una variedad de propósitos, incluyendo el monitoreo ambiental, la agricultura, la gestión de desastres, la seguridad, la investigación científica y la cartografía.



**Acceso a datos:** La disponibilidad y el costo de los datos varían entre los programas públicos (muchos ofrecen datos gratuitos o a bajo costo) y los operadores privados (donde los datos generalmente tienen un costo comercial).

Un elemento clave para la selección es la resolución espectral, es decir, el número y el ancho de bandas que incluyan los sensores remotos. Otro factor importante es la resolución radiométrica, que se refiere a la sensibilidad para captar variaciones en la radiación. Estas dos variables son particularmente útiles para diferenciar coberturas naturales, como en este caso.

La radiación solar es la fuente primaria de la energía para numerosos procesos biológicos que tienen lugar en las plantas. Esta interacción puede dividirse en tres categorías: efectos térmicos, efectos fotosintéticos y efectos fotomorfológicos. Cerca del 70 % de la radiación solar absorbida por las plantas es convertida en calor y usada para mantener su temperatura y para el proceso de transpiración (efectos térmicos) (Gates, 1965, 1968; Slatyer, 1967).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) (casi el 28 % de la energía absorbida por la planta) es usada en la fotosíntesis y para la conversión de compuestos orgánicos de alta energía. El primer contacto de la radiación es con la superficie de las hojas, las cuales están compuestas por la cutícula y capas de epidermis. El valor de luz que es absorbida o transmitida entre las hojas depende de su longitud de onda y de la selectividad de absorción de los pigmentos de la hoja, que pueden ser características de la misma especie o relacionarse con enfermedades o deficiencias nutritivas (Meer y Jong, 2002).

La región del espectro visible en la vegetación se caracteriza por bajas reflectancia y transmitancia dada la fuerte absorción por los pigmentos foliares. Por ejemplo, los pigmentos de clorofila absorben la luz violeta-azul y roja por la fotosíntesis. La luz verde es reflejada para el mismo proceso, razón por la cual muchas de las plantas aparecen verdes. El espectro de reflectancia de la vegetación verde muestra picos de absorción de alrededor de 420 nm (violeta), 490 nm (azul) y 660 nm (rojo), causados por una fuerte absorción de la clorofila. La tabla 1 muestra los principales pigmentos encontrados en plantas grandes y su absorción máxima (Meer y Jong, 2002).

Tabla 1. Pigmentos de las plantas y su absorción máxima

Tipo de Pigmento	Característica de absorción máxima (nm)
Clorofila a	420 (violeta), 490 (azul), 660 (rojo)
Clorofila b	435 (violeta), 464 (azul)
$\beta$ -Caroteno	425 (violeta), 450 (azul), 480 (azul)
$\alpha$ -Caroteno	420 (violeta), 440 (violeta), 470 (azul)
Xantofila	425 (violeta), 450 (azul), 475 (azul)

**Nota.** Tomado de Araque y Jiménez (2009).

Los pigmentos como la clorofila y los carotenoides absorben la luz de energía específica, causando transición de electrones entre la estructura molecular del pigmento. La energía resultante de estas transiciones es usada para las reacciones fotoquímicas de la planta. Dado que la luz viene en pequeños paquetes (fotones), solo la de cierta energía puede causar la transición de electrones; de ahí que los pigmentos de las plantas absorban luz fuertemente en algunas longitudes de onda y no en todas (Meer y Jong, 2002).

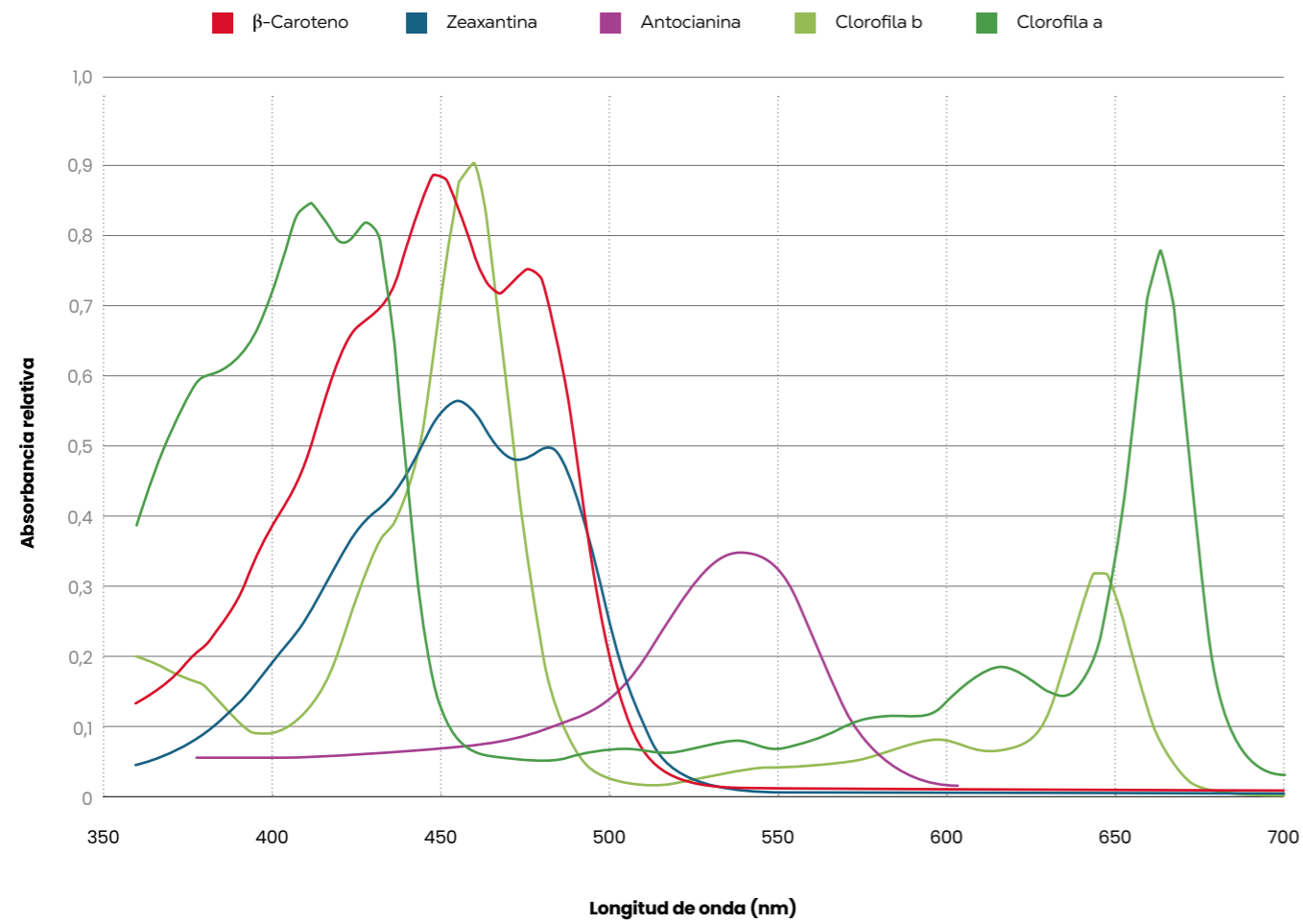
La combinación de las luces verde y roja da el color amarillo. Cuando las hojas mueren, los pigmentos de coloración café aparecen (*tannins*), y la reflectancia de la hoja y la transmitancia en el rango de longitudes de onda entre 400 nm y 750 nm decrecen (Boyer *et al.*, 1988).

En los casos en los que la hoja está enferma, la clorofila se degrada más rápido que los carotenos (Sanger, 1971). Este efecto genera un incremento en la reflectancia de la longitud de onda roja debido a la reducción de la

absorción de la clorofila. En tales circunstancias, carotenos y xantofilos ahora son los dominantes en las hojas, las cuales aparecen amarillas debido a que estos compuestos absorben luz azul y reflejan la luz verde y roja. En la figura 8 se puede apreciar cómo la firma espectral de una planta muestra las características del comportamiento de la radiación electromagnética con la estructura del vegetal (Meer y Jong, 2002).

De igual forma, se observa el cambio que existe en el final de la longitud de onda del rojo; por tal razón, esta región (*red edge*, en inglés), descrita primero por Collins (1978), es una característica de la respuesta espectral de la vegetación y tal vez es la más estudiada en la curva espectral. Esta propiedad se presenta por la baja reflectancia de la clorofila (figura 8) y la alta reflectancia, de alrededor de 800 nm (infrarrojo cercano), asociada con la estructura interna de la planta sana y el contenido de agua (Chuvioco, 2002).

Figura 8. Curva de absorción de las plantas en el espectro electromagnético visible



Nota. Tomado de Sáenz (2007).

En el Meta, las lluvias de las planicies del llano oriental generan una columna de aire húmedo que, al encontrarse con un obstáculo del relieve como una montaña, asciende y se enfría hasta alcanzar el punto de saturación del vapor de agua y una humedad relativa del 100 %. Este fenómeno da lugar a las denominadas precipitaciones orográficas. Así, el departamento presenta unas condiciones muy particulares que requieren un estudio especializado para la firma espectral del bambú o guadua.

Cabe recordar que, según Nelson y Bianchini (2005), cuando el bambú domina un bosque abierto, presenta una densa capa de hojas en el nivel medio del dosel, lo que resulta en una mayor reflectancia en las bandas ópticas del infrarrojo cercano y medio, en comparación con el bosque primario típico de la Amazonía. Como resultado, en estos casos se detecta una mayor proporción de hojas verdes sanas iluminadas en el píxel dominado por bambú y una

mayor proporción de sombra en un píxel de bosque sin bambú. Este comportamiento se acentúa en condiciones de verano, que para el caso del departamento del Meta en el año 2024 correspondió a los meses de enero-febrero y agosto-septiembre.

Por otro lado, el dosel forestal con bambú recientemente muerto también presenta más sombra, pero incluye algunas ramas de bambú muertas iluminadas. Esta vegetación seca no fotosintética se evidencia como una menor relación NIR/rojo y una mayor reflectancia de las dos bandas infrarrojas ópticas de longitud de onda más larga, en comparación con el bosque sin bambú.

Finalmente, para este estudio se utilizó una ortoimagen provista por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) del año 2024, compuesta de imágenes ortorectificadas provenientes del sensor PlanetScope, con una resolución espacial de 3 m. Las características de este insumo son:

- UTF-8 - 8 bits UCS Transfer Format.
- EPSG:9377 Projected coordinate system for Colombia.
- 8 bandas (Banda 1: azul costero; Banda 2: azul; Banda 3: verde I; Banda 4: verde; Banda 5: amarillo; Banda 6: rojo; Banda 7: rojo edge; Banda 8: NIR).
- Profundidad del píxel: 16.
- 18 % de nubosidad.
- Para el ejercicio, UTF-8 y UCS-2 fueron reemplazados por UTF-16.

Se analizaron las bandas y sus rangos electromagnéticos asociados, los cuales se utilizaron para el cálculo de las áreas de guadua en el Meta. De igual manera, se analizó la respuesta electromagnética del sensor a cada una de las bandas. La imagen obtenida se procesó en el software QGIS Versión de 3.34.15-Prizren, en donde se le realizó el posterior cálculo de índices NDVI.

## Índices usados

**NDVI:** Este indicador permite estimar la cantidad, la calidad y el desarrollo de la vegetación a partir de la diferencia entre la luz reflejada en el rango infrarrojo cercano (NIR) y la luz roja del espectro electromagnético. Se usa para monitorear la salud de la vegetación, cuantificar la biomasa, predecir zonas de riesgo de incendio y cartografiar la desertificación.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

**Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI):** Este índice de vegetación mide el “verdor” de una planta o su actividad fotosintética. Es similar al NDVI, pero más sensible a la variación del contenido de clorofila. Esta herramienta se utiliza comúnmente para determinar la captación de agua y nitrógeno en el dosel del cultivo.

$$GNDVI = (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN)$$



**Enhanced Vegetation Index (EVI):** El índice de vegetación mejorado tiene en cuenta las influencias atmosféricas y la señal de fondo de la vegetación. Es similar al NDVI, pero es menos sensible a los ruidos de fondo y atmosférico, y no se satura tanto como el NDVI al visualizar áreas con vegetación verde muy densa.

$$EVI = G * ((NIR - R) / (NIR + C1 * R - C2 * B + L))$$

$$EVI = 2,5 * ((NIR - Red) / ((NIR + 6 * Red - 7,5 * Blue) + 1))$$

**Advanced Vegetation Index (AVI):** El índice de vegetación avanzada es un indicador numérico similar al NDVI que utiliza las bandas espectral roja y cercana al infrarrojo (NIR). Al igual que el NDVI, el AVI se utiliza en estudios de vegetación para monitorear las variaciones de cultivos y bosques a lo largo del tiempo. Mediante la combinación multitemporal del AVI y el NDVI, los usuarios pueden discriminar diferentes tipos de vegetación y extraer características/parámetros fenológicos (Franzpc, 2019).

$$AVI = [NIR * (1 - Red) * (NIR - Red)]^{(1/3)}$$

**Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI):** El índice de vegetación ajustado al suelo intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección. Se utiliza con frecuencia en regiones áridas en donde la cubierta de vegetación es baja y genera valores entre -1,0 y 1,0.

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) * (1 + L)$$

**Normalized Difference Moisture Index (NDMI):** El índice de humedad de diferencia normalizada es sensible a los niveles de humedad de la vegetación y se utiliza para monitorear sequías y niveles de combustible en zonas propensas a incendios. Este método recurre a las bandas NIR y SWIR para crear una relación diseñada que mitiga los efectos de la iluminación y la atmósfera. En teoría, la delimitación de áreas de bambú mediante el NDMI debería ser posible ya que este parámetro determina el contenido de agua de las

hojas de las plantas, el cual resulta menor en dicha especie en comparación con otros tipos de bosque. La diferencia del valor del índice del bambú con otras clases de uso del suelo es menor.

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

$$NDMI = (NIR - SWIR_1) / (NIR + SWIR_1)$$

Cabe anotar que esta es la misma fórmula empleada para el SI del BI, en donde la longitud de onda SWIR oscila entre 1,55-1,70  $\mu$ m.

**Moisture Stress Index (MSI):** El índice de estrés hídrico es una medida de reflectancia sensible al crecimiento del contenido hídrico de las hojas del dosel vegetal. A medida que dicha variable aumenta, la absorción en longitudes de onda es cercana a 1.599 nm (la absorción a 819 nm se utiliza como referencia ya que prácticamente no se ve afectada por los cambios en el contenido hídrico). Este indicador se invierte en relación con los demás índices hídricos de la vegetación: valores más altos indican mayor estrés hídrico y menor contenido hídrico.

$$MSI = SWIR1 / NIR$$

**Green Coverage Index (GCI):** El índice de clorofila verde se utiliza para estimar el contenido de clorofila foliar en las plantas basándose en las bandas del infrarrojo cercano y verde. En general, el valor de la clorofila refleja directamente la vegetación.

$$ICG = IR\ cercano / Verde - 1$$

**BI:** Como se anotó antes, Goswami *et al.* (2010) proponen que la delimitación de áreas de bambú mediante el SI es posible ya que dicho indicador determina el contenido de agua de las hojas de las plantas, el cual es característicamente menor en bambú en comparación con otros tipos de bosque. Ahora bien, dado que la dife-

rencia del valor del índice de esta planta con otras clases de uso del suelo es menor, se buscó aumentar esta variación utilizando el NDVI y el SI. Los autores utilizaron las imágenes resultantes de este proceso para identificar áreas de guadua con base en los valores del índice. Se ha observado que el rango normal del BI se encuentra entre 0,06 y 0,08 para todos los sitios de estudio en China.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

$$SI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

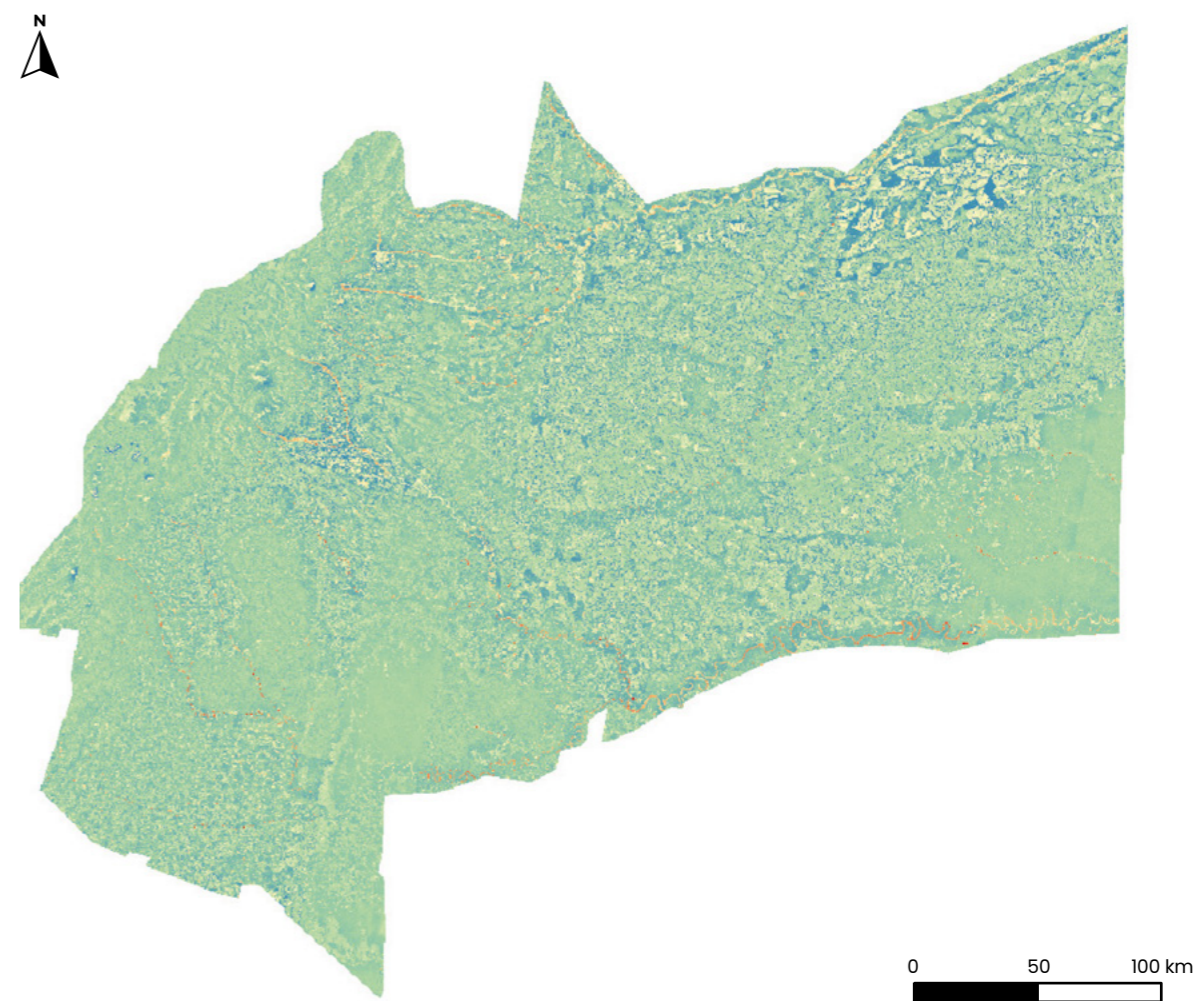
$$BI = (NDVI - SI) / (NDVI + SI)$$

El NDVI para Landsat 8 se calculó con (Banda 5-Banda 4)/(Banda 5+Banda 4); y el SI con (Banda 5-Banda 6)/(Banda 5+Banda 6). Así, en su estudio, Goswami *et al.* (2010) generaron el mapa de NDVI e SI.

Luego de evaluar el alcance de cada uno de estos índices y con base en la revisión bibliográfica, se concluyó que el índice que ofrecía el menor error para detectar bambú era el NDVI (figura 9). Este hallazgo, sin embargo, debió ser validado en campo generando la matriz de confusión y calculando el coeficiente kappa de Cohen.

Para el cálculo del NDVI correspondiente a la imagen del departamento del Meta (figura 9) obtenida del satélite Planet con ocho bandas, se empleó la siguiente fórmula con base en las bandas roja y NIR (banda 8):

Figura 9. NDVI para el departamento del Meta a 3 m, agosto 2024



Nota. Elaboración propia, a partir de ortoimagen suministrada por el IGAC.

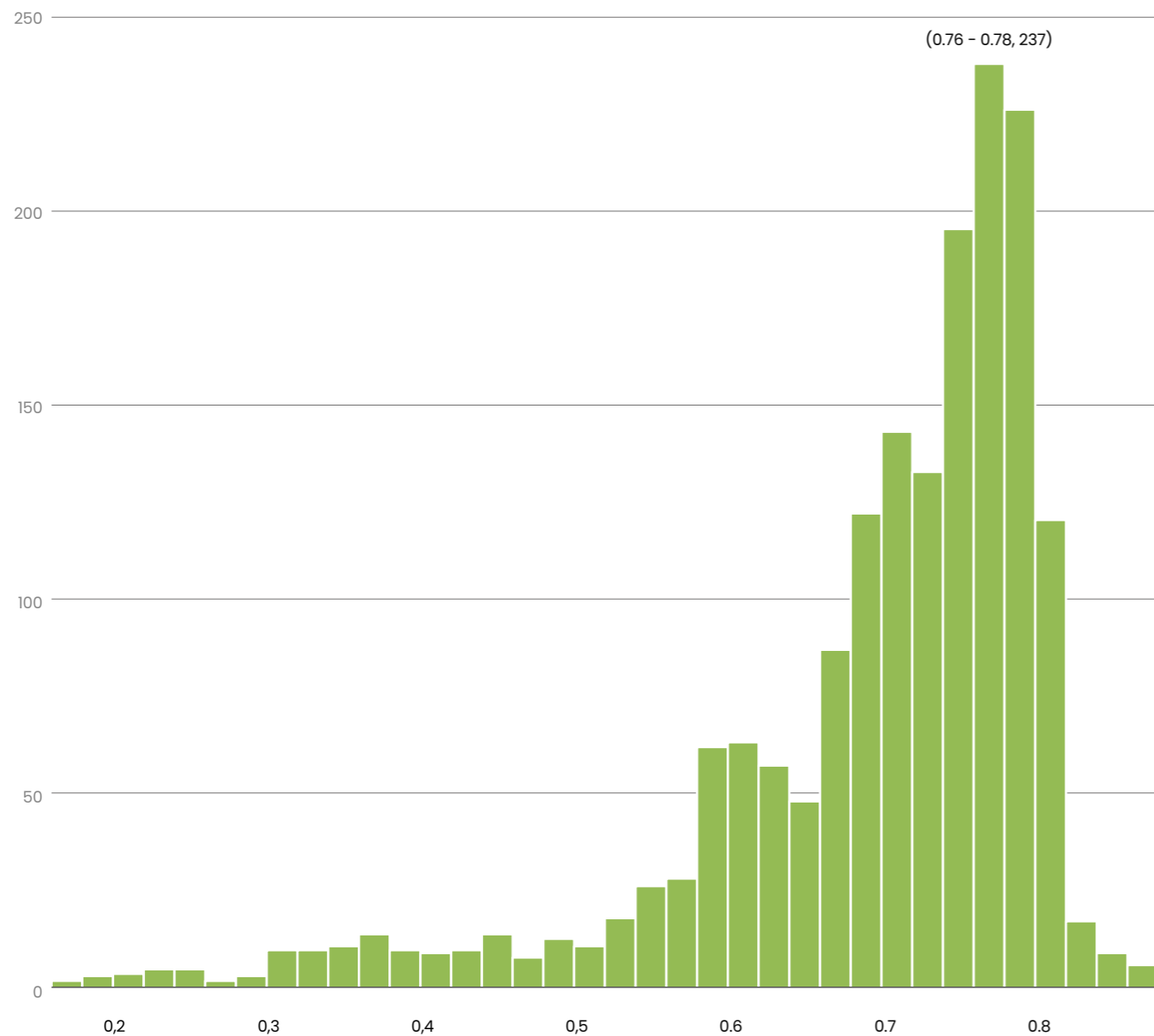
En este caso se añadió la capa de polígonos rectificadas como máscara para generar una nueva capa a partir de las áreas de bambú. Inicialmente, se tomaron 120 muestras que abarcan un área de 962 m<sup>2</sup>, aunque luego del presente análisis se podrán añadir más puntos que permitan hacer más representativa la muestra.

Una vez seleccionada la capa de máscara, se realizó el proceso de corte del ráster sobre las áreas de polígonos mediante el software QGIS 3.34.15-Prizren LTR. Como

resultado, se obtuvo una nueva capa ráster con la información de los polígonos extraídos.

A partir de los polígonos, se generó un histograma para evaluar los rangos entre los cuales se iba a detectar inicialmente la guadua (figura 10). Para el caso de NDVI, se decidió tomar los dos valores más representativos que se encuentran entre 0,76-0,78 Y 0,78-0,8 para obtener la mayor cantidad de aciertos aproximados. Este producto se generó usando 20 compartimentos.

Figura 10. Histograma para bambú o guadua bajo NDVI



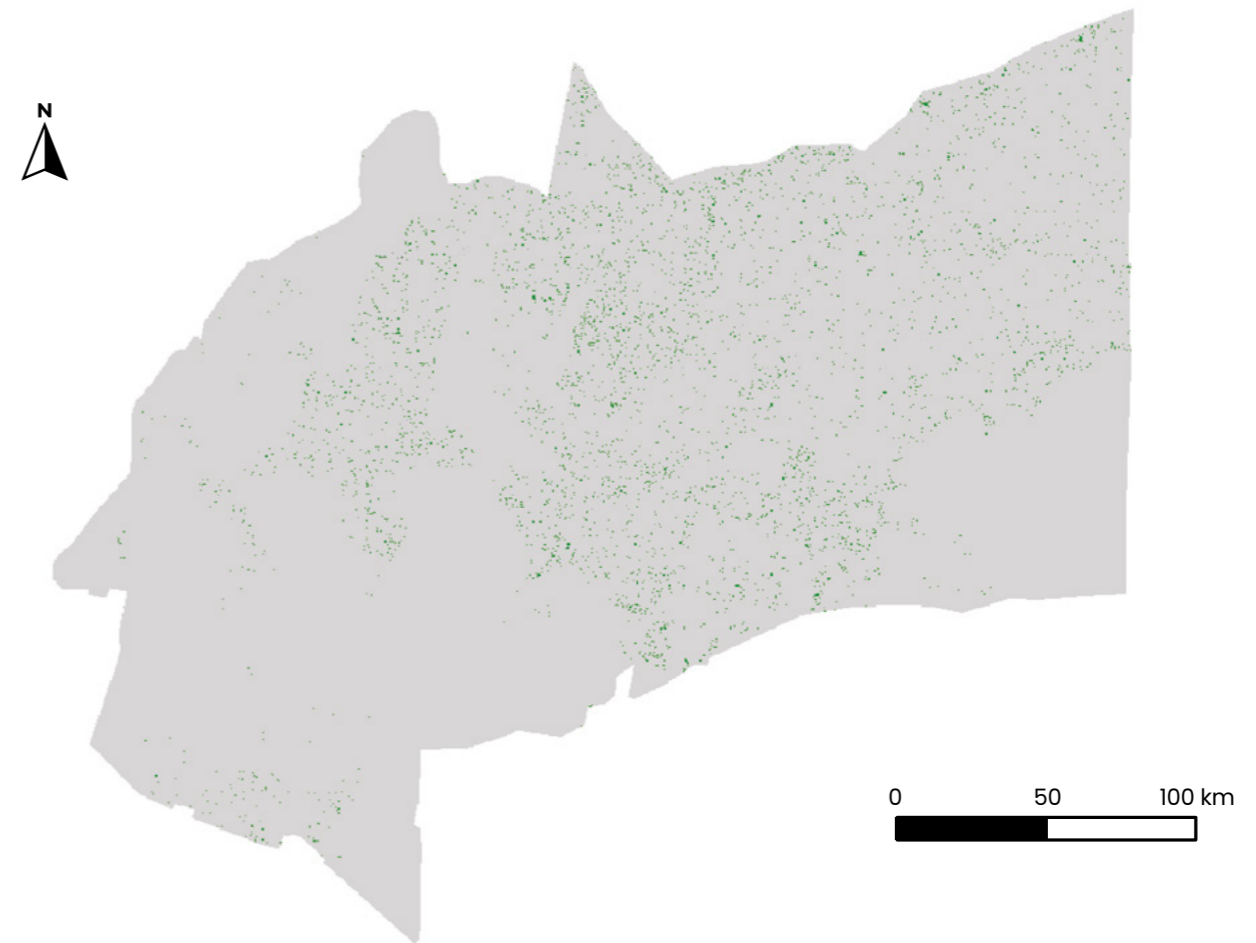
Nota. Elaboración propia.

Para extraer las zonas a partir de la imagen NDVI que contuvieran solo valores entre 0,76-0,78 se empleó la herramienta *raster calculator* con la siguiente fórmula:

$$("NDVI\_3M@1" \geq 0,76) \text{ AND } ("NDVI\_3M@1" \leq 0,78)$$

Como resultado, se obtuvo una capa nueva (figura 11) con los píxeles con valores NDVI entre 0,76-0,78, que corresponden a la firma espectral del bambú o guadua.

Figura 11. Áreas de guadua sin eliminación de ruido



Nota. Elaboración propia.

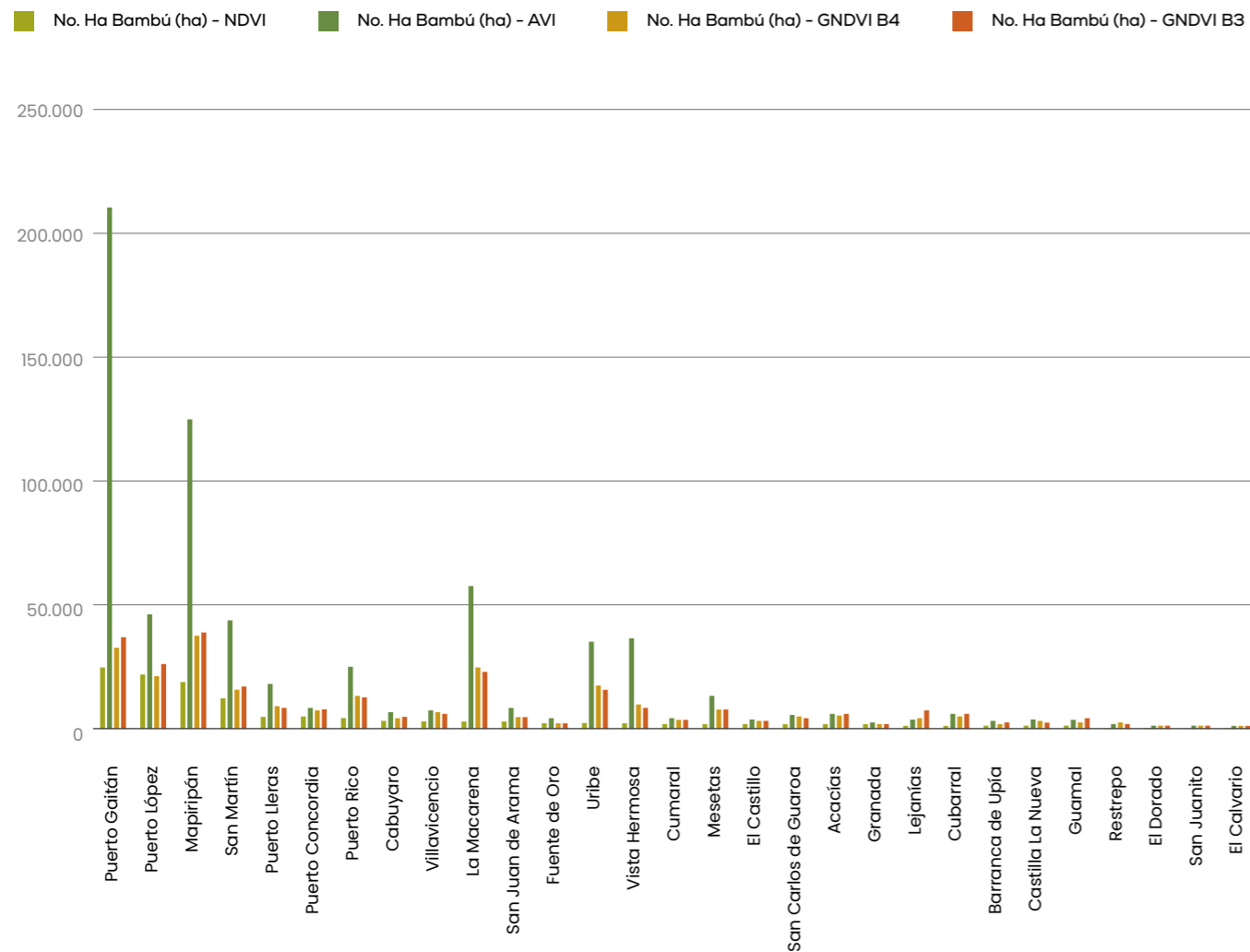
Para facilitar el procesamiento de la información, se generaron capas separadas para cada municipio del departamento del Meta. Luego de este tratamiento y de generar cada ráster, se creó el código en Python empleando Visual Studio Code (VSC), un editor de código fuente desarrollado por Microsoft para Windows, Linux, macOS y Web que incluye soporte para la depuración, control integrado de Git, resaltado de sintaxis, finalización inteligente de código, fragmentos y refactorización de código. También se hizo uso de Jupyter Notebook, una aplicación web de código abierto que permite crear y compartir documentos

interactivos que combinan código, texto explicativo, visualizaciones y otros elementos.

El objetivo de esta etapa fue conocer el número de píxeles en los cuales existía bambú, que para el estudio eran los que poseían valor de 1. De esta manera se calculó, con base en la resolución espacial por píxel de 3 m (9 m<sup>2</sup>/píxel), el área total por municipio y total de esta especie. El procedimiento se repitió para cada uno de los índices propuestos: NDVI, GNDVI, EVI, AVI, SAVI, NDMI, MSI y GCI, con el objetivo de validar cuál ofrecía un menor error y un mayor acierto en la detección de áreas de guadua.

La capa ráster NDVI se creó a partir de la máscara de polígonos y se generó el histograma, con el cual se obtuvo la firma espectral para bambú. Finalmente, la capa correspondiente a los bosques de esta especie en todo el departamento se construyó con todas las áreas detectadas según la firma espectral, cuantificadas de acuerdo al número de píxeles detectados mediante código en Python 3.13.3.

Figura 12. Comparación del número de hectáreas de bambú encontradas entre índices



Nota. Elaboración propia.

Como resultado, se encontró que la firma espectral para bambú basada en NDVI para el Meta oscila entre 0,76-0,8. Sin embargo los valores que reportaron la menor cantidad de errores se hallaron entre 0,76-0,78. Asimismo, se detectaron 117.976 ha de bambú para el departamento, en donde los municipios de Puerto Gaitán (20,72 %), Puerto López (18,26 %), Mapiripán (15,35 %) y San Martín (10,19 %) se destacan con las mayores áreas de esta cobertura.

Se concluye entonces que la metodología empleada brinda un acierto del 78,4 %, el cual puede ser mejorado con la incorporación de la banda 11 (SWIR1) de Sentinel-2. Esta banda, en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR), se utiliza principalmente para el análisis de vegetación, y en especial para estimar la humedad del suelo y la vegetación a 20 m de resolución espacial. No obstante, es preciso señalar que este ajuste podría reducir la detección de áreas menores a 400 m<sup>2</sup> al pasar de una GSD de 3 m (PlanetScope) a 20 m (Sentinel 2).

## 2 Levantamiento de información en puntos de control, parcelas en campo y vuelos con dron

Con el objetivo de establecer el porcentaje de acierto para la teledetección y de llevar a cabo unos cálculos iniciales para estimar cantidades de guadua de disponible en el Meta, el proyecto estableció cinco parcelas de monitoreo y tomó 114 puntos de validación en cinco municipios (Villavicencio, Acacias, Guamal, Cubarral y Puerto López). De manera complementaria, se llevó a cabo la toma de vuelos con dron (DJI Mini 4 Pro) y una cámara de 48 Mpx entre 50

a 100 m de altura sobre parcelas identificadas previamente con cultivos de guadua o áreas naturales de guadua.

En la capa del índice NDVI a partir de las bandas roja (banda 6) y NIR (banda 8), se cargaron los más de 100 puntos recolectados en campo con la geolocalización del bambú en Google Earth Pro. Luego se generaron los polígonos a partir de los puntos y se rectificaron en el software QGIS 3.34.15-Prizren LTR con base en la imagen satelital.

Como resultado, se encontró que, de las 117.976 ha detectadas con esta especie en el departamento, el 87,57 % son correctas según la matriz de confusión (tabla 2), lo que permite estimar un total de 103.311 ha.

Tabla 2. Matriz de confusión para los 114 puntos de validación

Actual	Positivo	93	25
	Negativo	31	89
		Positivo	Negativo
Predicho			

Nota. Elaboración propia.

Asimismo, se determinó que, de estas 103.311 ha, la mayor cantidad de guaduales poseen diámetros entre 2,86-5,25 cm (27,64 %), y la menor proporción se encuentra en el rango de 10,03-12,41cm (12,73 %). Este último umbral, en particular, es el de mayor interés para la industria de la construcción, con alrededor de 13.151 ha. No obstante, estas cifras son iniciales, y deberán ser validadas a través de estudios posteriores estableciendo más parcelas de muestreo (alrededor de 100) para contar con una confiabilidad estadística mayor.

También se pudo establecer que las áreas requieren una priorización por parte del Comité de la Cadena Productiva de la Guadua y el Bambú y un trabajo de formación en conceptos técnicos debido a que no todas cumplen con los criterios de metros cuadrados o potenciales de aprovechamiento forestal.



**3 Estimación de áreas por municipio**

Con los puntos y las coordenadas tomadas, más las predicciones del mapa generado, se realizó el proceso de validación de las áreas de bambú detectadas en el departamento del

Meta. La tabla 3 consolida el número de hectáreas de guadua o bambú para cada uno de los 29 municipios que comprende el departamento del Meta, con base en el NDVI.

**Tabla 3.** Número de hectáreas de bambú o guadua para los municipios del Meta según NDVI

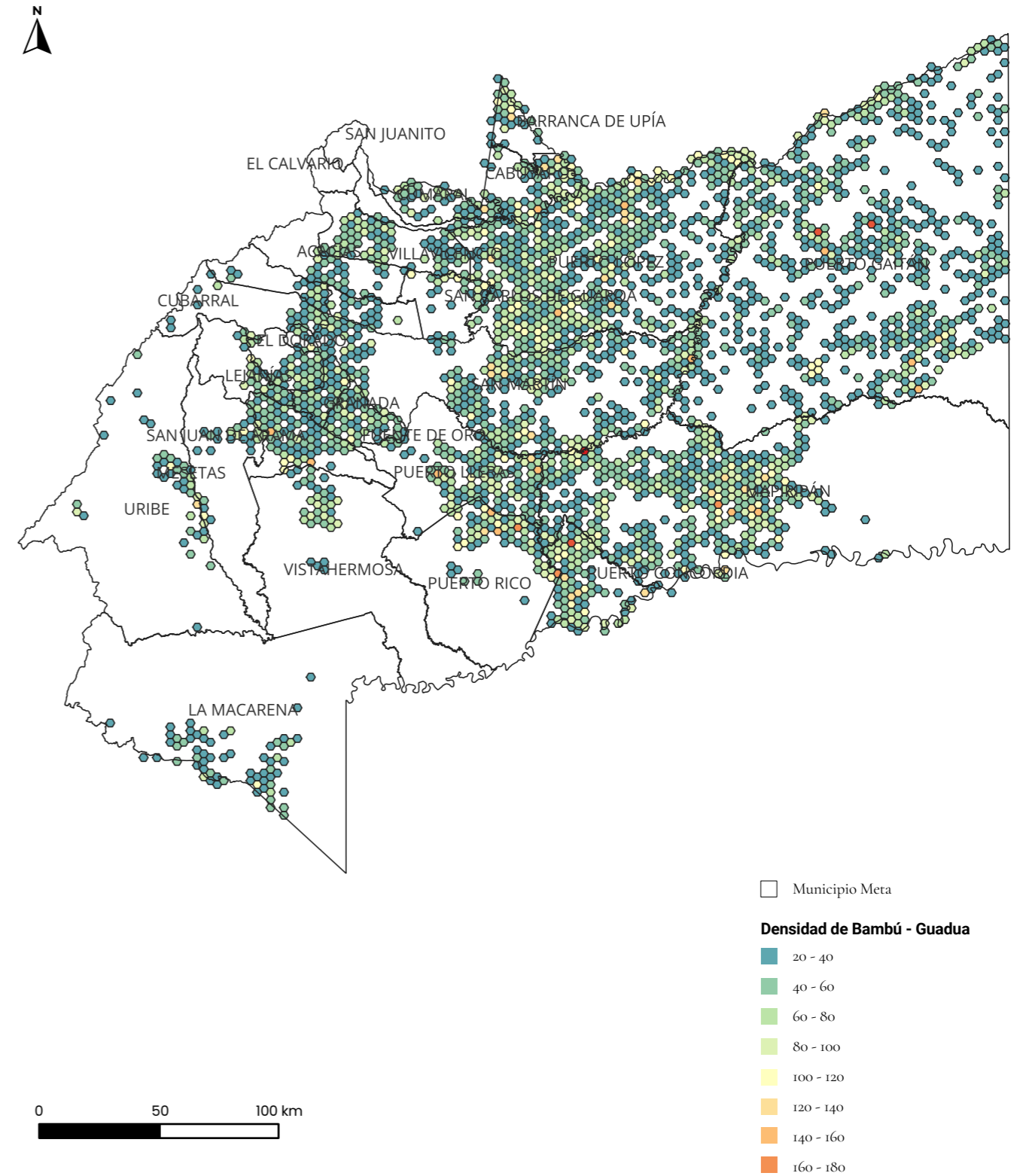
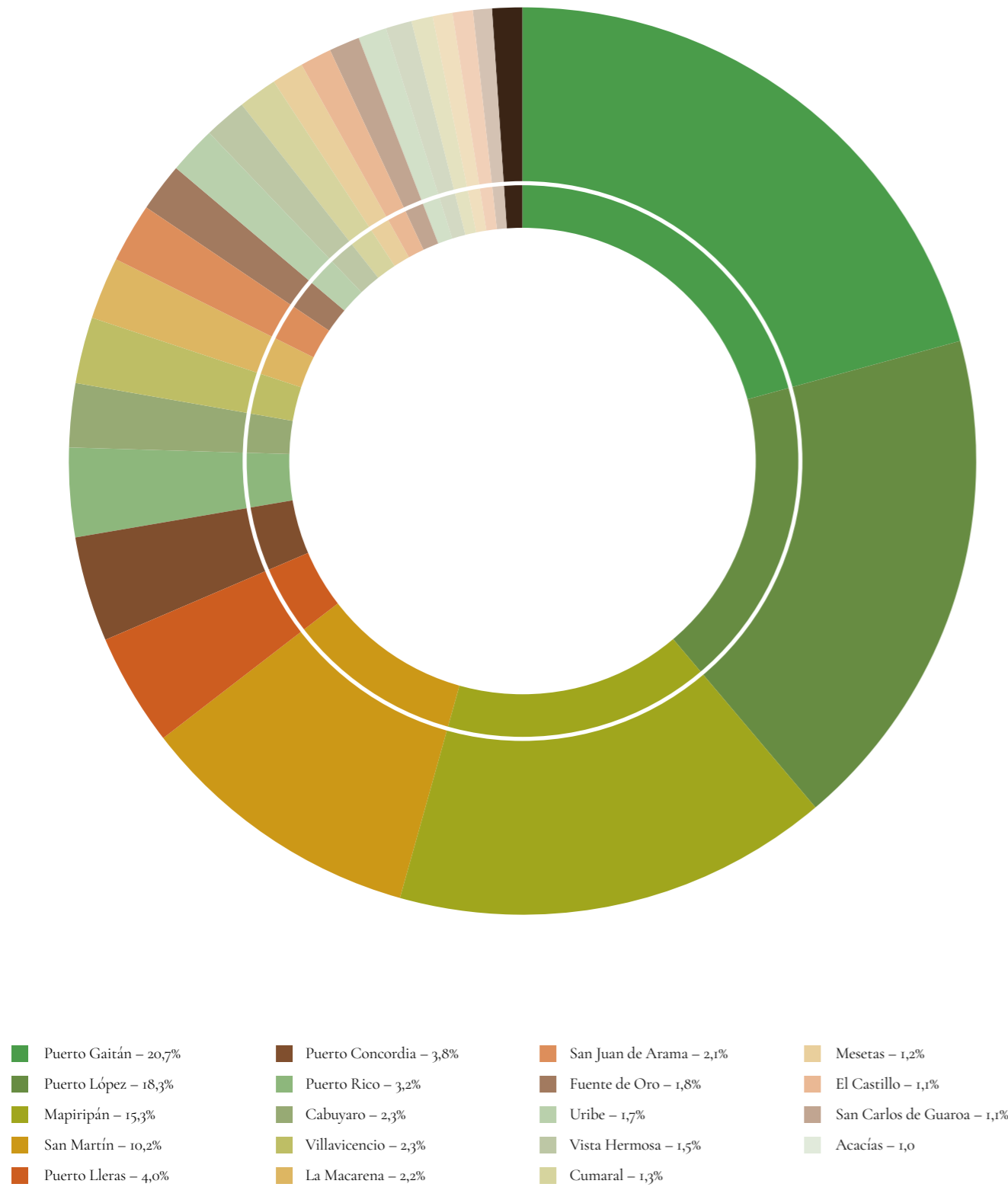
Nombre	N.º píxeles	N.º ha bambú (m <sup>2</sup> )	N.º ha bambú
Acacias	1.289.720	11.607.480	1.161
Barranca de Upia	922.555	8.302.995	830
Cabuyaro	3.071.220	27.640.980	2.764
Castilla La Nueva	808.453	7.276.077	728
Cubarral	937.373	8.436.357	844
Cumaral	1.761.829	15.856.461	1.586
El Calvario	55	495	0
El Castillo	1.455.245	13.097.205	1.310
El Dorado	369.603	3.326.427	333
Fuente de Oro	2.305.185	20.746.665	2.075
Granada	1.233.935	11.105.415	1.111
Guamal	674.700	6.072.300	607
La Macarena	2.891.762	26.025.858	2.603
Uribe	2.199.954	19.799.586	1.980
Lejanías	987.710	8.889.390	889

Nombre	N.º píxeles	N.º ha bambú (m <sup>2</sup> )	N.º ha bambú
Mapiripán	20.117.059	181.053.531	18.105
Mesetas	1.530.059	13.770.531	1.377
Puerto Concordia	4.930.201	44.371.809	4.437
Puerto Gaitán	27.165.249	244.487.241	24.449
Puerto Lleras	5.254.190	47.287.710	4.729
Puerto López	23.935.403	215.418.627	21.542
Puerto Rico	4.233.438	38.100.942	3.810
Restrepo	425.613	3.830.517	383
San Carlos de Guaroa	1.424.108	12.816.972	1.282
San Juan de Arama	2.802.732	25.224.588	2.522
San Juanito	2.303	20.727	2
San Martín	13.355.823	120.202.407	12.020
Villavicencio	2.992.711	26.934.399	2.693
Vista Hermosa	2.006.495	18.058.455	1.806
<b>Total</b>	<b>131.084.683</b>	<b>1.179.762.147</b>	<b>117.976</b>

**Nota.** Elaboración propia.

Por otro lado, en la figura 13 se representan las proporciones de área con bambú en el Meta. Los municipios con mayores registros en este sentido son: Puerto Gaitán (20,72 %), Puerto López (18,26 %), Mapiripán (15,35 %) y San Martín (10,19 %).

Figura 13. Porcentaje de área con bambú encontrada por municipio en el Meta según NDVI



Nota. Elaboración propia.

ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL BAMBÚ  
- GUADUA EN EL DEPARTAMENTO DEL META  
A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

# 3.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La revisión bibliográfica que se llevó a cabo específicamente para el departamento del Meta encontró un estudio dirigido concretamente a la detección de guadua en el municipio de la Macarena. Este referente permitió validar las cinco especies que se hallan en la región, de las cuales cuatro son bambúes herbáceos de los géneros *Olyra*, *Pariana* y *Raddiella*, y una es un bambú leñoso del género *Guadua*. Además, se han identificado bambúes exóticos como *Bambusa vulgaris* var. *vittata*, introducido del sur de Asia.

La metodología para la detección de guadua en el departamento del Meta también toma elementos de casos de estudio realizados en Brasil, China y África extraídos de la revisión bibliográfica. Esta propuesta, asimismo, incluye los mecanismos de validación y de clasificación entre estadios del ciclo de vida de la guadua identificados en la literatura científica y reconoce las importantes diferencias de este bambú leñoso con respecto a las demás especies de esta planta en cuanto a la senescencia y la defoliación de las hojas ante el estrés hídrico. De este modo se puede establecer que para el estudio de este recurso vegetal es más factible emplear imágenes obtenidas de periodos secos del Meta, como enero y febrero de 2025.

El modelo que se presenta para la detección de bambú o guadua se encuentra optimizado para las condiciones orográficas, de radiación y de reflectancia específica del Meta. Este ajuste permitió identificar la huella digital de la especie a partir de los índices NDVI, GNDVI, EVI, AVI, SAVI, NDMI, MSI y GCI sobre la imagen del sensor PlanetScope, con una resolución espacial de 3 m. Para cada uno de estos indicadores se generó una imagen ráster con el área de guadua; también se elaboró un histograma para identificar la firma espectral, y se calculó la cobertura de este bosque para cada municipio.

A partir del índice NDVI, se identificó que la huella digital del bambú o la guadua en el Meta varía entre 0,76 y 0,78. Así, según este parámetro, se puede afirmar que, de los 82.805 km<sup>2</sup> del territorio del departamento, equivalente a 82.80.500 ha, aproximadamente 117.976 ha corresponden al género *Guadua* de la familia Poaceae. El 87,57 % de esta área estimada es correcto según la matriz de confusión, por lo que, en definitiva, se podría hablar de 103.311 ha de bambú distribuidas en la región.

A partir de las mediciones de *Guadua angustifolia* en las cinco parcelas establecidas para dicho fin en los municipios de Villavicencio, Guamal, Cubarral, Puerto López y Puerto Gaitán, se pudo determinar que la mayor cantidad de esta planta por área, esto es, un 27,64 % del inventario realizado, presenta diámetros entre 2,86-5,25 cm. Por otro lado, los ejemplares maduros, con diámetros entre 10,03-12,41 cm, son los que poseen menor cantidad por área, con un 12,73%.

También se estableció que, de las 103,311 ha con guadua, 24.040 ha corresponden a diámetros entre 0,48-2,86 cm; 28.555 ha tienen plantas que se encuentran entre 2,86-5,25 cm; en 16.902 ha este parámetro varía entre 5,25-7,64 cm; en 20.662 ha oscila entre 7,64-10,03 cm; y en 13.151 ha se reportan registros entre 10,03-12,41 cm. Sin embargo, es importante aclarar que estos valores todavía requieren mayores evaluaciones a través de estudios posteriores que establezcan más parcelas (alrededor de 100) para contar con una confiabilidad estadística mayor. Se sugiere ampliar dichas investigaciones con estudiantes del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y de la Universidad de Unillanos.

Finalmente, se deben llevar a cabo mesas de trabajo con el Comité de la Cadena Productiva de la Guadua y el Bambú del Meta para priorizar las zonas con potencial de manejo sostenible.

También será necesario identificar las áreas mínimas de interés de aprovechamiento, considerando los elementos normativos de la Ley 2206 de 2022, “Por medio del cual se incentiva el uso productivo de la guadua y el bambú y su sostenibilidad ambiental en el territorio nacional”, que define tres categorías:

- 1) GuaduaLes y bambusales naturales dentro de áreas protectoras.
- 2) Guaduales y bambusales plantados con carácter protector y protector productor.
- 3) Guaduales y bambusales plantados con carácter productor.

El objetivo es facilitar la priorización y el manejo de estas zonas, así como la definición de núcleos productivos.

# BIBLIOGRAFÍA

Araújo, L. S., Sparoveka, G., dos Santos, J. R. y Rodrigues, R. R. (2008). High-Resolution Image To Map Bamboo-Dominated Gaps In The Atlantic Rain Forest, Brazil. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(4), 1287-1292.

Bo, W., Hong, Z., Xiaoyi W., Guanting, L., Kuangmin, C., Jinfeng, X., Guishan, C., Liheng Z., Le Y., Huabing H. y Qinghong S. (2024). Bamboo classification based on GEDI, time-series Sentinel-2 images and whale-optimized, dual-channel DenseNet: A case study in Zhejiang province, China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.02.002>

Carvalho, A. L., Nelson, B. W., Bianchini, M. C., Plagnol, D., Kuplich, T. M. y Daly, D. C. (2013). Bamboo-Dominated Forests of the Southwest Amazon: Detection, Spatial Extent, Life Cycle Length and Flowering Waves. *PLoS ONE*, 8(1), e54852. [10.1371/journal.pone.0054852](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054852)

Castaño, F. y Moreno, R. D. (2004). *Guadua para todos. Cultivo y aprovechamiento*.

Clark, L.G., Londoño, X. y Ruiz-Sánchez, E. (2015). Bamboo taxonomy and habitat. En W. Liese y M. Köhl (Eds.), *Bamboo: The plant and its uses* (Vol. 10, pp. 1-30). Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6_1)

Chen, Y., Ding, L., Ge, H., Zhang, M. y Hu, Y. (2011). Hyperspectral Bambusoideae discrimination based on Mann-Whitney non-parametric test and SVM. *Spectrosc. Spectr. Anal*, 31, 3010-3013.

Fadrique, B., Veldman, J. W., Dalling, J. W., Clark, L. G., Montti, L., Ruiz-Sanchez, E., Rother, D. C., Ely, F., Farfan-Ríos, W., Gagnon, P., Prada, C. M., Camargo, J. C., Saha, S., Veblen, T. T., Londoño, X., Feeley, K. J. y Rockwell, C. A. (2019). *Guidelines for including bamboos in tropical ecosystem monitoring*.

Goswami, J., Tajo, L. y Sarma, K. K. (2010). Bamboo resources mapping using satellite technology. *Current Science*, 99(5).

Koim, N. (2009). *Urban sprawl, land cover change and forest fragmentation: A case of study of Pereira, Colombia* [Tesis de maestría, Humboldt-Universität zu].

Londoño, X. (2002). Evaluation of Bamboo Resources in Latin America. En A. Kumar, I. V. Ramanuja y C. Sastry (Eds.), *Bamboo for Sustainable Development – Proceedings of the Vth International Bamboo Congress and the VIth International Bamboo Workshop*. VSP; INBAR.

Londoño de la Pava, X., Camargo García, J. C. y Jácome Estrella, P. (2019). *La guadua: el gigante oculto de La Macarena*. Sociedad Colombiana del Bambú.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *Cadena Guadua. Acuerdo de Competitividad 2021*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Guadua/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Muñoz, D. y Camargo, J. C. (2015). Identificación visual de guaduales en el Eje Cafetero de Colombia a partir de una imagen Landsat 8 sometida a mejoramiento espacial por método ISH. *Recursos Naturales y Ambiente*, 65-66, 77-82.

Muñoz-López, J., Camargo-García, J. C. y Romero-Ladino, C. (2021). Valuation of ecosystem services of guadua bamboo (*Guadua angustifolia*) forest in the southwestern of Pereira, Colombia. *Revista Caldasia*, 43(1), 186-196.

Nelson, B. W. y Bianchini, M. C. (2005). Complete life cycle of southwest Amazon bamboos (*Guadua* spp.) detected with orbital optical sensors. En *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE* (pp. 1629-1636).

Nfornekah, B. N., Rene, K., Martin, T., Louis, Z., Cedric, C. y Armand, T. (2020). Assessing the spatial distribution of bamboo species using remote sensing in Cameroon. *Journal of Ecology and The Natural Environment*, 12(4), 172-183. [10.5897/JENE2020.0839](https://doi.org/10.5897/JENE2020.0839)

NASA. (2025). *Thematic Mapper (TM)*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/thematic-mapper/>

Salas, E. (2006). *Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia: Simón Velez: símbolo y búsqueda de lo primitivo* [Doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya]. [10.5821/dissertation-2117-93442](https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-93442)

Tchoutezou, H. Z., Tanougong, A. D., Kaam, R., Ouya, H., Ngoh-Allah, O., Nyong, A. y Ngankam, M. (2024). Inventory of timber and non-timber forest products through remote sensing and mapping: The example of bamboo resources in Chad. *Advances in Bamboo Science*, (9), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100118>

Wang, J., Du, H., Li, X., Mao, F., Zhang, M., Liu, E., Ji, J. y Kang, F. (2021). Remote Sensing Estimation of Bamboo Forest Aboveground Biomass Based on Geographically Weighted Regression. *Remote Sens.*, 13, 2962. <https://doi.org/10.3390/rs13152962>

Xiang, S., Xu, Z., Shen, W., Chen, L., Hao, Z., Wang, L., Liu, Z., Li, Z., Guo, X. y Zhang, H. (2023). Mapping of bamboo forest bright and shadow areas using optical and SAR satellite data in Google Earth Engine. *Geocarto International*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2203105>

Zhou, G., Ni, Z., Zhao, Y. y Luan, J. (2022). Identification of Bamboo Species Based on Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Using Zhuhai-1 Orbita Hyperspectral Remote Sensing Imagery. *Sensors*, 22, 5434. <https://doi.org/10.3390/s22145434>



**Análisis de distribución espacial del bambu**  
– guadua en el departamento del Meta a  
partir de imágenes satelitales

