



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

ANÁLISIS DE LA COBERTURA BOSCOSA EN EL PARQUE  
NACIONAL TINGO MARÍA - PERÚ UTILIZANDO ALGORITMOS DE  
INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Línea de Investigación:  
Biodiversidad, ecosistema y conservación

Tesis para optar el Grado Académico de  
Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor:  
Puerta Tuesta, Ronald Hugo

Asesor:  
Iannacone Oliver, José Alberto  
(ORCID: 000-0003-3699-4732)

Jurado  
Zambrano Cabanilla, Abel Walter  
Zamora Talavera, Noé Sabino  
Rodríguez Rodríguez, Ciro

Lima – Perú  
2023

**Dedicatoria:**

A mis hijos: Joanna Ofelia, Luciana Romina y Ronald Joaquín, y a mi señora Yéssica quienes me impulsan a salir adelante cada día.

A mis padres Ronaldo y Ofelia (+) que me han conducido por las sendas de la vida.

A mis hermanos Jorge Martín y Ofelia María; y a toda mi familia que me han acompañado en este largo camino.

## **Agradecimientos**

A Dios por darme la vida y la salud para culminar con satisfacción este proceso de mi vida.

A toda mi familia por su apoyo incondicional y comprensión para acompañarme en los días más duros de mi existencia.

A mi asesor, Ph.D. José Iannacone Oliver por su orientación y motivación durante la concepción, ejecución y redacción de la presente investigación. Mi eterno agradecimiento.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), mi alma mater; en especial a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, sin su apoyo no hubiera sido posible llevar a cabo esta travesía.

Al personal del Parque Nacional Tingo María (SERNANP) por todas las facilidades brindadas para el desarrollo de esta tesis.

A todas las personas que de una u otra manera han hecho posible el presente trabajo.

## Índice de contenido

|   | Pág. |
|---|------|
| Dedicatoria:.....                                       | ii   |
| Agradecimientos .....                                   | iii  |
| Índice de contenido .....                               | iv   |
| Índice de Tablas .....                                  | vii  |
| Índice de Figuras.....                                  | ix   |
| RESUMEN .....   | x    |
| ABSTRACT.....   | xi   |
| I. INTRODUCCIÓN.....                                    | 1    |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                   | 2    |
| 1.2. Descripción del problema.....                      | 4    |
| 1.3. Formulación del problema.....                      | 4    |
| 1.3.1. Problema general .....                           | 4    |
| 1.3.2. Problemas específicos.....                       | 5    |
| 1.4. Antecedentes .....                                 | 5    |
| 1.4.1. Antecedentes nacionales.....                     | 5    |
| 1.4.2. Antecedente internacionales .....                | 6    |
| 1.5. Justificación de la investigación.....             | 7    |
| 1.5.1. Implementaciones prácticas y de desarrollo ..... | 7    |
| 1.5.2. Utilidad metodológica .....                      | 7    |
| 1.5.3. Relevancia social .....                          | 7    |
| 1.5.4. Valor teórico o de conocimiento .....            | 8    |
| 1.6. Limitaciones de la Investigación .....             | 8    |

|  |    |
|--|----|
| 1.7. Objetivos .....   | 8  |
| 1.7.1. Objetivo general .....  | 8  |
| 1.7.2. Objetivos específicos .....   | 9  |
| 1.8. Hipótesis .....   | 9  |
| 1.8.1. Hipótesis general .....   | 9  |
| 1.8.2. Hipótesis específicas.....  | 9  |
| II. MARCO TEÓRICO .....  | 10 |
| 2.1. Marco conceptual .....  | 10 |
| 2.1.1. Bosque y deforestación.....   | 10 |
| 2.1.2. Áreas Naturales Protegidas.....   | 10 |
| 2.1.3. Algoritmos para clasificación de imágenes satelitales .....                       | 13 |
| 2.1.4. Misión Sentinel-2 .....   | 14 |
| III. MÉTODO .....  | 16 |
| 3.1. Tipo de Investigación .....   | 16 |
| 3.2. Población y muestra .....   | 16 |
| 3.3. Operacionalización de variables.....  | 16 |
| 3.3.1. Variable cobertura boscosa (ha) .....   | 16 |
| 3.4. Instrumentos .....  | 17 |
| 3.5. Procedimientos .....  | 18 |
| 3.5.1. Cobertura boscosa del PNTM y ZA para los años 2017, 2019 y<br>2021 .....          | 18 |
| 3.5.2. Cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y<br>2019 al 2021 ..... | 20 |
| 3.5.3. Grado de fragmentación de bosques.....  | 21 |
| 3.6. Análisis de datos.....  | 23 |

|  |    |
|--|----|
| 3.7. Consideraciones éticas .....  | 25 |
| IV. RESULTADOS .....   | 26 |
| 4.1. Cobertura boscosa del PNTM y su ZA para los años 2017, 2019 y 2021.....           | 26 |
| 4.1.1. Ubicación y accesibilidad.....  | 26 |
| 4.1.2. Coberturas encontradas.....   | 27 |
| 4.1.3. Exactitud temática de la clasificación .....                                    | 34 |
| 4.2. Cambio de bosque a no bosque en los períodos 2017 al 2019 y 2019 al<br>2021 ..... | 35 |
| 4.3. Grado de fragmentación de los bosques.....  | 39 |
| V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....   | 40 |
| VI. CONCLUSIONES.....  | 44 |
| VII. RECOMENDACIONES .....   | 45 |
| VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 46 |
| IX. ANEXOS.....  | 54 |

## Índice de Tablas

|   | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Lista resumida de las Áreas Naturales en el Perú. ....                       | 11   |
| Tabla 2. Lista de los Parques Nacionales en el Perú .....                             | 12   |
| Tabla 3. Zonificación del PNTM según los Planes Maestros desde el 2002 al 2022.....   | 13   |
| Tabla 4. Descripción de las bandas de los satélites S-2 .....                         | 15   |
| Tabla 5. Operacionalización de variables.....   | 17   |
| Tabla 6. Características de las imágenes S-2 empleadas en la clasificación.....       | 18   |
| Tabla 7. Coberturas identificadas en la zona de estudio .....                         | 19   |
| Tabla 8. Imágenes utilizadas en la medición de la exactitud temática.....             | 20   |
| Tabla 9. Fuerza de concordancia según el Índice de Kappa.....                         | 23   |
| Tabla 10. Matriz de transición.....   | 24   |
| Tabla 11. Valores para el Índice de fragmentación.....                                | 24   |
| Tabla 12. Vías de acceso al Parque Nacional Tingo María.....                          | 27   |
| Tabla 13. Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2017 .....          | 27   |
| Tabla 14. Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2019 .....          | 29   |
| Tabla 15. Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2021 .....          | 31   |
| Tabla 16. Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2017 .....                  | 34   |
| Tabla 17. Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2019 .....                  | 34   |
| Tabla 18. Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2021 .....                  | 35   |
| Tabla 19. Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2017 al 2019 (ha) ..... | 35   |
| Tabla 20. Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZA 2017 al 2019 (ha) ..... | 36   |
| Tabla 21. Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2019 al 2021 (ha) ..... | 37   |
| Tabla 22. Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZAs 2019 al 2021 (ha)..... | 37   |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 23. Métricas de fragmentación del bosque dentro del PNTM y su ZA al 2021 ..... | 39 |
| Tabla 24. Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2017 ..... | 57 |
| Tabla 25. Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2019 ..... | 60 |
| Tabla 26. Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2021 ..... | 63 |



## Índice de Figuras

|   | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Flujograma de los procedimientos empleados .....                            | 22   |
| Figura 2. Ubicación del área de estudio .....   | 26   |
| Figura 3. Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2017 .....                           | 28   |
| Figura 4. Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2019 .....                           | 30   |
| Figura 5. Mapa de coberturas del PNTM y ZA al 2021 .....                              | 32   |
| Figura 6. Visualización de las coberturas dentro del área de estudio.....             | 33   |
| Figura 7. Detección del cambio de cobertura.....                                      | 38   |
| Figura 8. Entrevista con comuneros y personal del PNTM sector La Quinceañera.....     | 55   |
| Figura 9. Ingreso principal al PNTM sector Cueva de las Pavas .....                   | 55   |
| Figura 10. Río Tres de Mayo luego del deslizamiento de tierras ocurrido el 2021 ..... | 56   |
| Figura 11. Catarata Gloriapata en el sector Tres de Mayo – PNTM.....                  | 56   |

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo analizar la dinámica de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María (PNTM) y su zona de amortiguamiento (ZA) ubicados en la selva alta de la región Huánuco, Perú utilizando algoritmos de inteligencia artificial (IA). Para lo cual se utilizó como insumo principal imágenes Sentinel-2 que fueron clasificadas utilizando el algoritmo de IA Random Forest. Como resultado, se elaboró los mapas de cobertura de la zona de estudio que corresponde a los años 2017, 2019 y 2021 con una exactitud temática considerable. Durante el periodo de evaluación, la tasa de cambio de bosque a no bosque dentro del PNTM se incrementó de -0,26 (2017 – 2019) a -1,24 (2019 – 2021) como consecuencia de fenómenos naturales. Mientras que los bosques de la ZA han sufrido una transición dinámica, con tasas de cambio de -2,97 a -4,39 derivado del cambio de uso de las tierras. Las métricas del paisaje sugieren que los bosques del PNTM se encuentran moderadamente fragmentados y los bosques de la ZA se encuentran fuertemente fragmentados, por lo que se concluye que el área natural protegida ha cumplido con el objetivo de mantener la cobertura vegetal.

*Palabras clave:* Fragmentación, Random Forest, Sentinel-2, Tasa de cambio.

## ABSTRACT

The objective of the research was to analyze spatially and temporally the forest cover of Parque Nacional Tingo María and its buffer zone located in the high jungle of the Huánuco region, Peru. For which Sentinel-2 images were used as the main input, which were classified using the Random Forest artificial intelligence algorithm. As a result, the coverage maps of the study area corresponding to the years 2017, 2019 and 2021 were prepared with considerable thematic accuracy. During the evaluation period, the rate of change from forest to non-forest within the PNTM increased from -0.26 (2017 - 2019) to -1.24 (2019 - 2021) as a consequence of natural phenomena. While the forests of the AZ have undergone a dynamic transition, with rates of change from -2.97 to -4.39 derived from the change in land use. The landscape metrics suggest that the PNTM forests are moderately fragmented and the ZA forests are strongly fragmented, so it is concluded that the protected natural area has fulfilled the objective of maintaining plant cover.

*Keywords:* Fragmentation, Random Forest, Sentinel-2, Rate of change.

## I. INTRODUCCIÓN

La deforestación es uno de los problemas ambiental más recurrentes que aqueja actualmente a la humanidad. Se ha calculado a nivel mundial que la tasa de deforestación es de 10 millones de ha anuales durante el quinquenio 2015 - 2020 (FAO - PNUMA 2020). En el Perú la situación de los bosques es muy similar, desde el inicio del nuevo milenio la deforestación avanza a una velocidad impresionante, y el 2020 alcanzó un pico histórico de 203 272 ha de bosques destruidos en un solo año (MINAM, 2022).

El establecimiento de las áreas naturales protegidas es una estrategia clave para contrarrestar la deforestación, la fragmentación del paisaje y conservar la biodiversidad. Las Áreas Protegidas representan casi el 15 % de la superficie terrestre de la Tierra y protegen el 5 % de la cubierta arbórea mundial (Wade et al., 2020). En el territorio peruano, las áreas naturales protegidas actualmente protegen el 17,89% de la superficie terrestre y 7,76% de la superficie marina (SERNANP, 2022a). Sin embargo; a pesar de su importancia para mantener los servicios ecosistémicos, estas se encuentran en constante amenaza debido al avance de la agricultura y ganadería, la minería ilegal y la construcción de carreteras, lo que impide el cumplimiento a cabalidad de su propósito de creación (Aguirre et al., 2021; Cotrina et al., 2021).

Ante esta situación, surge la necesidad de realizar evaluaciones periódicas y cartografiar las tierras degradadas dentro de las áreas naturales protegidas y sus zonas de amortiguamiento tal como lo recomiendan los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) trazados al 2030 (Giuliani, 2020). Por lo que se requiere generar datos continuos y actualizados del estado de la cobertura boscosa dentro del territorio nacional y sobre todo dentro de las áreas naturales protegidas que permitan a las autoridades competentes tomar las mejores decisiones.

Es así como se gesta el presente trabajo: Análisis de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María (PNTM) - Perú, utilizando algoritmos de inteligencia artificial (IA), que

se inicia con el análisis de cómo se encuentra distribuido espacialmente la cobertura boscosa dentro del PNTM y su zona de amortiguamiento (ZA), posteriormente el análisis temporal entre el 2017 al 2019 y del 2019 al 2021 y finalmente un análisis de la fragmentación del bosque utilizando métricas del paisaje.

La investigación se desarrolla en 7 capítulos, en el CAPITULO I trata los aspectos que abarcan los antecedentes en temas de cuantificación y monitoreo de la cobertura boscosa; además del planteamiento, descripción y formulación de los problemas a investigar, los objetivos, la hipótesis, variables y su operacionalización por cada objetivo planteado. En el CAPITULO II, que desarrolla el marco teórico, donde se definen diferentes términos relacionados a los bosques y la deforestación, el sistema de áreas naturales protegidas en el Perú, los algoritmos de inteligencia artificial utilizados para clasificar imágenes satelitales y aspecto sobre los productos Sentinel-2. El CAPITULO III, se detallan los materiales cartográficos y Software libres utilizados, así como procedimientos empleados para resolver los objetivos planteados. El CAPITULO IV se muestran los resultados encontrados en el desarrollo de la investigación, desde la ubicación del área de estudio, la cobertura boscosa de PNTM y su ZA de los años 2017, 2019 y 2021, los cambios de bosque a no bosque y las métricas del paisaje encontradas. Finalmente, en los CAPITULOS V, VI y VII se muestran la discusión de los resultados, conclusiones y recomendaciones.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Los bosques naturales son ecosistemas de vital importancia para los seres humanos en todo el mundo, debido que brindan una serie de bienes y sobre todo beneficios conocidos como servicios ecosistémicos (McMurray et al., 2017). En el Perú, más de las dos terceras parte de su territorio nacional están cubiertas de bosques; aun así, a pesar de los esfuerzos gubernamentales por conservar los bosques, la deforestación está avanzando a una velocidad increíble (MINAM, 2022), lo que constituye uno de los problemas ambientales más recurrente

en nuestro país.

Debido a esta preocupación, muchas instituciones gubernamentales y privadas han venido realizando el monitoreo de la cobertura boscosa, la deforestación y el cambio del uso del suelo empleando geotecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección, no obstante; para la elaboración de mapas de deforestación utilizan como insumo principal imágenes satelitales de resolución espacial media, lo que trae como resultado una cartografía a escala nacional (MINAM, 2019).

Para analizar la dinámica del bosque, se requiere de una data histórica y actualizada del territorio, además de herramientas informáticas para el tratamiento de toda la data colectada, por lo que las geotecnologías de acceso libre son una alternativa económicamente viable para cumplir con esta tarea. Por una parte, podemos mencionar a la corriente Open Data, que a través de diversos portales ofrece en la web información de la observación de la Tierra como es el caso del Programa espacial Copernicus, diseñado para suministrar imágenes de la Misión Sentinel-2, que son gratuitas, de resolución espacial mediana y fácil acceso. Por otra parte la corriente Open Source, ofrece un sinnúmero de Software libres para procesamiento digital de imágenes satelitales, los cuales hacen posible calcular en forma global y regional el avance de la deforestación (Kim et al., 2014).

Finalmente, en la última década los especialistas están utilizando métodos complejos y robustos de clasificación de imágenes satelitales que permitan ubicar y delimitar con la mayor exactitud los bosques y la pérdida de éstos, utilizando los algoritmos de IA, que se presentan como una opción efectiva ante las técnicas tradicionales de mapeo del uso y cobertura de la tierra (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2012). Estos algoritmos se basan en métodos no paramétricos para procesar ingentes cantidades de datos, siendo los más notables: Árboles de decisiones (AD), Random Forest (RF), Redes Neuronales Artificiales (RNA) y Máquinas de Vector Soporte (MVS) (Jensen, 2015).

## **1.2. Descripción del problema**

El Parque Nacional Tingo María (PNTM) cuenta con una extensión de 4 777 ha, que en su totalidad son bosques típicos de Selva Alta y cumplen un rol significativo en la provincia Leoncio Prado, por una parte, en lo económico; debido que esta área natural protegida posee atractivos turísticos y recreativos como Cueva de las Lechuzas y el circuito de Cataratas (Román, 2014), y por otro lado en lo ambiental; al capturar y almacenar reservas de carbono (Vargas, 2019).

No obstante; en la última década el avance de la deforestación en esta parte del país se ha incrementado paulatinamente (Puerta y Fajardo, 2022), convirtiéndose en una amenaza que puede perturbar la integridad de los bosques, lo que afectaría la biodiversidad y los recursos naturales que se encuentran en su interior, siendo prioritario determinar el estado actual de la cobertura del PNTM para establecer una línea base y analizar su dinámica en el tiempo (SERNANP, 2022b). En este contexto, para determinar el grado de fragmentación de un ecosistema respecto a la pérdida de cobertura se emplea métricas del paisaje que nos aportan datos numéricos sobre la proporción de cada cubierta del suelo, indicando la superficie o forma de los elementos del paisaje (McGarigal et al., 2009).

Es así, que el presente trabajo tiene por finalidad analizar la dinámica de la cobertura boscosa del PNTM y su zona de amortiguamiento, a partir de la clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2 de los años 2017, 2019 y 2021 utilizando algoritmos de inteligencia artificial, examinar el cambio de bosque a no bosque y estimar el grado de fragmentación.

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. *Problema general***

¿Cómo ocurre la dinámica de la cobertura boscosa dentro del PNTM y su zona de amortiguamiento (ZA), Tingo María, Perú?

### **1.3.2. Problemas específicos**

¿Cuál es la superficie de la cobertura boscosa para los años 2017, 2019 y 2021 dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú?

¿De qué manera ocurre el cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021 dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú?

¿Cuán fragmentado se encuentra actualmente el bosque dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú?

## **1.4. Antecedentes**

### **1.4.1. Antecedentes nacionales**

Desde la puesta en funcionamiento del Programa Copernicus, se han venido utilizando las imágenes Sentinel-2 en la clasificación de usos de suelo tanto en lugares de Europa como en Latinoamérica (Borrás et al., 2017), así también estas imágenes son utilizadas para cartografiar áreas quemadas (Fernández-Manso et al., 2017). En el Perú, recientemente se ha empezado a emplear estas imágenes en el monitoreo de la pérdida de bosques en la Amazonía (Chahua, 2019), aunque, la estimación de la deforestación ocurre desde décadas atrás utilizando imágenes Landsat, que son las imágenes satelitales más utilizadas en todo el mundo.

En cuanto a la determinación de cambio de cobertura vegetal dentro de las áreas protegidas, se han realizado trabajos utilizando imágenes Landsat como en el mapeo del área protegida de la reserva de vida silvestre Krau en Malasia (Shaharum et al., 2018) o en el caso de seguimiento de la eficacia de la conservación en la Reserva de la Biósfera de Vhembe en Sudáfrica (Jauro et al., 2020).

Igualmente, en el Perú se han realizado estudios, pero en periodos prolongados; por ejemplo en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe San Ignacio en la región Cajamarca, donde se encontró una leve recuperación del bosque denso alto, que ocupaba una superficie de



74,36% del total del área en 1989 y alcanzó 75,48% en el 2018 (Alberca y Pintado, 2019). Lo mismo se encontró en el Área de Conservación Privada Comunal Hierba Buena-Allpayacku en la región Amazonas, donde se cuantificó los usos de suelos y cobertura vegetal natural, determinándose que para el año 1989 la superficie de pastos y cultivos fue de 0,76 ha y ésta se reducía en el periodo 2003 al 2017, sin embargo; el área circundante mostró un incremento de la superficie que fueron ocupadas por pastos y cultivos, suelo desnudo y zona urbana (Delgado, 2018).

Mientras que en el Parque Nacional Cerros de Amotape de Tumbes durante el periodo 2000 hasta el año 2014 las áreas cubiertas con árboles y arbustos frondosos y vigorosos tuvieron una tendencia negativa como consecuencia de la agricultura y pastoreo (Campos et al., 2018).

#### **1.4.2. Antecedente internacionales**

Se ha cuantificado la pérdida de los bosques dentro de las áreas naturales protegidas de la Amazonía peruana y sus áreas de amortiguamiento durante los años 2001 al 2019 utilizando Google Earth Engine, los resultados mostraron que las pérdidas de cobertura forestal dentro de las áreas protegidas fueron de 114 463 ha y de 782 781 ha en sus zonas de amortiguamiento, siendo las zonas de alto riesgo de deforestación las que se encuentran en las partes central y suroeste de la Amazonía peruana (Cotrina et al., 2021).

Por último, se observa a nivel mundial que las geotecnologías son ampliamente utilizadas como herramientas eficaces para evaluar el proceso de fragmentación de bosques, basándose en los índices del paisaje es posible cuantificar las características biofísicas de las áreas boscosas (De Luque et al., 2019). El análisis de la fragmentación forestal a través de métricas espaciales nos ayuda a comprender los patrones espacio-temporales de los cambios en el uso de la tierra para el manejo sostenible de los bosques tropicales en la India (Ramachandra et al., 2019).

## **1.5. Justificación de la investigación**

### **1.5.1. Implementaciones prácticas y de desarrollo**

La información cartográfica y metodológica generada sirve de línea base para la implementación y ejecución de programas y proyectos de inversión y de investigación, que conlleven a buscar y acceder a estrategias regionales y nacionales para la Reducción de Emisiones de Carbono por Deforestación y Degradación Forestal evitada, Conservación de bosques y ecosistemas frágiles, Gestión Forestal Sostenible y aumento de reservas de carbono de los bosques (REDD+).

### **1.5.2. Utilidad metodológica**

La metodología implementada proporciona un protocolo que permita cartografiar la cobertura boscosa con el mayor grado de exactitud en los próximos años, detectar cambios históricos en la cobertura, predecir la afectación a futuro y estimar las emisiones y remoción de CO<sub>2</sub> provenientes de la intervención de bosques. Con el avance tecnológico de la inteligencia artificial es de imperiosa necesidad utilizar estas herramientas digitales que hace posible poder representar con el mayor grado de detalle el territorio y los recursos naturales como son los bosques.

### **1.5.3. Relevancia social**

Los resultados de la presente investigación contribuyen a la conservación y por ende a la valoración económica ambiental de las áreas boscosas y otras asociaciones vegetales que se encuentran dentro del PNTM, permitiendo a las poblaciones aledañas a estos ecosistemas desarrollar actividades económicas y mejorar la calidad de vida de sus familias, así como sensibilizar a los pobladores que hacen usos directo e indirecto del área natural protegida a continuar con las buenas prácticas en aras de mantener la integridad del área natural protegida.

#### **1.5.4. Valor teórico o de conocimiento**

Aporta al conocimiento científico sobre el uso de algoritmos de inteligencia artificial para procesar imágenes Sentinel 2 y posterior análisis de la fragmentación mediante métricas del paisaje, considerando que existen escasas experiencias sobre el tema a nivel nacional. Esta investigación es importante porque considera a la educación ambiental como el pilar fundamental para alcanzar el desarrollo sostenible, el mismo que está orientada a formar ciudadanos activos y comprometidos en la construcción de una sociedad más justa, democrática y solidaria; es por ello que la Universidad es un espacio privilegiado para llevar adelante acciones que partiendo de realidades complejas, tengan como horizonte un desarrollo económicamente viable, justo y ecológicamente equilibrado.

#### **1.6. Limitaciones de la Investigación**

Debido principalmente al escaso tiempo con lo que se contó para ejecutar la tesis, en la presente investigación solo se trabajó con un algoritmo de inteligencia artificial para clasificar las imágenes Sentinel-2. Este clasificador conocido mundialmente como Random forest, actualmente se encuentran entre los métodos más utilizados para calcular bosques, áreas deforestadas, áreas quemadas y otros. Además, teniendo en cuenta que en el ciberespacio existen diversos algoritmos y debido al avance tecnológico de la inteligencia artificial pudieron aparecer nuevos clasificadores de imágenes durante la ejecución de la presente tesis.

#### **1.7. Objetivos**

##### **1.7.1. Objetivo general**

Analizar la dinámica de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María (PNTM) y su zona de amortiguamiento (ZA) a partir de la clasificación de imágenes Sentinel-2 utilizando un algoritmo de inteligencia artificial.

### **1.7.2. *Objetivos específicos***

- Calcular la cobertura boscosa al 2021 del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento de acuerdo a la clasificación de imágenes Sentinel-2 utilizando un algoritmo de inteligencia artificial, Tingo María, Perú.
- Examinar el cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021 dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú.
- Estimar el grado de fragmentación de los bosques del PNTM y su ZA al 2021 mediante métricas del paisaje, Tingo María, Perú.

## **1.8. Hipótesis**

### **1.8.1. *Hipótesis general***

Es posible analizar la dinámica de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento a partir de la clasificación de imágenes Sentinel-2 utilizando un algoritmo de inteligencia artificial, Tingo María, Perú.

### **1.8.2. *Hipótesis específicas***

- La cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento al 2021 es superior al 50% del área total, Tingo María, Perú.
- El cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021 se ha incrementado dentro del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento, Tingo María, Perú.
- Los bosques del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento al 2021 se encuentran fuertemente fragmentados, Tingo María, Perú.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco conceptual

#### 2.1.1. *Bosque y deforestación*

En base a la ley forestal y de fauna silvestre vigente, se define al bosque como el ecosistema en que predominan especies arbóreas en cualquier estado de desarrollo, cuya cobertura de copa supera el 10% en condiciones áridas o semiáridas o el 25% en circunstancias más favorables (DS 018-2015-Minagri). Mientras que la FAO define el bosque como una zona con una cobertura de dosel mínima del 10%, altura mínima de los árboles de 5 m, superficie mínima de 0,5 ha y donde la agricultura no es el uso predominante de la tierra. La CMNUCC permite una definición de bosque más flexible: cobertura de dosel mínima de 10 a 30 %, altura mínima de los árboles de 2 a 5 m y superficie mínima de 0,1 ha (Argotty et al., 2018).

Por otro lado, la deforestación es la eliminación de la cobertura forestal de un bosque por causa del ser humano o de la naturaleza (DS 018-2015-Minagri). También se precisa como la conversión de tierra con bosque a tierra sin bosque. En los Acuerdos de Marrakech la deforestación se define como “la conversión directa, producida por la mano del hombre, de tierra forestal en tierra no forestal”. La FAO define la deforestación como “la conversión de bosque a otro uso de la tierra o la reducción a largo plazo de la cobertura arbórea por debajo del umbral mínimo del 10%” (Argotty et al., 2018). No obstante, instituciones mundiales como Global Forest Watch indica que la pérdida de cobertura arbórea no es lo mismo que la deforestación, debido que cobertura forestal abarca no solo bosques sino también plantaciones forestales (GFW, 2020).

#### 2.1.2. *Áreas Naturales Protegidas*

Se define como los espacios continentales y/o marinos del territorio nacional, expresamente reconocidos y declarados como tales, incluyendo sus categorías y zonificaciones,

para conservar la diversidad biológica y demás valores asociados de interés cultural, paisajístico y científico, así como por su contribución al desarrollo sostenible del país. Las Áreas Naturales Protegidas constituyen patrimonio de la Nación. Su condición natural debe ser mantenida a perpetuidad pudiendo permitirse el uso regulado del área y el aprovechamiento de recursos, o determinarse la restricción de los usos directos (Ley N° 26834).

Hasta el 30 de mayo del 2022, el número total de áreas naturales protegidas en el Perú fue de 252, que ocupan una superficie total de 29 635 814,06 ha (Sernanp, 2022a). En la lista oficial de áreas naturales protegidas encontramos las de administración nacional con categoría definida y las transitorias, así como las de administración regional y privada, las cuales se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Lista resumida de las Áreas Naturales en el Perú.*

| Categorías                     | Número     | Superficie (ha)      |
|--------------------------------|------------|----------------------|
| Parques Nacionales             | 15         | 10 394 366,70        |
| Santuarios Nacionales          | 9          | 317 366,47           |
| Santuarios Históricos          | 4          | 41 279,38            |
| Reservas Nacionales            | 17         | 10 928 608,08        |
| Refugio de Vida Silvestre      | 3          | 20 775,11            |
| Reservas Paisajísticas         | 2          | 711 818,48           |
| Reservas Comunes               | 10         | 2 166 588,44         |
| Bosque de Protección           | 6          | 389 986,99           |
| Cotos de Caza                  | 2          | 124 735,00           |
| Zonas Reservadas               | 8          | 588 302,67           |
| Áreas de Conservación Regional | 32         | 3 599 519,17         |
| Áreas de Conservación Privada  | 144        | 378 371,65           |
| <b>Total</b>                   | <b>252</b> | <b>29 635 814,06</b> |

**2.1.2.1. Parques Nacionales.** Áreas que constituyen muestras representativas de la diversidad natural del país y de sus grandes unidades ecológicas. En ellos se protege con carácter intangible la integridad ecológica de uno o más ecosistemas, las asociaciones de la flora y fauna silvestre y los procesos sucesionales y evolutivos, así como otras características, paisajísticas y culturales que resulten asociadas (Ley N° 26834). El Perú cuenta con quince parques nacionales las que se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Lista de los Parques Nacionales en el Perú*

| Parque Nacional                          | Creación   | Región                                  | Superficie<br>(ha) |
|--|------------|---|--------------------|
| Cutervo                                  | 08.09.1961 | Cajamarca                               | 8 214,23           |
| Tingo María                              | 14.05.1965 | Huánuco                                 | 4 777,00           |
| del Manu                                 | 29.05.1973 | Cusco y Madre de Dios                   | 1 716 295,22       |
| Huascarán                                | 01.07.1975 | Ancash                                  | 340 000,00         |
| Cerros de Amotape                        | 22.07.1975 | Tumbes y Piura                          | 151 767,49         |
| del Río Abiseo                           | 11.08.1983 | San Martín                              | 274 520,00         |
| Yanachaga - Chemillén                    | 29.08.1986 | Pasco                                   | 122 000,00         |
| Bahuaja - Sonene                         | 17.07.1996 | Madre de Dios y Puno                    | 1 091 416,00       |
| Cordillera Azul                          | 21.05.2001 | S. Martín, Huánuco, Loreto<br>y Ucayali | 1 353 190,85       |
| Otishi                                   | 14.01.2003 | Junín y Cusco                           | 305 973,05         |
| Alto Purús                               | 18.11.2004 | Ucayali y Madre de Dios                 | 2 510 694,41       |
| Ichigkat Muja -<br>Cordillera del Cóndor | 09.08.2007 | Amazonas                                | 88 477,00          |
| Güepí-Sekime                             | 15.10.2012 | Loreto                                  | 203 628,51         |
| Sierra del Divisor                       | 09.11.2015 | Loreto y Ucayali                        | 1 354 485,10       |
| Yaguas                                   | 10.01.2018 | Loreto                                  | 868 927,84         |

**2.1.2.2. Parque Nacional Tingo María (PNTM).** Fue establecido el 14 de mayo de 1965 mediante Ley N° 15574. Actualmente cuenta con una superficie de 4 777 ha. El Plan Maestro 2022 – 2026 tiene como objetivos: mantener la cobertura vegetal del ecosistema selva alta, mantener el estado poblacional de guácharos de la cueva de las pavas, las poblaciones de especies de mariposas registradas para el PNTM así como las poblaciones de abejas nativas para beneficio del caserío Río Oro, y desarrollar un turismo diversificado y sostenible (SERNANP, 2022b).

**Tabla 3**

*Zonificación del PNTM según los Planes Maestros desde el 2002 al 2022*

| Zonas del PNTM              | Superficie (ha) |          |          |          |
|-----------------------------|-----------------|----------|----------|----------|
|                             | 2002            | 2012     | 2017     | 2022     |
| Zona de Protección Estricta | 2 531,24        | 1 788,06 | 1 785,46 | 1 785,46 |
| Zona Silvestre              | 1 650,71        | 2 491,54 | 2 531,95 | 2 530,67 |
| Zona de Recuperación        | 268,33          | 162,81   | 154,05   | 158,63   |
| Zona de Uso Especial        | 265,63          | 235,97   | 224,70   | 219,25   |
| Zona de Uso Turístico       | 61,89           | 99,43    | 80,84    | 82,99    |
| Total                       | 4 777,80        | 4 777,50 | 4 777,00 | 4 777,00 |
| Zona de Amortiguamiento     | 6 453,04        | 6 453,04 | 4 125,72 | 4 125,72 |

### **2.1.3. Algoritmos para clasificación de imágenes satelitales**

Para poder cartografiar las diferentes coberturas del suelo utilizando datos procedentes de la teledetección, existe una gran variedad de algoritmos que se les puede agrupar de la siguiente manera (Jensen, 2015):

**2.1.3.1. Algoritmos para clasificación no supervisada.** Podemos mencionar a Isodata y K-medias.



**2.1.3.2. Algoritmos para clasificación supervisada.** Estos algoritmos se pueden dividir en dos grupos: Paramétricos, con su representante Máxima probabilidad y los No paramétrico como Paralelepípedo, Distancia mínima y Vecino más cercano.

**2.1.3.3. Algoritmos híbridos que implica inteligencia artificial.** En este grupo encontramos a los Árboles de decisión, Máquina de vector de soporte y Redes neuronales artificiales.

*Árboles de decisión.* Una de las maneras más efectiva de representar un sistema es mediante la estructura en forma de árbol. Cuando los árboles de decisiones se organizan como hipótesis, reglas y condiciones; las hipótesis pueden considerarse como el tronco del árbol, las reglas cada una de las ramas y finalmente las condiciones pueden ser consideradas como hojas. La finalidad de esta organización jerárquica es comprender a fondo las relaciones entre objetos a diferentes escalas de observación (Jensen, 2015).

*Random forest.* Es un clasificador que utiliza árboles de decisión como clasificadores base. Este algoritmo es una combinación de predictores de árboles de manera que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio muestreado de forma independiente y con la misma distribución para todos los árboles del bosque (Breiman, 2001). Es así que utiliza un procedimiento denominado bagging para la creación de datos de entrenamiento que remuestra aleatoriamente el conjunto de datos originales con reemplazamiento (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2012).

#### **2.1.4. Misión Sentinel-2**

Es una de las misiones del Programa Copernicus dedicado a la observación y monitoreo de la Tierra, administrado por la Agencia Espacial Europea (ESA). La misión Sentinel-2 cuenta con dos satélites ópticos multiespectrales: S-2A y S-2B. Gracias a su corredor de 290 km de ancho tiene una cobertura mundial de las tierras emergidas en tan solo cinco días (ESA, 2022).

Las imágenes S-2 son entregados al público en dos niveles: el Nivel 1C, ortoimágenes en Proyección UTM/WGS84 con valores de reflectancia en el Tope de la Atmósfera (TOA) y el Nivel 2A, que son imágenes de reflectancia en el fondo de la atmósfera (BOA) derivadas del nivel 1C. Estas últimas se generan sistemáticamente en el segmento terrestre para todo el mundo desde diciembre del 2018 lo que significa un ahorro de tiempo considerable para los especialistas y público en general que obtienen imágenes con mejor aspecto visual y libre de influencia de la atmósfera (Puerta et al., 2021).

Los productos S-2 cuentan con 13 bandas, que van desde el espectro visible y el infrarrojo cercano (NIR), hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), cuyas características espectrales, de longitud de onda y de resolución espacial se describen en la Tabla 4 (IGNE, 2020).

**Tabla 4**

*Descripción de las bandas de los satélites S-2*

| Nº de banda | Descripción de la banda | Longitud de onda central (µm) | Resolución espacial (m) |
|-------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1           | Aerosol costero         | 0,443                         | 60                      |
| 2           | Azul                    | 0,490                         | 10                      |
| 3           | Verde                   | 0,560                         | 10                      |
| 4           | Rojo                    | 0,665                         | 10                      |
| 5           | Vegetación Red Edge     | 0,705                         | 20                      |
| 6           | Vegetación Red Edge     | 0,740                         | 20                      |
| 7           | Vegetación Red Edge     | 0,783                         | 20                      |
| 8           | Infrarrojo cercano NIR  | 0,842                         | 10                      |
| 8A          | Vegetación Red Edge     | 0,865                         | 20                      |
| 9           | Vapor de agua           | 0,945                         | 60                      |
| 10          | SWIR (Cirros)           | 1,375                         | 60                      |
| 11          | SWIR                    | 1,610                         | 20                      |
| 12          | SWIR                    | 2,190                         | 20                      |

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de Investigación

En principio, la investigación es aplicada debido que integra los principios físicos, geométricos y estadísticos que utilizan las geotecnologías para identificar uno de los problemas ambientales que aquejan al PNTM, Tingo María, Perú, como es la pérdida de cobertura boscosa. Además, la investigación es de enfoque cuantitativo de tipo no experimental, debido que se ejecutó sin manipulación deliberada de la variable. El carácter es longitudinal, que permitió analizar los cambios de la cobertura boscosa a través del tiempo, con un diseño de tipo panel (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018), donde el mismo ecosistema fue medido en los tres años 2017, 2019 y 2021.

#### 3.2. Población y muestra

Para la presente investigación se consideró como población y muestra al área del PNTM, ubicado en la región Huánuco, Perú. Ecológicamente se encuentra dentro de la región yunga o selva alta.

El área en estudio tiene una superficie de 4 777 ha, las mismas que fueron observadas en su totalidad.

#### 3.3. Operacionalización de variables

##### 3.3.1. *Variable cobertura boscosa (ha)*

Correspondió a la vegetación boscosa en pie dentro del PNTM que pertenece al ecosistema de Selva Alta, con la finalidad de determinar cómo se encontraba espacial y temporalmente, así como el grado de fragmentación que ha sufrido a través del tiempo (Tabla 5).

**Tabla 5***Operacionalización de variables*

| Variable          | Definición conceptual   | Dimensión              | Definición operativa   | Indicador                    | Unidad |
|-------------------|---|------------------------|--|------------------------------|--------|
| Cobertura boscosa | Es el ecosistema en que predominan especies arbóreas en cualquier estado de desarrollo, cuya cobertura de copa supera el 10% en condiciones áridas o semiáridas o el 25% en circunstancias más favorables (DS 018-2015-Minagri) | Espacial               | La cartografía de coberturas consistió en identificar, delimitar y cuantificar la cobertura boscosa mediante la clasificación supervisada de imágenes Sentinel 2 utilizando el algoritmo Random Forest.  | Clases de cobertura          | ha     |
|                   |   | Temporal               | La detección del cambio entre los años 2017, 2019 y 2021 consistió en calcular las pérdidas (deforestación) o ganancias (crecimiento secundario) de la cobertura boscosa utilizando la matriz de cambio. | Tasas de cambio de cobertura | ha/año |
|                   |   | Grado de fragmentación | El grado de intervención de la cobertura boscosa se estimó calculando la proporción y configuración de ésta respecto al área total utilizando datos numéricos.   | Métricas del paisaje         | Varios |

**3.4. Instrumentos**

Para la colecta de información, se utilizó como instrumento el esquema Corin Land Cover propuesto por la Unión Europea (Pérez y Muñoz, 2006). Esta leyenda ha sido adaptada para Colombia, y da un marco de comparabilidad internacional para la construcción de mapas de cobertura y uso de la tierra (Ideam et al., 2008). Del mismo modo, el Ministerio del Ambiente del Perú validó y acondicionó este esquema para ser utilizado en el territorio nacional (MINAM, 2014).

### 3.5. Procedimientos

Para poder cumplir con los objetivos específicos, en primer lugar, se realizó visitas al PNTM con el apoyo de los guardaparques, en los cuales se recorrió los principales senderos a fin de tener una idea global de las coberturas existentes dentro del PNTM y su ZA. Asimismo, se dialogó con personas directamente involucradas con el parque.

#### 3.5.1. Cobertura boscosa del PNTM y ZA para los años 2017, 2019 y 2021

**3.5.1.1. Pre procesamiento de imágenes.** Se obtuvo gratuitamente productos S-2 desde la plataforma Copernicus Open Access Hub (ESA, 2021). En total se descargaron tres imágenes, para los tres años evaluados. Se seleccionaron imágenes con la menor cantidad de cobertura nubosa, que se consiguieron principalmente en la época seca de la zona de estudio (Tabla 6).

**Tabla 6**

*Características de las imágenes S-2 empleadas en la clasificación*

| Sensor     | Fecha de captura     | Corrección atmosférica | Fuente           |
|------------|----------------------|------------------------|------------------|
| Sentinel-2 | 04 de agosto 2017    | No                     | Copernicus (ESA) |
| Sentinel-2 | 08 de setiembre 2019 | Sí                     | Copernicus (ESA) |
| Sentinel-2 | 12 de octubre 2021   | Sí                     | Copernicus (ESA) |

Luego se acondicionaron las bandas 12,8A,3, obteniendo un juego de tres bandas con una resolución espacial de 10 metros. Para el año 2017 fue necesario realizar la corrección atmosférica, mediante el método Dark Object Subtraction (DOS1)

**3.5.1.2. Procesamiento.** En esta etapa se realizó la clasificación propiamente dicha, asignando cada pixel de la imagen Sentinel-2 a una clase de cobertura de acuerdo al esquema

Corin Land Cover (Tabla 7). Las áreas de entrenamiento se obtuvieron a partir de la combinación de 2,3,4, que nos permitió hacer visualizaciones en RGB (IGNE, 2020) para poder identificar las coberturas existentes dentro del área de estudio.

Seguidamente, se realizó la clasificación supervisada en el software SAGA 7.4.0 (Conrad et al., 2015) utilizando el algoritmo Random Forest para agrupar las áreas espectralmente similares y asignarle a una determinada clase de cobertura.

**Tabla 7**

*Coberturas identificadas en la zona de estudio*

| Nivel I                                 | Nivel II                            | Nivel III  | Leyenda en el Mapa    |
|---|-------------------------------------|--|-----------------------|
| 1. Área artificializada                 | 1.1 Áreas urbanas                   | 1.1.2 Tejido urbano discontinuo  | Población             |
| 2. Áreas agrícolas                      | 2.4 Áreas agrícolas heterogéneas    |  | Vegetación secundaria |
|   |                                     | 3.1.3 Bosque denso alto  |                       |
|   |                                     | 3.1.4 Bosque abierto alto  | Bosque                |
| 3. Bosques y áreas mayormente naturales | 3.1 Bosque                          | 3.1.5 Bosque fragmentado   |                       |
|   |                                     | 3.3.3 Vegetación secundaria o en transición  | Vegetación secundaria |
|   | 3.4 Áreas sin o con poca vegetación | 3.4.3 Tierras desnudas (incluyen áreas erosionadas naturales y también degradadas) | Tierras desnudas      |
| 5. Superficies de agua                  | 5.1. Aguas continentales            | 5.1.1 Ríos (50 m)  | Ríos                  |

**3.5.1.3. Exactitud.** Para medir la exactitud temática de los mapas de coberturas, se comparó las coberturas encontradas en la clasificación con una imagen de alta resolución espacial del mismo año de la evaluación (Tabla 8). Para lo cual se verificó 98 puntos en la

imagen; 49 puntos para bosques y 49 para las restantes, que fueron establecidos a través de un muestreo aleatorio sistemático no alineado estratificado según lo establecido por el MINAM (2014). Las coincidencias encontradas fueron transcritas a una matriz de confusión. Posteriormente, se determinó el nivel de concordancia calculando las métricas: Exactitud global y el Índice de Kappa.

**Tabla 8**

*Imágenes utilizadas en la medición de la exactitud temática*

| Sensor | Fecha de Adquisición | Resolución espacial | Fuente      |
|--------|----------------------|---------------------|-------------|
| Spot 6 | 02 de agosto 2017    | 1,5 m               | Airbus      |
| Planet | 30 de noviembre 2019 | 3 m                 | PlanetScope |
| Planet | 30 de octubre 2021   | 3 m                 | PlanetScope |

Por último, se realizó el ajuste temático de las coberturas, según lo encontrado en las imágenes de alta resolución y se procedió a convertir la clasificación mejorada en formato vectorial, Los polígonos de las diversas coberturas fueron generalizados a una unidad mínima cartografiable (UMC) de 0,2 ha obteniendo una cartografía forestal a escala 1:25 000. Los mapas de coberturas fueron elaborado a escala 1: 75 000, utilizando Datum WGS 1984 en coordenadas UTM en la zona 18 s.

### **3.5.2. Cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021**

A partir de las coberturas 2017, 2019 y 2021 se conoció la dinámica del bosque, en el que se utilizó matrices de transición de primer orden para determinar las pérdidas y ganancias del bosque y las demás coberturas del suelo en los periodos 2017 – 2019 y 2019 – 2021.

Además, se calculó las tasas de cambio entre cada periodo, utilizando la siguiente fórmula (FAO, 1996):

$$TC = \left\{ \left[ \frac{S2}{S1} \right]^{1/n} - 1 \right\} \times 100$$

Donde:

TC = tasa de cambio (en %)

S1 = superficie en la fecha inicial

S2 = superficie en la fecha final

n = diferencia de años entre fecha inicial y final

### 3.5.3. Grado de fragmentación de bosques

Para conocer cuán fragmentados se encuentran los bosques del PNTM y su ZA al 2021, se utilizó métricas del paisaje. Se calcularon las siguientes métricas:

#### 3.5.3.1. Índice de continuidad de Vogelmann (FCI):

$$FCI = \ln (\Sigma A / \Sigma P)$$

Donde:

$\Sigma A$  = Área total de parches de bosque del paisaje, en metros cuadrados (m<sup>2</sup>) y

$\Sigma P$  = Perímetro total de parches de bosque del paisaje en metros (m).

Valores altos implicaron mayor continuidad del bosque y valores bajos reflejaron mayor fragmentación y discontinuidad de los parches de bosque.

**3.5.3.2. Distancia media al fragmento vecino más cercano (MNN).** Se calculó sumando la distancia que separa un fragmento de su vecino más cercano, dividiendo luego el resultado por el número de fragmentos. El indicador se aproxima a cero cuando todos los fragmentos en que está dividido un ecosistema, en un área de interés y en un tiempo dado, están cercanos unos de otros, y aumenta,  $MNN \geq 0$ , cuando dichos fragmentos están separados.

**3.5.3.3. Grado de fragmentación (F).** La fragmentación total del PNTM se estimó

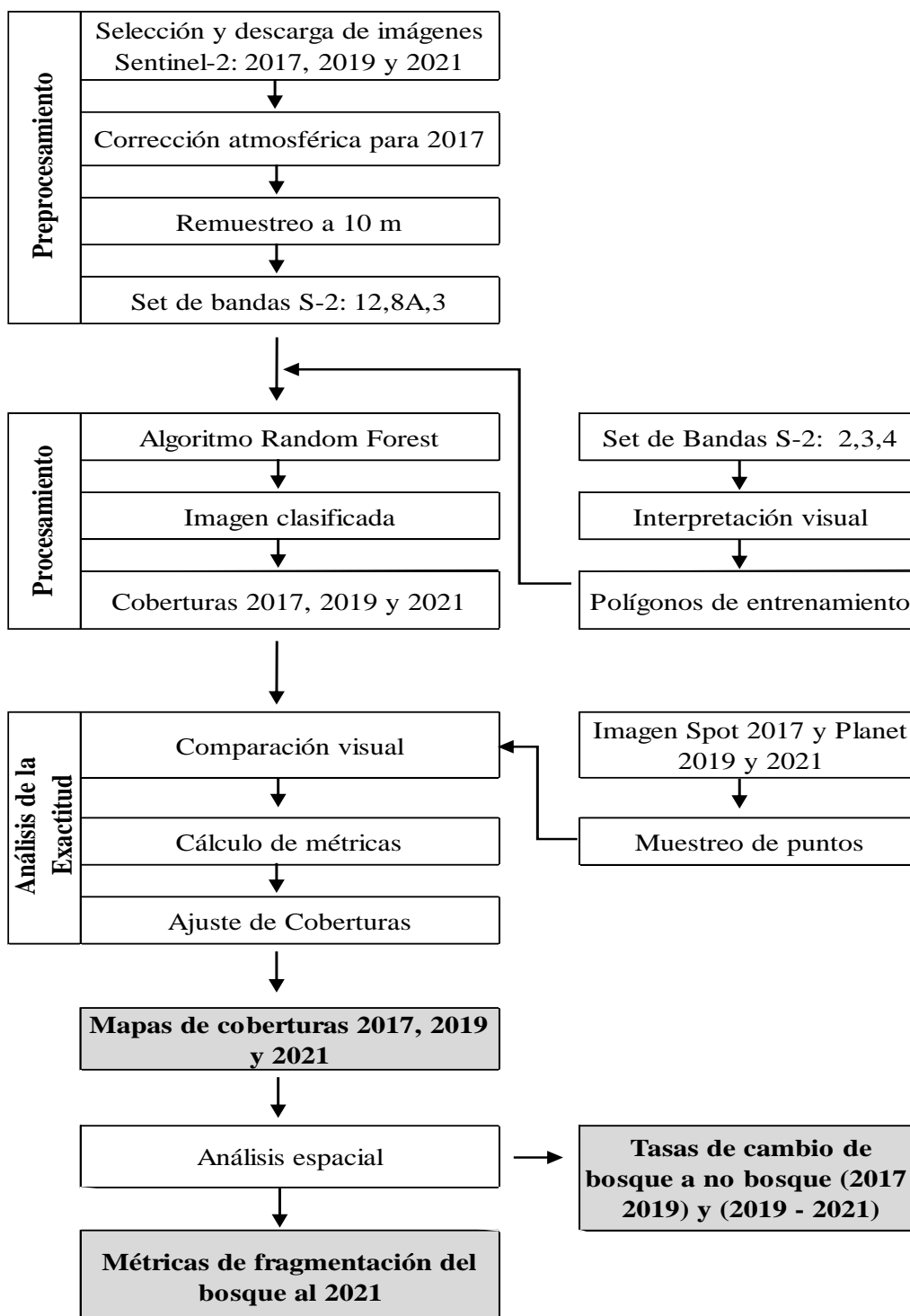


a través de la relación entre la cobertura boscosa y el área total y su definición es:

$$F = \text{Área de cobertura boscosa (ha)} / \text{Área total (ha)}$$

**Figura 1**

*Flujograma de los procedimientos empleados*



### 3.6. Análisis de datos

Para analizar la exactitud temática de las coberturas encontradas, además de la Exactitud global se calculó el Índice de Kappa a partir de la matriz de confusión, según la fórmula siguiente (Bishop et al., 1977):

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde:

$P_o$  : es el número de aciertos entre n

$P_e$  : se calculó desde la matriz de confusión.

Para interpretar el valor de K se usó la escala propuesta por Landis y Kock (1977) como se muestra en la Tabla 9:

**Tabla 9**

*Fuerza de concordancia según el Índice de Kappa*

| Coeficiente de Kappa | Fuerza de concordancia |
|----------------------|------------------------|
| 0                    | Nula                   |
| 0,01 - 0,2           | Leve                   |
| 0,21 - 0,40          | Aceptable              |
| 0,41 - 0,60          | Moderada               |
| 0,61 - 0,80          | Considerable           |
| 0,80 - 1,00          | Casi perfecta          |

Luego, las coberturas encontradas fueron sometidas a un análisis espacial; primero sometidas a la detección del cambio utilizando el Plugin Semi-Automatic Classification versión 7.10.5 (Congedo, 2021) dentro del software Qgis 3.16.13, cuyos datos resultantes se transcribieron a la matriz de transición por cada periodo de tiempo evaluado (Tabla 10).

**Tabla 10***Matriz de transición*

|           |             | Año 2       |             |             |             | Total | Pérdidas    |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|
|           |             | Clase 1     | Clase 2     | Clase 3     | Clase 4     | Año 2 |             |
| Año 1     | Clase 1     | p11         | p12         | p13         | p14         | p1+   | (p1+)-p11   |
|           | Clase 2     | p21         | p22         | p23         | p24         | p2+   | (p2+) - p22 |
|           | Clase 3     | p31         | p32         | p33         | p34         | p3+   | (p3+) - p33 |
|           | Clase 4     | p41         | p42         | p43         | p44         | p4+   | (p4+) - p44 |
|           | Total Año 1 | p+1         | p+2         | p+3         | p+4         | 1     |             |
| Ganancias |             | (p+1) - p11 | (p+2) - p22 | (p+3) - p33 | (p+4) - p44 |       |             |

Posteriormente, se realizó la estimación del grado de degradación del bosque mediante el análisis de fragmentación, donde las coberturas fueron ingresadas en formato ráster al Software Fragstats v.4.2.1 (McGarigal et al., 2012). Para una mejor interpretación de cuan fragmentados se encuentra el ecosistema boscosa, los datos se caracterizaron de acuerdo con el rango de valores presentados en la Tabla 11 (Díaz, 2003).

**Tabla 11***Valores para el Índice de fragmentación*

| Rangos F       | Grado de fragmentación |
|----------------|------------------------|
| 1,0            | Sin fragmentación      |
| $< 1 \leq 0,7$ | Fragmentación moderada |
| $0,7 \leq 0,5$ | Altamente fragmentado  |
| $< 0,5$        | Insularizado           |

### 3.7. Consideraciones éticas

Se consideraron los siguientes aspectos éticos:

1. Se cumplió con todos los ítems y capítulos exigidos en la estructura de Tesis Doctoral de la Escuela Universitaria de Posgrado de la Universidad Nacional Federico Villarreal.
2. Se solicitó con la debida anticipación al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas del Perú (SERNANP) y a la Jefatura del Parque Nacional Tingo María la autorización correspondiente para el ingreso al área natural protegida, la cual fue concedida con Resolución Jefatural del Parque Nacional Tingo María N°05-2021-SERNANP-JEF.
3. Se generó información espacial y temporal del PNTM y su ZA ubicados en la zona montañosa de la Amazonía peruana, a partir del procesamiento digital de imágenes Sentinel-2, las cuales son de acceso directo, gratuito y abierto.
4. Para la clasificación supervisada de las imágenes Sentinel-2 se utilizó el algoritmo de inteligencia artificial Random Forest para lo cual se empleó Software libre como Qgis y SAGA.
5. Toda información mencionada como referencia está debidamente citada respetando la autoría correspondiente de acuerdo con las Normas APA vigente.
6. La presente investigación es original y producto del esfuerzo intelectual del tesista y se encuentra libre de algún tipo de conflicto para su difusión y publicación.

## IV. RESULTADOS

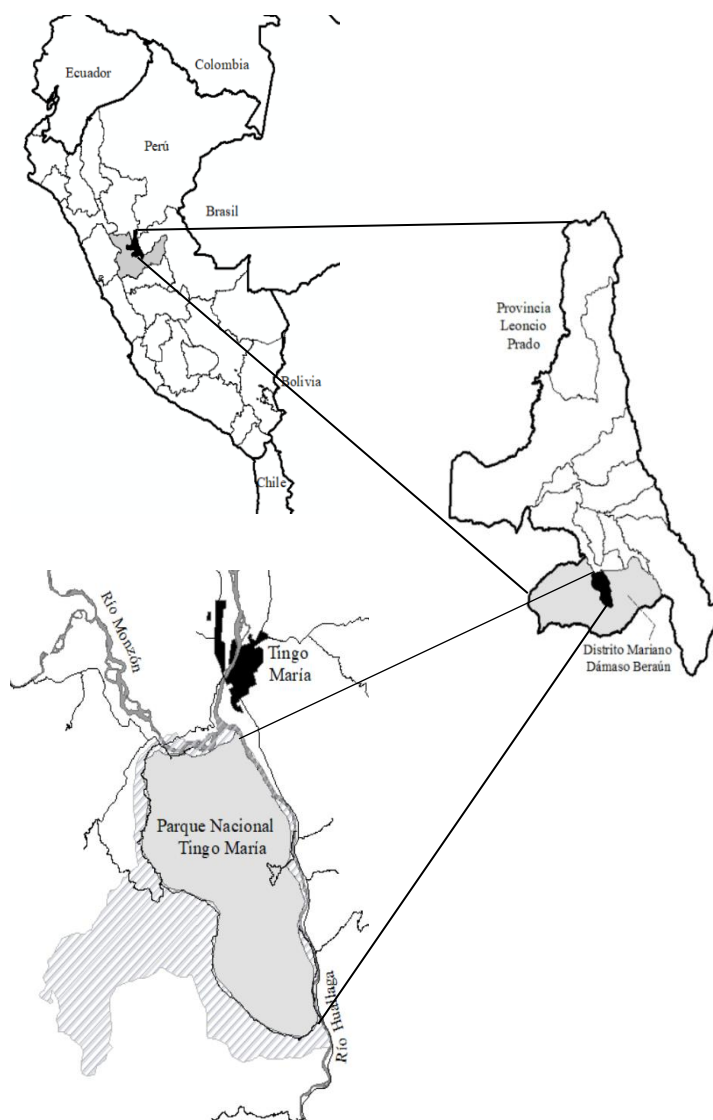
### 4.1. Cobertura boscosa del PNTM y su ZA para los años 2017, 2019 y 2021

#### 4.1.1. Ubicación y accesibilidad

El Parque Nacional Tingo María está ubicado en el distrito Mariano Dámaso Beraún, provincia Leoncio Prado y región Huánuco, entre los 640 y 1 800 msnm. Esta área natural protegida se sitúa en la margen izquierda del río Huallaga, geográficamente pertenece a la región Selva Alta.

**Figura 2**

*Ubicación del área de estudio*



Para acceder al PNTM es necesario llegar a la ciudad de Tingo María, desde allí hay dos ingresos principales: Por la Cueva de las Pavas, que es el principal atractivo turístico de la provincia y por el Sector Tres de Mayo.

**Tabla 12**

*Vías de acceso al Parque Nacional Tingo María*

| Ruta                             | Tipo de vía | Distancia (km) | Tiempo aproximado |
|----------------------------------|-------------|----------------|-------------------|
| Lima - Tingo María               | Asfaltado   | 500            | 11 h              |
| Tingo María - Cueva de las Pavas | Asfaltado   | 6              | 15 min            |
| Tingo María - Tres de Mayo       | Asfaltado   | 14             | 25 min            |

#### 4.1.2. Coberturas encontradas

La clasificación de la imagen Sentinel-2 para cuantificar las coberturas del PNTM y su ZA utilizando el algoritmo Random Forest arrojó los siguientes resultados: Para el año 2017, los bosques cubren 4 641,30 ha dentro del PNTM y 3 162,73 ha de la zona de amortiguamiento, siendo la cobertura más representativa; ocupando el 97,16% y 76,66% respectivamente del área de estudio (Tabla 13). El mapa de coberturas al 2017 se muestra en la Figura 3.

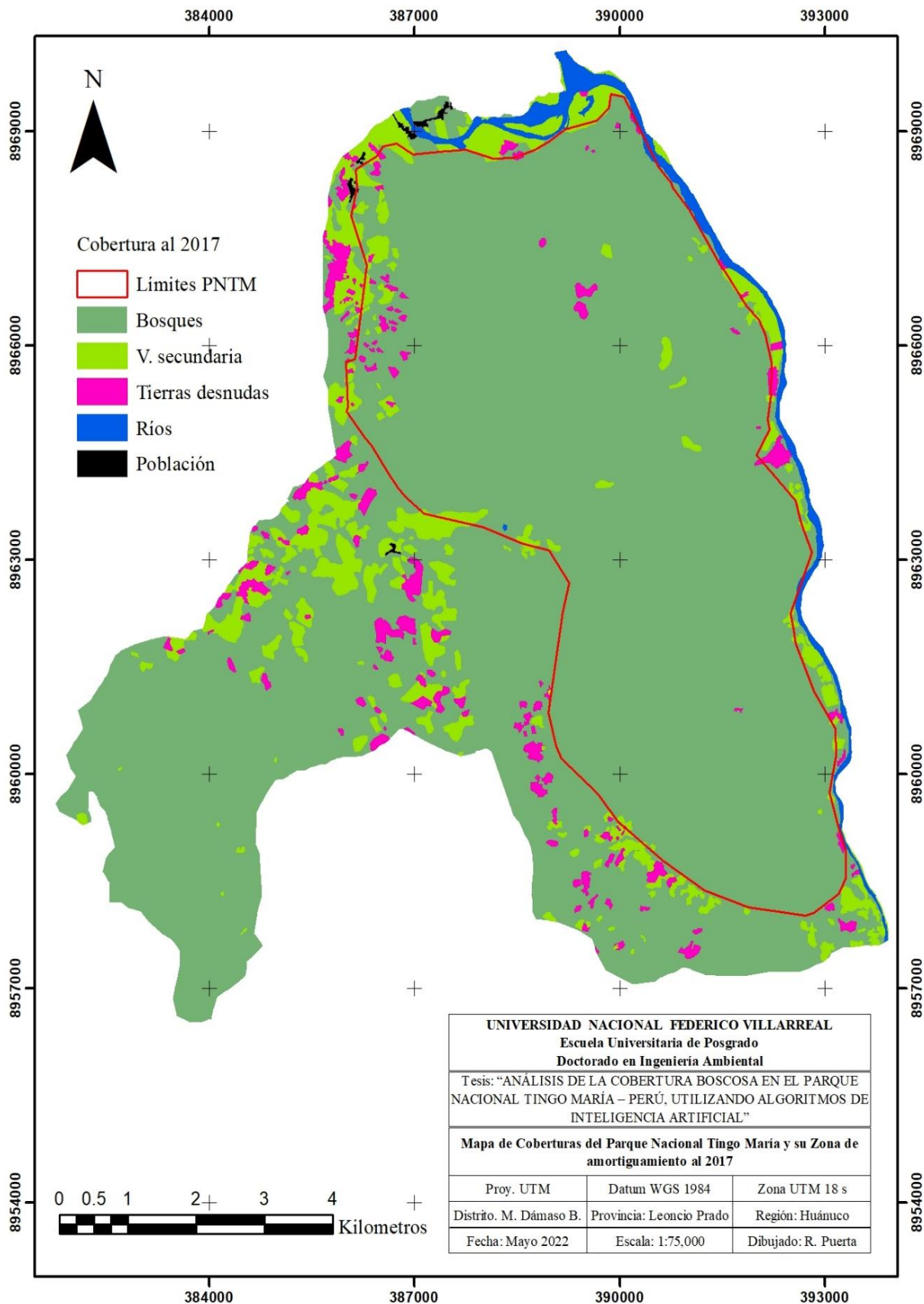
**Tabla 13**

*Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2017*

| Cobertura        | PNTM     |        | Zona de Amortiguamiento |        |
|------------------|----------|--------|-------------------------|--------|
|                  | ha       | %      | ha                      | %      |
| Bosque           | 4 641,30 | 97,16  | 3 162,73                | 76,66  |
| V. secundaria    | 99,41    | 2,08   | 581,87                  | 14,10  |
| Tierras desnudas | 31,61    | 0,66   | 197,18                  | 4,78   |
| Ríos             | 4,44     | 0,09   | 171,32                  | 4,15   |
| Población        | 0,25     | 0,01   | 12,62                   | 0,31   |
| Total            | 4777,00  | 100,00 | 4 125,72                | 100,00 |

**Figura 3**

*Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2017*



Para el año 2019 los bosques cubren la mayor parte de la zona de investigación, que son catalogados como bosques de tipo montañosos, seguido de la cobertura de la vegetación secundaria que cubren 139,16 ha dentro del PNTM y 709,42 ha en la zona de amortiguamiento, lo que representa el 2,91% y 17,19% respectivamente (Tabla 14). La vegetación secundaria, que se han identificado como áreas que se encuentran en un proceso de sucesión secundaria, a consecuencia de la pérdida total o parcial del bosque.

Luego, encontramos a las tierras desnudas que son las zonas fuertemente degradadas, donde los bosques fueron remplazados drásticamente por cultivos agrícolas o pastos para ganado vacuno; de las cuales 15,41 ha se encuentran dentro del PNTM y 247,61 ha en su zona de amortiguamiento. Respecto a la hidrografía de la zona, que se encuentra en casi su totalidad en la zona de amortiguamiento; el río Huallaga lo recorre de sur a norte, mientras que el río Monzón lo hace de oeste a este por la parte norte del parque, donde desemboca al río Huallaga.

Como última cobertura, encontramos a la población constituida por zona con población rural dispersa, dentro del parque se encuentra 0,25 ha mientras que 13,57 en la zona de amortiguamiento. La distribución espacial de las coberturas se muestra en la Figura 4.

**Tabla 14**

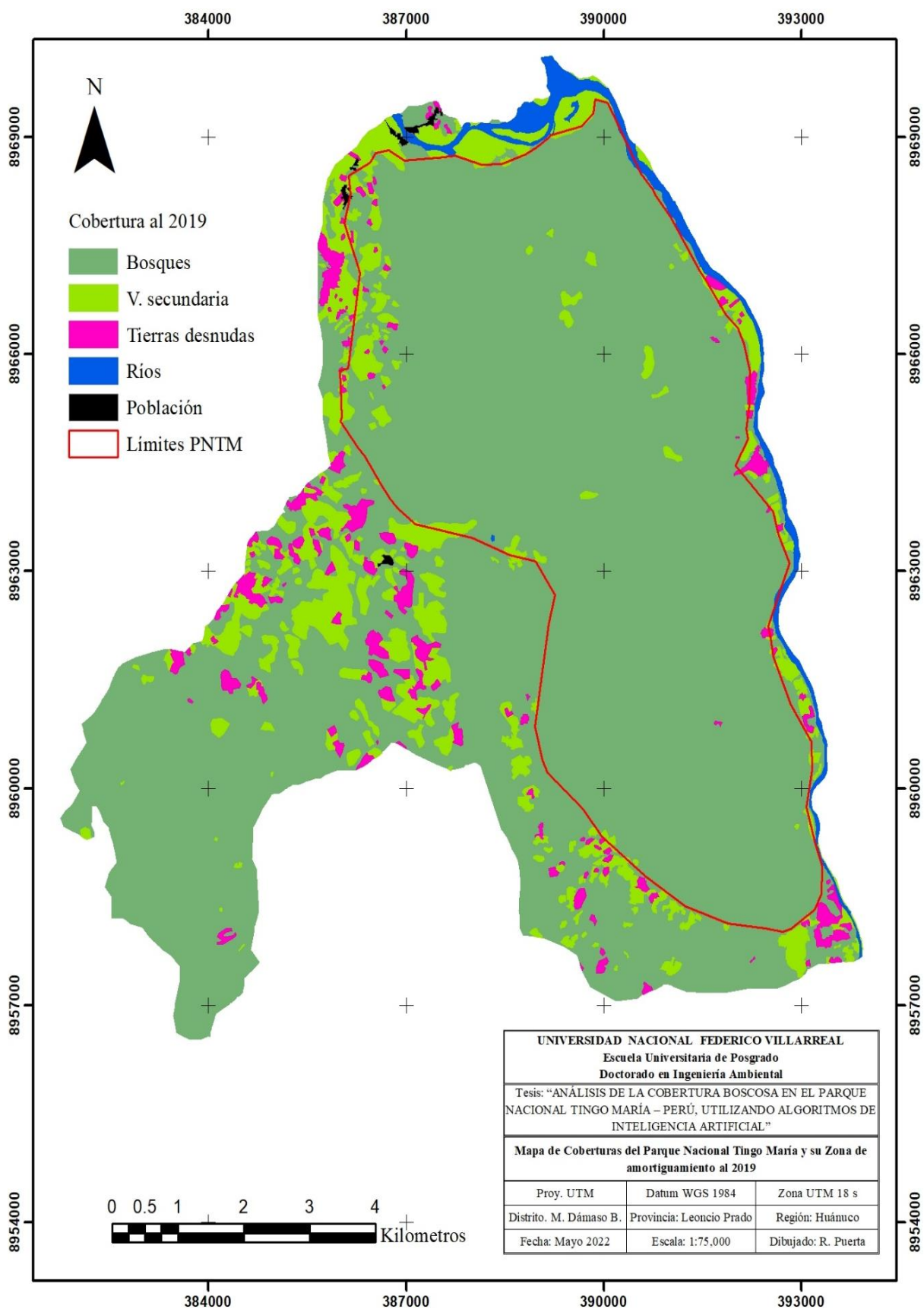
*Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2019*

| Cobertura        | PNTM     |        | Zona de Amortiguamiento |        |
|------------------|----------|--------|-------------------------|--------|
|                  | ha       | %      | ha                      | %      |
| Bosque           | 4 617,74 | 96,67  | 2 977,73                | 72,17  |
| V. secundaria    | 139,16   | 2,91   | 709,42                  | 17,19  |
| Tierras desnudas | 15,41    | 0,32   | 247,61                  | 6,00   |
| Ríos             | 4,44     | 0,09   | 177,39                  | 4,30   |
| Población        | 0,25     | 0,01   | 13,57                   | 0,33   |
| Total            | 4 777,00 | 100,00 | 4 125,72                | 100,00 |



**Figura 4**

*Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2019*



Mientras que para el año 2021, aunque disminuida en comparación a los años anteriores; los bosques siguen siendo la cobertura más representativa tanto para el área natural protegida con 94,29 % como para su zona adyacente con 65,97%. Es así, que la pérdida de la cobertura boscosa trae consigo un incremento en cuanto a tierras desnudas en la parte sur del parque, que ascendieron a 31,76 ha, las cuales fueron provocadas principalmente por causas naturales.

En la zona de amortiguamiento en cambio, el incremento de las zonas con suelos desnudos se presentó en la parte centro occidente que alcanzaron una superficie acumulada de 256,80 ha (Tabla 15).

Otras de las coberturas que se ha visto incrementada en superficie es la zona poblada, sobre todo en la zona de amortiguamiento del parque en estudio que alcanzó las 21,87 ha. Para una mejor visualización de cómo se encuentran distribuidas espacialmente los bosques dentro del PNTM y su respectivo ZA, se muestra el Mapa de Coberturas cuya escala es de 1:75 000 (Figura 5).

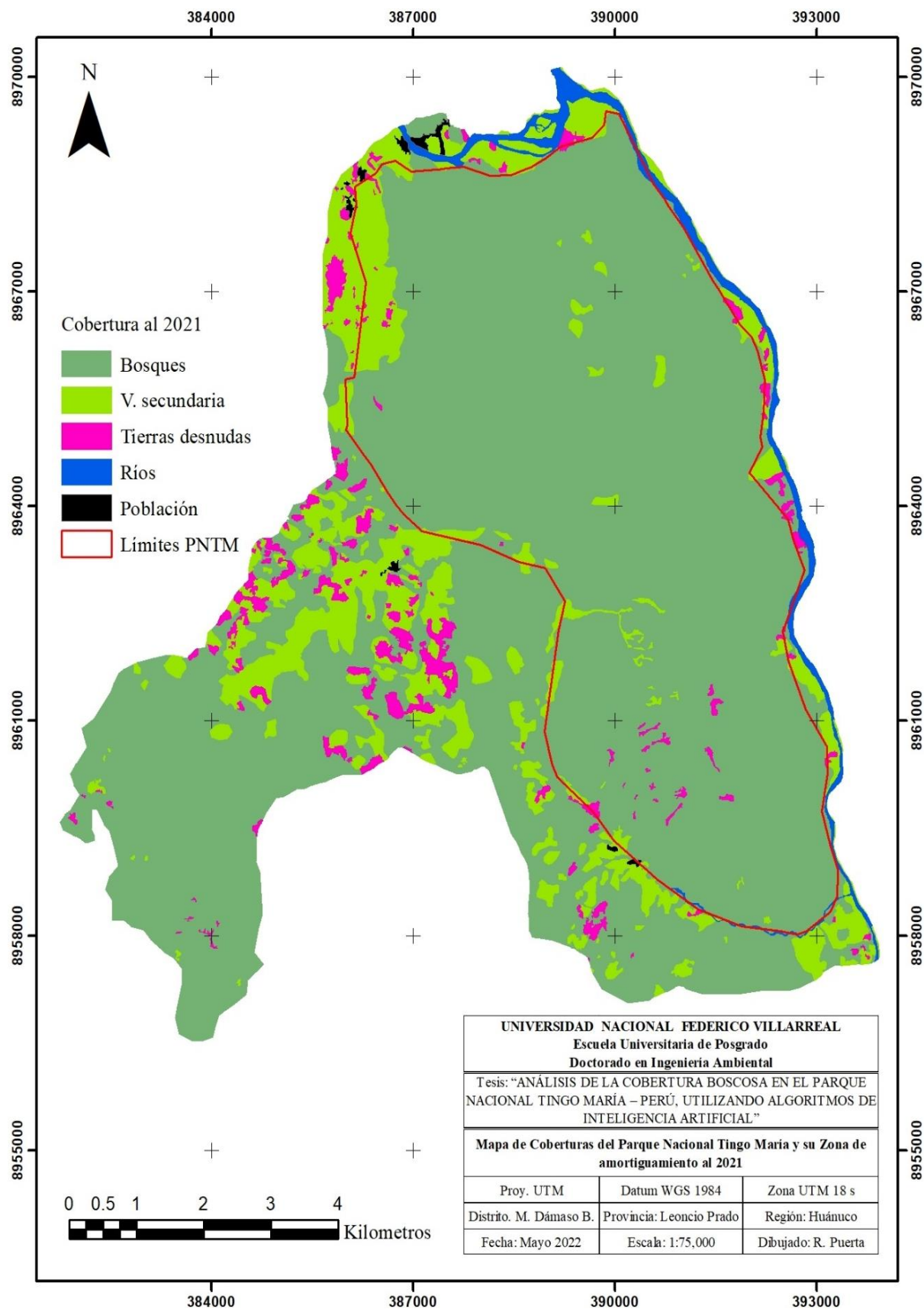
**Tabla 15**

*Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2021*









| Cobertura        | PNTM    |        | Zona de Amortiguamiento |        |
|------------------|---------|--------|-------------------------|--------|
|                  | ha      | %      | ha                      | %      |
| Bosque           | 4504,21 | 94,29  | 2721,81                 | 65,97  |
| V. secundaria    | 231,45  | 4,85   | 951                     | 23,05  |
| Tierras desnudas | 31,76   | 0,66   | 257,78                  | 6,25   |
| Ríos             | 9,17    | 0,19   | 173,26                  | 4,2    |
| Población        | 0,41    | 0,01   | 21,87                   | 0,53   |
| Total            | 4777    | 100,00 | 4125,72                 | 100,00 |

**Figura 5**

*Mapa de coberturas del PNTM y ZA al 2021*



**Figura 6***Visualización de las coberturas dentro del área de estudio*

|                       | Vista frontal de la cobertura   | Vista desde Spot Escala 1:8 000  |
|-----------------------|---|--|
| Bosques               |    |    |
| Vegetación secundaria |   |   |
| Tierras desnudas      |  |  |
| Río Huallaga          |  |  |

### 4.1.3. Exactitud temática de la clasificación

En la medición de la confiabilidad del mapa de coberturas al 2017 dentro del PNTM y su zona de amortiguamiento, se obtuvo una exactitud global de 84,7% y un Índice de Kappa de 0,77; lo que indica que tuvo un grado de concordancia considerable al utilizar el algoritmo Random Forest para clasificar las imágenes Sentinel-2. En la Tabla 16 se muestra la matriz de confusión indicando los aciertos por cada cobertura encontrada.

**Tabla 16**

*Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2017*

| Coberturas    |             | Verdad Terreno          |            |                      |      | Total |
|---------------|-------------|-------------------------|------------|----------------------|------|-------|
|               |             | Bosques                 | V. secund. | T. desnudas          | Ríos |       |
| Clasificación | Bosques     | 47                      | 2          | 0                    | 0    | 49    |
|               | V. secund   | 2                       | 12         | 5                    | 1    | 20    |
|               | T. desnudas | 0                       | 5          | 15                   | 0    | 20    |
|               | Ríos        | 0                       | 0          | 0                    | 9    | 9     |
| Total         |             | 49                      | 19         | 20                   | 10   |       |
|               |             | Exactitud global 84,7 % |            | Índice de Kappa 0,77 |      |       |

Asimismo, en la confiabilidad del Mapa de coberturas del 2019 se encontró una exactitud global de 89,8% y un índice de Kappa de 0,84; lo que indica un grado de concordancia casi perfecto (Tabla 17).

**Tabla 17**

*Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2019*

| Coberturas    |             | Verdad Terreno          |            |                      |      | Total |
|---------------|-------------|-------------------------|------------|----------------------|------|-------|
|               |             | Bosques                 | V. secund. | T. desnudas          | Ríos |       |
| Clasificación | Bosques     | 48                      | 1          | 0                    | 0    | 49    |
|               | V. secund   | 3                       | 16         | 1                    | 0    | 20    |
|               | T. desnudas | 1                       | 4          | 15                   | 0    | 20    |
|               | Ríos        | 0                       | 0          | 0                    | 9    | 9     |
| Total         |             | 52                      | 21         | 16                   | 9    |       |
|               |             | Exactitud global 89,8 % |            | Índice de Kappa 0,84 |      |       |

Para culminar, la confiabilidad del Mapa de coberturas 2021 logró una exactitud global de 84,7% y un índice de Kappa de 0,77 (Tabla 18).

**Tabla 18**

*Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2021*

| Coberturas    |             | Verdad Terreno         |            |                      |      | Total |
|---------------|-------------|------------------------|------------|----------------------|------|-------|
|               |             | Bosques                | V. secund. | T. desnudas          | Ríos |       |
| Clasificación | Bosques     | 46                     | 3          | 0                    | 0    | 49    |
|               | V. secund   | 4                      | 12         | 4                    | 0    | 20    |
|               | T. desnudas | 1                      | 2          | 16                   | 1    | 20    |
|               | Ríos        | 0                      | 0          | 0                    | 9    | 9     |
| Total         |             | 51                     | 17         | 20                   | 10   |       |
|               |             | Exactitud global 84,7% |            | Índice de Kappa 0,77 |      |       |

El detalle de los puntos verificados de los mapas de cobertura 2017, 2019 y 2021 se muestran en las Tablas 24, 25 y 26 respectivamente.

#### 4.2. Cambio de bosque a no bosque en los períodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021

El cambio de bosque a otro tipo de coberturas durante el 2017 al 2019 fue poco dinámico. Durante este periodo, la tasa anual de cambio dentro del PNTM fue de -0,26%; es decir, en dos años se han perdido 25,88 ha de bosques (Tabla 19).

**Tabla 19**

*Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2017 al 2019 (ha)*

|            |         | 2019     |        |       |      |      |          |          |
|------------|---------|----------|--------|-------|------|------|----------|----------|
| Coberturas |         | Bosques  | V. S.  | T. D. | Río  | Pob. | Total    | Pérdidas |
| 2017       | Bosques | 4 615,42 | 19,77  | 6,11  | 0    | 0    | 4 641,30 | 25,88    |
|            | V. S.   | 0,03     | 95,21  | 4,17  | 0    | 0    | 99,41    | 4,20     |
|            | T. D.   | 2,29     | 24,19  | 5,13  | 0    | 0    | 31,61    | 26,48    |
|            | Río     | 0        | 0      | 0     | 4,44 | 0    | 4,44     | 0        |
|            | Pob.    | 0        | 0      | 0     | 0    | 0,25 | 0,25     | 0        |
| Total      |         | 4 617,74 | 139,17 | 15,41 | 4,44 | 0,25 | 4 777,00 |          |
| Ganancias  |         | 2,32     | 43,96  | 10,28 | 0    | 0    |          |          |

Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

Mientras que en la Zona de Amortiguamiento la tasa de cambio fue de -2,97%. Se han eliminado 188,78 ha de cobertura boscosa, de los cuales 123,75 pasaron a ser vegetación secundaria y 65,03 a tierras desnudas. El detalle de la conversión de las demás coberturas se muestran en la Tabla 20.

**Tabla 20**

*Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZA 2017 al 2019 (ha)*

|           |            | 2019     |        |        |       |       |          |          |
|-----------|------------|----------|--------|--------|-------|-------|----------|----------|
|           | Coberturas | Bosques  | V. S.  | T. D.  | Río   | Pob.  | Total    | Pérdidas |
| 2017      | Bosques    | 2 973,95 | 123,75 | 65,03  | 0     | 0     | 3 162,73 | 188,78   |
|           | V. S.      | 2,97     | 500,19 | 71,41  | 6,39  | 0,91  | 581,87   | 81,68    |
|           | T. D.      | 0,81     | 85,16  | 111,17 | 0     | 0,04  | 197,18   | 86,01    |
|           | Río        | 0        | 0,32   | 0      | 171   | 0     | 171,32   | 0,32     |
|           | Pob.       | 0        | 0      | 0      | 0     | 12,62 | 12,62    | 0        |
|           | Total      | 2 977,73 | 709,42 | 247,61 | 177,4 | 13,57 | 4 125,72 |          |
| Ganancias |            | 3,78     | 209,23 | 136,44 | 6,39  | 0,95  |          |          |

Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

Por el contrario, durante el 2019 al 2021 el análisis demostró que fue un periodo de transición muy dinámico. En este lapso la tasa de cambio dentro del PNTM se ha incrementado a -1,24%, lo que significa que se ha perdido 152,74 ha de bosques, que en su gran mayoría han pasado a convertirse en vegetación secundaria (125,87 ha) y en tierras desnudas (21,53) además de pasar a formar parte de las coberturas de río y población, pero en menor proporción. Esta transición no necesariamente es consecuencia de las actividades antrópicas que ejercen presión sobre el área natural protegida, sino por efecto de la propia naturaleza (Figura 7).

Las demás coberturas también han experimentado cambios significativos, en la que cabe resaltar la cobertura de río que ha ganado áreas que antes pertenecían a los bosques y a las tierras desnudas. Aunque dentro del parque no todo es pérdida, también se ha registrado ganancias. Por ejemplo, a la cobertura boscosa se le añadió 39,25 ha procedentes de la vegetación secundaria (35,56 ha), tierras desnudas (3,33 ha) y río (0,32 ha) (Tabla 21).

**Tabla 21***Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2019 al 2021 (ha)*

|           |            | 2021     |        |       |      |      |          |          |  |
|-----------|------------|----------|--------|-------|------|------|----------|----------|--|
|           | Coberturas | Bosques  | V. S.  | T. D. | Río  | Pob. | Total    | Pérdidas |  |
| 2019      | Bosques    | 4 465,0  | 125,87 | 21,53 | 5,27 | 0,07 | 4 617,74 | 152,74   |  |
|           | V. S.      | 35,56    | 95,81  | 7,60  | 0,02 | 0,17 | 139,16   | 43,35    |  |
|           | T. D.      | 3,33     | 9,69   | 2,39  | 0    | 0    | 15,41    | 13,02    |  |
|           | Río        | 0,32     | 0      | 0,24  | 3,88 | 0    | 4,44     | 0,56     |  |
|           | Pob.       | 0        | 0,08   | 0     | 0    | 0,17 | 0,25     | 0,08     |  |
|           | Total      | 4 504,21 | 231,45 | 31,76 | 9,17 | 0,41 | 4 777,00 |          |  |
| Ganancias |            | 39,25    | 135,56 | 29,37 | 5,29 | 0,24 |          |          |  |

Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

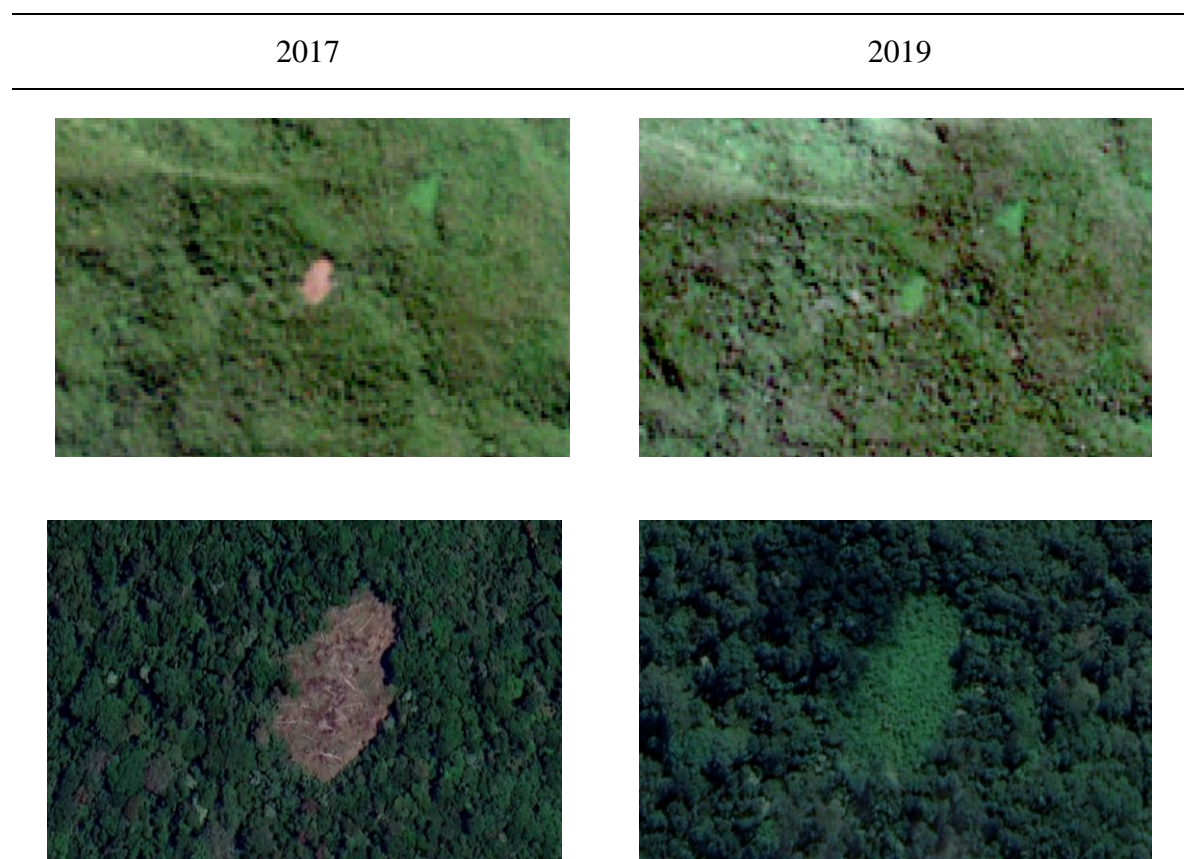
Similar escenario para la zona de amortiguamiento durante el periodo 2019 – 2021, con una tasa de cambio de -4,39%. De un total de 369,23 ha perdidas de bosques; 282,48 ha se han convertido en vegetación secundaria y 72,53 ha fueron talados para dar paso a cultivos y pastos, eliminando 216,49 ha más en comparación al periodo 2017 – 2019 (Tabla 22).

**Tabla 22***Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZAs 2019 al 2021 (ha)*

|           |            | 2021    |        |        |        |       |         |          |  |
|-----------|------------|---------|--------|--------|--------|-------|---------|----------|--|
|           | Coberturas | Bosques | V. S.  | T. D.  | Río    | Pob.  | Total   | Pérdidas |  |
| 2019      | Bosques    | 2608,5  | 282,48 | 72,53  | 12,96  | 1,26  | 2977,73 | 369,23   |  |
|           | V. S.      | 84,27   | 506,42 | 101,16 | 9,49   | 8,08  | 709,42  | 203,00   |  |
|           | T. D.      | 27,14   | 135,57 | 82,99  | 1,01   | 0,9   | 247,61  | 164,62   |  |
|           | Río        | 1,19    | 25,22  | 0,82   | 149,68 | 0,48  | 177,39  | 27,71    |  |
|           | Pob.       | 0,71    | 1,31   | 0,28   | 0,12   | 11,15 | 13,57   | 2,42     |  |
|           | Total      | 2721,81 | 951    | 257,78 | 173,26 | 21,87 | 4125,72 |          |  |
| Ganancias |            | 113,31  | 444,58 | 174,79 | 23,58  | 10,72 |         |          |  |

Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

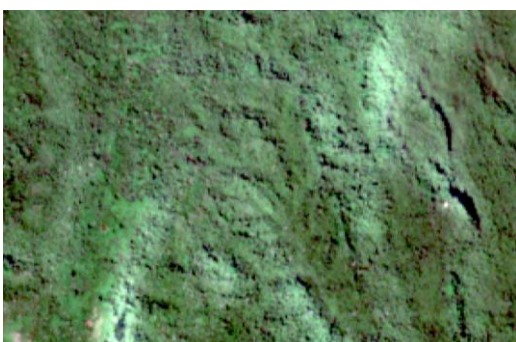


**Figura 7***Detección del cambio de cobertura*

Recuperación de la cobertura vegetal luego de una tala y rozo realizado por taladores furtivos en la parte norte central del Parque Nacional Tingo María. Arriba: Imágenes S-2 combinación de bandas 234 a escala 1:8 000. Abajo: Imágenes Google Earth Pro.

2019

2021



Pérdida de cobertura forestal ocurrida en la parte sur del PNTM por causas naturales durante el 2021. Imágenes S-2 combinación de bandas 234 a escala 1:12 500.

---

### 4.3. Grado de fragmentación de los bosques

De acuerdo con las métricas encontradas durante el análisis, los bosques dentro del PNTM presentan un mayor índice de continuidad con valores de 6,447 en comparación a su zona de amortiguamiento que presenta 4,321. Además, respecto a la distancia media al fragmento vecino más cercano presenta valores bajos con 30,08 a diferencia de su ZA que registró 82,026. Finalmente, el PNTM se encuentra menos fragmentado con un valor de 0,942 en comparación a su ZA. (Tabla 23).

**Tabla 23**

*Métricas de fragmentación del bosque dentro del PNTM y su ZA al 2021*

| Métrica   | PNTM  | Zona de amortiguamiento |
|---|-------|-------------------------|
| Índice de continuidad de Vogelmann              | 6,447 | 4,321                   |
| Distancia media al fragmento vecino más cercano | 30,08 | 82,026                  |
| Grado de fragmentación                          | 0,942 | 0,659                   |

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a la presente evaluación multitemporal se ha determinado que la superficie boscosa dentro del PNTM se mantuvo relativamente estable. Hacia el año 2017 los bosques cubrían el 97,16% de la superficie total del PNTM, mientras que la vegetación secundaria y las tierras desnudas en conjunto sumaban 2,74% (Tabla 13), las cuales se ubican principalmente en la parte noroeste del área de estudio, próxima a la comunidad Río Oro (Figura 3). Este lugar que cuenta con escasa vegetación boscosa originaria; según la zonificación del PNTM propuesta en el Plan Maestro 2022-2026 (Sernanp, 2022) corresponde a parte de la zona de uso especial, que es un espacio donde se desarrolla actividad agrícola por la población que se encuentra asentada con mucha anterioridad al establecimiento del PNTM.

Para el 2019 el escenario fue muy similar; los bosques cubrían el 96,67% y la vegetación secundaria y las tierras desnudas el 3,23%. La superficie de los ríos y la zona poblada se mantuvo estable al igual que el año 2017 (Tabla 14).

Mientras que para finales del 2021 la cobertura forestal se redujo. La vegetación secundaria y las tierras desnudas alcanzaron el 5,51% del total del PNTM, disminuyendo los bosques al 94,29% (Tabla 15). Este descenso en la superficie forestal se debió que durante el mes de marzo del 2021 ocurrió un deslizamiento de tierras producto de las fuertes precipitaciones ocurridas en la zona, lo que ha conllevado a la merma de la cobertura boscosa en la parte sur del PNTM.

A pesar de ello, el PNTM cumple con su objetivo principal que es la conservación de la cobertura vegetal. Las áreas naturales protegidas han demostrados ser muy eficientes en el tiempo para lograr su propósito de conservar los bosques (Dwiyahreni et al., 2021; Islam et al., 2021).

Por el contrario, los bosques de la ZA han experimentado una disminución considerable en su extensión; en el 2017 cubrían 76,66% del área total de la ZA, y en el 2021 se acentuó

reduciéndose la cobertura boscosa al 70,81%. Esta dinámica es producto de la constante presión antrópica por parte de las poblaciones asentadas en los alrededores del PNTM quienes practican la agricultura itinerante convirtiendo los bosques en tierras agrícolas. A nivel nacional las áreas naturales protegidas son amenazadas constantemente por la agricultura y el pastoreo (Campos et al., 2018; Delgado, 2018). Los estudios han demostrado que, uno de los responsables de la deforestación en la Amazonía peruana es la agricultura de subsistencia (Marquardt et al., 2019). La pérdida antropogénica de bosques para el establecimiento de la agricultura es común en las áreas naturales protegidas ubicada en los trópicos globales, (Wade et al., 2021). Asimismo, durante el tiempo de aislamiento social producido por la pandemia del Covid-19, la actividad en el campo no se ha detenido; por el contrario, ha sido aprovechada por la población rural para ampliar la frontera agrícola y pecuaria, según el reporte elaborado por el Minam (2022), el 2020 fue el año donde la deforestación en el Perú alcanzó su pico más alto en las últimas dos décadas.

La exactitud temática de los mapas de coberturas producidos fue evaluada a partir del uso de matrices de confusión (Tablas 16, 17 y 18), obteniéndose las métricas Índice de Kappa y Exactitud global. Según el Índice de Kappa calculado, se encontró un grado de concordancia considerable para los tres años evaluados y de acuerdo con la exactitud global calculada, los tres valores han superado el 80%; lo que demuestra un desempeño satisfactorio en la clasificación de coberturas boscosas.

La literatura científica manifiesta que es muy común encontrar exactitud temática alta cuando se usa productos Sentinel-2 con el algoritmo Random Forest para identificar bosques. Los usuarios de los productos S-2 han encontrado valores similares en diferentes ecosistemas del mundo (Li et al., 2021; Veerabhadraswamy et al., 2021; Daryaei et al., 2020). Inclusive si es comparada con imágenes de otros sensores, los productos S-2 han obtenido mayor exactitud temática, como por ejemplo frente a su mayor competidor Landsat 8 (Clark, 2020).

Del mismo modo, cuando se trata de comparar algoritmos que consigan la mayor fiabilidad posible, los clasificadores basados en aprendizaje automático tales como Random Forest y Máquinas de Vector de Soporte superan a los demás clasificadores cuando se trata de discriminar bosques y otro tipo de coberturas (Phiri et al., 2020).

Una de las ventajas de trabajar con matrices de confusión es su capacidad de plasmar los conflictos entre las categorías encontradas (Chuvienco, 2008). Para nuestro caso las principales confusiones que se observan en las Tablas 16, 17 y 18 es el solapamiento entre las categorías bosque y vegetación secundaria, además de los valores confusos entre la categoría vegetación secundaria y tierras desnudas, pero en menor proporción. Para evitar confundir los bosques con la vegetación secundaria se utilizó la combinación de bandas 12,8A,3; que corresponden al Infrarrojo de Onda corta, Vegetación Red Edge y Verde respectivamente, las cuales nos brindaron resultados sobresalientes cuando se entrenó el algoritmo. El trabajar con bandas del infrarrojo cercano nos permite discriminar mejor las coberturas vegetales, las cuales presentan comportamientos espectrales diferentes según los factores fisiológicos y morfológicos de las especies vegetales (Chuvienco, 2008).

En cuanto al cambio de bosque a otros usos del suelo, el análisis de las matrices de cambio (Tablas 19 y 20) nos permitió identificar que el periodo 2017 – 2019 dentro del PNTM fue menos dinámico en comparación al periodo 2019 – 2021. En efecto, la tasa anual de cambio fue de -0,26% en el primer periodo mientras que en el segundo alcanzó -1,24%. Estos valores son altos en comparación a los mencionados por Bax y Francesconi (2018) quienes encontraron dentro de las áreas naturales protegidas tasas de deforestación locales que van de -0,02% al -0,04%. Estas comparaciones evidencian la transición abrupta a las que han sido sometidos los bosques del PNTM producido por fenómenos naturales como las fuertes precipitaciones ocurridas durante el 2021.

Caso contrario es lo ocurrido en la ZA; donde los bosques han sufrido intervención de

tipo antrópica. En el primer lapso; se obtuvo una tasa de cambio de -2,97% con pérdidas de 188,78 ha de bosque y ganancias de sólo 3,78 ha (Tabla 21). Valores similares de la reducción de la cobertura forestal se han encontrado en zonas fuera de las áreas naturales protegidas, siendo las regiones San Martín, Huánuco y Junín las zonas más afectadas a nivel nacional (Bax y Francesconi, 2018). Mientras que en el periodo 2019 -2021 la tasa de cambio se incrementó a -4,39%; lo que equivale a una pérdida de 369,23 ha de cobertura boscosa (Tabla 22); durante este último lapso se ha deforestado la mayor superficie forestal. Durante el aislamiento social por la pandemia del Covid-19 los hogares que practican la agricultura itinerante en la Amazonía han ampliado la frontera agrícola, estableciendo cultivos mediante tala, rozo y quema; para luego de un tiempo dejar los barbechos que serán nuevamente utilizados en los sembríos y de esta manera acaparar la mayor cantidad de tierras (Coomes et al., 2016).

Finalmente, para cuantificar la fragmentación de los bosques del PNTM y su ZA se analizó métricas del paisaje a nivel de clases (Tabla 23). Los valores encontrados sobre la fragmentación señalan que los bosques del PNTM al 2021 se encuentran en una categoría de fragmentación moderada, mientras que los bosques de su ZA se encuentran altamente fragmentados. De igual manera esta área muestra valores más bajos de continuidad (FCI), lo que refleja mayor fragmentación y discontinuidad en los parches de bosques en comparación al PNTM.

Respecto a la distancia media al fragmento vecino más cercano (MNN), el PNTM presenta valores más bajos, señalando que los fragmentos de bosques dentro del área natural protegida se encuentran más cercanos uno de otros. Las métricas analizadas nos sugieren que la cobertura boscosa en la ZA ha sido fuertemente intervenida. Las zonas de amortiguamiento en el Perú son mucho más vulnerables a la deforestación en comparación a las áreas naturales protegidas (Rojas et al., 2021), es así que el avance de la agricultura mediante patrones migratorios dentro la ZA, representa una potencial amenaza a la integridad del PNTM.

## VI. CONCLUSIONES

A partir de la clasificación supervisada de las imágenes Sentinel-2 utilizando el algoritmo Random Forest se ha conseguido elaborar mapas de coberturas del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento que corresponde a los años 2017, 2019 y 2021 con una exactitud temática considerable. Los resultados encontrados en la cartografía forestal indican que la cobertura boscosa es la más representativa en ambas zonas de estudio, encontrándose 94,29% de cobertura boscosa para el área natural protegida y 65,97% para su zona de amortiguamiento en relación con el área total evaluada respectivamente.

Durante el periodo de evaluación, la tasa de cambio de bosque a no bosque dentro del PNTM ha sido poco dinámica. Pese a ello, se ha incrementado de -0,26 en el periodo 2017 al 2019 a un valor de -1,24 en el periodo 2019 al 2021, como consecuencia de fenómenos naturales ocurridos debido a las altas precipitaciones y las pendientes pronunciadas propias de la zona de estudio, sin embargo; la cobertura boscosa se ha mantenido relativamente estable.

Mientras que los bosques de la ZA han sufrido una transición muy dinámica, con tasas de cambio de -2,97 en el periodo 2017 al 2019 a un valor de -4,39 en el periodo 2019 al 2021. Esto como consecuencia de la deforestación generada por comuneros que talan bosques para ampliar su frontera agrícola. Las métricas del paisaje utilizadas sugieren que los bosques del PNTM se encuentran moderadamente fragmentados y los bosques de la ZA se encuentran fuertemente fragmentados.

A pesar de que el área natural protegida ha cumplido con el objetivo de mantener la cobertura vegetal del bosque de selva alta, las actividades agrícolas desarrolladas en la zona de amortiguamiento representan una amenaza constante para la integridad del Parque Nacional Tingo María.

## VII. RECOMENDACIONES

1. Considerar los hallazgos de la presente investigación respecto a la dinámica de la cobertura boscosa a fin de que las autoridades del Parque Nacional Tingo María y del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) tomen las decisiones necesarias correctivas y preventivas que coadyuven a la conservación de la integridad del bosque del área natural protegida.
2. Continuar con el monitoreo sistemático de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento, utilizando como insumo cartográfico productos de nuevos sensores como imágenes Planet y procesarlas digitalmente con diferentes algoritmos de inteligencia artificial, a través del fortalecimiento de las alianzas estratégicas existentes entre la Jefatura del Parque Nacional Tingo María, las diferentes facultades de la Universidad Nacional Agraria de la Selva y el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana.
3. Analizar las métricas del paisaje del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento asociándolas a las variables de infraestructura de transporte, variables físico-naturales y variables socioeconómicas al momento de calcular el grado de fragmentación, a fin de que sea posible predecir escenarios futuros y conocer los motores directos de la deforestación en la zona de estudio.
4. Capacitar periódicamente al personal del Parque Nacional Tingo María en temas relacionados a las geotecnologías, como el acceso a las diversas plataformas de sistemas de información geográfica, así como el procesamiento digital de imágenes satélites que se encuentran en el ciberespacio y de esta manera puedan manejar mejores herramientas para el control y vigilancia del área natural protegida.



## VIII. REFERENCIAS

- Aguirre, J., Guerrero, E., & Campana, Y. (2021). How effective are protected natural areas when roads are present? An analysis of the Peruvian case. *Environmental Economics and Policy Studies*, 23(4), 831-859.
- Alberca, C. V. & Pintado, G. L. (2019). *Cambios de Cobertura Vegetal en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe-San Ignacio-Cajamarca, Mediante Imágenes de Satélite, Periodo 1988–2018* (Tesis de grado, Universidad Nacional de Jaén). Archivo digital. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3072267>.
- Argotty, F., Zamora, J.C., Brenes, C., Schlesinger, P., Cifuentes Jara, M., Imbach, P. & Chacón, M. (2018). *Manual metodológico para la construcción de niveles de referencia para REDD+*. Argüello Leiva, M; & Cifuentes Jara, M. (eds.) Turrialba, Costa Rica, CATIE. 42 p. (Serie técnica Manual técnico no. 140).
- Bax, V., & Francesconi, W. (2018). Environmental predictors of forest change: An analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru. *Applied geography*, 91, 99-110.
- Bishop, Y., Fienberg, S., Holland, P., Light, R., & Mosteller, F. 1977. *Book Review: Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*. *Applied Psychological Measurement*, 1(2), 297-306. <https://doi.org/10.1177/014662167700100218>.
- Borrás, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G. & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 48, 55-66.
- Breiman, L. (2001). Random forest. *Machine learning*, 45, 5-32.
- Campos, A., Guerrero, E. & Gines, E. (2018). Evolución de la cobertura vegetal en el Parque Nacional Cerros de Amotape de Tumbes utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): 2000–2014. *Manglar*, 15, 47-56.

- Chahua, E. (2019). *Análisis de la deforestación en el periodo 2006-2018 del distrito Daniel Alomía Robles – Huánuco*. (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva) Archivo digital. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1686>.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (No. 528.8 CHU).
- Clark, M. L. (2020). Comparison of multi-seasonal Landsat 8, Sentinel-2 and hyperspectral images for mapping forest alliances in Northern California. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 26-40.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 [software]. *Geoscientific Model Development*, 8, 1991-2007.
- Coomes, O. T., Takasaki, Y., & Rhemtulla, J. M. (2016). Forests as landscapes of social inequality: tropical forest cover and land distribution among shifting cultivators. *Ecology and Society*, 21(3), 20.
- Cotrina, A., Bandopadhyay, S., Rojas, N., Banerjee, P., Torres, C. & Oliva, M. (2021). Peruvian Amazon disappearing: Transformation of protected areas during the last two decades (2001–2019) and potential future deforestation modelling using cloud computing and MaxEnt approach. *Journal for Nature Conservation*, 64, 126081.
- Daryaei, A., Sohrabi, H., Atzberger, C., & Immitzer, M. (2020). Fine-scale detection of vegetation in semi-arid mountainous areas with focus on riparian landscapes using Sentinel-2 and UAV data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105686.
- De Luque, M. A., Pérez, Y. P., Rodríguez, Y. A., & Rodríguez, C. J. (2019). Análisis del

proceso de fragmentación de bosques: metodologías orientadas en el uso de sistemas de información geográfica y métricas del paisaje. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 5, 32-41.

Decreto Supremo 018-2015-MINAGRI. (30 de setiembre del 2015). Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para la gestión forestal de la Ley Forestal y de Fauna Silvestre 29763. Diario Oficial El Peruano. Perú.

Delgado, E. C. (2018). Cambios de uso de suelo y cobertura vegetal en el área de conservación privada Hierba Buena-Allpayacku y su área circundante, Amazonas, 2017 (Tesis de grado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza). Archivo digital. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1464>.

Díaz, A. (2003). *Instrumentos para la planificación integral del uso de la tierra con sistemas de información geográfica: un caso de estudio en Argentina* (Tesis de doctorado, Universidad Humboldt de Berlín). Archivo digital. <https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/15743>.

Dwiyahreni, A., Fuad, H., Sunaryo, Soesilo, T., Margules, C., & Supriatna, J. (2021). Forest cover changes in Indonesia's terrestrial national parks between 2012 and 2017. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(3), 1235-1242.

European Space Agency (ESA) 2021. Copernicus. S-1, S-2, S-3: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

European Space Agency (ESA) 2022. Sentinel online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.

FAO (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. <http://www.fao.org/3/w0015e/w0015e00.htm>.

FAO y PNUMA (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>.

- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., Quintano, C., Marcos, E. & Calvo, L. (2017, del 3 al 7 de octubre). Utilización de las imágenes Sentinel-2 para cartografía de área quemada. En Ruiz, L.A., J.Estornell, J. y Erena, M. (Ed.). *XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Nuevas plataformas y sensores de teledetección aplicados a la gestión del agua, la agricultura y el medio ambiente*. pp. 499-502. Murcia, España: Universitat Politècnica de València.
- Giuliani, G., Mazzetti, P., Santoro, M., Nativi, S., Van Bemmelen, J., Colangeli, G., & Lehmann, A. (2020). Knowledge generation using satellite earth observations to support sustainable development goals (SDG): A use case on Land degradation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102068.
- Global Forest Watch (2020). *La pérdida de la cobertura mundial ascendió al 51% en el 2016*. GFW. <https://blog.globalforestwatch.org/es/data-and-research/la-perdida-de-cobertura-boscosa-mundial-ascendio-al-51-en-2016/>
- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Ideam, Igac & Cormagdalena (2008). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena.
- Instituto Geográfico Nacional España (IGNE). (2020). *El programa Copernicus para la monitorización del territorio y los objetivos del desarrollo sostenible*. Centro Nacional de Información Geográfica. <https://pcsitna.navarra.es/archivo/Documents.pdf>.
- Islam, M., Jimmy, A., Alam, M., & Khan, N. (2021). The use of multi-temporal Landsat normalized difference vegetation index (NDVI) data for assessing forest cover change

- of Lawarchara National Park. *Environment, Development and Sustainability*, 23(12), 17702-17722.
- Jauro, T. I., Tesfamichael, S. G., & Rampedi, I. T. (2020). Tracking conservation effectiveness in the Vhembe Biosphere Reserve in South Africa using Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-22.
- Jensen, J. (2015). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 4<sup>th</sup> ed. University of South Carolina. Pearson series in geographic information science. 623 p.
- Kim, D. H., Sexton, J. O., Noojipady, P., Huang, C., Anand, A., Channan, S., Feng, M.; & Townshend, J. R. (2014). Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000. *Remote Sensing of Environment*, 155, 178-193.
- Landis, J., & Koch, G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159- 174. <https://doi.org/10.2307/2529310>.
- Ley N° 26834. Ley de Áreas Naturales Protegidas. Ministerio del Ambiente. 30 de junio de 1997. Perú. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-26834.pdf>.
- Li, J., Wang, J., Fang, P., Xu, W. & Dai, Q. 2021. Forest Type Mapping at a Regional Scale Based Using Multitemporal Sentinel-2 Imagery. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021*, pp. 4228-4231, <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554083>.
- Marquardt, K., Pain, A., Bartholdson, Ö. & Romero, L. (2019). Forest Dynamics in the Peruvian Amazon: Understanding Processes of Change. *Small-scale Forestry* 18, 81–104. <https://doi.org/10.1007/s11842-018-9408-3>.
- McGarigal K., Tagil S., & Cushman S. (2009). Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landscape Ecology*, 24, 433–450,
- McGarigal, K., Cushman, S.A., & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis*

- Program for Categorical and Continuous Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- McMurray, A., Casarim, F., Bernal, B., Timothy, P., & Sidman, G. (2017). *Los servicios ecosistémicos de los bosques tropicales y un marco propuesto para evaluarlos. Análisis sobre los servicios ecosistémicos proporcionados por las plantaciones de árboles y por los sistemas agroforestales*. Winrock International. <https://winrock.org/wp-content/uploads/2018/02/Marco-servicios-ecosistemicos-28122917.pdf>
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2014). *Informe Final del Proyecto: Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad Andina. Componente Nacional Perú – Primera Etapa*. Centro de Datos para la Conservación. Dirección General de Ordenamiento Territorial - Ministerio del Ambiente. Perú.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2014). *Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación*. (1ra ed.). Dirección General de Ordenamiento Territorial.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2019). *Apuntes del bosque N° 1. Cobertura y deforestación en los bosques húmedos amazónicos 2018*. Programa Nacional de conservación de bosques para la mitigación del cambio climático.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2022). *Bosques y pérdida de bosques*. Geobosques. <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>.
- Pérez, C., & Muñoz, A. (2006). *Teledetección nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca.
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291.
- Puerta, R., & Fajardo, R. (2022). Cobertura boscosa al 2021 en la provincia Leoncio Prado,

Perú. *The Biologist (Lima)*, 20(1), 93-101.

- Puerta, R., Esenarro, D., Cesar, J., Rodriguez, C., & Aylas, C. (2021). Open-access geographic sources and data for the study and management of natural resources. *Journal of Contemporary Issues in Business & Government*, 27(3), 848-857.
- Ramachandra, T. V., Bhat, S. P., Kulkarni, G., & Aithal, B. H. (2019). Assessment of forest dynamics in Chikkamagalur District, Central Western Ghats using temporal remote sensing data and spatial metrics. *Indian Forester*, 145, 757-766.
- Rodríguez Galiano, V. & Chica-Rivas, M. (2012, del 19 al 21 de setiembre). Clasificación de imágenes de satélite mediante software libre: nuevas tendencias en algoritmos de Inteligencia Artificial. In *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, Madrid, AGE-CSIC (pp. 19-21).
- Rojas, E., Zutta, B. R., Velazco, Y. K., Montoya-Zumaeta, J. G., & Salvà-Catarineu, M. (2021). Deforestation risk in the Peruvian Amazon basin. *Environmental Conservation*, 48(4), 310-319.
- Román, M. (2014). Valoración económica de los servicios ambientales del Parque Nacional Tingo María: Cueva de las Lechuzas–Cataratas Gloria Pata y Sol Naciente (Tesis de Maestría, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann) Archivo digital. <http://www.tesis.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/989>.
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP). (2022a). Lista Oficial de las Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/2560580-listado-oficial-de-las-areas-naturales-protegidas>.
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP). (2022b). *Plan Maestro 2022-2026 del Parque Nacional Tingo María*. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/normas-legales/2712445-027-2022-sernanp>.

- Shaharum, N.S.N., Shafri, H.Z.M., Gambo, J., & Abidin, F.A.Z. (2018). Mapping of Krau Wildlife Reserve (KWR) protected area using Landsat 8 and supervised classification algorithms. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 24-35.
- Vargas, J. B. (2019). Carbono en la biomasa área arbórea viva del tramo Tres de Mayo–río Oro de la zona Silvestre del Parque Nacional Tingo María (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva) Archivo digital. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1596>.
- Veerabhadraswamy, N., Devagiri, G., & Khaple, A. (2021). Fusion of complementary information of SAR and optical data for forest cover mapping using random forest algorithm. *Current Science*, 120(1), 193-199.
- Wade, C. M., Austin, K. G., Cajka, J., Lapidus, D., Everett, K. H., Galperin, D., Maynard, R. & Sobel, A. (2020). What is threatening forests in protected areas? A global assessment of deforestation in protected areas, 2001–2018. *Forests*, 11(5), 539.



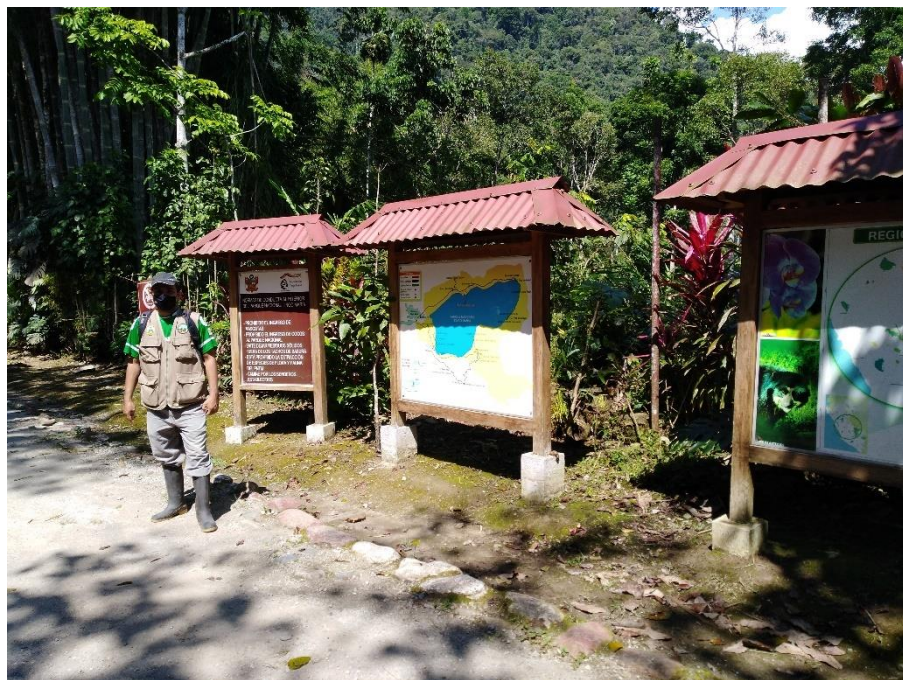
**IX. ANEXOS**

**Figura 8**

*Entrevista con comuneros y personal del PNTM sector La Quinceañera*

**Figura 9**

*Ingreso principal al PNTM sector Cueva de las Pavas*



**Figura 10**

*Río Tres de Mayo luego del deslizamiento de tierras ocurrido el 2021*



**Figura 11**

*Catarata Gloriapata en el sector Tres de Mayo – PNTM*



**Tabla 24***Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2017*

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este   | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|--------|---------|
| 1  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387089 | 8964039 |
| 2  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388967 | 8968749 |
| 3  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390184 | 8967823 |
| 4  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390222 | 8960126 |
| 5  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 384187 | 8959405 |
| 6  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390205 | 8962037 |
| 7  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387808 | 8962825 |
| 8  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385980 | 8961785 |
| 9  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383147 | 8960830 |
| 10 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392099 | 8960612 |
| 11 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389819 | 8966546 |
| 12 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391010 | 8963780 |
| 13 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389102 | 8962125 |
| 14 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388800 | 8963736 |
| 15 | Bosques               | V. secundaria        | Falso      | 386049 | 8965107 |
| 16 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386641 | 8962220 |
| 17 | Bosques               | V. secundaria        | Falso      | 385125 | 8962273 |
| 18 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385864 | 8960974 |
| 19 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383419 | 8961259 |
| 20 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383252 | 8960291 |
| 21 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383189 | 8958997 |
| 22 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 384244 | 8958029 |
| 23 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387411 | 8960807 |
| 24 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390793 | 8960212 |
| 25 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392261 | 8959227 |
| 26 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390753 | 8958005 |
| 27 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392118 | 8957322 |
| 28 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389499 | 8960323 |
| 29 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388459 | 8959918 |
| 30 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389054 | 8958537 |
| 31 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 393031 | 8958696 |

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este   | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|--------|---------|
| 32 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392698 | 8960672 |
| 33 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390007 | 8962847 |
| 34 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392333 | 8962926 |
| 35 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392206 | 8964188 |
| 36 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391602 | 8965379 |
| 37 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389515 | 8965419 |
| 38 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391428 | 8966712 |
| 39 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390531 | 8966776 |
| 40 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387507 | 8969062 |
| 41 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388205 | 8966911 |
| 42 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389967 | 8968697 |
| 43 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389491 | 8968332 |
| 44 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388308 | 8968268 |
| 45 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387657 | 8968586 |
| 46 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387197 | 8967578 |
| 47 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386229 | 8967427 |
| 48 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386999 | 8966165 |
| 49 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386364 | 8965490 |
| 50 | V. secundaria         | Río                  | Falso      | 389594 | 8969477 |
| 51 | V. secundaria         | Bosques              | Falso      | 390393 | 8968479 |
| 52 | V. secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 385818 | 8967476 |
| 53 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 386225 | 8966747 |
| 54 | V. secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 385995 | 8965899 |
| 55 | V. secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 386530 | 8965903 |
| 56 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 385980 | 8965353 |
| 57 | V. secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 384937 | 8962892 |
| 58 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 384958 | 8962676 |
| 59 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 389918 | 8957845 |
| 60 | V. secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 389891 | 8958165 |
| 61 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 393111 | 8957598 |
| 62 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 393268 | 8958085 |
| 63 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 390694 | 8968619 |
| 64 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 391085 | 8967493 |
| 65 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 391769 | 8966547 |

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este   | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|--------|---------|
| 66 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 390644 | 8965993 |
| 67 | V. secundaria         | Bosques              | Falso      | 389132 | 8966916 |
| 68 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 385964 | 8968026 |
| 69 | V. secundaria         | V. secundaria        | Verdadero  | 386386 | 8968553 |
| 70 | T. desnudas           | V. secundaria        | Falso      | 386703 | 8969019 |
| 71 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386511 | 8968684 |
| 72 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386498 | 8968228 |
| 73 | T. desnudas           | V. secundaria        | Falso      | 386554 | 8967966 |
| 74 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386011 | 8968293 |
| 75 | T. desnudas           | V. secundaria        | Falso      | 386524 | 8967365 |
| 76 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 388548 | 8968692 |
| 77 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 389452 | 8969496 |
| 78 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 389991 | 8969057 |
| 79 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 388895 | 8967451 |
| 80 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 392207 | 8965349 |
| 81 | T. desnudas           | V. secundaria        | Falso      | 393158 | 8960390 |
| 82 | T. desnudas           | V. secundaria        | Falso      | 393385 | 8958238 |
| 83 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 390496 | 8958498 |
| 84 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 388750 | 8960251 |
| 85 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 389791 | 8959121 |
| 86 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386567 | 8962074 |
| 87 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386627 | 8961624 |
| 88 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384461 | 8962560 |
| 89 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 391102 | 8957569 |
| 90 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 386903 | 8969267 |
| 91 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 387515 | 8968841 |
| 92 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 388044 | 8969142 |
| 93 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 388788 | 8968917 |
| 94 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 389297 | 8969545 |
| 95 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 390123 | 8969502 |
| 96 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 390943 | 8968228 |
| 97 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 391772 | 8967018 |
| 98 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 392894 | 8963407 |

**Tabla 25***Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2019*

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este     | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|----------|---------|
| 1  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390101.4 | 8958105 |
| 2  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388748   | 8963848 |
| 3  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391188.5 | 8965589 |
| 4  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388116.7 | 8965962 |
| 5  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390426.5 | 8966772 |
| 6  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388156.4 | 8966859 |
| 7  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388037.3 | 8968351 |
| 8  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389108.9 | 8968693 |
| 9  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385904.1 | 8965914 |
| 10 | Bosques               | V. Secundaria        | Falso      | 385118.3 | 8962694 |
| 11 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389039.1 | 8964917 |
| 12 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390497.5 | 8959905 |
| 13 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 382685.5 | 8960877 |
| 14 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 384076.9 | 8957239 |
| 15 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391285.5 | 8960911 |
| 16 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388603.2 | 8959536 |
| 17 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386356.8 | 8962252 |
| 18 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385602.4 | 8961816 |
| 19 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385384.5 | 8961045 |
| 20 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390810   | 8967386 |
| 21 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391748.8 | 8963647 |
| 22 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389737.1 | 8960865 |
| 23 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390340.6 | 8961451 |
| 24 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392469.6 | 8960730 |
| 25 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388312.2 | 8961954 |
| 26 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 384037.3 | 8960295 |
| 27 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387205.7 | 8967738 |
| 28 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389888   | 8968526 |
| 29 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388681   | 8967470 |
| 30 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387591.3 | 8966665 |
| 31 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386116.1 | 8964921 |

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este     | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|----------|---------|
| 32 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387574.5 | 8965408 |
| 33 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388815.1 | 8966648 |
| 34 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390323.8 | 8966263 |
| 35 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390776.5 | 8964905 |
| 36 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388848.6 | 8965486 |
| 37 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 384573.8 | 8960809 |
| 38 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390877.1 | 8963374 |
| 39 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389301.2 | 8964179 |
| 40 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387926.6 | 8964950 |
| 41 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388379.2 | 8962804 |
| 42 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383249.4 | 8960809 |
| 43 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383534.4 | 8959736 |
| 44 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383852.9 | 8958261 |
| 45 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391949.9 | 8961765 |
| 46 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385143.8 | 8960256 |
| 47 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392134.4 | 8960088 |
| 48 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392335.5 | 8959200 |
| 49 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392067.3 | 8957842 |
| 50 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 386359   | 8968729 |
| 51 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 386092.3 | 8968576 |
| 52 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 386479.7 | 8967338 |
| 53 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 386172.8 | 8966987 |
| 54 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 386642.4 | 8966521 |
| 55 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 385762.7 | 8966551 |
| 56 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 385910.2 | 8967531 |
| 57 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 389943.7 | 8969129 |
| 58 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 389305.4 | 8969218 |
| 59 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 388733.3 | 8968798 |
| 60 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 391992.9 | 8966450 |
| 61 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 392284   | 8966006 |
| 62 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 392452   | 8964271 |
| 63 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 391208.5 | 8964569 |
| 64 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 392657.1 | 8962809 |
| 65 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 393184   | 8960346 |



| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este     | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|----------|---------|
| 66 | V. Secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 393412.1 | 8958682 |
| 67 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 392898.3 | 8957751 |
| 68 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 391628.3 | 8957989 |
| 69 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 385817.9 | 8962075 |
| 70 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 383523.7 | 8961712 |
| 71 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384449.8 | 8961426 |
| 72 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384693.2 | 8962590 |
| 73 | T. desnudas           | V. Secundaria        | Falso      | 385967.2 | 8962251 |
| 74 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 387126.4 | 8963300 |
| 75 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385989.4 | 8967174 |
| 76 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385956.3 | 8968083 |
| 77 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386449.1 | 8968338 |
| 78 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386524.1 | 8967439 |
| 79 | T. desnudas           | V. Secundaria        | Falso      | 386562.5 | 8969004 |
| 80 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 387442.1 | 8969186 |
| 81 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 391590.9 | 8966987 |
| 82 | T. desnudas           | V. Secundaria        | Falso      | 389725.1 | 8969544 |
| 83 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 391787.5 | 8966726 |
| 84 | T. desnudas           | Bosques              | Falso      | 392261.1 | 8965136 |
| 85 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 392557   | 8962115 |
| 86 | T. desnudas           | V. Secundaria        | Falso      | 393157.5 | 8959477 |
| 87 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 393725   | 8958108 |
| 88 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 393088.4 | 8958180 |
| 89 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 389651.2 | 8958418 |
| 90 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 393893.5 | 8957735 |
| 91 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 393576.6 | 8958469 |
| 92 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 393321.1 | 8960136 |
| 93 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 392623.1 | 8962659 |
| 94 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 391191.7 | 8967696 |
| 95 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 389835.1 | 8969672 |
| 96 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 387796.7 | 8968973 |
| 97 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 388673   | 8968971 |
| 98 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 386980.3 | 8969047 |

**Tabla 26***Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2021*

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este   | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|--------|---------|
| 1  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388952 | 8964464 |
| 2  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387694 | 8961450 |
| 3  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390426 | 8960065 |
| 4  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390954 | 8966661 |
| 5  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 384005 | 8957072 |
| 6  | Bosques               | V. Secundaria        | Falso      | 385413 | 8963850 |
| 7  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389463 | 8960685 |
| 8  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388455 | 8968508 |
| 9  | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386571 | 8964130 |
| 10 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392868 | 8960339 |
| 11 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385053 | 8960782 |
| 12 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387802 | 8960479 |
| 13 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391225 | 8958961 |
| 14 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388682 | 8964343 |
| 15 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385149 | 8961370 |
| 16 | Bosques               | V. Secundaria        | Falso      | 387348 | 8961205 |
| 17 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 384536 | 8958810 |
| 18 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387542 | 8966714 |
| 19 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392121 | 8960413 |
| 20 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392757 | 8960144 |
| 21 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390681 | 8960145 |
| 22 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387036 | 8968037 |
| 23 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388996 | 8965337 |
| 24 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 385180 | 8960980 |
| 25 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391528 | 8958668 |
| 26 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389501 | 8959556 |
| 27 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 388009 | 8962342 |
| 28 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391769 | 8964464 |
| 29 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383261 | 8958454 |
| 30 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392119 | 8958250 |
| 31 | Bosques               | V. Secundaria        | Falso      | 386041 | 8962659 |

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este   | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|--------|---------|
| 32 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392372 | 8963373 |
| 33 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390170 | 8967546 |
| 34 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 387072 | 8966256 |
| 35 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386552 | 8966772 |
| 36 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386406 | 8966076 |
| 37 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392657 | 8961972 |
| 38 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392223 | 8959581 |
| 39 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 386285 | 8962240 |
| 40 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 391179 | 8965543 |
| 41 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389494 | 8959132 |
| 42 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392395 | 8960508 |
| 43 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389646 | 8966482 |
| 44 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 382779 | 8959481 |
| 45 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 389302 | 8961170 |
| 46 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390858 | 8960762 |
| 47 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 383102 | 8960368 |
| 48 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 390235 | 8968400 |
| 49 | Bosques               | Bosques              | Verdadero  | 392208 | 8965786 |
| 50 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 390682 | 8958648 |
| 51 | V. Secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 387551 | 8962179 |
| 52 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 390877 | 8957672 |
| 53 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 389215 | 8960867 |
| 54 | V. Secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 391559 | 8959926 |
| 55 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 391165 | 8957390 |
| 56 | V. Secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 389654 | 8958177 |
| 57 | V. Secundaria         | T. desnudas          | Falso      | 386314 | 8963774 |
| 58 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 385249 | 8961829 |
| 59 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 384291 | 8961524 |
| 60 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 389861 | 8969829 |
| 61 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 387004 | 8966784 |
| 62 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 386908 | 8969027 |
| 63 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 387283 | 8961855 |
| 64 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 393031 | 8957529 |
| 65 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 389377 | 8969643 |

| ID | Cobertura clasificada | Cobertura verificada | Validación | Este   | Norte   |
|----|-----------------------|----------------------|------------|--------|---------|
| 66 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 389111 | 8960586 |
| 67 | V. Secundaria         | Bosques              | Falso      | 391409 | 8957366 |
| 68 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 387226 | 8961792 |
| 69 | V. Secundaria         | V. Secundaria        | Verdadero  | 391151 | 8967983 |
| 70 | T. desnudas           | Bosques              | Falso      | 388430 | 8964064 |
| 71 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384086 | 8957830 |
| 72 | T. desnudas           | V. Secundaria        | Falso      | 388934 | 8969267 |
| 73 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385876 | 8964806 |
| 74 | T. desnudas           | Río                  | Falso      | 392633 | 8962348 |
| 75 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384804 | 8963216 |
| 76 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384603 | 8962651 |
| 77 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385988 | 8962955 |
| 78 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384647 | 8959495 |
| 79 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384452 | 8962700 |
| 80 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385819 | 8964751 |
| 81 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385358 | 8963844 |
| 82 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385755 | 8964269 |
| 83 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 385835 | 8963212 |
| 84 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 384000 | 8957914 |
| 85 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386344 | 8963753 |
| 86 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 392517 | 8962175 |
| 87 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386655 | 8961156 |
| 88 | T. desnudas           | T. desnudas          | Verdadero  | 386363 | 8961419 |
| 89 | T. desnudas           | V. Secundaria        | Verdadero  | 385940 | 8962533 |
| 90 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 389299 | 8969801 |
| 91 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 393359 | 8960383 |
| 92 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 389103 | 8969397 |
| 93 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 391421 | 8967384 |
| 94 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 389735 | 8969731 |
| 95 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 392944 | 8963413 |
| 96 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 392864 | 8961852 |
| 97 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 392911 | 8963542 |
| 98 | Río                   | Río                  | Verdadero  | 386962 | 8969014 |