



Esta obra está bajo una

[Licencia Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Vea una copia de esta licencia en

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis

**Cobertura boscosa perdida y recuperada,
mediante el uso de imágenes satelitales en la
ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023**

Para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Angie Stefany Vilca Arévalo
<https://orcid.org/0000-0001-8882-2217>

Asesor:

Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz
<https://orcid.org/0000-0001-6391-7981>

Moyobamba, Perú

2024



FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis

**Cobertura boscosa perdida y recuperada,
mediante el uso de imágenes satelitales en la
ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023**

Para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Angie Stefany Vilca Arévalo

Sustentado y aprobado el 23 de octubre del 2024, ante el honorable jurado:



Presidente de Jurado
Ing. M.Sc. Rubén Ruiz Valles



Secretario de Jurado
Ing. M.Sc. Juan José Pinedo
Canta



Miembro de Jurado
Ing. M.Sc. Julio César De la
Rosa Ríos



Asesor
Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala
Díaz

Moyobamba, Perú

2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL INFORME FINAL DE TESIS
CONDUCENTES A TÍTULO PROFESIONAL N.º 036-2024-UNSM/EPIA/UI

Jurado reconocido con Resolución N.º 460-2021-UNSM/CFT/FE, Moyobamba, 31 de diciembre de 2021.

FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL

A las 15:00 horas, del día miércoles 23 de octubre del 2024, se dio inicio al acto público de sustentación del informe final de tesis: **Cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 - 2023**, para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, presentado por **Angie Stefany Vilca Arévalo**, con la asesoría del **Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz**.

Instalada la Mesa Directiva conformada por el **Ing. M.Sc. Rubén Ruíz Valles** (Presidente del jurado), **Ing. M. Sc. Juan José Pinedo Canta** (Secretario), **Ing. M.Sc. Julio César De la Rosa Ríos** (Vocal) y acompañado por el **Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz** (Asesor), el presidente del jurado dirige brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la Resolución N° 412-2023-UNSM/CF/FE, de fecha 28 de setiembre de 2023.

Seguidamente el autor expuso el informe final de tesis y el jurado realizó las preguntas pertinentes, respondidas por el sustentante y evaluado por el jurado con la venia del asesor.

Una vez terminada la ronda de preguntas el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto; sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2 del RG-CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue **Catorce (14)**, tal como se deja constar en la siguiente descripción.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



De acuerdo con el Artículo 40° del RG-CTI, la nota obtenida es **A.P.R.O.B.A.D.O.**...y correspondiente a la calificación de **B.U.E.N.O.**.... Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendarios.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de sustentaciones N° 001 del Programa de Estudios de Ingeniería Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ecología de la UNSM.

Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del informe final tesis, en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las **1.7**..... horas, el mismo día 23 de octubre del 2024.




Ing. M.Sc. Rubén Ruiz Valles
Presidente de Jurado



Ing. M. Sc. Juan José Pinedo Canta
Secretario de Jurado



Ing. M.Sc. Julio César De La Rosa Ríos
Vocal del Jurado



Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz
Asesor



Angie Stefany Vilca Arévalo
Autor

Declaratoria de autenticidad

Angie Stefany Vilca Arévalo, con DNI N° 70421032, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: **Cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023.**

Declaro bajo juramento que:

1. **La tesis presentada es de mi autoría.**
2. **La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales**
3. **Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada;**
4. **Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.**

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Moyobamba, 23 de octubre de 2024



Angie Stefany Vilca Arévalo
DNI N° 70421032

Ficha de identificación

<p>Título: Cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023.</p>	<p>Área de investigación: Ciencia y tecnología ambiental. Línea de investigación: Variabilidad climática y cambio climático. Sublínea de investigación: Servicios ecosistémicos. Grupo de investigación: Ecosistemas-Ecos, Resolución N° N° 250-2022-UNSM/CFT/FE. Tipo de investigación: Básica <input checked="" type="checkbox"/>, Aplicada <input type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
<p>Autor: Angie Stefany Vilca Arévalo</p>	<p>Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental https://orcid.org/0000-0001-8882-2217</p>
<p>Asesor: Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz</p>	<p>Dependencia local de soporte: Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental Unidad o Laboratorio Ingeniería Ambiental https://orcid.org/0000-0001-6391-7981</p>

Dedicatoria

A Dios porque siempre está conmigo, siendo mi guía y mi fortaleza, brindándome sabiduría en todo momento para continuar y lograr una de mis metas más anheladas.

A mis Padres Elsa Arévalo y Richard Vilca, porque durante toda mi vida han velado por mi bienestar y educación, depositando su confianza y mostrándome su apoyo incondicional.

A mis hermanas Geraldine y Sheyla, que han sido siempre mi soporte y son para mí un ejemplo a seguir.

Agradecimientos

Ante todo, a Dios por darnos salud, fortaleza y sabiduría para llegar hasta donde hoy estamos.

A mis padres y hermanas por apoyarme arduamente día tras día, gracias a su ayuda y comprensión, me motivaron e impulsaron para seguir adelante.

A todas las personas (amistades, maestros y colegas) que de alguna forma son parte de la culminación de este trabajo, pues me brindaron su tiempo y apoyo compartiéndome sus conocimientos, experiencias, consejos y palabras de aliento, por lo cual contribuyeron a mejorar la presente investigación.

A todos mi más sincero agradecimiento y admiración.

Índice general

Ficha de identificación	6
Dedicatoria	7
Agradecimientos.....	8
Índice general.....	9
Índice de tablas	12
Índice de figuras	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN.....	16
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes de la investigación	19
2.1.1. Antecedentes internacionales	19
2.1.2. Antecedentes nacionales	20
2.1.3. Antecedentes regionales.....	20
2.2. Fundamentos teóricos	21
2.2.1. Pérdida de cobertura vegetal	21
2.2.2. Deforestación.....	21
2.2.3. Teledetección.....	23
2.2.4. Imágenes satelitales	25
2.2.5. Firma espectral	27
2.2.6. Análisis de la vegetación en el espectro electromagnético	28
2.2.7. Clasificación digital de las imágenes satelitales	29
2.2.8. Validación de datos.....	30
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación.....	31
3.1.1. Contexto de la investigación.....	31
3.1.2. Periodo de ejecución.....	31

	10
3.1.3. Autorizaciones y permisos	31
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad.....	31
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales.....	32
3.2. Sistema de variables	32
3.2.1. Variables principales	32
3.3. Procedimientos de la investigación.....	33
3.3.1. Diseño de la investigación:.....	33
3.3.2. Caracterización de la cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023	34
3.3.3. Evaluación de la cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023	37
3.3.4. Determinación de la tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023.....	39
3.3.5. Análisis de la exactitud del mapa de deforestación del último periodo de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada	39
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1. Cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023.....	42
4.2. Cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023.....	46
4.3. Tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023.....	48
4.3.1. Tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada.....	48
4.3.2. Deforestación anual promedio de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada.....	49
4.4. Exactitud del mapa de deforestación del último periodo de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada	50
CONCLUSIONES.....	52

RECOMENDACIONES.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
ANEXOS	62
Anexo 1. Ubicación del área de estudio	62
Anexo 2. Mapas temáticos de superficie boscosa y no boscosa en los periodos de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada	63
Anexo 3. Mapas temáticos de cambio de cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada	68
Anexo 4. Ficha de validación de puntos de verificación	73
Anexo 5. Panel fotográfico	75

Índice de tablas

Tabla 1. Instrumentos de teledetección basados en satélites activos y pasivos.....	25
Tabla 2. Tipo de imágenes satelitales de acuerdo a bandas de frecuencia	26
Tabla 3. Valores del índice Kappa	30
Tabla 4. Descripción de variables por objetivo específico	32
Tabla 5 Características de imágenes satelitales utilizados en los años de estudio	34
Tabla 6. Esquema de matriz transicional de cambio de cobertura	38
Tabla 7. Matriz de confusión.....	40
Tabla 8. Matriz transicional de cambio de cobertura (ha) en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023	46
Tabla 9. Matriz de confusión de la zona de estudio	50

Índice de figuras

Figura 1. Pérdida de bosque húmedo amazónico durante el 2001 – 2021 (ha).	23
Figura 2. Representación gráfica de firma espectral una cobertura de suelo cualquiera	28
Figura 3. Reflectancia espectral de una hoja viva.	28
Figura 4. Contraste espectral de una vegetación sana entre bandas NIR y RED del espectro.	29
Figura 5. Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2001.	42
Figura 6. Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2007.	42
Figura 7. Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2014.	43
Figura 8. Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2019.	43
Figura 9. Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2023.	44
Figura 10. Superficie boscosa durante el periodo 2001 – 2023.	44
Figura 11. Superficie no boscosa durante el periodo 2001 – 2023.....	45
Figura 12. Tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada.....	48
Figura 13. Deforestación anual promedio de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada.	49

RESUMEN

Cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023

La cobertura vegetal cumple un rol fundamental en los ecosistemas al proporcionar servicios ecosistémicos para el beneficio de las poblaciones. Sin embargo, durante los últimos años las actividades antrópicas han generado la pérdida de amplias áreas boscosas en diferentes zonas naturales del mundo, problemática que no ha sido ajena en la ZoCRE Morro de Calzada. El estudio tuvo como objetivo Determinar la cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023. Se desarrolló el proyecto en la ZoCRE Morro de Calzada, ubicada en los distritos de Calzada y Yantaló, provincia de Moyobamba. La población y la muestra fue 1 247,60 ha de superficie que tiene la ZoCRE. Se caracterizó la superficie boscosa y no boscosa de la zona de estudio en los años 2001, 2007, 2014, 2019 y 2023 a través de un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landast 5 y 8, y Sentinel 2 L2A. Asimismo, se evaluó la cobertura boscosa perdida y recuperada mediante una matriz transicional, se determinó la tasa de deforestación y ganancia de cobertura forestal, y la deforestación anual promedio. Finalmente, se midió la exactitud temática del mapa de deforestación del año 2023 mediante la validación de 70 puntos de verificación. El análisis de la dinámica forestal en el área de estudio durante el periodo de 23 años revela una reducción del 8,5 % (106,47 ha) de la superficie boscosa. Si bien las áreas no boscosas mostraron una tendencia creciente hasta 2019, a partir de dicho año se registró una recuperación de la cobertura forestal. Se identificaron tasas de cambio diferenciadas por periodos: la etapa 2014 – 2019 presentó la mayor tasa de deforestación (- 1,59 %) y una pérdida anual promedio de 12,87 ha, mientras que en el periodo 2019 – 2023 se registró una tasa de ganancia del 0,56 %. La tasa media anual de deforestación para todo el periodo de estudio fue de - 0,57 % (4,84 ha/año) y únicamente en el periodo 2019 – 2023 la superficie recuperada (11,52 %) superó a la pérdida (9,98 %). La validación del mapa de deforestación mediante el índice Kappa (0,90) confirma una exactitud de clasificación casi perfecta. El balance general evidencia mayores pérdidas que ganancias, con una pérdida acumulada del 15,01 % (187,26 ha) y una recuperación del 6,46 % (80,57 ha) de cobertura forestal.

Palabras clave: Análisis multitemporal, exactitud temática, tasa de deforestación, tasa de ganancia.

ABSTRACT

Lost and recovered forest cover, using satellite imagery in the Morro de Calzada ZoCRE,

Vegetation cover plays a fundamental role in ecosystems by providing ecosystem services that benefit populations. However, in recent years, human activities have led to the loss of large areas of forest in different natural areas around the world, a problem affecting the Morro de Calzada ZoCRE. The objective of the study was to Determine the forest cover lost and recovered, using satellite images in the Morro de Calzada ZoCRE, period 2001-2023. The project was carried out in the Morro de Calzada ZoCRE, located in the districts of Calzada and Yantaló, in the province of Moyobamba. The population and sample consisted of 1,247.60 ha of the ZoCRE's surface area. The forested and non-forested areas of the study zone were characterized in 2001, 2007, 2014, 2019, and 2023 through a multitemporal analysis of Landast 5 and 8, and Sentinel 2 L2A satellite images. Likewise, the lost and recovered forest cover was evaluated using a transitional matrix, and the rate of deforestation and forest cover gain, as well as the average annual deforestation, were determined. Finally, the thematic accuracy of the 2023 deforestation map was measured by validating 70 verification points. Analysis of forest dynamics in the study area over the 23-year period reveals an 8.5% reduction (106.47 ha) in forest area. Although non-forested areas showed an upward trend until 2019, forest cover began to recover from that year onwards. Different rates of change were identified for different periods: the 2014–2019 period showed the highest rate of deforestation (-1.59%) and an average annual loss of 12.87 ha, while the 2019–2023 period showed a gain of 0.56%. The average annual rate of deforestation for the entire study period was -0.57% (4.84 ha/year), and only in the period 2019–2023 did the recovered area (11.52%) exceed the lost area (9.98%). Validation of the deforestation map using the Kappa index (0.90) confirms an almost perfect classification accuracy. The overall balance shows greater losses than gains, with a cumulative loss of 15.01% (187.26 ha) and a forest cover recovery of 6.46% (80.57 ha).

Keywords: Multitemporal analysis, thematic accuracy, deforestation rate, gain rate.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

La cobertura de bosques cumple un rol fundamental dentro de los ecosistemas de la tierra (Feng et al., 2021), debido a su capacidad para proporcionar una amplia gama de servicios ecosistémicos y por su potencial para convertirse en el sustento de las sociedades (Shiferaw et al., 2023). Los bosques generan beneficios como construcción y protección del suelo, filtración del agua y máxima absorción de precipitaciones, preservación de cuencas hidrográficas, regulación del caudal de arroyos, contribuyen de manera valiosa y diversificada a la seguridad alimentaria (Aju et al., 2015), purificación del aire, hábitats de biodiversidad y regulación de los climas (Dar et al., 2022). Además, los bosques contribuyen a la mitigación de los efectos del cambio climático, debido a que son los más grandes sumideros de carbono (Joshi et al., 2021; Liu et al., 2023), almacenando a nivel mundial alrededor del 45 % del carbono total (Bonan, 2008).

Sin embargo, entre los años 2010 y 2020 la superficie forestal a nivel mundial se redujo anualmente 4,7 millones de hectáreas (0,1 %) (Forest Research, 2021). La pérdida de los bosques incrementó las emisiones de carbono y la temperatura terrestre produciendo así el calentamiento global (Kafy et al., 2022; Waseem y Khayyam, 2019), además, la disminución de cobertura boscosa reduce de forma significativa los servicios ecosistémicos, afectando el bienestar de la comunidad y salud ambiental (Shiferaw et al., 2023). Son muchos los factores o actividades antropogénicas que generan pérdidas de cobertura vegetal, por ejemplo, el incremento de áreas urbanas (Zhou et al., 2017), el desarrollo de prácticas agrícolas, los incendios forestales, la minería (Dzawanda y Ncube, 2020), la sobreexplotación y la deforestación (Dar et al., 2022).

Diversos estudios desarrollados en diversas partes del mundo han determinado pérdidas significantes de cobertura forestal, lo cual agrava los problemas de cambio climático y calentamiento global, por ejemplo, Thien et al. (2023) determinaron que en la provincia de Thua Thien Hue, Vietnam, la cobertura boscosa aumentó de 3 461,46 km² en 1986 a 3 469,51 km² en 2006 y luego se redujo hasta 2 891,8 km² en 2021, esta reducción significativa se atribuyó a la expansión agrícola en el borde del bosque y otros factores como la tala, tierras de producción ilegales e incendios forestales. Asimismo, Mishra et al. (2021) determinaron que el distrito Darbhanga de Bihar en la India contó con un área boscosa de 19,12 % en el 1999 y disminuyó drásticamente hasta 11,73 % en el 2019, en tanto, Kafy et al. (2022) determinaron en una ciudad de rápido

crecimiento, Cumilla, Bangladesh que la cobertura boscosa se redujo considerablemente en 9,0 % durante 25 años, lo cual generó un incremento de la temperatura promedio en 11 °C.

En el Perú, los bosques cubren más del 60 % del territorio, siendo a nivel mundial el noveno país con mayor cobertura boscosa, el segundo con mayor cantidad de bosque amazónico y el cuarto con mayor cobertura de bosque tropical (FAO, 2020; MINAM, 2016a). Los bosques de este país megadiverso proporcionan beneficios como prevención de erosión del suelo, purificación de aire y agua y regulación del clima (servicios de regulación), materias primas, medicinas, alimentos (servicio de suministro) y otros beneficios más (Fleming, 2022). Sin embargo, la fragmentación y degradación de los bosques por la tala ilegal, las prácticas agrícolas inadecuadas, etc., son amenazas para conservar adecuadamente a los ecosistemas (MIDAGRI, 2021), siendo la deforestación en el país un problema latente y según el MINAM (2023) desde el 2001 al 2020 la pérdida de bosque por categoría nacional fue de 2 636 584,64 ha. Al respecto, Barboza et al. (2022) determinaron que la cobertura de bosques secos en el departamento de Tumbes disminuyó en un 4 % (165,09 km²) del total de área durante los años 2017 a 2021.

La superficie del departamento de San Martín es de 5 128 807 ha y durante el año 2020 se perdió 20 149 ha de cobertura boscosa, en tanto, la cobertura de bosque amazónico perdido entre el 2001 y 2020 fue de 450 356 ha (MINAM, 2022b). En la provincia de Moyobamba la problemática no pasa por desapercibo y según el MINAM (2022a) durante el 2001 al 2021 se han perdido 1 351,0 ha de bosque húmedo amazónico. Además, algunos estudios realizados en el departamento han determinado el problema en diferentes distritos, por ejemplo, Carranza y Tasilla (2020) determinaron que en el distrito de Morales se registraron pérdidas de 948,42 ha durante 1987-1997, 81,83 ha durante 1997-2007 y 59,26 ha durante 2007-2017, asimismo, Rimarachin (2011) determinó que en el distrito de Soritor durante los años 1986 a 2008, los bosques primarios presentaron una tasa media de deforestación anual de 845,78 ha y un área total deforestada de 18 035,34 ha.

La teledetección se sustenta en técnicas que se utilizan para adquirir datos o información a través de imágenes espaciales que se obtienen por satélites (Cruz et al., 2022). Asimismo, las técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) son utilizados de forma amplia por la comunidad científica con el objetivo de evaluar y supervisar cuantitativa y cualitativamente los ecosistemas forestales (Kumar, 2011), por lo cual se dice que las tecnologías de teledetección por satélite son fuentes

de datos e información muy importantes para ordenar y conservar los bosques (Gyamfi-Ampadu et al., 2020). Además, estas tecnologías caracterizan la estructura de los bosques, convirtiéndose así en un método eficaz para detectar la deforestación con fines de gestión y seguimiento forestal (Rahman et al., 2022).

La “Zona de Conservación y Recuperación de Ecosistemas (ZoCRE) Morro de Calzada”, se ubica entre los distritos de Calzada y Yantalo, provincia de Moyobamba y al igual que muchas áreas de conservación, esta zona no ha sido ajeno a la deforestación y pérdida de cobertura boscosa durante muchos años por parte de poseionarios, migrantes y la misma población local, quienes han visto la necesidad de extender sus áreas agrícolas y obtener material forestal de la zona con fines de uso personal y de comercialización, actividades que se convirtieron muy frecuentes durante años debido a la ineficiente y falta de medidas para fiscalizar y multar a los responsables de la degradación de los bosques. Además, con el fin de recuperar la cobertura boscosa, las autoridades locales y regionales de turno han venido desarrollando proyectos de reforestación, sin embargo, en la zona no se cuenta con algún dato o información sobre la pérdida y recuperación de cubierta forestal durante los últimos años. Por ello, el presente estudio buscó determinar la cobertura boscosa perdida y recuperada a través del uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023.

El problema formulado del estudio fue: ¿Cuál es la cantidad de cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023? El objetivo general considerado fue: Determinar la cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023. Se consideró como objetivos específicos, 1ro: Caracterizar la cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023; 2do: Evaluar la cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023; 3ro: Determinar la tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023, y; 4to: Analizar la exactitud del mapa de deforestación del último periodo de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Tariq et al. (2023). En la provincia de Khyber Pakhtun Khwa (KPK) de Pakistán monitorearon las variaciones espacio-temporales de la cubierta boscosa empleando técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) desde 1990 hasta 2017, clasificaron las imágenes satelitales en clases denominadas nieve, tierra estéril, agua, zona edificada, vegetación y bosques. Encontraron que la cobertura forestal disminuyó de 19,360 km² (26,0 %) a 18,784 km² (25,2 %) de 1990 a 2010, mientras que entre el 2013 al 2017 hubo incremento de la superficie forestal de 18,640 km² (25,0 %) a 26,765 km² (35,9 %) debido a la ejecución de un proyecto denominado "Proyecto de mil millones de árboles".

Miranda-Castro et al. (2022). En el área natural protegida el santuario de fauna y flora Corchal "El Mono Hernández" que cuenta con bosques de *Pterocarpus officinalis*. Realizaron una evaluación multitemporal para la cuantificación de la pérdida de cobertura boscosa a través del tratamiento de imágenes Landsat de los años 1986, 1998, 2003, 2013 y 2018, y desarrollaron una clasificación supervisada con cuatro clases de cobertura: tierra desnuda, cuerpos de agua, otras vegetaciones y *P. officinalis*. Encontraron que el bosque de *P. officinalis* contaba en 1986 con 865,26 ha, cuya superficie entre 1986 a 1998 se redujo en 60,30 ha, entre 1998 a 2003 disminuyó 399,15 ha y entre 2003 a 2013 perdió 79,30 ha, en cambio, durante los años 2013 a 2018 se recuperaron 79,65 ha de cobertura boscosa. Concluyeron que durante el periodo 1986 a 2018, el bosque de *P. officinalis* perdió alrededor del 50,0 % de su área boscosa.

Suárez y Acosta (2020). En el municipio de Samacá, desarrollaron un análisis multitemporal de la cobertura boscosa. Determinaron que, como consecuencia del desarrollo de actividades socioeconómicas la vegetación arbustiva y herbácea disminuyó exponencialmente, siendo la minería y la agricultura extensiva entre las causas principales de la deforestación; asimismo, identificó el incremento de la cobertura boscosa por el desarrollo de procesos de sucesión vegetal y reforestaciones; estimó que, en el municipio las coberturas con mayor incremento y disminución fueron los cultivos permanentes (9,98 %) y la vegetación herbácea y/o arbustivo (11,78 %), debido a diversas actividades socioeconómicas reemplazando éstas áreas de vegetación por pastos, zonas de extracción minera y por cultivos.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Móstiga et al. (2024). En el Perú, desarrollaron un análisis espacio-temporal de tasas de deforestación durante el periodo de 2000 a 2020 a escala regional y nacional, considerando también la pérdida de bosques en áreas protegidas. Encontraron que durante el año 2000 al 2020 el Perú perdió 3,4 millones de hectáreas de bosques particularmente en la región de selva no inundable, asimismo, encontraron que las tasas de deforestación a nivel nacional mostraron una aceleración, en las áreas protegidas las tasas presentaron un incremento muy pequeño y las tasas de deforestación a nivel regional se mostraron como las tasas del patrón nacional con excepción de la región Costa, además, encontraron que el aumento de las tasas de deforestación se alinearon con el desarrollo de infraestructuras viales, aumento de actividades antrópicas y, una mayor intensidad y frecuencia de eventos naturales extremos que difieren de acuerdo a la región.

Vera et al. (2024). En el Santuario Histórico Bosque de Pómac (SHBP) del departamento de Lambayeque, analizaron las variaciones en la cobertura boscosa y uso del suelo. Utilizaron un enfoque de algoritmo de bosque aleatorio e interpretaron de forma visual imágenes satelitales Landsat durante los años 2000 al 2008, además, evaluaron tasas de pérdida y ganancia para cada periodo de estudio, y procesos de recuperación a través del “índice de vegetación mejorado (EVI)” y el “índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)”. Encontraron que la expansión de tierras en cada periodo estudiado fue uno de los principales factores que generaron la pérdida de 739,9 ha de bosque seco abierto y 102,6 ha de bosque seco denso entre los años 2000 a 2008.

2.1.3. Antecedentes regionales

Cortez (2021). En la subcuenca Gera del distrito de Japelacio, evaluó la pérdida de cobertura boscosa durante el 2017 al 2019 a través de imágenes satelitales. Utilizó imágenes satelitales Sentinel 2A, Landsat 7 ETM y 5 TM, desarrollando el tratamiento y obtención de superficies mediante el programa ArcGIS. Encontró que durante el 2007 al 2013 se produjo un incremento de la cobertura deforestada en 1 811,19 ha y disminución de 1 852,62 ha de área boscosa, en cambio durante el 2013 al 2019 el área deforestada se incrementó en 3 255,51 ha y la superficie boscosa se redujo en 3 272,9 ha, además, durante el primer y segundo periodo de estudio la tasa anual de deforestación fue 308,77 y 545,48 ha/año, respectivamente, y el mapa de deforestación del 2019 presentó un valor de Kappa de 0,80 % que indicó una concordancia aceptable.

Jimenez (2023). En la microcuenca de Juningullo de Moyobamba, desarrolló un análisis de la deforestación utilizando SIG. Seleccionó imágenes satelitales Sentinel 2 y Landsat

5 y 8, los cuales fueron procesados, corregidos geométricamente y atmosféricamente, y clasificadas para finalmente elaborar mapas temáticos, además, desarrolla clasificación supervisada y no supervisada para determinar usos de suelo y cobertura vegetal. Encontró un incremento del área deforestada de 31,93 % (1 051,25 ha) durante el 2008 a 2020, generándose un mayor incremento de 21,48 % (707,05 ha) durante el periodo 2014 y 2020 a diferencia de un aumento de 10,46 % (344,20 ha) durante el 2008 al 2014, además, encontró que las coberturas boscosas más importantes fueron bosques de montañas subandinas con matorrales densos y árboles medianos, y el uso de suelo más representativo fue la superficie sin uso productivo.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Pérdida de cobertura vegetal

La cobertura vegetal es la capa natural que recubre a la superficie de la tierra, la misma que cumple funciones múltiples como la de captar y almacenar energía, fuente de materias primas y para el bienestar del ser humano, reduce la contaminación de la atmósfera, regula el clima local, evita la erosión de la tierra y es refugio de la fauna; asimismo, son considerados desde pastizales hasta superficies cubiertas por bosques de tipo natural y se incluyen áreas de cultivos que resultan de la acción antrópica (Quispe, 2019).

Existe una serie de motivos que conllevan a perder la cubierta boscosa en el Perú, por ejemplo, cultivos ilegales de coca, plantaciones industriales, tala ilegal, agricultura migratoria y otros. Pero, detrás de este conjunto de acciones que ponen en peligro la cobertura forestal se suman las causas de carácter indirecto, por ejemplo, las malas políticas económicas, la economía deficiente, corrupción e ilegalidad en el ámbito forestal, la necesidad de tierras, la densidad poblacional, pobreza, inadecuadas decisiones políticas y particularmente la falta de educación ambiental activa y eficiente (Dancé y Sáenz, 2013).

Según Hansen et al. (2021) la pérdida de coberturas boscosas naturales se asocia con el desarrollo de la periferia urbana, vegetación de los bordes del bosque, proximidad a vías de acceso, terrenos públicos, cuerpos de agua y con áreas demográficas.

2.2.2. Deforestación

La “Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)” utiliza 2 parámetros para definir la deforestación; primero, hace mención sobre el “uso de suelo” que refiere al proceso de conversión de suelos forestales a otros tipos de suelos; y, la segunda definición basada en la cantidad de la cubierta vegetal,

sustentando que la deforestación es la pérdida de vegetación por debajo de un 10 % de umbral durante un periodo de largo plazo (Kanninen et al., 2008).

Se han señalado múltiples factores como responsables de la deforestación y la pérdida de hábitats, que pueden ser de origen humano o natural. Las causas naturales son los incendios forestales, las sequías, los animales exóticos, las inundaciones, la superpoblación de animales foráneos y el cambio climático. Entre las causas antrópicas se encuentran la expansión agrícola, la ganadería, la extracción de madera, la minería, la extracción de petróleo, la construcción de presas, el desarrollo de infraestructuras, entre otros (Bodo et al., 2021).

2.2.2.1. Deforestación en el Perú

La pérdida de bosque húmedo amazónico durante el 2021 fue 137 976 ha, además, durante el 2001 – 2021 se perdió en promedio 132 122 ha anualmente y al 2021 el área de bosque húmedo amazónico fue 67 932 915 ha. Durante el 2020 (203 272 ha) se registró la mayor pérdida de cobertura boscosa desde el año 2000 y durante el 2021 (137 976,0 ha) se registró una pérdida del 32,0 % menos con respecto al año 2020 (Figura 1). De un total de 15 departamentos donde se encuentran los bosques húmedos amazónicos, durante el 2021, 14 presentaron una reducción significativa en la pérdida de bosques en relación al 2020: Huánuco (16,0 %), Ucayali (23,0 %), San Martín (35,0 %), Junín (41,0 %) y Loreto (42,9 %). Los cinco departamentos con mayor cobertura boscosa pérdida en el 2021 son: Junín (12 082,0 ha), Huánuco (15 021,0 ha), Loreto (19 829,0 ha), Madre de Dios (23 142,0 ha) y Ucayali (36 306,0 ha) (MINAM, 2022a).

2.2.2.2. Cobertura boscosa perdida

La pérdida de cobertura boscosa es el resultado de inadecuadas gestiones de uso de tierra y de afectaciones generadas por el cambio climático que aumentaron durante las últimas décadas y que se observan a nivel mundial (Snejana, 2022).

2.2.2.3. Cobertura boscosa recuperada

La recuperación de cobertura boscosa luego de una perturbación es una medida importante de la resiliencia de los ecosistemas forestales, y recuperaciones que se desarrollan rápidamente son indicadores de sistemas resilientes (Senf et al., 2019).

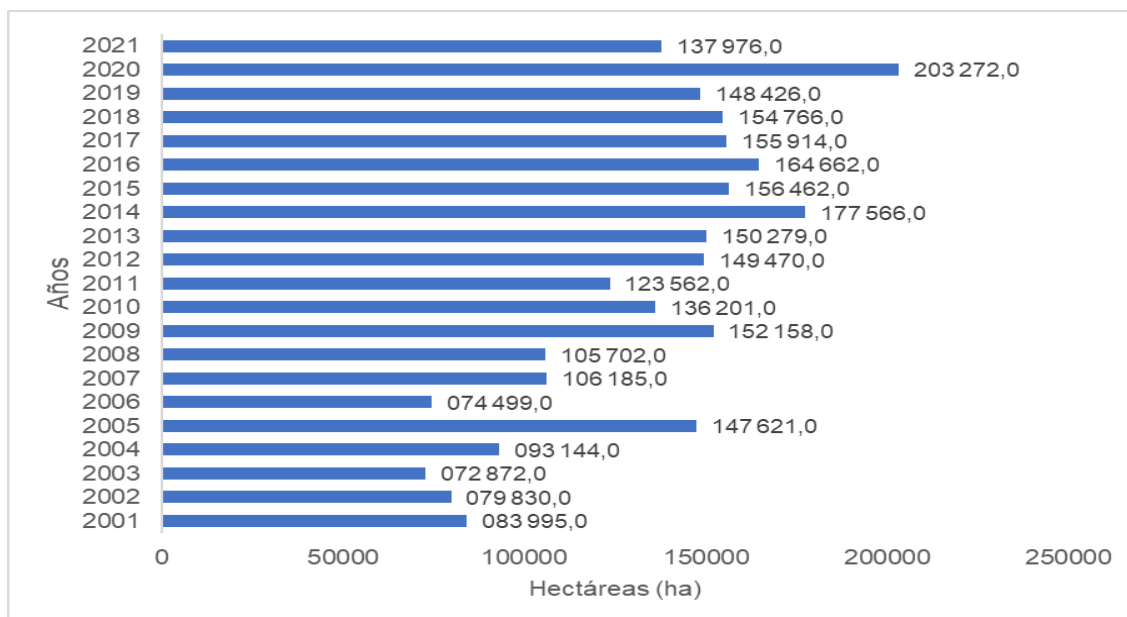


Figura 1

Pérdida de bosque húmedo amazónico durante el 2001 – 2021 (ha).

Nota. Tomado y adaptado de MINAM (2022a)

2.2.3. Teledetección

Es una técnica de utilizar la energía solar o los rayos de energía artificial reflejados desde la superficie terrestre y recibidos por sensores colocados en plataformas especiales, decodificados y analizados por personal calificado para obtener imágenes que reflejen la realidad de dicha superficie. Al mismo tiempo, la energía recibida por el sensor debe almacenarse convenientemente en el satélite o estación receptora para que pueda ser interpretada para una aplicación específica (Chuvienco, 1995).

La teledetección proporciona datos sobre los objetos ubicados en la tierra o próximos a esta y sobre el medio atmosférico a partir de radiaciones emitidas o reflejadas por los objetos, tal información puede ser captada a distancias desde la parte superior mediante datos de imagen y facilita estimar la naturaleza y composición de la atmósfera y la tierra considerando escalas locales a globales, también favorece la evaluación de variaciones mediante análisis de imágenes capturadas en diversos momentos (Read y Torrado, 2009).

2.2.3.1. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es una onda que se auto propaga en el espacio o a través de la materia, y tiene componentes eléctricos y magnéticos que oscilan en fase normalmente (en un ángulo de 90 °) entre sí y en la dirección de propagación de la onda o energía. Dada la frecuencia de esta oscilación, se forma un espectro de radiación EM que contiene radiación RF, MT, THz, infrarroja, visible, ultravioleta, X y gamma (Dervic et al., 2019).

La radiación electromagnética proviene del sol cuando arriba a objetos presentes en el área terrestre, por ejemplo, en las hojas se puede transmitir, absorber y reflejar. La proporción de energía que se transmite se conoce como transmisividad (T), la proporción de energía absorbida es la absorptividad (α) y la proporción de energía que se refleja se conoce como reflectividad o albedo (ρ). La sumatoria de estas tres energías debe ser semejante a los valores y unidad de T , α y ρ , esto depende de las características de los cuerpos, el cual muestra funcionamientos diferentes y genera distintas radiaciones (García, 2006).

2.2.3.2. Espectro electromagnético

Es una energía que se amplía a través de ondas, presenta diferentes longitudes desde 100 Angstroms (rayos X y gamma) hasta superiores a 1 m (televisión y radio). Además, se conoce como espectro electromagnético al conjunto de longitudes de onda, del cual se diferencian una serie de regiones. El espectro visible que difiere desde 0,4 a 0,7 μm se muestra por regiones captadas por la vista del ser humano (García, 2006).

2.2.3.3. Sensores remotos

Se define a un sensor remoto como una herramienta que detecta la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre, normalmente montado en satélites o aeronaves, para obtener información sobre las características de un objeto sin mantener contacto directo con él. Los sistemas de instrumentos remotos están diseñados para registrar la radiación de una o más regiones del espectro electromagnético, cuyos instrumentos empleados para este fin se denominan sensores remotos (Vargas, 1992).

De acuerdo al tipo de energía detectada, los instrumentos de la teledetección se clasifican en sensores pasivos y activos. Los sensores pasivos captan una señal de la naturaleza (el sol) y la refleja sobre el objeto que detecta, estas señales producidas por la radiación solar natural pueden proporcionar informaciones muy ricas acerca de los objetos percibidos (Bravo, 2017). Los sensores activos generan su propia señal que después es medido cuando se refleja en la superficie de la tierra (Horning, 2019).

A continuación, se presenta una serie de instrumentos pasivos y activos montados en plataformas satelitales que se utilizan en estudios ecológicos (Horning, 2019).

Tabla 1*Instrumentos de teledetección basados en satélites activos y pasivos*

Nombre del sensor	Óptico	
	Resolución (m)	Rango de onda (nm)
WorldView-4	0,31-1,23	450-920
IRS Resourcesat-2 LISS-III	23,5	520-1 700
ALOS AVNIR-2	10	420-890
GeoEye-1	0,46-1,84	450-920
Landsat 8 OLI/TIRS	15-100	430-1 251
Suomi-NPP VIIRS	400	410-12 500
MODIS	250-1 000	459-14 385
SPOT 7	1,5-6	450-890
Nombre del sensor	Radar	
	Resolución (cm)	Rango de onda (cm)
Sentinel-1A and 1B	5-100	5,7 (banda C)
RADARSAT-2	3-100	5,6 (banda C)
ENVISAT ASAR	30-1 000	5,7 (banda C)
ALOS-PALSAR-2	0,65-100	23,5 (banda L)

Nota. Tomado y adaptado de Horning (2019)

2.2.4. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales se pueden definir como representaciones del total o de una fracción de la superficie terrestre adquirida a través de satélites artificiales, donde las imágenes presentan diferentes utilidades como la predicción meteorológica, inteligencia militar y cartografía (Xiao et al., 2004). Estas imágenes pueden ser de infrarrojos, de luz visible y de vapor de agua, las imágenes de luz visible muestran el suelo y el cielo desde el espacio exterior en momentos determinados, en cambio, las imágenes de vapor de agua muestran particularmente la humedad ambiental, generalmente en forma de nubes (Dhingra y Kumar, 2019).

Las imágenes de satélite se utilizan principalmente en los sistemas de información geográfica (SIG). Su clasificación es muy útil para la cartografía. Con imágenes de satélite de baja resolución, la intensidad de los píxeles es suficiente para clasificar individualmente cada uno de ellos. Por el contrario, la clasificación de imágenes de alta resolución es más difícil (Gigandet, 2004).

2.2.4.1. Tipo de imágenes satelitales

De acuerdo a la cantidad de bandas y gamma del espectro en donde se realiza la medición de la reflectancia, se cuenta con diversos tipos de imágenes satelitales (Gómez et al., 2013).

Tabla 2*Tipo de imágenes satelitales de acuerdo a bandas de frecuencia*

Tipo	Descripción
Pancromáticas	Son imágenes que se capturan a través de sensores digitales que realizan la medición de la reflectancia de energías en una amplia porción del espectro electromagnético (se denomina bandas a estas partes del espectro). Para aquellos sensores pancromáticos más actuales, una banda única abarca la zona visible y de infrarrojo próximo del espectro. La información pancromática se representa a través de imágenes en negro y blanco.
Multiespectrales	Se capturan a través de sensores digitales que facilitan la medición de la reflectancia en diferentes bandas, es decir, una serie de detectores mide energía roja reflejada en zonas visibles del espectro, en cambio otra cantidad realiza la medición de la energía del infrarrojo cercano. Además, existe la posibilidad que 2 series de detectores cuantifiquen la energía en 2 zonas diferentes de una misma longitud de onda. Estos datos diferentes de reflectancia se mezclan para generar imágenes de color. Este tipo de satélites en la actualidad cuantifican la reflectancia de forma simultánea en una cantidad de bandas diferentes que pueden ir desde 3 a 14.
Hiperespectrales	Sensores espectrales que cuantifican la reflectancia en diversas bandas, con muchas frecuencias. La detección hiperespectral se basa en la teoría de que la cuantificación de reflectancia en varias franjas estrechas del espectro facilita la detección de diferencias y características muy sutiles entre aspectos superficiales, particularmente referente a rocas, suelo y vegetación.

Nota. Tomado y adaptado de Sensores Remotos & GIS (2009)

2.2.4.2. Pre procesamiento de imágenes satelitales

Según Gonzaga (2014) el pre procesamiento de las imágenes satelitales se centra en desarrollar correcciones de las imágenes, cuyo objetivo se fundamenta en eliminar anomalías detectadas, bien sea en su ubicación o radiometría de los píxeles por los que se encuentra conformado.

Cualquiera de las imágenes que se adquieren a partir de sensores remotos, presenta un conjunto de afectaciones geométricas y radiométricas debido a diversos factores, para el caso de las imágenes espaciales, alteraciones más comunes se pueden agrupar en 4 grupos: distorsiones generadas por la atmósfera, distorsiones por los sensores, distorsiones generadas por la rotación terrestre y distorsiones provocadas por la plataforma (Chuvienco, 2008).

Según Hantson et al. (2011), los procedimientos que forman parte del pre procesamiento de imágenes satelitales se describen a continuación:

a) Correcciones geométricas – georreferenciación

Las correcciones geométricas tienen como objetivo la reconstrucción geométrica de las imágenes mediante la adaptación a un sistema de coordenadas relacionado y a una proyección cartográfica determinada. Este tipo de operaciones se conocen como

georreferenciación. Existe una amplia variación de procesos matemáticos que dan solución a esta problemática y los métodos utilizados para implementar a través de algoritmos en las aplicaciones informáticas de la teledetección (Pérez y Muñoz, 2006).

Este procedimiento implica transformar las coordenadas de los píxeles de la segunda imagen satelital a fin de que haya coincidencia precisa con las coordenadas de la primera imagen referenciada. Se desarrolla a través de la conversión polinomial de segundo grado obtenido con una serie de pares de puntos de control de las dos imágenes. Este proceso considera la ubicación de puntos de control, transformación de coordenadas y conversión de los niveles de gris (Ambrosio et al., 2002).

b) Correcciones radiométricas

Este tipo de correcciones tienen como objetivo reestablecer valores de los niveles digitales de las imágenes, realizando una depuración de anomalías en su registro achacable, ya sea a condiciones ambientales de la toma o por defectos en el sistema sensor (Pérez y Muñoz, 2006).

Usualmente, cualquier área que se captura en dos imágenes diferentes (con el mismo sensor) deberían presentar idénticos valores de intensidad. Esto nunca sucede en la práctica ya que existen diversas condiciones de iluminación y atmosféricas, por lo que resulta necesario desarrollar correcciones radiométricas de las imágenes. Se puede realizar la corrección radiométrica relativa transformando niveles basados en el histograma y una corrección absoluta empleando un modelo analítico (Ambrosio et al., 2002).

c) Correcciones atmosféricas

Es un método que se aplica a las imágenes con el fin de que se remueva los efectos de aerosoles y de la radiancia intrínseca que entran en los sensores y se reflejan en las imágenes, debido a procesos de interacción que existe entre los sensores y el medio atmosférico. Este proceso facilita la mejora significativa de la calidad visual de las imágenes y favorece la remoción del componente intruso que proviene de la atmósfera (Aguilar-Arias et al., 2015).

2.2.5. Firma espectral

Se define a la firma espectral como el componente desigual que muestra la radiación emitida (emitancia) o reflejada (reflectancia) desde algún objeto o superficie terrestre en los diferentes rasgos del espectro electromagnético. Para graficar este comportamiento se dispone en el eje X la longitud de onda λ y en el eje Y los datos de reflectancia (%).

Al unir los puntos con líneas continuas se genera una representación bidimensional de la firma espectral (Figura 2) (Hernández y Montaner, 2007).

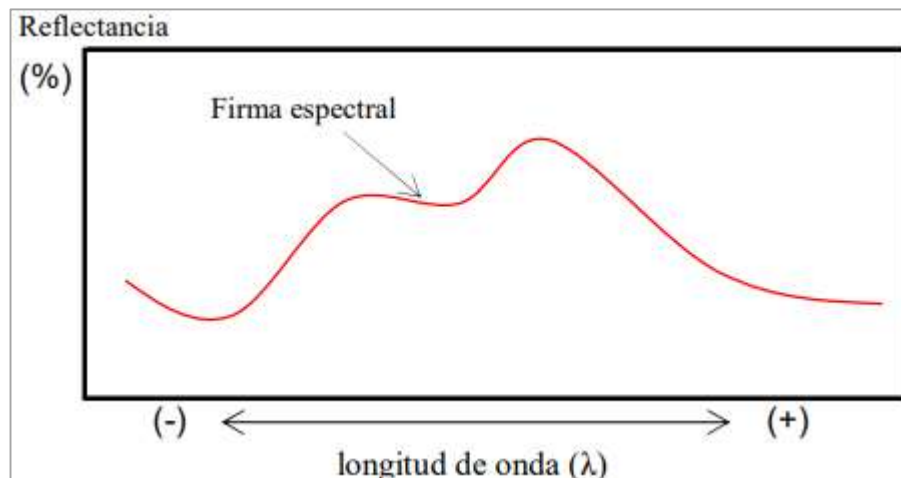


Figura 1

Representación gráfica de firma espectral una cobertura de suelo cualquiera.

Nota. El % indicada reflectividad. Tomado de Hernández y Montaner (2007).

2.2.6. Análisis de la vegetación en el espectro electromagnético

La clorofila absorbe enormemente energía a través de las bandas centradas en 0,45 y 0,67 μm . Por tal motivo, nuestra vista percibe de color verde la vegetación, por la gran absorción en rojo y azul en las hojas, y verde por la reflexión. Al no estar sano la vegetación, la clorofila tiende a disminuir y resulta un aumento de la reflectancia espectral en el color rojo, por lo cual se observa en tono amarillento a las hojas (mezcla de rojo y verde). En la siguiente figura se muestra la reflectancia espectral típica de hojas vivas (Bravo, 2017).



Figura 2

Reflectancia espectral de una hoja viva.

Nota. Tomado de Bravo (2017)

Las características de la asignatura espectral de una vegetación sana presentan claros comportamientos entre el infrarrojo cercano (NIR) (0,7 y 1,1 μm) y la banda roja (RED) (0,6 y 0,7 μm). Contrastes claros entre el infrarrojo cercano y la región roja favorecen estimar si la cobertura vegetal es sana, en el NIR la reflectividad suele ser menor

incrementando de forma paralela en el RED (al haber menos absorción de la clorofila), por lo cual el contraste será menos en ambas capas (Chuvienco, 2008).

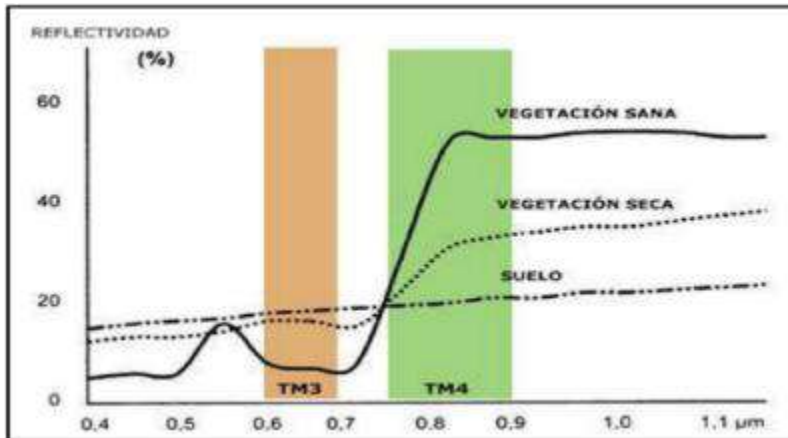


Figura 3

Contraste espectral de una vegetación sana entre bandas NIR y RED del espectro.

Nota. Tomado de Bravo (2017)

2.2.7. Clasificación digital de las imágenes satelitales

Para la mayoría de usuarios la clasificación digital es la fase final del tratamiento digital de las imágenes satelitales, en esta etapa se convierten a imágenes de tipo vector lo que favorece la cuantificación de las áreas. Estos resultados que se obtienen de la clasificación muestran la calidad final del trabajo. A continuación, se definen los tipos de clasificación digital de las imágenes (Chuvienco, 1995):

2.2.7.1. Clasificación supervisada

Comienza con el conocimiento que se adquiere de la superficie a evaluar, ya sea por trabajo de campo o por el conocimiento de la superficie, esto favorece la estimación de zonas pilotos en el área de estudio, los cuales se caracterizan por representar categorías en mostradas en la leyenda. El usuario ingresa las coordenadas y luego se atribuyen categorías estimadas por el programa, posteriormente con las coordenadas que se introducen se procede a verificar en campo.

2.2.7.2. Clasificación no supervisada

Este tipo de clasificación define categorías espectrales presentes en las imágenes, por lo cual no es pertinente visitar o conocer el área de estudio, esto permite a los seres humanos intervenir solo con la interpretación.

2.2.7.3. Clasificación mixta

Para reducir inconvenientes de la clasificación supervisada y no supervisada, se propusieron alternativas que de alguna manera los combinan. Estos métodos se agrupan en dos bloques: a) Se encuentran los trabajos que utilizan un análisis supervisado para permitir al supervisor ser guiado, esto facilita el uso de los

conocimientos del interprete para orientar búsquedas de los conjuntos espectrales homogéneos. b) Se puede generar una combinación del análisis supervisado y no supervisado debido a la facilidad de aplicarlos de manera separa en la misma imagen, para después resumir medidas que se extraen por ambos, se asume que las categorías inferidas por ambas metodologías se pueden complementar mutuamente, ganando de esta forma en significado informacional y espectral las clases obtenidas.

2.2.8. Validación de datos

2.2.8.1. Matriz de confusión

También se lo conoce como matriz de contingencia o matriz de error, es un instrumento o herramienta que facilita la evaluación de la precisión de una determinada clasificación. Se encuentra conformada por columnas y filas, en las filas se ordenan las unidades cartográficas (clases o unidades del mapa) y en las columnas son ordenados las clases reales (verdad-terreno) (Sánchez, 2016).

2.2.8.2. Índice kappa

Da a conocer la manera de medición de la exactitud de un determinado mapa temático, comparando la concordancia que se observa en una serie de datos, en referencia a lo que podría suceder al azar. Se calculan en tablas de cualquier dimensión, siempre que sea contrastado con dos observadores (López y Pita, 2001).

Tabla 3

Valores del índice Kappa

Valor de K	Fuerza de la concordancia
0,00	Pobre
0,01 – 0,20	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Considerada
0,81 – 1,00	Casi perfecta

Nota. Tomado de MINAM (2014)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

3.1.1. Contexto de la investigación

a. Ubicación geográfica

La Zona de Conservación y Recuperación de Ecosistemas (ZoCRE) “Morro de Calzada” se ubica en los distritos de Calzada y Yantalo, de la provincia de Moyobamba, departamento de San Martín. Se localiza al noroeste del ámbito urbano del distrito de Calzada y al sureste del área urbana del distrito de Yantaló. La ZoCRE Morro de Calzada cuenta con un total de 1 247,60 ha, de los cuales 852,57 y 395,03 ha se ubican en el distrito de Calzada y Yantaló, respectivamente (ver Anexo 1).

b. Ubicación política

- Área de estudio : ZoCRE Morro de Calzada.
- Distrito : Calzada y Yantaló.
- Provincia : Moyobamba.
- Departamento : San Martín.

3.1.2. Periodo de ejecución

El periodo de ejecución del proyecto de investigación fue desde el 28 – 09 – 2023 al 27 – 05 – 2024.

3.1.3. Autorizaciones y permisos

El acceso a la zona de estudio no requirió de permisos o autorizaciones formales, al tratarse de un área de libre ingreso.

3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

Se consideraron todas las medidas de bioseguridad para el trabajo de validación en campo, por ejemplo, el uso de casco de seguridad, camisa manga larga, chaleco, guantes y zapatos de seguridad.

Asimismo, se consideraron medidas de control ambiental como el uso de bolsas plásticas para la recolección temporal de residuos sólidos, lo cual se evitó que sean arrojados al suelo.

3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

El investigador refiere que el desarrollo del proyecto ha respetado una serie de principios éticos internacionales, los cuales deben ser aplicados para realizar investigaciones. Entre los principios aplicados se tiene a la justicia, respeto a las personas y ecosistemas, integridad, beneficencia, confidencialidad y transparencia.

3.2. Sistema de variables

3.2.1. Variables principales

- Variable de estudio: Cobertura boscosa perdida y recuperada.

Tabla 4

Descripción de variables por objetivo específico

Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Objetivo específico № 1: Caracterizar la cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023.			
Cobertura boscosa y no boscosa	- Superficie boscosa.	- Procesamiento y tratamiento de imágenes satelitales, mapas temáticos.	- ha
	- Superficie no boscosa.		- ha
Objetivo específico № 2: Evaluar la cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023.			
Cobertura boscosa perdida y recuperada	- Superficie boscosa perdida.	- Procedimiento indirecto mediante matriz transicional a partir de información obtenida con imágenes satelitales.	- ha; %
	- Superficie boscosa recuperada.	- Mapas temáticos.	- ha; %
Objetivo específico № 3: Determinar la tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023.			
Tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa	- Tasa de deforestación.	- Procedimiento indirecto mediante ecuaciones a partir de información obtenida con imágenes satelitales.	- %
	- Tasa de ganancia.		- %
	- Deforestación anual promedio.		- ha/año
Objetivo específico № 4: Analizar la exactitud del mapa de deforestación del último periodo de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada.			
Exactitud del mapa de deforestación	- Índice de Kappa.	- Procedimiento indirecto mediante matriz de confusión a partir de información obtenida con imágenes satelitales.	- Pobre (0,00)
		- Procedimiento directo con ficha de recolección de datos para validar puntos de verificación.	- Leve (0,01 – 0,20) - Aceptable (0,21 – 0,40) - Moderada (0,41 – 0,60) - Considerada (0,61 – 0,80) - Casi perfecta (0,81 – 1,00)

3.3. Procedimientos de la investigación

3.3.1. Diseño de la investigación:

Básica, ya que el estudio generó conocimiento científico relevante acerca de la cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada, usando imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023. Según Sánchez y Reyes (2006) la investigación básica tiene como objetivo encontrar nuevos campos y conocimientos de estudio sin centrarse en objetivos prácticos específicos e inmediatos.

Nivel de investigación: Descriptivo, debido a que el estudio caracterizó la cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada, a partir de la determinación de coberturas boscosas y no boscosas mediante imágenes satelitales de los años 2001, 2007, 2014, 2019 y 2023. Sánchez y Reyes (2006) manifiestan que este nivel de estudio se centra en caracterizar fenómenos y hechos estableciendo estructuras y comportamientos.

Población: En el presente estudio la población estuvo constituida por 1 247,60 ha de superficie que tiene la ZoCRE Morro de Calzada.

Muestra: Por su parte, la muestra fue la misma población, es decir, 1 247,60 ha debido a que el tratamiento de las imágenes satelitales se desarrolló en toda la superficie de la ZoCRE Morro de Calzada.

El muestreo fue por conveniencia. Según Otzen y Manterola (2017) este tipo de muestreo “permite seleccionar aquellos casos accesibles que acepten ser incluidos. Esta, fundamentado en la conveniente accesibilidad y proximidad de los sujetos para el investigador” (p. 4).

La investigación presenta un diseño no experimental, de tipo descriptivo. Según Hernández et al. (2014) este tipo de diseño de estudio muestra el siguiente esquema: Obtención de información in-situ y descripción de los sucesos o eventos dados en un determinado espacio, en un tiempo único.

M - - - - - > O

Donde:

M: Cobertura boscosa y no boscosa en el área de la ZoCRE Morro de Calzada.

O: Cobertura boscosa perdida y recuperada.

Los resultados se presentan mediante tablas y figuras, los cuales se elaboraron con el programa Excel. Asimismo, se presentan en mapas temáticos que se elaboraron con el programa ArcGIS 10.8.

Se utilizó la estadística descriptiva para procesar y analizar datos obtenidos del tratamiento y procesamiento de imágenes satelitales a través de un análisis multitemporal con el programa ArcGIS 10.8. El programa estadístico utilizado fue Excel.

3.3.2. Caracterización de la cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023

a. Actividades y tareas

- Delimitación de la zona de estudio.
- Definición y selección de imágenes satelitales del área de estudio.
- Combinación de las imágenes satelitales del área de estudio.
- Procesamiento de las imágenes satelitales.
- Corrección atmosférica y geométrica de las imágenes satelitales.
- Clasificación de las imágenes satelitales y elaboración de mapas temáticos.
- Procesamiento y análisis de resultados.

b. Descripción de los procedimientos

Delimitación de la zona de estudio

- Se utilizó la información cartográfica del “Gobierno Regional de San Martín (GRSM)” para delimitar la ZoCRE Morro de Calzada como la zona de estudio, esta área se encuentra en los distritos de Calzada y Yantalo. Se utilizó el software ArcGIS 10.8. con herramientas como proyección y extracción.

Definición y selección de imágenes satelitales del área de estudio

- Se definió y seleccionó en la plataforma “USGS EarthExplorer” las imágenes satelitales del año 2001, 2007, 2014, 2019 y 2023. Se seleccionaron imágenes Landsat 5 (año 2001 y 2007), Landsat 8 (año 2014) y Sentinel 2 L2A (año 2019 y 2023) (Tabla 5).

Tabla 5

Características de imágenes satelitales utilizados en los años de estudio

Año	Satélite	Fecha	Descarga
2001	Landsat 5	25/08/2001	USGS
2007	Landsat 5	30/01/2007	USGS
2014	Landsat 8	30/09/2014	USGS
2019	Sentinel 2 L2A	9/04/2019	USGS
2023	Sentinel 2 L2A	26/08/2023	USGS

Combinación de las imágenes satelitales del área de estudio

- Se tomaron las imágenes y se procedió a combinar las bandas 3 – 2 – 1, con el objetivo de observar la zona de interés previo al procesamiento de las imágenes. El color natural presentó aspectos semejantes a lo evidenciado a través de fotografía normales, ya que la combinación de las bandas de tonalidad natural se aproxima a la noción de la vista de los seres humanos, por lo cual, los colores marrones claros representaron superficies deforestadas y los colores verdes pusieron en evidencia la vegetación.

Procesamiento de las imágenes satelitales

- Se utilizó el programa ArcGIS 10.8 con el fin de desarrollar correcciones radiométricas que se describen a continuación:

a. Corrección radiométrica de las imágenes de satélite

- El objetivo de este proceso fue desarrollar la calibración de datos de los píxeles a través de la conversión de números digitales (ND) a unidades de radiancia. Los procedimientos fueron los siguientes:

1. Conversión de ND a radiancia

La radiancia se mide a través de los sensores, para el caso de imágenes Landsat se cuantifica la radiancia espectral del sensor (L_{λ}) mediante “[vatios/ (m² * ster * μm)]”. El valor de L_{λ} se calculó con las ecuaciones 1 y 2: AL y ML expresan el factor aditivo y multiplicativo de reescalamiento particular de las bandas, respectivamente, esto proviene de la data (“RADIANCE_MULT_BAND_X”, donde el número de la banda es “X”); Q_{cal} expresa los valores del píxel calibrado y discretizado (valores digitales) (1) $L_{MIN\lambda}$ y $L_{MAX\lambda}$ expresan la radiancia espectral mínima y máxima que corresponden a la “banda Q_{calx} ”, respectivamente; Q_{calmin} y Q_{calmax} expresan los valores mínimos (2) máximos de los píxeles, el valor mínimo es 1 y se localiza en el fichero de la data de las imágenes Landsat (MTL.txt) y el valor máximo depende del grado de resolución radiométrica, por ejemplo, 8 bits representa 255. Las ecuaciones se muestran a continuación (Ihlen, 2019):

$$L_{\lambda} = ML * Q_{cal} + AL$$

$$L_{\lambda} = (L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda} / Q_{calmax} - Q_{calmin}) * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{MIN\lambda}$$

2. Estimación de la reflectancia al tope de la atmósfera (TOA)

El valor de reflectancia al tope de la atmósfera de los sensores (P_{λ}) se determinó mediante la ecuación 3: L_{λ} expresa a la radiancia espectral del sensor a evaluar; d

expresa a la longitud de la tierra al sol registrado en el instante de captura de las imágenes, se representa a través de unidades “Astronómicas” determinado considerando el día juliano; $ESUN_{\lambda}$ expresa a la irradiación promedio solar exoatmosférica; Θ_{ZE} expresa el ángulo zenital del sol en grados que es igual a $90 - \Theta_{SE}$ (ángulo local de ascenso solar obtenido de la metadata “SUN ELEVATION” (NASA, 2011).

$$P_{\lambda} = (\pi * L_{\lambda} * d^2) / (ESUN_{\lambda} * \cos(\Theta_{ZE}))$$

El valor “d” difiere entre 0,983 y 1,017 unidades astronómicas a lo largo de los años y para determinarlo se utilizó la ecuación 4 (Chuvieco, 2008).

$$d = 1 - 0,0167 * \cos(2 * \pi * (\text{Día juliano} - 3) / 365) \quad (4)$$

Se utilizó la ecuación 5 para estimar el valor de irradiancia promedio del sol exoatmosférico (“ $ESUN_{\lambda}$ (W/(m²*μm))”). Los valores de REFLECTANCE_MAXIMUM y RADIANCE_MAXIMUM se muestran en la data de las imágenes satelitales (Ihlen, 2019).

$$ESUN_{\lambda} = \frac{\pi * (d * d) * RADIANCE_MAXIMUM}{REFLECTANCE_MAXIMUM} \quad (5)$$

Para que se convierta el ángulo de elevación solar local (Θ_{SE}° o SUN_ELEVATION) de grados a radianes se utilizó la ecuación 6. El valor de Θ_{SE} se obtiene de la metadata de la imagen (Bravo, 2017).

$$(\Theta_{SE}^{\circ}) * \pi / 180 \quad (6)$$

Corrección atmosférica y geométrica de las imágenes satelitales

- La corrección atmosférica se realizó para las imágenes Landsat 5 y 8 a través de dos procedimientos: estimación del efecto bruma y determinación de la reflectancia de superficie.

1. Estimación del efecto bruma (L_p)

Para determinar el valor L_p se utilizó la ecuación 7: AL y ML expresan la constante aditiva conocido como sesgo (“Radiance_add_band_x”) y el factor multiplicativo conocido como ganancia (“Radiance_mult_band_x”), respectivamente; NDmin expresa el valor digital mínimo; d es la longitud entre el sol y la tierra representado en unidades astronómicas; Θ_{SE} expresa el ángulo local de elevación solar proporcionado en la metadata; $ESUN_{\lambda}$ expresa la irradiancia promedio del sol exoatmosférico (Sobrino et al., 2004).

(7)

$$L_p = ML + ND_{min} + AL - \frac{0,01 * ESUN\lambda * SEN(\Theta_{SE})}{\pi * (d * d)}$$

2. Estimación de la reflectancia de la superficie (Ps)

Para determinar el valor Ps se utilizó la ecuación 8: Lp expresa el efecto bruma; Lλ expresa la reflectancia espectral de ingreso en el sensor; Θ_{SE} expresa el ángulo local de elevación solar proporcionado en la metadata; d es la longitud entre el sol y la tierra representado en unidades astronómicas; ESUNλ expresa la irradiancia promedio del sol exoatmosférico (Moran et al., 1992).

$$P_s = [\pi * (L\lambda - L_p) * d^2] / (ESUN\lambda * SEN(\theta_{SE})) \quad (8)$$

- La corrección geométrica de las imágenes satelitales porque usualmente existen partículas que son de menos tamaño en relación a la longitud de onda generado por la radiación, lo cual está asociado a la radiación generada por partículas de los gases atmosféricos.

Clasificación de las imágenes satelitales y elaboración de mapas temáticos

- Se clasificó las imágenes satelitales en dos criterios: superficie boscosa y superficie no boscosa. El primer criterio representó a los bosques primarios y secundarios de la ZoCRE Morro de Calzada y el segundo criterio a las superficies sin cubierta vegetal, donde además se consideró a las áreas con cuerpos de agua y aquellas áreas donde se construyeron diferentes infraestructuras. Se realizó la clasificación en dos criterios de acuerdo a los fines y objetivos del presente estudio.

- Se elaboraron mapas temáticos de superficie boscosa y no boscosa de cada año en el programa ArcGIS 10.8. Primero, se convirtió de formato ráster a vector (shape) mediante la herramienta "Raster to polygon" y luego se proyectó a coordenadas UTM 1984 zona 18 S.

c. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se procesó y analizó imágenes satelitales de los años 2001, 2007, 2014, 2019 y 2023 mediante el programa ArcGIS 10.8 con el objetivo de determinar superficies boscosas y no boscosas. Asimismo, para procesar y analizar los resultados obtenidos se utilizó la estadística descriptiva con el fin de elaborar tablas y figuras, este proceso se realizó con el programa estadístico Excel.

3.3.3. Evaluación de la cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023

a. Actividades y tareas

- Sistematización de resultados.
- Evaluación de la cobertura boscosa perdida y recuperada.
- Procesamiento y análisis de datos.

b. Descripción de los procedimientos

Sistematización de resultados

- Se sistematizó los resultados de superficie boscosa del primer objetivo según años y periodos de estudio, con el fin de facilitar la evaluación de la cobertura boscosa perdida y recuperada durante el 2001 – 2023.

Evaluación de la cobertura boscosa perdida y recuperada

- Se realizó una matriz de doble entrada denominada “matriz de transición” con la base de datos obtenidos en la clasificación de bosque y no bosque. Este proceso se realizó en el programa ArcGIS 10.8 usando la herramienta “Intersect” ubicado en la caja de herramientas del programa “ArcTool box > Analysis Tools > Overlay > Intersect”. Esta herramienta facilita el cálculo de la intersección o unión que vincula geoméricamente las características de la información de entrada, los cuales a la vez se ubican uno sobre otro y se genera superposición de todas las clases o capas de datos de salida, en otras palabras, toma los shapefiles de dos años diferentes, los superpone y el resultado representa a la entidad de salida, con lo cual se elaboran mapas temáticos de cada periodo de estudio (2001 – 2007, 2007 – 2014, 2014 – 2019, 2019 – 2023 y 2001 – 2023). La matriz transicional utiliza presenta el siguiente esquema:

Tabla 6

Esquema de matriz transicional de cambio de cobertura

Clasificación / ponderación	Bosque		No bosque	
	1	2	1	2
Bosque	10	11	12	13
No bosque	20	21	22	23

- Los valores 11 y 22 mostrados en la tabla representan que no hubo transición de la cobertura, es decir, se mantuvo en bosque y no bosque, en cambio, resultados con valores 12 indicaron que el bosque se convirtió en no bosque y el valor 21 indicó que la superficie no bosque se convirtió en bosque durante el periodo de estudio fijado. Este proceso favoreció la determinación de cobertura boscosa perdida y recuperada por cada periodo de estudio y durante todo el 2001 al 2023.

c. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se realizó el análisis de la matriz de transición en el programa ArcGIS 10.8. Además, para procesar y analizar los resultados obtenidos de la matriz se utilizó el programa Excel.

3.3.4. Determinación de la tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023

a. Actividades y tareas

- Estimación de la tasa de deforestación.
- Estimación de la deforestación anual promedio.
- Procesamiento y análisis de datos.

b. Descripción de los procedimientos

Determinación de la tasa de deforestación

- La tasa de deforestación (r) se determinó utilizando la ecuación 9: t_1 y t_2 representan al periodo inicial y final, respectivamente; A_1 y A_2 representan a la superficie boscosa en el periodo inicial y final, respectivamente. Esta ecuación de índice de deforestación fue propuesta por la FAO en el año 1995 (Puyravaud, 2003) y fue utilizada por Quezada et al. (2022):

$$r = \frac{1}{(t_2 - t_1)} * \text{Ln} \left(\frac{A_2}{A_1} \right) * 100 \quad (9)$$

Estimación de la deforestación anual promedio

- Para estimar la deforestación anual promedio (R) se utilizó la ecuación 10: t_1 y t_2 representan al periodo inicial y final, respectivamente; A_1 y A_2 representan a la superficie boscosa en el periodo inicial y final, respectivamente. La ecuación fue desarrollada por Puyravaud (2003):

$$R = \frac{A_1 - A_2}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

c. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se utilizó la estadística descriptiva para determinar la tasa de deforestación y ganancia, además, para elaborar tablas y figuras se empleó el programa Excel.

3.3.5. Análisis de la exactitud del mapa de deforestación del último periodo de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada

a. Actividades y tareas

- Determinación de la exactitud del mapa de deforestación del año 2023.

- Procesamiento y análisis de datos.

b. Descripción de los procedimientos

Determinación de la exactitud del mapa de deforestación del año 2023

- Se determinó 70 puntos de verificación que se distribuyeron aleatoriamente dentro del área de la ZoCRE Morro de Calzada, para desarrollar este proceso se utilizó herramientas del programa ArcGIS 10.8: “Spatial Analyst Tools” > “Segmentation and Classification” > “Create Accuracy Assessment Points”. Los puntos de muestreo se verificaron en campo utilizando un GPS y una ficha de registro de datos (ver Anexo 4) donde se indicó si los puntos verificados coincidieron con los criterios del mapa elaborado en gabinete.

- Con la información recopilada en campo se realizó la matriz de confusión, considerando en la parte de las filas la interpretación visual de los criterios clasificados en el mapa de deforestación, en las columnas de la matriz se consideró los datos del trabajo de campo, la diagonal refiere el número de datos que se acertaron en campo en referencia al mapa de deforestación y la confiabilidad del trabajo de gabinete se representó por la asociación entre la cantidad de puntos consignados de forma correcta y la totalidad de puntos que se verificaron. Además, la matriz de confusión elaborada permitió obtener información como clases bien estimadas (A1 y B2), total de clases (X+Y = R+S = M), exactitud del productor (EP1 = A1/R) y exactitud del usuario (EU1 = A1/X) (Tabla 7).

Tabla 7

Matriz de confusión

Clases	Bosque	No bosque	Total	Exact. del usuario
Bosque	A1	A2	X	EU1
No bosque	B1	B2	Y	EU2
Total	R	S	M	
Exact. del productor	EP1	EP2		P ₀

Nota. Tomado y adaptado de MINAM (2014).

- Para estimar la exactitud de la clasificación del mapa se utilizó el índice de Kappa (K), con ello se logró diferenciar la exactitud obtenida en el mapa de deforestación elaborado en gabinete y la verificación de campo. Se empleó la ecuación 11: P₀ expresó la cantidad de aciertos sobre el total de clases (A1 + B2)/M; P_e expresó el valor calculado de la matriz ((EP1 * EU1) + (EP2 * EU2))/M² (MINAM, 2014):

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (11)$$

- Finalmente, con el fin de determinar el nivel de concordancia entre la clasificación de gabinete y la clasificación en campo, se comparó el índice de capa obtenido con los valores mostrados en la Tabla 3.

c. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se utilizó la estadística descriptiva para determinar la exactitud del mapa de deforestación, además, para elaborar tablas y figuras se empleó el programa Excel.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023

El tratamiento y análisis de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada permitió caracterizar la superficie boscosa y no boscosa durante el 2001 al 2023, cuyos resultados por años estudiados se muestran a continuación:

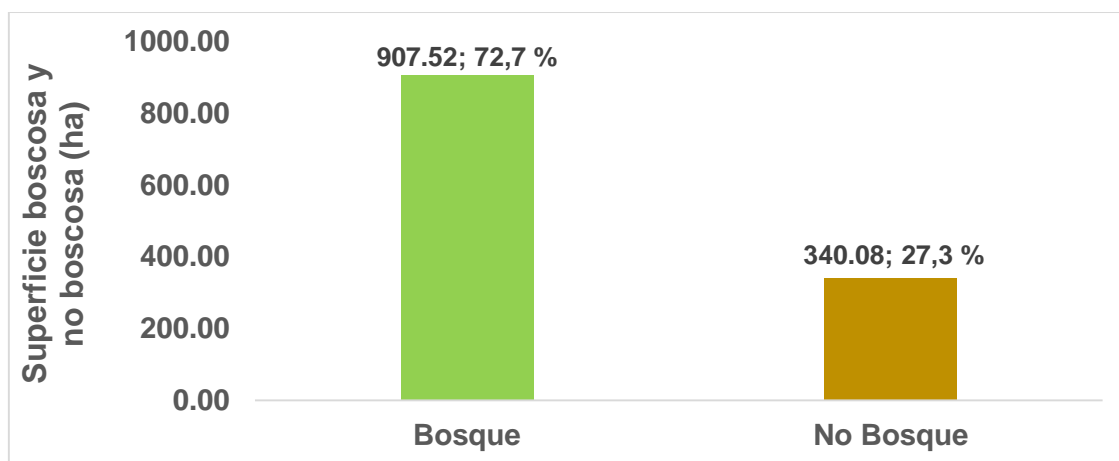


Figura 4

Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2001.

En el año de estudio 2001, la superficie boscosa (907,52 ha) fue mayor que la superficie no boscosa (340,08 ha) en 567,44 ha. Del total de área de la ZoCRE Morro de Calzada la superficie boscosa representó el 72,7 % y la no boscosa el 27,3 %, existiendo entre ambas áreas una diferencia porcentual del 45,5 %.

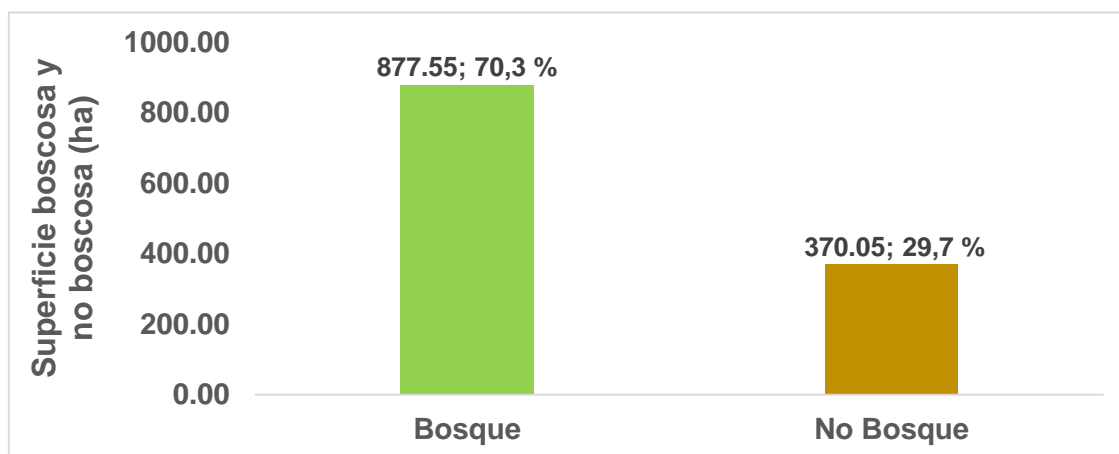


Figura 5

Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2007.

En el año 2007, la superficie boscosa (877,55 ha) también fue mayor que la no boscosa (370,05 ha) en 507,50 ha. Del total de área de la ZoCRE Morro de Calzada la superficie boscosa representó el 70,3 % y la no boscosa el 29,7 %, existiendo una diferencia de 40,7 %. En relación al año 2001 se produjo una disminución y aumento de 2,4 % del área de bosque y no bosque, respectivamente.

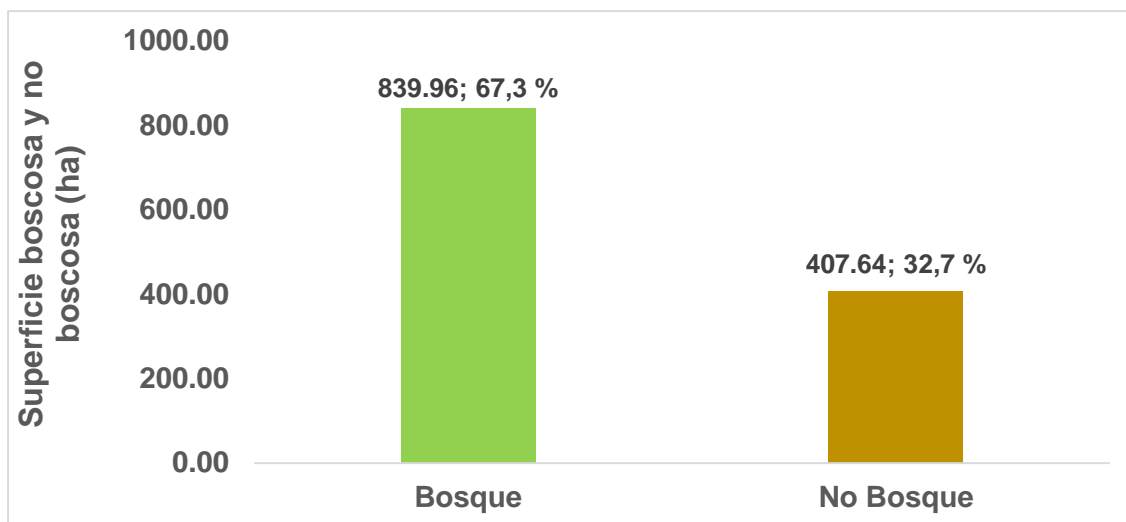


Figura 6

Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2014.

En el año de estudio 2014, la superficie boscosa (839,96 ha) también fue mayor que la no boscosa (407,64 ha) en 432,32 ha. Del total de área de la ZoCRE Morro de Calzada la superficie boscosa representó el 67,3 % y la no boscosa el 32,7 %, existiendo una diferencia de 34,7 %. En relación al año 2007 se produjo una disminución y aumento de 3,0 % del área de bosque y no bosque, respectivamente.

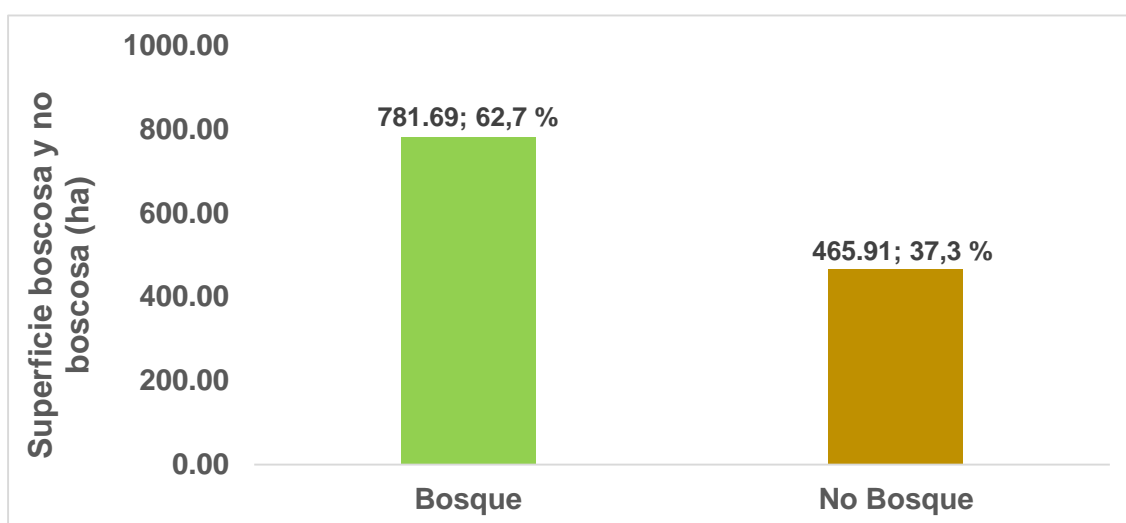


Figura 7

Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2019.

En el año de estudio 2019, la superficie boscosa (781,69 ha) también fue mayor que la no boscosa (465,91 ha) en 315,78 ha. Del total de área de la ZoCRE Morro de Calzada la superficie boscosa representó el 62,7 % y la no boscosa el 37,3 %, existiendo una diferencia de 25,3 %. En relación al año 2014 se produjo una disminución y aumento de 4,7 % del área de bosque y no bosque, respectivamente.

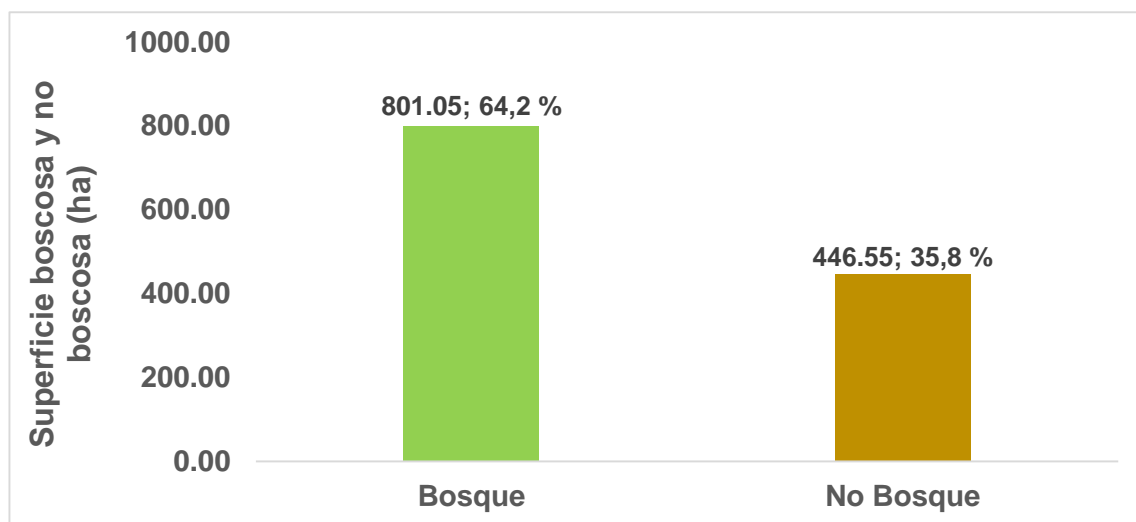


Figura 9

Superficie boscosa y no boscosa durante en el año 2023.

En el año 2023, la superficie boscosa (801,05 ha) también fue mayor que la no boscosa (446,65 ha) en 354,50 ha. Del total de área de la ZoCRE Morro de Calzada la superficie boscosa representó el 64,2 % y la no boscosa el 35,8 %, existiendo entre ambas áreas una diferencia porcentual del 28,4 %. En relación al año 2019 se produjo un aumento y disminución de 1,6 % del área de bosque y no bosque, respectivamente.

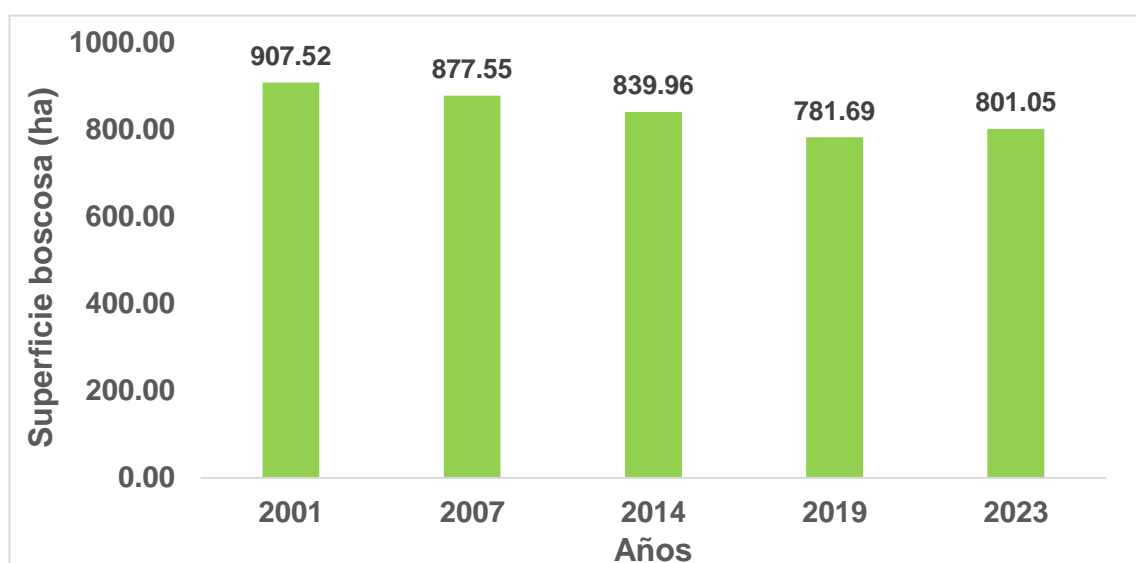


Figura 8

Superficie boscosa durante el periodo 2001 – 2023.

Se observa que durante el periodo 2001 – 2023, la ZoCRE Morro de Calzada registró la mayor superficie boscosa en el año 2001 (907,52 ha) y la menor cobertura boscosa en el 2019 (781,69 ha). Asimismo, la superficie boscosa se redujo hasta el año 2019, a partir del cual aumentó en 19,36 ha hasta en el último año de estudio. Además, la mayor reducción de superficie boscosa se registró durante 2014 – 2019 (4,7 %) y la menor reducción entre el 2001 – 2007 (2,4 %), en tanto, entre el 2001 – 2023 la cobertura boscosa se redujo en 8,5 % (106,47 ha).

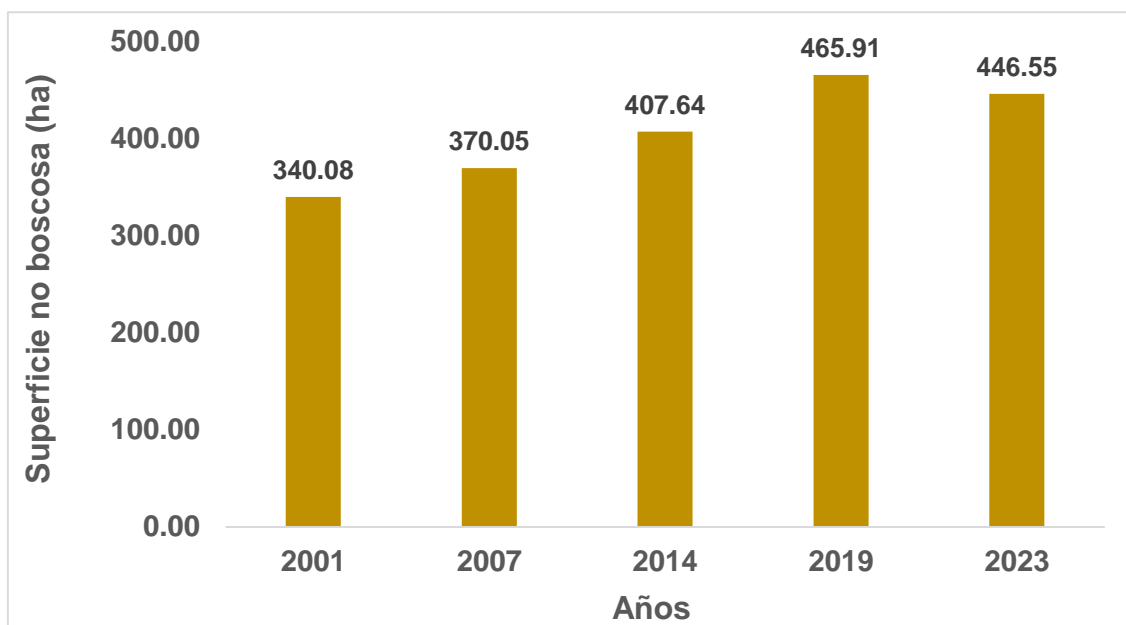


Figura 9
Superficie no boscosa durante el periodo 2001 – 2023.

Se observa que durante el periodo 2001 – 2023, la ZoCRE Morro de Calzada registró la menor superficie no boscosa en el año 2001 (340,08 ha) y la mayor área en el 2019 (465,91 ha). Asimismo, la cobertura no boscosa aumentó hasta el año 2019 y luego disminuyó en 19,36 ha hasta el año 2023. Además, se registró mayor incremento de área no boscosa durante el 2014 – 2019 (4,7 %) y menor superficie entre 2001 – 2007 (1,4 %), en tanto, entre el 2001 – 2023 la cobertura no boscosa aumentó en 8,5 % (106,47 ha).

Se determinó que en la ZoCRE Morro de Calzada la superficie boscosa se redujo en 8,5 % (106,47 ha) durante los últimos 23 años (2001 – 2023), además, durante el 2014 – 2019 la superficie boscosa registró la mayor reducción de 4,7 %. Tariq et al. (2023) determinaron en la provincia de Khyber Pakhtun Khwa (KPK) de Pakistán que la cobertura forestal disminuyó en 0,8 % durante 10 años (1990 a 2010); por su parte, Miranda-Castro et al. (2022) estimaron que durante 32 años (1986 a 2018) la cobertura boscosa de *P. officinalis* se redujo alrededor del 50,0 % en el ANP el santuario de fauna

y flora Corchal "El Mono Hernández". Como se observa, existe diferencia entre los resultados presentados, lo cual se debe a que la pérdida de cobertura boscosa está sujeta a una serie de factores, por ejemplo, expansión agrícola, intensificación de la deforestación, tierras de producción ilegales, incendios forestales (Thien et al., 2023) e incremento de áreas urbanas (Zhou et al., 2017).

Asimismo, se ha determinado que en la ZoCRE Morro de Calzada la superficie no boscosa aumentó en 8,5 % (106,47 ha) durante los últimos 23 años (2001 – 2023) y durante el 2014 – 2019 se registró el mayor incremento de 4,7 % de área no boscosa. Al respecto, Cortez (2021) determinó que en la subcuenca Gera la cobertura no boscosa aumentó en 23,57 % durante 13 años (2007 a 2019), asimismo, Jimenez (2023) determinó que durante 13 años de estudio (2008 a 2020) la superficie no boscosa de la microcuenca Juninguillo aumentó en 31,93 %. La cobertura no boscosa que se incrementó en la ZoCRE Morro de Calzada durante 23 años es inferior a lo determinado por los mencionados autores en 13 años, esto se debe principalmente a que en la zona de estudio no se identificó extensión de áreas urbanas o rurales que pudieron incrementar el área no boscosa, además, se asume a que la intensidad de la deforestación y expansión agrícola fue menor al considerarse la zona de estudio como un atractivo turístico natural y una ZoCRE a partir del 2011.

4.2. Cobertura boscosa perdida y recuperada en la ZoCRE Morro de Calzada a través del uso de imágenes satelitales durante el periodo 2001 – 2023

A partir de la matriz transicional de cambio de cobertura se ha determinado la superficie boscosa perdida y recuperada durante los últimos 23 años y en cada periodo estudiado, los resultados se presentan a continuación:

Tabla 8

Matriz transicional de cambio de cobertura (ha) en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023

Cambio de cobertura	Periodo de estudio				
	2001-2007	2007-2014	2014-2019	2019-2023	2001-2023
Bosque sin cambio (ha)	789,21	797,88	646,12	658,10	720,43
De bosque a no bosque (ha)	118,08	78,62	191,35	124,52	187,26
De no bosque a bosque (ha)	88,20	41,89	136,80	143,71	80,57
No bosque sin cambio (ha)	252,11	329,21	273,33	321,27	259,34
Total	1 247,60	1 247,60	1 247,60	1 247,60	1 247,60

Se observa que, la mayor superficie boscosa conservada representó el 63,26 % en el periodo 2007 – 2014 (797,88 ha) y la menor área expresó el 51,79 % entre los años 2014 – 2019 (646,12 ha), además, se determinó que la mayor área no boscosa

conservada representó el 26,39 % durante los años 2007 – 2014 (329,21 ha) y la menor superficie expresó el 20,21 % en el periodo 2001 – 2007 (252,11 ha).

Asimismo, se evidencia que, la mayor pérdida de superficie boscosa del 15,34 % fue entre los años 2014 – 2019 (191,35 ha) y la menor pérdida del 6,30 % durante el periodo 2007 – 2014 (78,62 ha), es decir, el área boscosa pasó a convertirse en no bosque; además, la superficie no boscosa que se convirtió en bosque y representa a la cobertura recuperada fue mayor con un 11,52 % durante el 2019 – 2023 (143,71 ha) y fue menor con un 3,36 % entre los años 2007 – 2014 (41,89 ha).

Finalmente, se observa que, para todo el periodo de estudio, es decir, entre los años 2001 – 2023 la cobertura boscosa y no boscosa conservada representó el 57,75 % (720,43 ha) y 20,79 % (259,34 ha), en cambio, la superficie boscosa perdida fue mayor con un 15,01 % (187,26 ha) en relación a la superficie de bosques recuperado que representó solo el 6,46 % (80,57 %).

Durante los últimos 23 años la ZoCRE Morro de Calzada ha experimentado una masiva y frecuente pérdida de bosques en la zona norte y sur próxima a la zona de amortiguamiento y en áreas de posesionarios que durante años han extendido tierras agrícolas, asimismo, hubo mayor recuperación de bosques al oeste durante el 2019 – 2023 y superficies recuperadas en diferentes partes de la ZoCRE, esto se debe al desarrollo de proyectos de reforestación y procesos de sucesión vegetal, tal y como lo afirman Suárez y Acosta (2020) que determinaron que en el municipio de Samacá el aumento de cobertura de bosques se debió a procesos de sucesión vegetal y reforestaciones, asimismo, Tariq et al. (2023) determinaron que el incremento de cobertura forestal entre el 2013 al 2017 en la provincia de Khyber Pakhtun Khwa (KPK) de Pakistán se atribuyó a la ejecución de un proyecto llamado "Proyecto de mil millones de árboles".

Se ha determinado mayores pérdidas de cubierta forestal en zonas ocupadas por posesionarios y próximas a la zona de amortiguamiento, estas personas a lo largo de los últimos años han expandido sus tierras agrícolas ocasionando perjuicios y alteración de los bosques, denominando así a la expansión de tierras agrícolas como uno de los principales factores de degradación boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada, esta información se corrobora con lo determinado por Vera et al. (2024) quienes encontraron que la pérdida de bosques secos abiertos y densos ha sido ocasionado principalmente por la expansión de tierras.

4.3. Tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada durante el periodo 2001 – 2023

De acuerdo a los resultados de superficie boscosa perdida se ha determinado la tasa de deforestación, de ganancia y la deforestación anual promedio de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada, los cálculos se realizaron para cada periodo de estudio y para el periodo general de 2001 a 2023. Los resultados se presentan a continuación:

4.3.1. Tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada

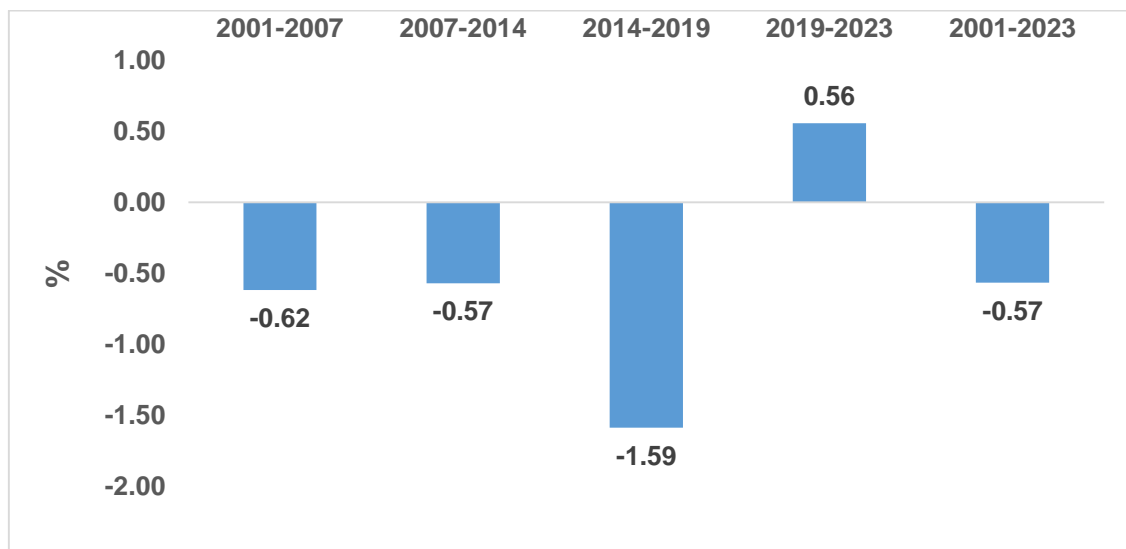


Figura 10

Tasa de deforestación y ganancia de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada.

Se observa que en la ZoCRE Morro de Calzada se registró la mayor tasa de deforestación durante el 2014 – 2019 (-1,59 %) y la menor tasa durante el periodo 2007 – 2014 (-0,57 %), en cambio, durante el 2019 – 2023 se registró una tasa de ganancia de cobertura forestal de 0,56 % y durante todo el periodo 2001 – 2023 se registró una tasa de deforestación de -0,57 %.

Durante los años 2001 a 2023 la tasa de deforestación varió entre -1,59 y -0,57 %, con un valor total de -0,57 % durante todo el periodo de estudio y una tasa de incremento de bosques de 0,56 % durante el 2019 – 2023. Al respecto, Quezada et al. (2022) determinaron que las provincias de Pastaza y Orellana en Ecuador registraron tasas de deforestación entre -0,132 % (2000 – 2005) y -3,435 % (2015 – 2020), con un valor de -2,947 % durante el 2000 – 2020. Los autores citados encontraron una mayor tasa durante los últimos años de estudio, en cambio en la ZoCRE Morro de Calzada en el último periodo se determinó una tasa de incremento y no de deforestación, esto refiere que la intensidad de la deforestación, extensión de tierras agrícolas, otras actividades antrópicas y posiblemente incendios naturales han disminuido notablemente en

beneficio de la cobertura boscosa en la ZoCRE, además, se nota una gran diferencia en los valores más altos de deforestación, esto se debe a que en una provincia se talan bosques para construir infraestructuras viales, hay incremento de zonas urbanas y mayor extensión agrícola, ya que según Móstiga et al. (2024) las tasas de deforestación se alinean con infraestructuras viales, incremento de actividades antrópicas y mayor intensidad y frecuencia de eventos naturales.

4.3.2. Deforestación anual promedio de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada

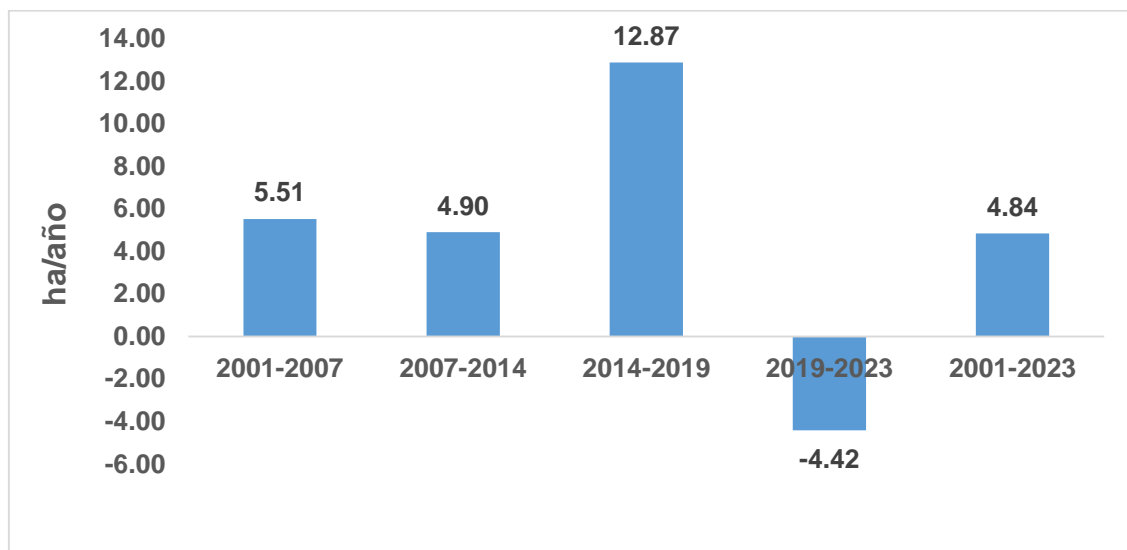


Figura 13

Deforestación anual promedio de cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada.

Se observa que en la ZoCRE Morro de Calzada se registró la mayor y menor deforestación anual promedio durante el 2014 – 2019 (12,87 ha/año) y el 2007 – 2014 (4,90 ha/año), respectivamente; en cambio, en el periodo 2019 – 2023 la deforestación anual media fue negativa debido a que hubo incremento de la superficie boscosa, además, se determinó que durante el periodo 2001 – 2023 se registró una deforestación anual promedio de 4,84 ha/año.

Los valores de deforestación anual promedio en la ZoCRE Morro de Calzada variaron entre 4,90 y 12,87 ha/año, registrando durante los últimos 23 años 4,84 ha/año, estos valores fueron inferiores en relación a lo encontrado en otros estudios, por ejemplo, Cortez (2021) determinó en la subcuenca Gera una mayor deforestación anual promedio de 545,48 ha/año durante el 2013 al 2019; Jimenez (2023) determinó en la microcuenca Juninguillo una mayor deforestación anual media de 117,84 ha/año durante el 2014 al 202; y, Quezada et al. (2022) estimaron en las provincias de Pastaza y Orellana en Ecuador durante el 2000 al 2020 una deforestación anual promedio de 45 319,56 ha/año. La diferencia en los resultados mostrados se debe a la extensión de las áreas

estudiadas y por otro lado se debe, al tipo, extensión e intensidad de ejecución de actividades antropogénicas a lo largo de los años en las zonas de estudio.

4.4. Exactitud del mapa de deforestación del último periodo de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada

Se verificó 70 puntos de muestreo, de los cuales a nivel de gabinete se clasificó 43 puntos para la entidad bosque y 27 para no bosque, cuyos resultados de la evaluación en campo y contraste con el trabajo de gabinete se presentan a continuación:

Tabla 9

Matriz de confusión de la zona de estudio

Clases	Bosque	No bosque	Total	Exact. del usuario
Bosque	38	5	43	0,88
No bosque	2	25	27	0,93
Total	40	30	70	
Exact. del productor	0,95	0,83		0,90

Nota: Exact.: Exactitud.

Se observa que de 43 puntos de la clase bosque, el 88,4 % (38 puntos) fueron validados de forma correcta en campo y el 11,6 % (5 puntos) no representaron a la categoría bosque clasificada en gabinete, en cambio, de 27 puntos para la clase bosque, el 92,6 % (25 puntos) se validaron correctamente en campo y solo el 7,4 % (2 puntos) no correspondieron a la categoría clasificada. Asimismo, se observa que de los 70 puntos contrastados en campo el 57,1 % (40 puntos) representaron a la clase bosque y el 42,9 % (30 puntos) fueron de no bosque.

Por otro lado, se determinó que en bosque la exactitud del usuario (0,88) fue menor que la exactitud del productor (0,95) y en la clase no bosque la exactitud del usuario (0,93) fue mayor que la exactitud del productor (0,83). Los resultados obtenidos permitieron determinar un índice Kappa (K) de 0,90, valor que permitió clasificar a los procedimientos con un grado de concordancia de casi perfecta (entre 0,81 – 1,00).

Se determinó que la precisión de la clasificación realizada en gabinete a través del mapa de deforestación del año 2023 fue casi perfecta al obtener un valor Kappa de 0,90. Al respecto, Cortez (2021) en la subcuenca Gera de Jepelacio determinó un grado de concordancia aceptable con un índice Kappa de 0,80; asimismo, Jimenez (2023) determinó un grado de concordancia aceptable entre el mapa de deforestación y la validación en campo, determinando un valor Kappa de 0,80. Existe diferencias en el grado de concordancia encontrado y lo determinado por los mencionados autores, esto indica que la exactitud del mapa de deforestación del año 2023 de la ZoCRE Morro de

Calzada fue mayor que el mapa de deforestación encontrado por los autores, según el trabajo de gabinete y de campo realizado.

CONCLUSIONES

La cobertura boscosa supera a la cobertura no boscosa durante los últimos 23 años en la ZoCRE Morro de Calzada. Los bosques disminuyen considerablemente en el área de los poseionarios que convierten estas superficies en coberturas no boscosas. Durante el periodo 2019 – 2023 la cubierta boscosa muestra un aumento y en todo el periodo 2001 – 2023 se estima una disminución de 8,5 % (106,47 ha) de bosques.

En los últimos 23 años la ZoCRE Morro de Calzada muestra mayor pérdida de bosques (187,26 ha) que superficies recuperadas (80,57 ha), particularmente en la zona norte y sur presidida por poseionarios, donde hay mayor exposición a la degradación debido a la expansión agrícola, además, en estas áreas la recuperación de bosques es baja, esto demuestra poca o nada importancia por parte de los pobladores para reforestar y conservar la cubierta forestal.

La tasa de deforestación de la cobertura boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada varía entre -0,57 y -1,59 %, con una tasa media de -0,57 % en los últimos 23 años. La deforestación anual varía entre 4,90 y 12,87 ha/año, con una media de 4,84 ha/año durante el 2001-2023. Solo durante el 2019 – 2023 hay una tasa de ganancia (0,56 %), lo que denota la recuperación de los bosques.

La exactitud del mapa de deforestación del año 2023 de la ZoCRE Morro de Calzada es 0,90, lo cual se considera como casi perfecta y afirma que los resultados determinados mediante la clasificación a nivel de gabinete empleando imágenes satelitales es eficiente para monitorear la pérdida de cobertura boscosa.

RECOMENDACIONES

A los poseesionarios de la ZoCRE Morro de Calzada y pobladores del distrito de Calzada y Yantaló, desarrollar actividades de reforestación, realizar buenas prácticas agrícolas mediante sistemas agroforestales, limitar y disminuir la intensificación de la expansión agrícola y, participar activa y voluntariamente en jornadas de reforestación que fomentan las diferentes entidades.

A la Municipalidad Distrital de Calzada (MDC), fiscalizar de forma constante la pérdida de cobertura boscosa por extensión de tierras agrícolas, actuar de manera inmediata ante incendios naturales y ocasionados por el hombre, formalizar alianzas estratégicas con poseesionarios y, entidades públicas y privadas con el fin de desarrollar actividades de reforestación masiva.

Al Gobierno Regional de San Martín a través de la Autoridad Regional Ambiental (ARA) y Proyecto Especial Alto Mayo (PEAM), recomendarles fortalecer alianzas con la MDC para fomentar y desarrollar actividades de reforestación en la ZoCRE Morro de Calzada, a fin de recuperar la cobertura boscosa perdida a lo largo de los años.

A los docentes y alumnos de la facultad de Ecología recomendarles tomar en consideración la metodología de la presente investigación a fin de desarrollar investigaciones similares en otras ciudades de la región y brindar a las autoridades una herramienta de mucha utilidad para la toma de decisiones adecuadas.

A docentes y estudiantes afines a la profesión recomendar evaluar la pérdida y ganancia de cobertura boscosa en zonas de conservación y recuperación de ecosistemas, y en áreas naturales protegidas, con el objetivo de informar a las autoridades responsables sobre el estado actual de los bosques, para tomar medidas pertinentes que promuevan la recuperación de áreas boscosas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Arias, H., Mora-Zamora, R., y Vargas-Bolaños, C. (2015). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes aster, rapideye, spot 2 y landsat 8 con el módulo flaash del software envi. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Aju, P. C., Iwuchukwu, J. J., e Ibe, C. (2015). Our forests, our environment, our sustainable livelihoods. *European Journal of Academic Essays*, 2(4), 6-19. https://www.researchgate.net/publication/353014874_Our_Forests_Our_Environment_Our_Sustainable_Livelihoods
- Ambrosio, G., González-Jiménez, J., y Arévalo-Espejo, V. (2002). Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal (in spanish). *X Congreso de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección At: Valladolid*. https://www.researchgate.net/publication/266478620_Correccion_Radiometrica_y_Geometrica_de_Imagenes_para_la_Deteccion_de_Cambios_en_una_Serie_Temporal_in_spanish
- Barboza, E., Salazar, W., Gálvez-Paucar, D., Valqui-Valqui, L., Saravia, D., Gonzales, J., Aldana, W., Vásquez, H. V., y Arbizu, C. I. (2022). Cover and land use changes in the dry forest of Tumbes (Peru) using sentinel-2 and google earth engine data. *IECF 2022*, 2. <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13095>
- Bodo, T., Gimah, B. G., y Seomoni, K. J. (2021). Deforestation and habitat loss: Human causes, consequences and possible solutions. *Journal of Geographical Research*, 4(2), 22-30. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i2.3059>
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bravo, N. F. (2017). *Teoría - Teledetección espacial Landsat, Sentinel -2, Aster L1T y Modis*. https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf
- Carranza, J., y Tasilla, F. (2020). Pérdida de cobertura vegetal en el distrito de Morales, San Martín, Perú (periodo 1987 – 2017). *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(1). <https://doi.org/10.17162/RICTD.V6I1.1400>

- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la teledetección espacial* (2da ed.). Alcalá. <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio* (3ra ed.). Editorial book print digital.
- Cortez, Y. L. (2021). *Pérdida de la cobertura vegetal mediante el uso de imágenes satelitales en la subcuenca Gera, distrito de Jepelacio* [Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio institucional. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/4537>
- Cruz, T. V., Gamboa, S. M., Luján, J. M., Llaque, G., y Valderrama, M. W. (2022). Use of geographic information systems in amazonian forest cover loss. A systematic review between 2010 - 2020. *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: "Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions"*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.126>
- Dancé, J. J., y Sáenz, D. F. (2013). *Estado de la situación y gestión ambiental en Perú*.
- Dar, S. A., Nabi, M., Dar, S. A., y Ahmad, W. S. (2022). Influence of anthropogenic activities on the diversity of forest ecosystems. En *Towards Sustainable Natural Resources* (pp. 33-49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06443-2_3
- Dervić, K., Sinik, V., y Despotovic, Z. (2019). Basics of electromagnetic radiation. *Conference: IX International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection 2019 (IIZS 2019) At: Zrenjanin, Serbia, 512-520*. https://www.researchgate.net/publication/336316251_BASICIS_OF_ELECTROMAGNETIC_RADIATION
- Dhingra, S., y Kumar, D. (2019). A review of remotely sensed satellite image classification. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 9(3), 1720-1731. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i3.pp1720-1731>
- Dzawanda, B., y Ncube, S. (2020). An assessment of vegetation cover changes and soil erosion hazard in muzvezve sub-catchment area, Zimbabwe. *African Geographical Review*, 41(1), 125-142. <https://doi.org/10.1080/19376812.2020.1856156>

- Feng, D., Fu, M., Sol, Y., Bao, W., Zhang, M., Zhang, Y., y Wu, J. (2021). How large-scale anthropogenic activities influence vegetation cover change in China? A Review. *Forests*, 12(3), 320. <https://doi.org/10.3390/F12030320>
- Fleming, L. (2022). *Los servicios sistémicos en el Perú*. <https://www.folkloreimperu.com/peru-info/que-son-y-cuales-son-los-servicios-sistemicos-en-el-peru-los-5-mejores-consejos.html>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Global forest resources assessment 2020: Main report*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Forest Research. (2021). *Forestry statistics 2021. Chapter 9: International forestry*. https://cdn.forestresearch.gov.uk/2022/02/ch9_international_fs2021.pdf
- García, E. (2006). *Corrección del sombreado topográfico en imágenes Landsat ETM+, aplicado al inventario de cuerpos de agua: caso: Cuenca Alta del río Chillón* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/5836e93d-10bf-4bee-baf9-36930a9f2374>
- Gigandet, X. (2004). *Satellite image segmentation and classification*. <https://core.ac.uk/download/pdf/147917865.pdf>
- Gómez, E., Obregón, N., y Rocha, D. F. (2013). Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales. *Tecnura*, 17(36), 96-110. <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257028093009.pdf>
- Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio institucional. <https://doi.org/10.35537/10915/34487>
- Gyamfi-Ampadu, E., Gebreslasie, M., y Mendoza-Ponce, A. (2020). Mapping natural forest cover using satellite imagery of Nkandla forest reserve, KwaZulu-Natal, South Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100302>
- Hansen, A. J., Mullan, K., Theobald, D. M., Powell, S., Robinson, N., y East, A. (2021). Natural vegetation cover on private lands: locations and risk of loss in the northwestern United States. *Ecosphere*, 12(10). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3756>

- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., Cristobal, J., Peces, J. J., y Tejeiro, J. A. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51-61. https://www.aet.org.es/revistas/revista36/Numero36_05.pdf
- Hernández, J., y Montaner, D. (2007). *Patrones de respuesta espectral*. <https://gep.uchile.cl/Publicaciones/Hern%C3%A1ndez%20&%20Montaner%202009%20SAF.pdf>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Horning, N. (2019). Remote Sensing. *Encyclopedia of Ecology*, 404-413. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10607-4>
- Ihlen, V. (2019). *Landsat 7 (L7). Data Users Handbook*. https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1927_L7_Data_Users_Handbook-v2.pdf
- Jimenez, D. J. (2023). *Análisis de la deforestación mediante sistemas de información geográfica, en la microcuenca Juninguillo - Moyobamba – San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/5252>
- Joshi, V. C., Negi, V. S., Bisht, D., Sundriyal, R. C., y Arya, D. (2021). Tree biomass and carbon stock assessment of subtropical and temperate forests in the Central Himalaya, India. *Trees, Forests and People*, 6, 100147. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100147>
- Kafy, A., Faisal, A., Rakib, A., Fattah, A., Rahaman, Z., y Sattar, G. (2022). Impact of vegetation cover loss on surface temperature and carbon emission in a fastest-growing city, Cumilla, Bangladesh. *Building and Environment*, 208, 108573. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108573>
- Kanninen, M., Murdiyarso, D., Seymour, F., Angelsen, A., Wunder, S., y German, L. (2008). *¿Crecen los árboles sobre el dinero? Implicaciones de la investigación sobre deforestación en las medidas para promover la REDD*. Center for International Forestry Research. https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/Books/BKanninen0801SP.pdf

- Kumar, D. (2011). Monitoring forest cover changes using remote sensing and GIS: A global prospective. *Res. J. Environ. Sci.*, 5, 105-123.
- Liu, H., Zhang, L., Ma, Q., Zhao, W., y Chen, Y. (2023). From tree to forest: Multiple carbon sink constraints. *The Innovation*, 4(4), 100463. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100463>
- López, G. I., y Pita, S. (2001). Medidas de concordancia: el índice de Kappa. *Cad Aten Primaria*, 6, 169-171. https://www.mvclinic.es/wp-content/uploads/L%C3%B3pez-de-Ullibarri-Medidas-de-concordancia_-el-%C3%ADndice-Kappa.pdf
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2021). *Servicios Ecosistémicos Forestales*.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2014). Protocolo: Evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación. Ministerio del Ambiente. <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/928>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2016). *Estrategia nacional sobre bosques y cambio climático*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/ESTRATEGIA-NACIONAL-SOBRE-BOSQUES-Y-CAMBIO-CLIM%C3%81TICO-DECRETO-SUPREMO-007-2016-MINAM11.pdf>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2022a). *Cobertura y pérdida de bosque húmedo Amazónico 2021. Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático (PNCBMCC)*. [https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/descargas_geobosque/perdida/documentos/Reporte_Cobertura_y_Perdida_de_Bosque_Humedo_Amazonico_2021.pdf?Wed%20Oct%2011%202023%2004:47:36%20GMT-0500%20\(hora%20est%C3%A1ndar%20de%20Per%C3%BA\)](https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/descargas_geobosque/perdida/documentos/Reporte_Cobertura_y_Perdida_de_Bosque_Humedo_Amazonico_2021.pdf?Wed%20Oct%2011%202023%2004:47:36%20GMT-0500%20(hora%20est%C3%A1ndar%20de%20Per%C3%BA))
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2022b). *San Martín: Reporte Estadístico Departamental, Diciembre 2021*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/san-martin-reporte-estadistico-departamental-diciembre-2021>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2023). *Apuntes del Bosque 5. Cobertura de Bosques al 2020*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4770060/Apuntes%20N5_%28versionfinal%29.pdf
- Miranda-Castro, W., Acevedo-Barrios, R., Guerrero, M., Guzmán, K., y De Gorostizaga, S. (2022). Assessing forest cover loss using Landsat images and GIS: A case study

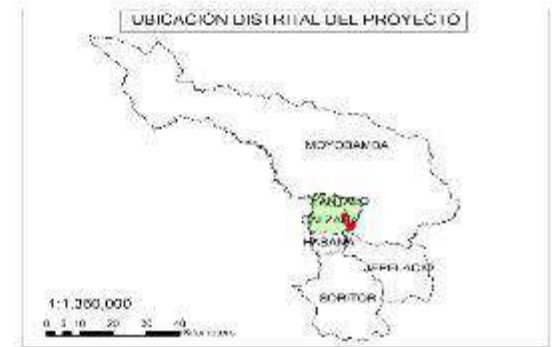
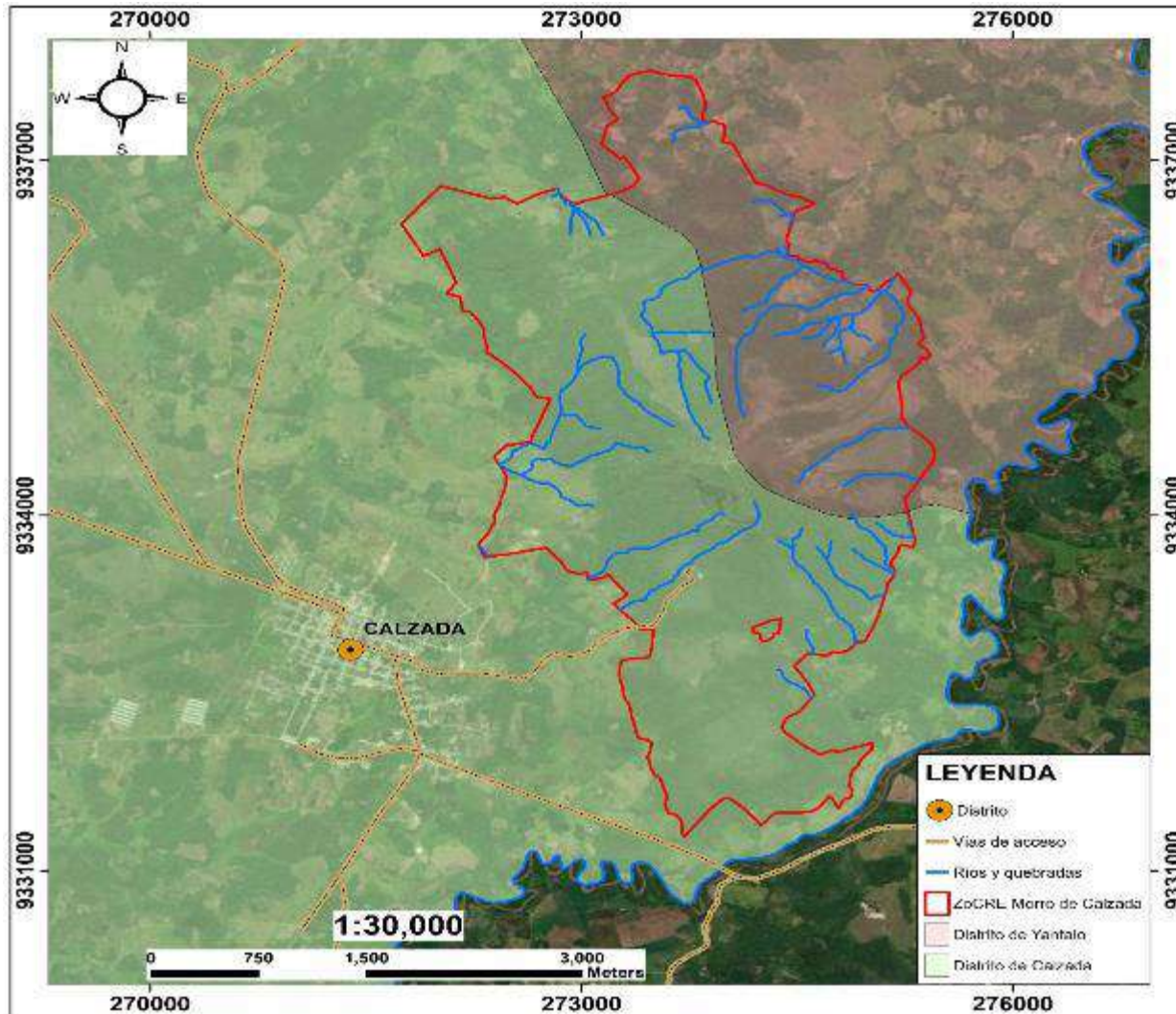
- in Colombian protected area. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(8), 831-847.
<https://doi.org/10.1080/10549811.2022.2123356>
- Mishra, R., Singh, E., Kumar, A., y Kumar, S. (2021). Application of remote sensing for assessment of change in vegetation cover and the subsequent impact on climatic variables. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41675-41687.
<https://doi.org/10.1007/S11356-021-13563-9>
- Moran, M., Jackson, R., Slater, P., y Teillet, P. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3), 169-184.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90076-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90076-V)
- Móstiga, M., Armenteras, D., Vayreda, J., y Retana, J. (2024). Two decades of accelerated deforestation in Peruvian forests: a national and regional analysis (2000–2020). *Regional Environmental Change*, 24(2), 42.
<https://doi.org/10.1007/s10113-024-02189-5>
- Otzen, T., y Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol.*, 35(1), 227-232.
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v35n1/art37.pdf>
- Pérez, C., y Muñoz, Á. L. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones*.
<https://mundocartogeo.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/teledeteccion-nocionesaplicaciones-2006publico.pdf>
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 593-596.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- Quezada, A. S., Sevilla, J. D., y Avilés, E. C. (2022). Estimación de la tasa de deforestación en Pastaza y Orellana- Ecuador mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales durante el período 2000-2020. *Revista Alfa*, 6(17), 282-299. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i17.168>
- Quispe, I. E. (2019). *Cambio de cobertura vegetal en la cuenca del río Zapatilla llave - Juli* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12057>
- Rahman, S. H. A. A., Shukri, M. A. H. M., Latip, A. S. A., y Latif, Z. A. (2022). Land use and land cover change analysis using satellite images in Gua Musang, Kelantan.

- IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1019(1), 012025.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1019/1/012025>
- Read, J. M., y Torrado, M. (2009). Remote sensing. *International Encyclopedia of Human Geography*, 335-346. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00508-3>
- Rimarachin, O. M. (2011). *Evaluación del impacto de la población en la degradación de los bosques naturales del distrito Soritor, provincia Moyobamba, región San Martín, Perú, 2010* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio institucional. <https://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/3556>
- Sánchez, C., y Reyes, C. (2006). *Metodología y diseño en la investigación científica* (E. V. Universitaria, Ed.).
- Sánchez, J. M. (2016). Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 9-26.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5998855>
- Senf, C., Müller, J., y Seidl, R. (2019). Post-disturbance recovery of forest cover and tree height differ with management in Central Europe. *Landscape Ecology*, 34(12), 2837–2850. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00921-9>
- Sensores Remotos y GIS. (2009). *Guía básica sobre imágenes satelitales y sus productos*. <https://es.scribd.com/document/101649279/Guia-Basica-Imagenes-Satelitales>
- Shiferaw, M., Kebebew, Z., y Gemedu, D. O. (2023). Effect of forest cover change on ecosystem services in central highlands of Ethiopia: A case of Wof-Washa forest. *Heliyon*, 9(7), e18173. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18173>
- Snejana, D. (2022). Forest cover and climate change. *EJournal of Applied Forest Ecology* (EJAFE), 10(1), 32–38.
https://www.researchgate.net/publication/377851392_Forest_cover_and_climate_change
- Sobrino, J., Jiménez, J., y Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(2004), 434-440.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Suárez, E. F., y Acosta, K. N. (2020). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal del municipio de Samacá, generado por actividades socioeconómicas* [Trabajo de

- grado, Universidad Santo Tomás].
<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/28390>
- Tariq, A., Jiango, Y., Li, Q., Gao, J., Lu, L., Soufan, W., Almutairi, K. F., y Habib-ur-Rahman, M. (2023). Modelling, mapping and monitoring of forest cover changes, using support vector machine, kernel logistic regression and naive bayes tree models with optical remote sensing data. *Heliyon*, 9(2), e13212. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13212>
- Thien, B. B., Phuong, V. T., y Komolafe, A. A. (2023). Assessment of forest cover and forest loss using satellite images in Thua Thien Hue province, Vietnam. *AUC GEOGRAPHICA*, 58(2), 172-186. <https://doi.org/10.14712/23361980.2023.13>
- Vargas, E. (1992). *La fotografía aérea y su aplicación a estudios geológicos y geomorfológicos. Principios de percepción remota. Tomo I* (Universidad Mayor de San Andrés, Ed.). Imprenta del Comité Ejecutivo de la Universidad Boliviana. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/2021-08/37799.pdf
- Vera, E., Cruz, C., Barboza, E., Salazar, W., Canta, J., Salazar, E., Vásquez, H. V., y Arbizu, C. I. (2024). Change of vegetation cover and land use of the Pómac forest historical sanctuary in northern Peru. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05597-6>
- Waseem, S., y Khayyam, U. (2019). Loss of vegetative cover and increased land surface temperature: A case study of Islamabad, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 234, 972-983. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.228>
- Xiao, Y., Kuan, S., Seng, T., y ChuanTay, S. (2004). Feature extraction using very high resolution satellite imagery. *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370741>
- Zhou, W., Zhang, S., Yu, W., Wang, J., & Wang, W. (2017). Effects of urban expansion on forest loss and fragmentation in six megaregions, China. *Remote Sensing*, 9(10), 991. <https://doi.org/10.3390/rs9100991>

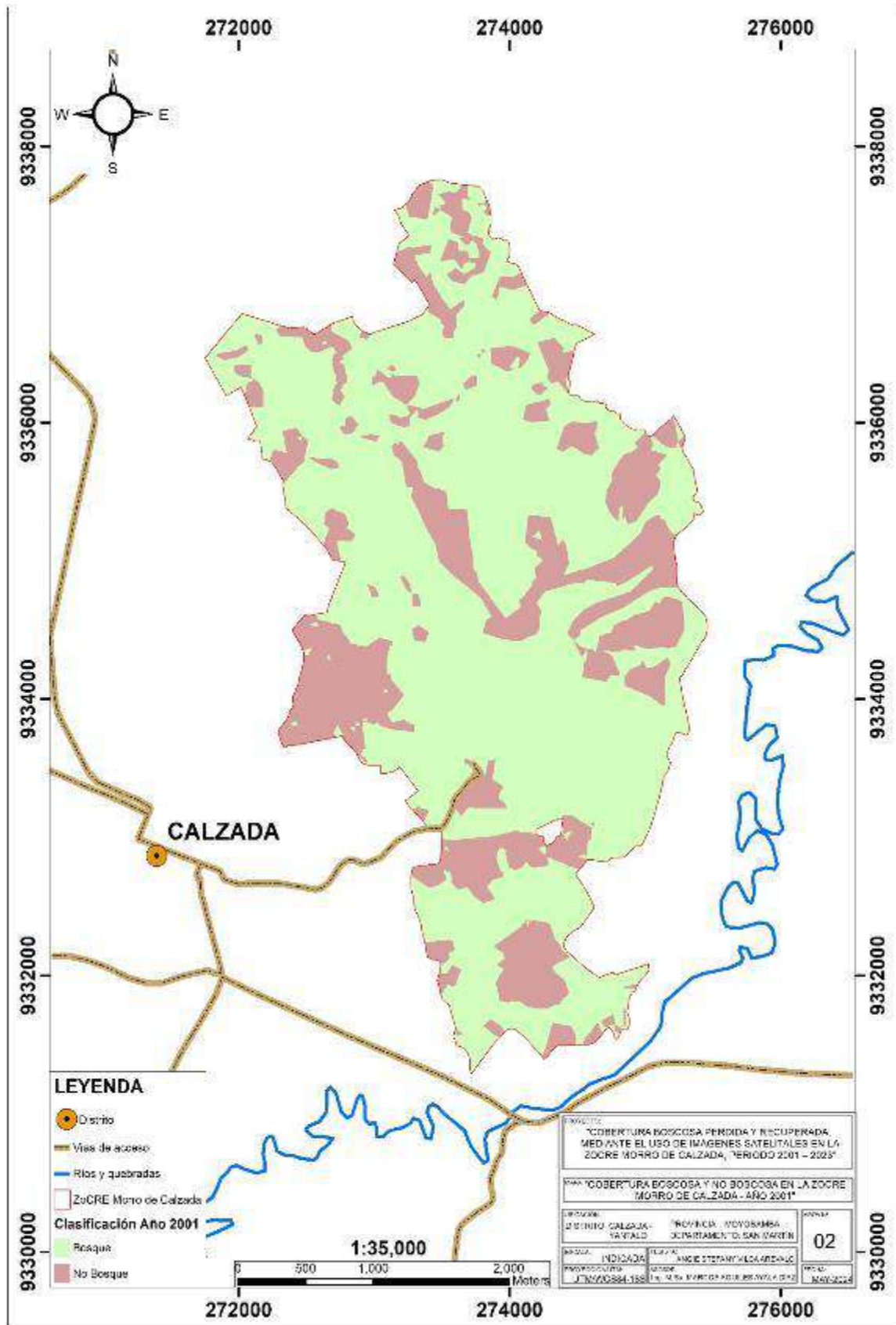
ANEXOS

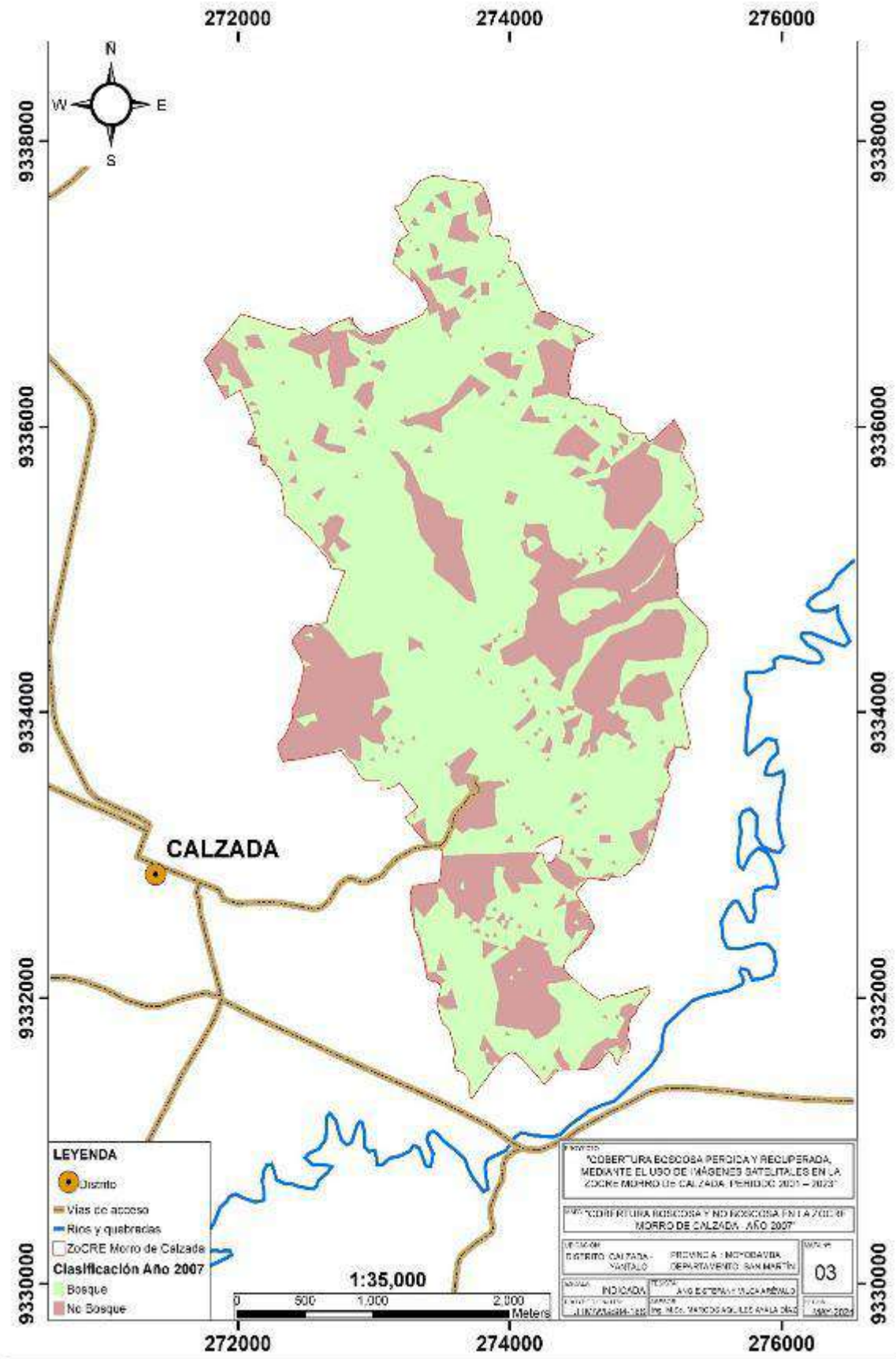
Anexo 1. Ubicación del área de estudio

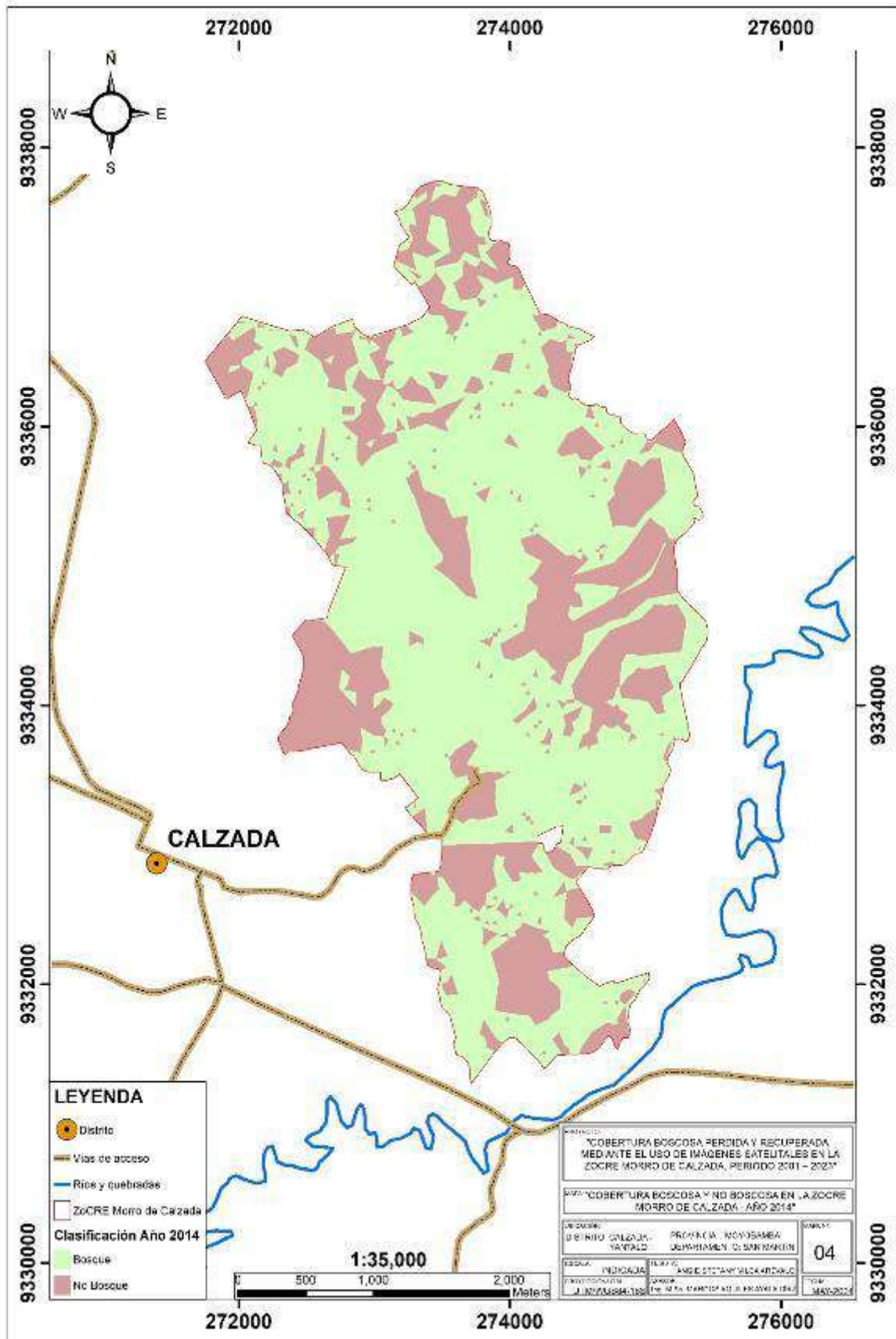


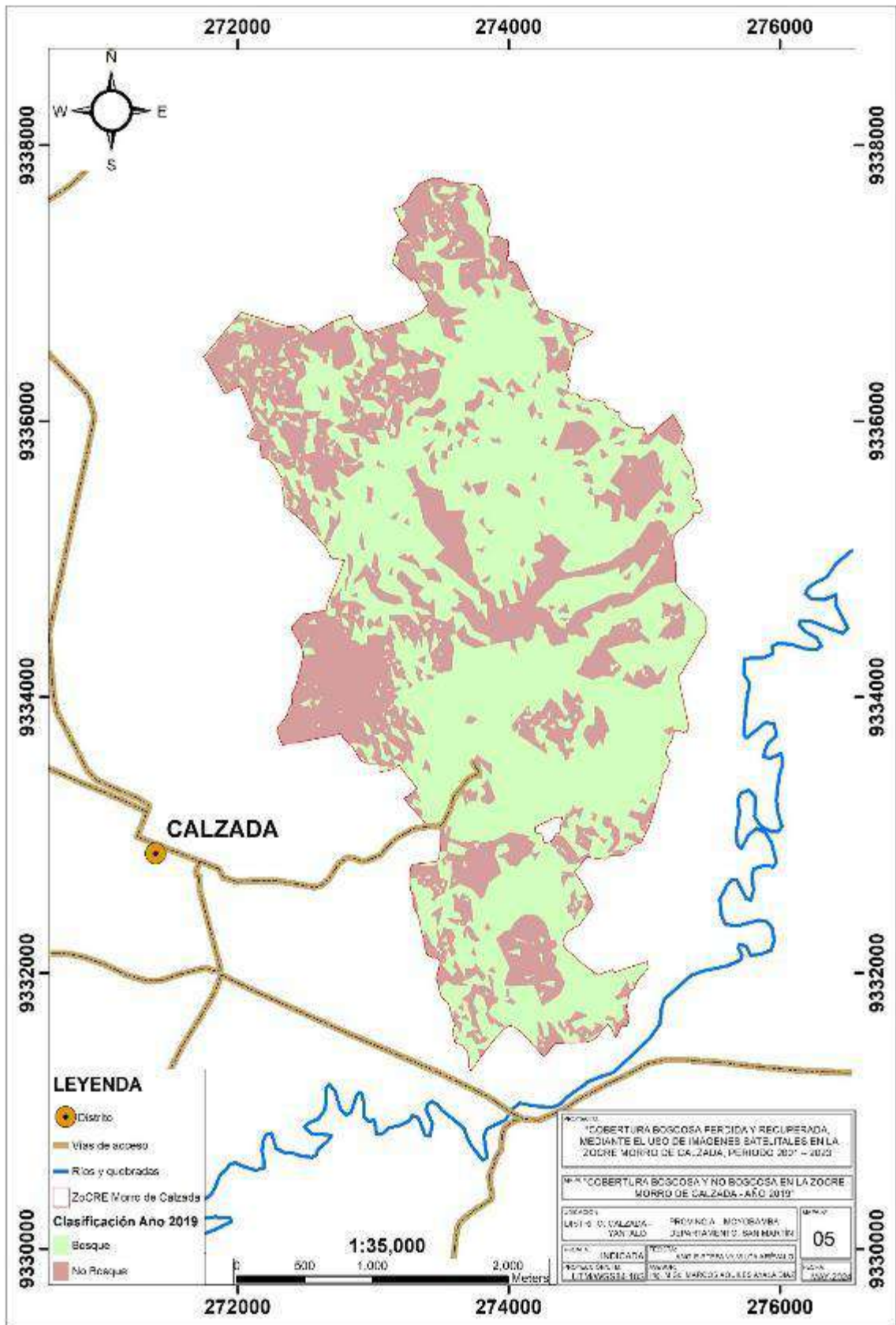
PROYECTO: "COBERTURA BOSCOSA PERDIDA Y RECUPERADA, MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES EN LA ZONER MORRO DE CALZADA, PERIODO 2001 - 2023"			
TÍTULO: "UBICACIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO"			
UBICACIÓN: DISTRITO: CALZADA - YANTALO		PROVINCIA: MOYOBAMBA DEPARTAMENTO: SAN MARTÍN	
ESCALA: INDICADA		AUTOR: ANGE STEFANY VILCA AREVALO	
PROYECCIÓN: UTM WGS84-18S		ASesor: Ing. M.Sc. MARCOS ADRIAN AYALA O'AZ	
FOLIO: 01			FECHA: MAY 2024

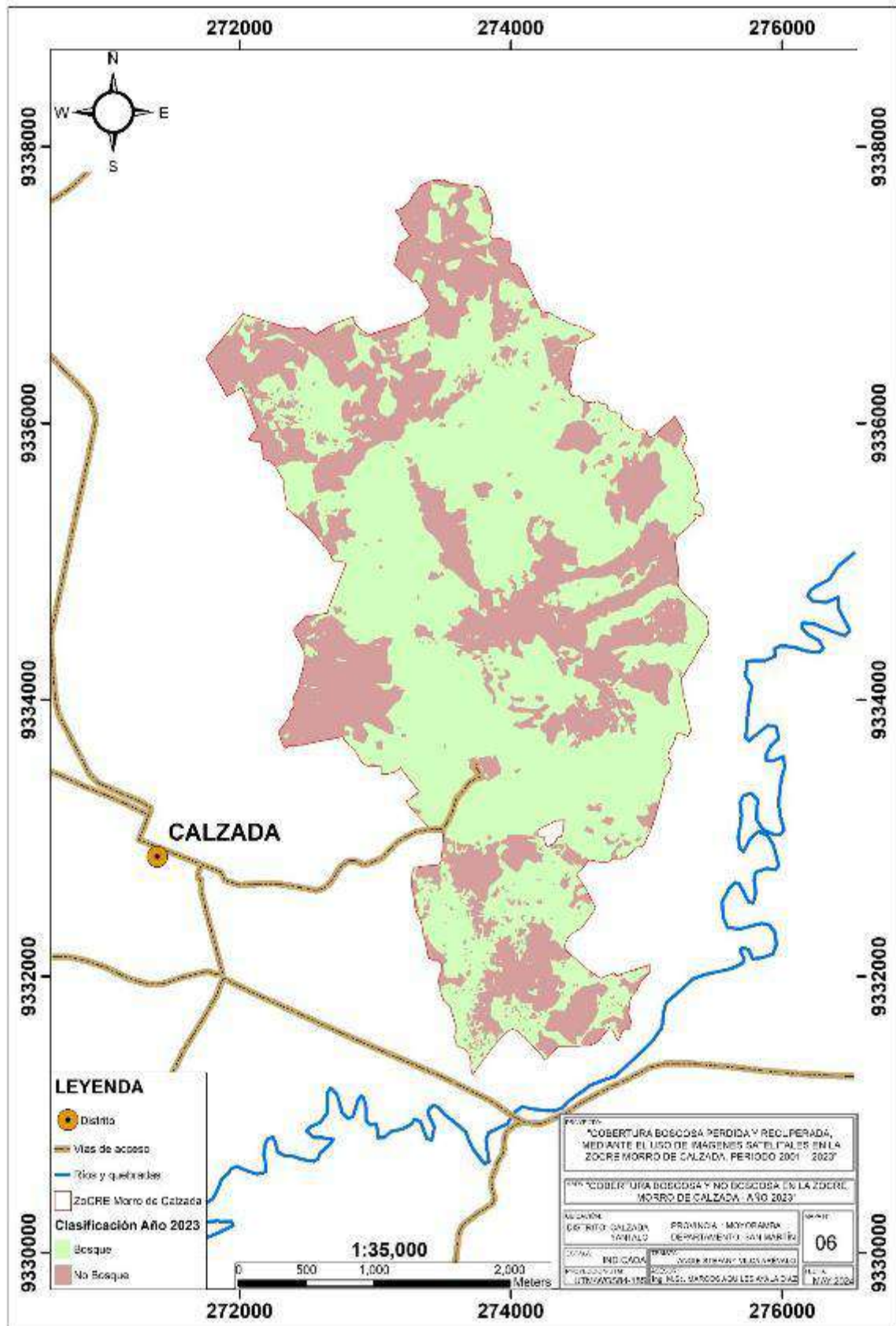
Anexo 2. Mapas temáticos de superficie boscosa y no boscosa en los periodos de estudio en la ZoCRE Morro de Calzada



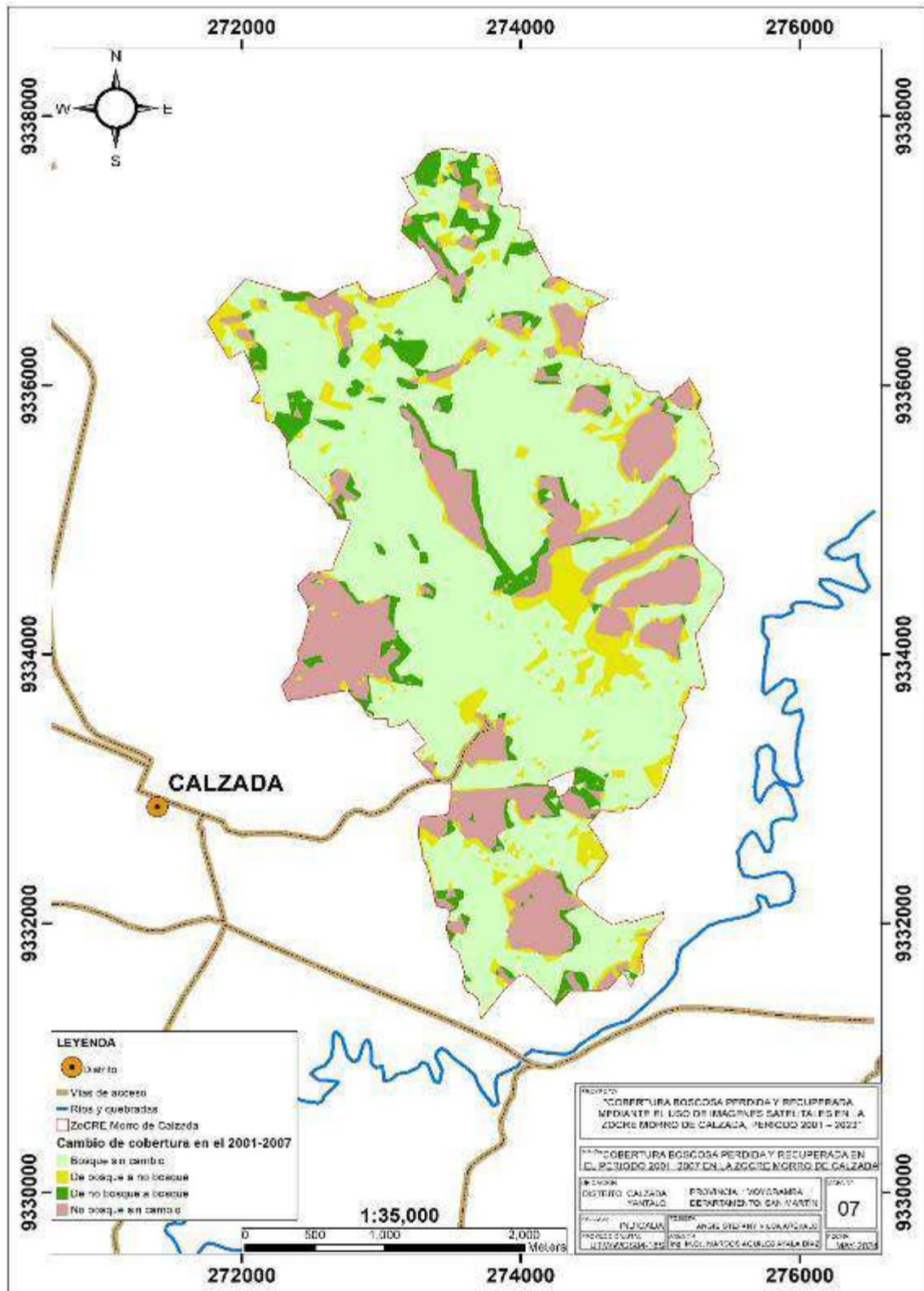


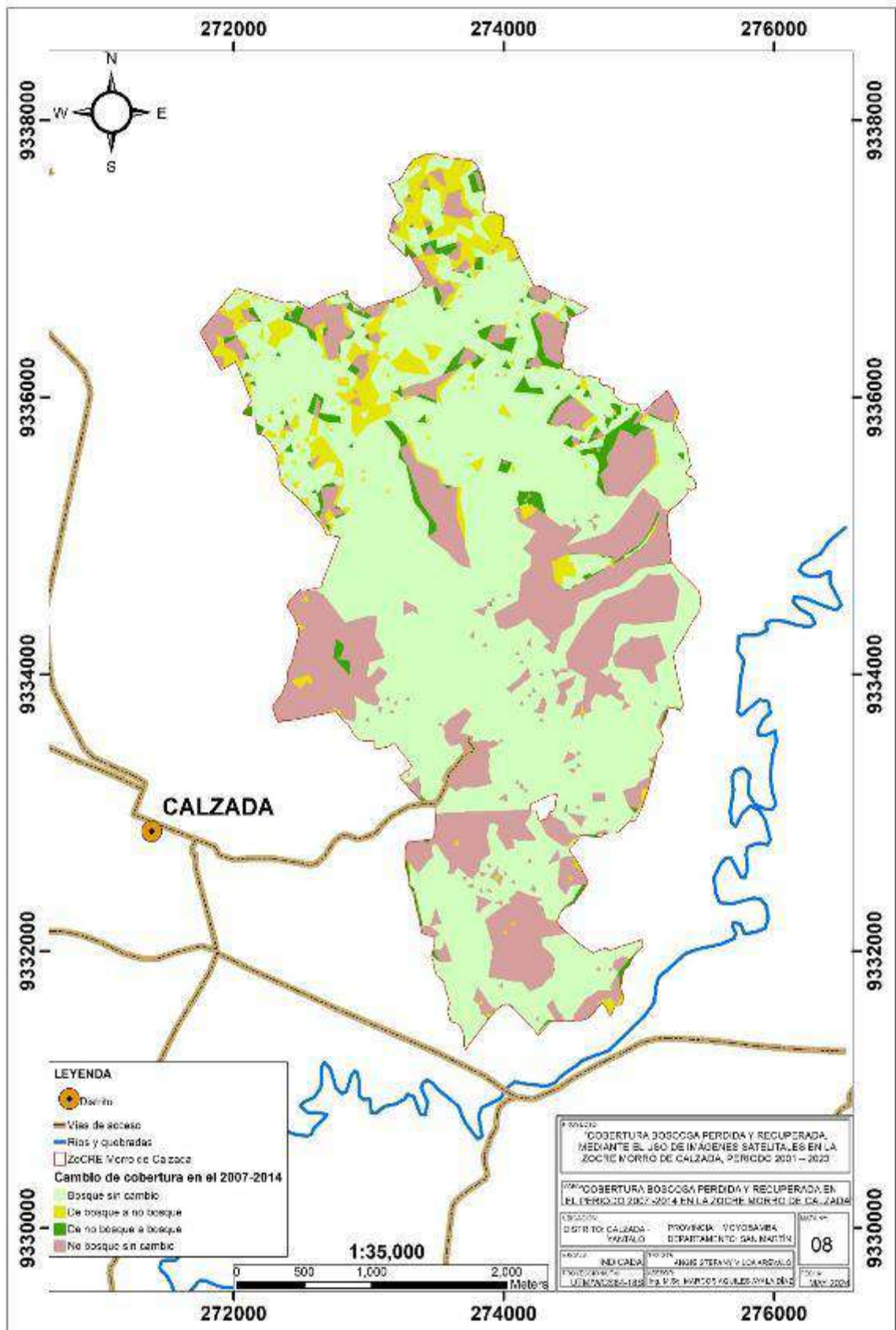


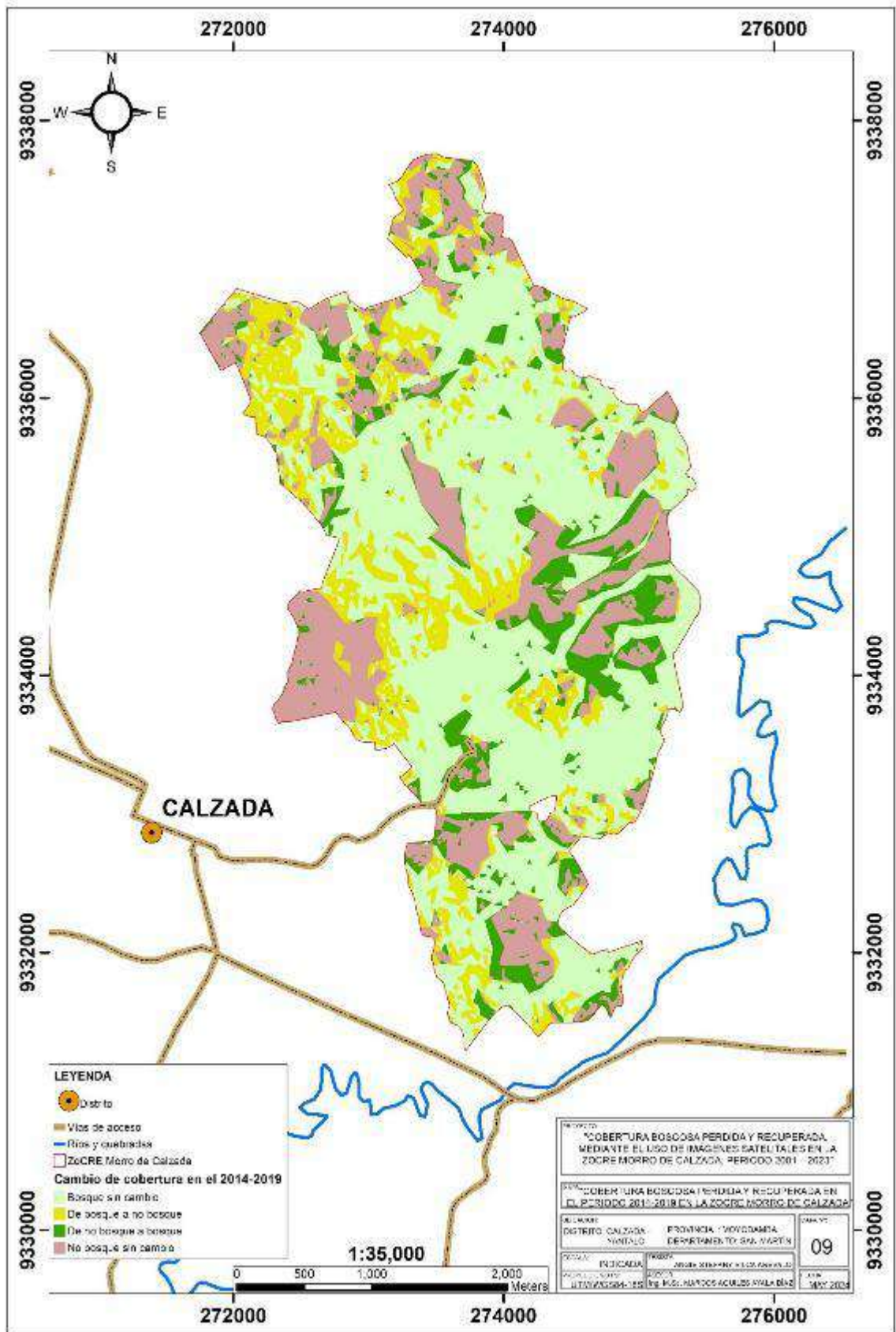


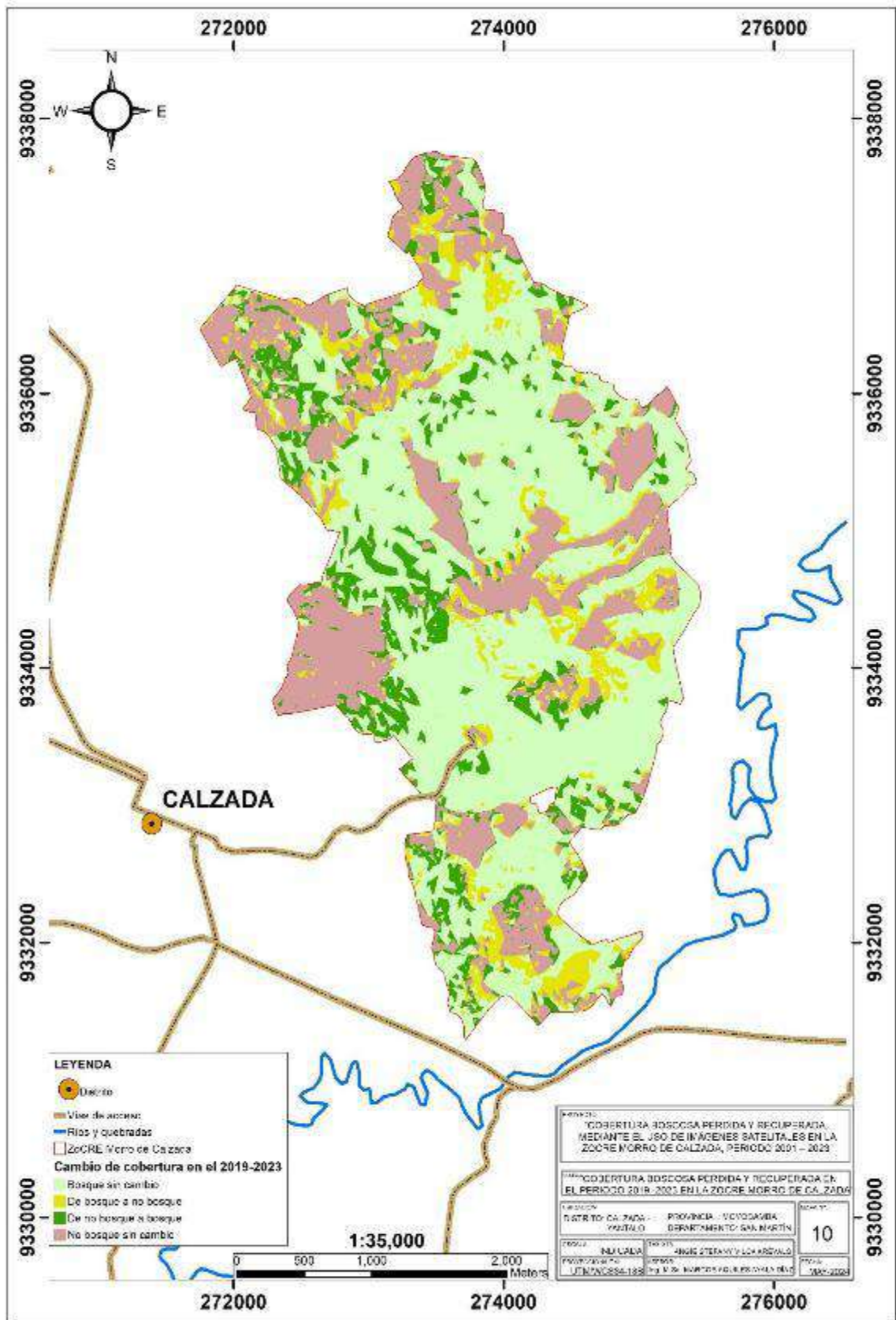


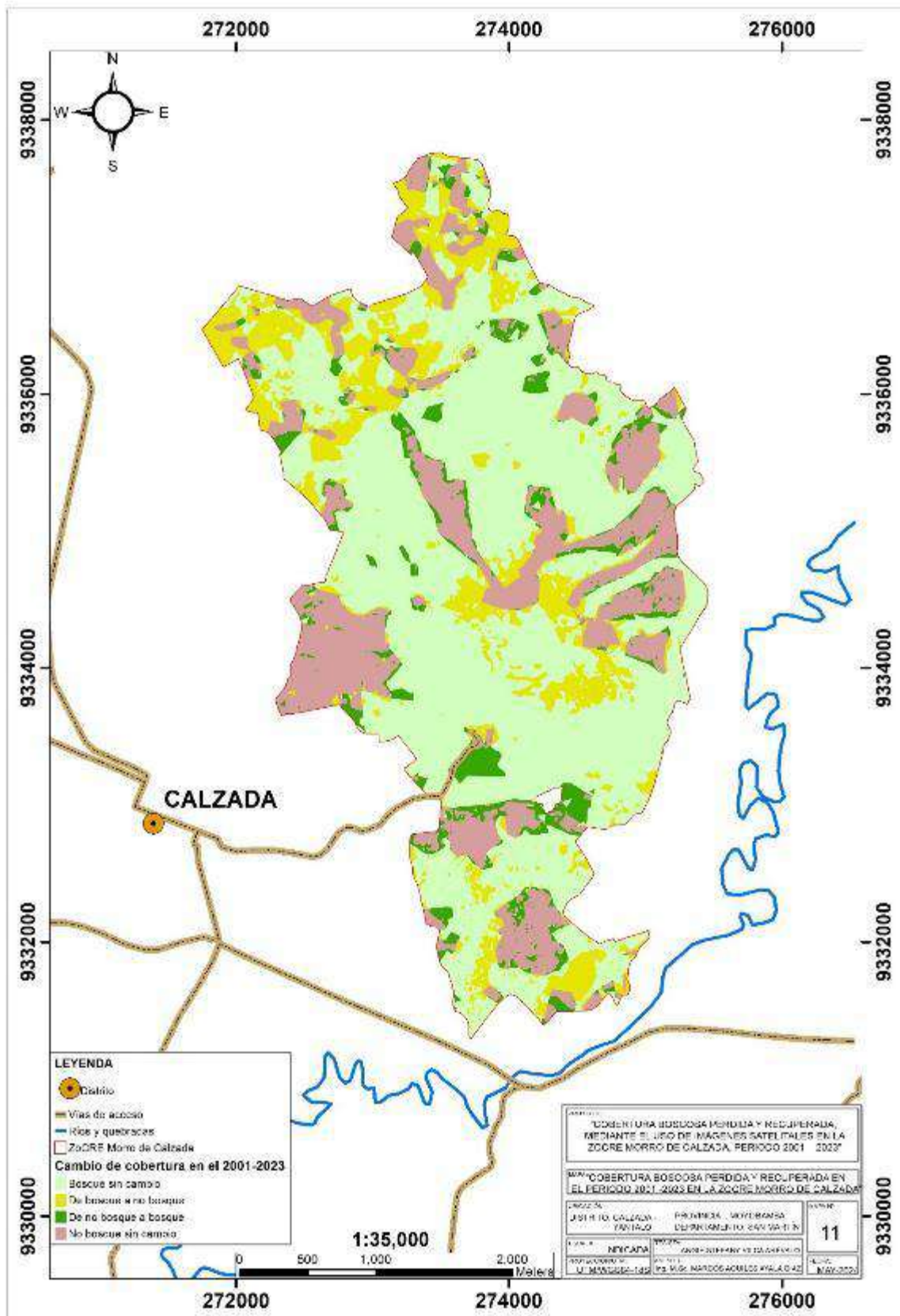
Anexo 3. Mapas temáticos de cambio de cobertura boscosa y no boscosa en la ZoCRE Morro de Calzada











Anexo 4. Ficha de validación de puntos de verificación

Proyecto	: Cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2001 – 2023.				
Punto de verificación	Coordenadas UTM WGS84 Z18 S		Clasificación	Campo	Resultado
	Este (X)	Norte (Y)			
1	273219	9337470	No Bosque	No Bosque	V
2	273742	9336667	Bosque	Bosque	V
3	272621	9336643	No Bosque	No Bosque	V
4	271841	9336531	No Bosque	No Bosque	V
5	273332	9336446	No Bosque	No Bosque	V
6	272284	9336234	No Bosque	No Bosque	V
7	273823	9336231	Bosque	Bosque	V
8	273513	9336151	Bosque	No Bosque	F
9	273538	9337255	No Bosque	No Bosque	V
10	274114	9336133	Bosque	Bosque	V
11	273055	9336079	Bosque	Bosque	V
12	273894	9336052	Bosque	Bosque	V
13	272404	9335997	No Bosque	Bosque	F
14	273816	9335704	Bosque	Bosque	V
15	272796	9335690	No Bosque	No Bosque	V
16	273195	9335652	Bosque	Bosque	V
17	274195	9336689	Bosque	Bosque	V
18	274736	9335598	Bosque	Bosque	V
19	274727	9335519	Bosque	No Bosque	F
20	274415	9335577	Bosque	Bosque	V
21	275388	9335373	Bosque	Bosque	V
22	275196	9335715	Bosque	Bosque	V
23	274787	9335201	Bosque	Bosque	V
24	273762	9337476	Bosque	Bosque	V
25	274797	9335141	Bosque	Bosque	V
26	274537	9335909	No Bosque	No Bosque	V
27	275098	9334923	No Bosque	No Bosque	V
28	272682	9336191	Bosque	Bosque	V
29	272249	9336484	No Bosque	No Bosque	V
30	273179	9334778	Bosque	Bosque	V
31	272463	9335496	Bosque	Bosque	V
32	274820	9334643	Bosque	No Bosque	F
33	275189	9334575	No Bosque	No Bosque	V
34	272597	9334218	No Bosque	No Bosque	V
35	273682	9333362	No Bosque	No Bosque	V
36	275080	9334161	No Bosque	No Bosque	V
37	272868	9334258	No Bosque	No Bosque	V
38	272906	9333634	Bosque	Bosque	V
39	275183	9334070	Bosque	Bosque	V
40	273033	9333972	No Bosque	No Bosque	V
41	273833	9333926	Bosque	Bosque	V
42	274090	9332878	No Bosque	No Bosque	V

43	273679	9332723	No Bosque	No Bosque	V
44	273433	9333726	Bosque	Bosque	V
45	273539	9336944	Bosque	Bosque	V
46	275104	9333563	Bosque	Bosque	V
47	275228	9334405	Bosque	No Bosque	F
48	274989	9333975	Bosque	Bosque	V
49	274895	9333215	Bosque	Bosque	V
50	273483	9333199	Bosque	Bosque	V
51	273782	9333521	Bosque	No Bosque	F
52	274725	9333095	No Bosque	No Bosque	V
53	274676	9333024	Bosque	Bosque	V
54	274917	9332955	Bosque	Bosque	V
55	274486	9332894	Bosque	Bosque	V
56	273408	9332622	No Bosque	No Bosque	V
57	273348	9332531	Bosque	Bosque	V
58	273658	9332176	Bosque	Bosque	V
59	273778	9332116	Bosque	Bosque	V
60	273900	9332037	No Bosque	No Bosque	V
61	274532	9331951	Bosque	Bosque	V
62	274670	9331932	No Bosque	No Bosque	V
63	273961	9331729	Bosque	Bosque	V
64	274381	9331582	No Bosque	No Bosque	V
65	274482	9331533	No Bosque	Bosque	F
66	274258	9331477	No Bosque	No Bosque	V
67	273754	9331391	Bosque	Bosque	V
68	273603	9331738	Bosque	Bosque	V
69	272441	9333883	No Bosque	No Bosque	V
70	272863	9334937	Bosque	Bosque	V

Anexo 5. Panel fotográfico



Fotografía 1. Validación de puntos de verificación de cobertura boscosa y no boscosa.



Fotografía 2. Validación de puntos de verificación de cobertura boscosa y no boscosa.



Fotografía 3. Validación de puntos de verificación de cobertura boscosa y no boscosa.



Fotografía 4. Validación de puntos de verificación de cobertura boscosa y no boscosa.



Fotografía 5. Validación de puntos de verificación de cobertura boscosa y no boscosa.

Angie Stefany Vilca Arévalo

Cobertura boscosa perdida y recuperada, mediante el uso de imágenes satelitales en la ZoCRE Morro de Calzada, periodo 2...

 INFORME DE TESIS

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:571640653

Fecha de entrega

26 mar 2026, 11:52 GMT-5

Fecha de descarga

26 mar 2026, 12:37 GMT-5

Nombre del archivo

Informe Final de Tesis _ Angie S. Vilca A..docx

Tamaño del archivo

2.8 MB

76 páginas

16.414 palabras

90.145 caracteres




13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.