

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



T E S I S

**Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas
al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el
año 2050**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autor:

Bach. Adita Milagros ROJAS TRINIDAD

Asesor:

Mg. Edson Valery RAMOS PEÑALOZA

Cerro de Pasco - Perú - 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



T E S I S

**Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas
al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el
año 2050**

Sustentada y aprobado ante los miembros del jurado:

Dr. David Johnny CUYUBAMBA ZEVALLOS
PRESIDENTE

Mg. Rosario Marcela VASQUEZ GARCIA
MIEMBRO

Mg. Lucio ROJAS VITOR
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 311-2025-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

“Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050”

Apellidos y nombres del tesista

Bach. Adita Milagros, ROJAS TRINIDAD

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. Edson Valery, RAMOS PEÑALOZA

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Ambiental

Índice de Similitud

12 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 20 de agosto del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 20.08.2025 17:22:03 -05:00

DEDICATORIA

A mi familia por haberme forjado, apoyado de manera constante, muchos de mis logros se los debo a ustedes, con su motivación pude alcanzar uno de mis anhelos.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por permitirme tener una buena experiencia, gracias a cada docente de la Universidad, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso integral de formación, ya sea de manera directa e indirecta, que deja como producto esta tesis que perdurará dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar.

RESUMEN

Pozuzo es un distrito turístico de nivel nacional e internacional por ser la única colonia austro alemana en el mundo, asimismo destaca su diversidad biológica, paisajes y su actividad agropecuaria, en los últimos años se ha evidenciado una creciente deforestación producto de la expansión del sistema productivo de ganadero, tala y quema, entre otros, con una continua presión al bosque y disminución de los servicios ecosistémicos. En base a lo anterior los modelos predictivos de cambio de cobertura y uso del suelo son herramientas para conocer la dinámica del territorio estableciendo patrones de cambio en base variables o drivers ambientales y/o antrópicas. En el presente estudio se tuvo como principal objetivo analizar y modelar las condiciones ambientales y antrópicas que se asocian en la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000. 2010 y 2021 mediante de sensores remotos, autómatas celulares y Cadenas de Márkov con el fin simular el cambio de uso de suelo para el año 2050 en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco, para lo cual se usaron mapas del portal MapBiomas Perú procesados en Google Earth Engine de imágenes satelitales Landsat. El software usado para el modelamiento del año 2050 fue Terrset, módulo Land Change Modeler (LCM) que opera a través de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares. Los resultados indican que la categoría “Bosque” es la más predominante, pero con tendencia marcada a su disminución superficial para los años 2000, 2010 y 2021 con 56,685.60 ha, 55,238.90 ha y 50,887.10 ha, respectivamente. Y una tendencia creciente de la categoría Mosaico agropecuaria con 11,775.15 ha, 13,018.16 ha y 17,794.67 ha, respectivamente; mientras que para el año modelado 2050 la categoría “Bosque” sigue disminuyen a 40,674.87 ha, y un incremento de la categoría “Mosaico agropecuario” de 27,338.83 ha. La variable más influyente y de naturaleza antrópica fue tendencia a deforestación y la de menor efecto Red Hídrica.

Palabra claves: Cambio de cobertura y uso del suelo, deforestación, modelamiento territorial, distrito de Pozuzo.

ABSTRACT

Pozuzo is a national and international tourist district, being the only Austro-German colony in the world. It is also notable for its biological diversity, landscapes, and agricultural activity. In recent years, increasing deforestation has been observed due to the expansion of livestock production systems, logging and burning, among other activities, resulting in continued pressure on forests and a decrease in ecosystem services. Based on the above, predictive models of land cover and land use change are tools for understanding territorial dynamics, establishing patterns of change based on environmental and/or anthropogenic variables or drivers. In the present study, the main objective was to analyze and model the environmental and anthropic conditions that are associated with the dynamics of land cover and land use change in the years 2000, 2010, and 2021 using remote sensing, cellular automata, and Markov Chains in order to simulate land use change for the year 2050 in the district of Pozuzo, province of Oxapampa, Pasco region, for which maps from the MapBiomass Perú portal processed in Google Earth Engine from Landsat satellite images were used. The software used for modeling the year 2050 was Terrset, a Land Change Modeler (LCM) module that operates through Markov Chains and Cellular Automata. The results indicate that the "Forest" category is the most predominant, but with a marked tendency to decrease in area for the years 2000, 2010 and 2021 with 56,685.60 ha, 55,238.90 ha and 50,887.10 ha, respectively. And an increasing trend in the Agricultural Mosaic category with 11,775.15 ha, 13,018.16 ha and 17,794.67 ha, respectively; while for the modeled year 2050 the "Forest" category continues to decrease to 40,674.87 ha, and an increase in the "Agricultural Mosaic" category of 27,338.83 ha. The most influential variable, and one of anthropogenic nature, was the trend toward deforestation, and the one with the least impact was the Water Network.

Keywords: Land cover and land use change, deforestation, territorial modeling, Pozuzo district.

INTRODUCCIÓN

Toda actividad antrópica sobre el territorio afecta directa o indirectamente sobre los complejos sistemas biológicos y sus implicancias negativas sobre los bienes y servicios y ecosistémicos de los cuales depende todo ser viviente, por ello existe una preocupación mundial sobre el uso inadecuado del suelo y su impacto sobre el cambio climático, principalmente en la Amazonía considerado como uno de los principales pulmones del planeta. Ante ello surge la necesidad de comprender la interacción entre los diversos factores ambiental y socioeconómicos que conllevan a la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo.

La ocupación inadecuada del territorio sin caracterizar sus potencialidades y limitaciones, sumado al uso indiscriminado de sus recursos naturales conlleva a conflictos ambientales irreparables, ignorando la vocación natural de conservación o protección para fines agropecuarios con inevitables pérdidas a nivel físico, químico y biológico de los suelos, así como la erosión de los mismos.

Los sistemas de información geográfica son herramientas que permiten identificar, analizar y representar espacialmente el territorio permitiendo visualizar los cambios para comprender los factores implicados en la dinámica, y modelarlos en un tiempo específico con Machine Learning mediante algoritmos complejos y especializados las cadenas de Markov y Células Automatas.

En tal sentido, el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco presenta una reducción de masa forestal producto de un sistema extensivo ganadero vacuno y una agricultura de bajo nivel tecnológico ocasionando cambios de cobertura y uso del suelo, siendo necesario una evaluación multitemporal de la dinámica del uso del suelo para cuantificar los cambios y comprender como los factores ambientales y antropogénicos contribuyen o influyen en la dinámica, por lo que en la presente investigación se propone el análisis histórico de estos procesos y su proyección de los cambios de cobertura y uso del suelo.

El presente estudio contempla la evaluación multitemporal del cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito de Pozuzo de los años 2000, 2010 y 2021 mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat, procesados en la plataforma de Google Earth Engine y presentados por MapBiomás Perú, y predicción futura para el año 2050 con el módulo Land Cover Moduler del software Terrset. La importancia de la presente investigación representa un aporte a los tomadores de decisiones o gestores del territorio del distrito de Pozuzo y provincia de Oxapampa dado que desde el año 2010 es considerada reserva de biosfera existiendo compromisos internacionales bajo los objetivos de desarrollo sostenible con normativa vinculante.

INDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
INDICE	

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Delimitación de la investigación	3
1.2.1.	Delimitación espacial.....	3
1.2.2.	Delimitación temporal.....	4
1.2.3.	Delimitación conceptual	4
1.3.	Formulación del problema.....	4
1.3.1.	Problema general	4
1.3.2.	Problemas específicos	4
1.4.	Formulación de objetivos.....	4
1.4.1.	Objetivo general	4
1.4.2.	Objetivos específicos	5
1.5.	Justificación de la investigación	5
1.5.1.	Justificación Teórica.....	6
1.5.2.	Justificación social.....	6
1.5.3.	Justificación metodológica	7
1.5.4.	Justificación ambiental	7
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	8

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1.	Antecedentes de estudio	9
2.1.1.	Antecedentes internacionales	9
2.1.2.	Antecedentes nacionales	11
2.1.3.	Antecedentes locales	13
2.2.	Bases teóricas científicas	14
2.2.1.	Cambios en la cobertura del suelo o uso del suelo	14
2.2.2.	Teledetección	15
2.2.3.	Las imágenes satelitales su aplicación.....	16
2.2.4.	Modelamiento Geoespacial de cambio de cobertura y uso del suelo.....	16
2.2.5.	Autómatas Celulares (AC)	17
2.2.6.	Cadenas de Markov	19
2.2.7.	Sistemas de información geográfica (SIG).	20
2.2.8.	Land Change Modeler (LCM) en TerrSet: El Análisis de Cambio de Uso del Suelo.....	21
2.3.	Definición de términos conceptuales	25
2.4.	Enfoque filosófico – epistémico.....	25

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1.	Tipo de investigación.....	28
3.2.	Nivel de investigación.....	28
3.3.	Característica de la investigación	28
3.4.	Método de investigación.....	29
3.4.1.	Lugar de ejecución	29

3.4.2. Metodología.....	29
3.5. Diseño de investigación.....	29
3.6. Procedimiento del muestreo.....	29
3.6.1. Población	29
3.6.2. Muestra.....	30
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	31
3.7.1. Mapas de cobertura y uso del suelo	31
3.7.2. Drivers o variables explicativas ambientales y antrópicas	32
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	35
3.8.1. Análisis de cambio.....	36
3.8.2. Potencial de transición	36
3.8.3. Predicción de cambios	40
3.8.4. Tratamiento estadístico	41
3.9. Orientación ética.....	42

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados	43
4.1.1. Análisis de la dinámica multitemporal de cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021 mediante sensores remotos en el distrito de Pozuzo.	43
4.1.2. Evaluación y modelación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo de los años 2000, 2010 y 2021, mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov con el fin de simular el cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050.....	50
4.2. Discusión de resultados	54

4.2.1. Análisis de la dinámica multitemporal de cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021 mediante sensores remotos en el distrito de Pozuzo.	54
4.2.2. Evaluación y modelación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo de los años 2000, 2010 y 2021, mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov con el fin de simular el cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050.....	56

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de Clases o categorías de cobertura y uso del suelo para el distrito de Pozuzo.....	31
Tabla 2. Drivers o variables explicativas recopiladas o elaboradas.....	33
Tabla 3. Comportamiento del submodelo por transición y persistencia.....	40
Tabla 4. Aumento y reducción de la cobertura y uso del suelo 2000 – 2021 en el distrito de Pozuzo.....	44
Tabla 5. Comparación de resultados entre Mapa realidad MapBiomass y Mapa Predictivo para el año 2021	48
Tabla 6. Reporte de clasificación año de referencia 2021 y prospectiva al año 2050.	51
Tabla 7. Sensibilidad del modelo con respecto a variables o divers a ser constantes	52
Tabla 8. Contrastación de variables por etapas	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración del modelo de AC.....	18
Figura 2. Etapas para la generación de Mapas del geoportal MapBiomias Perú.....	32
Figura 3. Variables independientes de la modelación.....	34
Figura 4. Módulo LCM, Análisis de cambios.....	37
Figura 5. Mapa de cambios o transiciones predominantes 2000 a 2010	38
Figura 6. Submodelos de transición de 2000 a 2010.....	38
Figura 7. Variables ambientales y antrópicas usas para el módulo LCM	39
Figura 8. Submodelo de transición para los años 2000 – 2010, LCM.....	40
Figura 9. Cobertura y uso de suelo del distrito de Pozuzo año 2000, 2010 y 2021....	44
Figura 10. Mapa de cobertura y uso del suelo, zona terrestre norte PNM en 1990....	45
Figura 11. Mapa de cobertura y uso del suelo, zona terrestre norte PNM en 1990....	46
Figura 12. Mapa de cobertura y uso del suelo, zona terrestre norte PNM en 1990....	47
Figura 13. Mapa predictivo de cobertura y uso del suelo año 2021	49
Figura 14. Resultados del módulo válídate mapa modelo 2021 vs mapa 2021 MapBiomias ajustado en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, Pasco – Perú.	50
Figura 15. Resultados del módulo válídate mapa modelo 2021 vs mapa 2021 MapBiomias ajustado en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, Pasco – Perú.	53
Figura 16. Perdida de bosque 2001 – 2022 en la provincia de Oxapampa.	54
Figura 17. Perdida de bosque 2001 – 2022 en el distrito de Pozuzo.	55
Figura 18. Comparación de cambio de cobertura y uso de suelos año 2021 realidad vresus predictivo según cadenas de Markov.....	57

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La provincia de Oxapampa, Región Pasco, se ubica en la zona central de la Cordillera Oriental, abarcando las Cordilleras Yanachaga–Chemillén, San Matías, San Carlos y Sira, que delimitan principalmente con las subcuencas de los ríos Pozuzo, Palcazú y Pichis.

Constituye un territorio muy importante de conservación por la presencia de culturas indígenas (Yánesha y Asháninka), colonos Austro Alemanes y migrantes de procedencia andina, cultivos sostenibles y áreas naturales protegidas (Parque Nacional Yanachaga Chemillén, la Reserva Comunal Yánesha, el Bosque de Protección de San Matías San Carlos y la Reserva Comunal El Sira). Asimismo, su notable gradiente altitudinal (de páramos a llanura amazónica), sumada a su variedad climática genera una alta variedad de formaciones ecológicas en un espacio geográfico relativamente pequeño, con una consecuente alta diversidad biológica. Posee ambientes acuáticos en interrelación con el bosque que permiten una fauna muy variada, conservando bosques inalterados y albergando endemismos de interés nacional e internacional. Ante lo antes mencionado, el 02 de junio del 2010 la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)

reconoció a la provincia de Oxapampa como “Reserva de Biosfera Oxapampa-Asháninka-Yánesha”.

Sin embargo, la deforestación provocada por la ampliación de la frontera agropecuaria, agricultura migratoria, tala ilegal e incendios forestales, están poniendo en riesgo la denominación de Reserva de Biosfera para la Provincia, así como la pérdida de riqueza biológica, desabasto de agua y aceleración del cambio climático ya que, al remover la cobertura vegetal se libera el bióxido de carbono (CO₂) almacenado, entre otros.

Lambin et al., (2006) menciona que “la deforestación se asocia en los procesos de cambio de cobertura boscosa y uso del suelo”. El cambio en la cobertura del suelo es un tema de interés global por las implicaciones de la dinámica en la evolución del suelo y sus tendencias, ya sea como consecuencia de los cambios geográficos (cambios en la cobertura del suelo, degradación del suelo, degradación forestal, entre otros). Los cambios de cobertura y uso del suelo son reconocidos como una de las principales causas de deterioro ambiental, con una influencia muy importante en la dinámica hídrica superficial (Nágera *et al.*, 2010).

Es imprescindible entender el comportamiento evolutivo o dinámica de los cambios de cobertura o uso de suelo, ante ello en las últimas décadas el desarrollo de los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada, principalmente, a los siguientes aspectos: (a) Explorar los variados mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto; (b) Proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y; (c) Evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo et al., 2007). De la diversidad de modelos, los basados en transición espacial comprenden, principalmente, las técnicas

estocásticas basadas en el método de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Zhou y Liebhold, 1995; Pontius y Malanson, 2005). Estos modelos asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Las investigaciones que emplean esta aproximación discuten la tradicional función de decaimiento de distancia. En particular, ellos cuestionan el supuesto de equilibrio y precisan que la complejidad que suponen los modelos basados en regresión es despejada como ruido (Aguayo *et al.*, 2007). Los AC incorporan reglas simples acerca de los efectos de adyacencia espacial que gobiernan la dinámica del sistema y que dan lugar a patrones de comportamientos emergentes que son usualmente más complejos que aquellos generados por simples modelos de equilibrio.

En este sentido el distrito de Pozuzo no es ajena al tema expuesto, pues está experimentando intensivamente cambios de uso de suelo principalmente por factores antropogénicos como la ampliación de la frontera agropecuaria, principalmente por pastizales.

Ante lo expuesto, la presente investigación pretende identificar, analizar y modelar la dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el distrito de Pozuzo a través de las cadenas de Márkov para el periodo 2000 – 2050 y escenarios futuros de cambio de cobertura y uso de suelo para los años 2021 – 2050 mediante Autómatas Celulares; asimismo la investigación pretende ser un instrumento de gestión ambiental para los procesos de ordenamiento territorial en el distrito.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación espacial

La investigación comprende el territorio político del distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco, Perú.

1.2.2. Delimitación temporal

El periodo que comprende el estudio abarcará los meses de setiembre a noviembre del 2023.

1.2.3. Delimitación conceptual

Determinar el cambio de uso de suelo y cobertura para los años 2000, 2010 y 2021 mediante el procesamiento y análisis de imágenes satelitales, así como la proyección futura para los próximos 30 años, es decir para el 2050.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo las condiciones ambientales y antrópicas se asocian en la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021, mediante el uso de sensores remotos, autómatas celulares y Cadenas de Márkov con el fin simular el cambio de uso de suelo para el año 2050 en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la dinámica multitemporal del cambio de cobertura y uso del suelo para los años 2000, 2010 y 2021 mediante el uso de sensores remotos en el distrito de Pozuzo?
- b. ¿Evaluar y modelar condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo ocurrido durante los años 2000, 2010 y 2021 mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov nos permitirán simular la dinámica de cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar y modelar las condiciones ambientales y antrópicas que se asocian en la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000. 2010 y 2021 mediante de sensores remotos, autómatas celulares y

Cadenas de Márkov con el fin simular el cambio de uso de suelo para el año 2050 en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Analizar la dinámica multitemporal de cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021 mediante sensores remotos en el distrito de Pozuzo.
- b. Evaluar y modelar las condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo de los años 2000, 2010 y 2021, mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov con el fin de simular el cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050.

1.5. Justificación de la investigación

En los últimos años, ha habido un aumento en la investigación enfocada en el análisis y modelado de cambios en el uso del suelo, especialmente en los procesos de deforestación, cambio climático, problemas de recursos hídricos y la dinámica de la urbanización. Se busca identificar las causas y consecuencias de esto en los ámbitos ecosistémico, social y económico.

Estudiar la cobertura vegetal y los cambios en el uso del suelo ha demostrado ser un proceso muy complejo y requiere información cartográfica muy detallada y la comprensión de la dinámica de estos cambios; sin embargo, este proceso podría ser mejor entendido si se contase con información sobre los cambios de vegetación que se producen a lo largo del tiempo dentro de la cuenca a través el uso de las imágenes satelitales, sistemas de información geográfica y teledetección. Sin embargo, se puede comprender mejor este proceso al utilizar imágenes satelitales, sistemas de información geográfica y sensores remotos, obteniendo información sobre los cambios en la vegetación que ocurren con el tiempo en la cuenca.

El distrito de Pozuzo a través del tiempo viene experimentando por diversos cambios a nivel de su cobertura y uso del suelo en toda su superficie de una manera acelerada y alarmante, pues su área boscosa es fuertemente impactada por la expansión de los pastizales, extracción de madera y cultivos agrícolas, conllevando a un impacto negativo de sus ecosistemas y servicios ambientales.

1.5.1. Justificación Teórica

El estudio se basa en teorías y modelos científicos vinculados a las modificaciones en la cobertura y el uso del suelo, basándose en:

- **Modelos de transición espacial** (Cadenas de Markov y Autómatas Celulares), que facilitan la predicción de patrones de cambio futuros (Aguayo et al., 2009; Pontius, 2000).
- **Dinámica de ecosistemas y deforestación**, respaldada por investigaciones como las de Lambin et al. (2003) y Nájera et al. (2010), que relacionan la disminución de la cobertura de vegetación con elementos socioeconómicos y ambientales.
- **Tecnologías de teledetección y SIG**, que simplifican el análisis de imágenes satelitales multitemporales para valorar variaciones en el paisaje. La investigación proporcionará nuevos saberes al utilizar estos modelos en un área de gran biodiversidad e importancia ecológica, tal como la Reserva de Biosfera.

1.5.2. Justificación social

- La provincia de Oxapampa acoge a comunidades indígenas (Yánesha, Asháninka) y colonos de origen austro-aleman, cuya supervivencia se basa en los recursos del entorno natural.
- La deforestación causada por la expansión agropecuaria, la tala ilegal y los incendios pone en peligro sus fuentes de alimento, la disponibilidad de agua y la preservación cultural.

- Los resultados servirán como herramienta de gestión territorial para autoridades locales y comunidades, facilitando políticas de ordenamiento sostenible.

1.5.3. Justificación metodológica

- Aplica métodos innovadores tales como:
 - Detectores a distancia para rastrear modificaciones históricas (2000–2021).
 - Modelo predictivo (Cadenas de Markov + Autómatas Celulares) para diseñar panoramas para el año 2050.
- Vence las restricciones de investigaciones anteriores al incorporar factores antrópicos y ambientales.
- La metodología sugerida puede ser replicada en otras regiones de la Amazonía que enfrenten problemas parecidos.

1.5.4. Justificación ambiental

- El sector de Pozuzo forma parte de la Reserva de Biosfera Oxapampa Asháninka Yánesha, que acoge ecosistemas singulares, bosques primarios y especies autóctonas, cuya desaparición impactaría la biodiversidad y los servicios del ecosistema.
- El estudio detecta tendencias de deforestación que favorecen el cambio climático y la modificación del ciclo del agua.
- Los hallazgos facilitarán:
 - Elaborar tácticas de preservación.
 - Disminuir las consecuencias de la expansión agropecuaria.
 - Mantener políticas gubernamentales para preservar la denominación de Reserva de Biosfera, otorgada por la Unesco en 2010.

Por otro lado, durante la busque de información base para la realización de la presente tesis no se identificó estudios directamente realizados en la zona a estudiar, ni temas relacionados con nuestros objetivos, por lo que la presente investigación contribuirá a cubrir esta falta de información, y ser un instrumento de gestión en predicciones en bien de la conservación de los ecosistemas del distrito.

1.6. Limitaciones de la investigación

Las principales limitaciones que se identifican para la ejecución de la presente investigación se basan en la falta de información o estudios relacionados con el que se propone, asimismo la fisiografía del distrito puede limitar el desplazamiento al momento de realizar la validación de los mapas. Por otro lado, la alta frecuencia y permanencia de nubes en la zona influirá en los resultados de las imágenes satelitales por ende en la tesis.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Pinos (2015) con el fin de obtener el grado de magister en la Universidad de Cuenca, Ecuador, sustentó la tesis titulada: Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial caso Cantón Cuenca con el objetivo de evaluar de una metodología para la construcción de escenarios futuros a año 2010 y 2030 a partir de un análisis multitemporal con imágenes satélites Landsat de los años 1991 y 2001. La metodología empleó modelos de simulación (Autómatas celulares de cadenas de Markov CA_MARKOV y el Land Change Modeler -LCM), en base al análisis histórico o multitemporal (cadenas de Markov), en la cobertura y uso del suelo del cantón. Los resultados muestran que la cobertura de plantas de páramo, herbáceas, leñosas y leñosas nativas representa una pérdida de 49.066,3 hectáreas, equivalente a -2% hectáreas por año. En 1991 el total era de 267.873,7 hectáreas, pero en 2001 disminuyó a 218.807,4 hectáreas. Esto indica que la mayoría de los cambios se realizaron en estas portadas. La categoría pastos y cultivos presentó el mayor crecimiento con 22.796,1 ha en 1991 y 70.639,8 ha en 2001, lo que corresponde a una tasa de variación anual del 12%. Las

categorías de agua, suelo baldío y suelo urbano fueron 6.877,8 ha en 1991 y 8.100 ha en 2001, con una tasa de variación anual del 1,6%.

Hurtado (2014) con el fin de optar el grado académico de magister en geomática en la Universidad Nacional de la Plata, sustentó la tesis titulada: “Análisis, modelamiento y simulación espacial del cambio de cobertura del suelo, entre las áreas naturales y las de origen antrópico en la provincia de Napo (Ecuador), para el período 1990 – 2020”. El objetivo general fue analizar, modelar y simular el cambio de cobertura entre áreas naturales y áreas de origen antrópico, para determinar zonas ya deforestadas y aquellas susceptibles a la deforestación en la provincia de Napo, para el período 1990 – 2020. La metodología utilizada fue la creación de una base de datos geográfica que contiene cartografía básica y temática de Napo (Ecuador). En esta base de datos, los mapas de cobertura terrestre para 2002 y 2008 resaltan 1990 a partir de imágenes de sensores TM (Landsat 4 y 5). A continuación, realizamos un modelo probabilístico de la existencia de cobertura antrópica mediante una técnica de regresión logística multivariante. El modelo se evaluó mediante la curva ROC (característica operativa relativa) y se encontró un alto poder predictivo en el modelo (AUC 0.89). Esto distingue que la distancia entre áreas densamente pobladas y vías de comunicación es la variable más influyente para la presencia de cobertura antrópica.

El mapa del modelo probabilístico resultante se utilizó como entrada para un modelo de transición de cobertura que combinaba autómatas celulares y cadenas de Markov para simular el mapa de tipo de cobertura de 2008 (natural o antrópico). El mapa simulado se evaluó con una tasa de coincidencia general del 93 %. Este es un buen indicador. Las simulaciones se realizaron en 2015 y 2020, especialmente en el río Napo cerca de las principales áreas densamente pobladas como Tena, luego de que los modelos estuvieran disponibles para ejecutar las simulaciones con la certeza requerida. Sin embargo, el área

protegida en la simulación muestra un estado de conservación "natural". Esto puede deberse a la falta de infraestructura vial y condiciones de inaccesibilidad en el sentido de condiciones ambientales especiales. Finalmente, se confirmó que la tasa de deforestación (cambio de la naturaleza al principio antrópico) fue de 4661 ha/año entre 1990 y 2008 y de 3550 ha/año entre 2008 y 2020. Se sugirió que esta tendencia se hizo evidente con el tiempo. En el mejor de los casos, el proceso de deforestación se reduce o al menos se estabiliza.

Sandoval (2009) para optar el título profesional de Geógrafo en la Universidad de Chile sustentó la tesis titulada “análisis del proceso de cambio de uso y cobertura de suelo en la expansión urbana del gran Valparaíso, su evolución y escenarios futuros”. Consideró como objetivo principal analizar el uso del suelo y los cambios en la cobertura del suelo por urbanización en el Gran Valparaíso y generar proyecciones que simulen escenarios para 2016 y 2025. La metodología consiste en el procesamiento y análisis multitemporal de uso de suelo de los años 1989, 1998 y 2007 a través de la interpretación de imágenes de satélite LANDSAT TM. Asimismo, se determina la probabilidad de cambio de uso del suelo aplicando el método de cadenas de Markov, para generar más imágenes de aptitud del suelo para cada tipo de uso y cobertura del suelo. Estos procesos se combinan con el uso de autómatas celulares para simular escenarios para los años 2016 - 2025. Concluye con identificar diferentes tasas de crecimiento para usos urbanos a través de escenarios de simulados; además, identifica diferencias en los modelos estadísticos y espaciales debido a distintos escenarios de simulación, así como el alcance de los modelos sustitutos para las superposiciones naturales y casi naturales circundantes.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Chicani y Vilca (2022) con el fin de optar el título profesional de Ingeniero topógrafo y agrimensor en la Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

sustentó la tesis titulada: Análisis multiespectral a través de imágenes satelitales del crecimiento urbano y su impacto en el cambio de uso del suelo agrícola en la ciudad de Juli (2000-2019). El objetivo principal fue determinar el crecimiento urbano de la ciudad de Juli mediante el análisis de imágenes satelitales y medir su impacto en el cambio de uso de suelo agrícola entre 2000-2019. La metodología es descriptiva y correlativa, la aplicación de la teledetección a través de imágenes satelitales, la identificación de terrenos agrícolas (cultivos temporales), la tasa de crecimiento urbano de la ciudad de Juli en el periodo 2000 – 2019. Se realizó el análisis mediante SIG y de esta manera se pudo medir la tasa de crecimiento urbano en uso de suelo agrícola en la ciudad de Juli. Los resultados obtenidos indican que el crecimiento urbano para el 2019 aumentó en un 0,84 % anual, y el uso del suelo agrícola disminuyó en un 0,75 % a lo largo de los años. En cuanto al análisis de varianza realizado, se observaron diferencias en función del uso de suelo urbano y cultivos de tránsito, y se concluyó que luego de realizar el estudio se observó que en el periodo 2000-2019 hubo un aumento significativo de la superficie urbana mientras que el sector agrícola disminuyó significativamente.

Tuesta (2017) para optar el título profesional de ingeniero forestal y medio ambiente en la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Perú, sustentó la tesis intitulada: Prospectiva Del Cambio De Uso De Suelo En El Distrito De Iberia, Tahuamanu – Madre De Dios, Periodo 2004-2030. El principalmente objetivo planteado por autor fue analizar y modelar el cambio de cobertura de bosque a deforestación para determinar el área de deforestación para los años 2004, 2011, 2016 y 2030. El método indica que utilizó imágenes satelitales de sensores Landsat 5 TM (2004 y 2011) y Landsat 8 OLI (2016). Según el informe para el período 2004, 2011 y 2016, el área de deforestación es de 4.824,09 hectáreas, 12.260,08 hectáreas y 17.063,72 hectáreas, respectivamente. La detección de áreas por imágenes satelitales de distintas

características muestra que tienen un grado de cambio creciente en los periodos 2004-2011 (7 años) con 7767.78 ha y 2011-2016 (5 años) 5123.71 ha. Asimismo, para la predicción se utilizó el software TerrSet, módulo Land Change Modeler (LCM) que opera a través del método cadenas de Markov; asimismo, se utilizó el Módulo de Land Change Modeler (LCM) del software TerrSet para predecir los cambios el cual se basa en cadenas de Markov. Para esto, se desarrolló un modelo de pronóstico para el período 2016 y 2030, basado en imágenes de 2004-2011 y 2011-2016. La validación del modelo mostró un ajuste (índice kappa) de 96,61% e identificó 25139,51 ha de área deforestada en 14 años (2016-2030), esta cifra corresponde a 8075,78 ha adicionales.

2.1.3. Antecedentes locales

Ojeda (2023) con el fin de optar el grado Magister Scientie en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, presentó la tesis intitulada “Modelamiento y prognosis espacial del cambio de uso en el suelo de La Subcuenca Chorobamba, Oxapampa - Pasco, 2000 – 2030”. El objetivo principal fue evaluar las trasformaciones en el uso del suelo ocurridas en la Subcuenca mencionada para el periodo 2000-2030 basadas en el análisis y clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 5 y 8 con el algoritmo Random forest en la plataforma de Google Earth Engine. Se establecieron dos categorías o clases: Natural o Antrópica; así mismo, a través de un análisis descriptivo y regresiones logísticas, se establecen los principales factores socioeconómicos y biofísicos que han sido determinantes en las transformaciones o cambios en el periodo mencionado. Mediante el enfoque de Redes Neuronales Artificiales (RNA) se hicieron simulaciones del paisaje para los próximos 10 y 20 años en el simulador Land Change Modeler (LCM) del software Terrset. Los resultados indican que en el periodo 2000 - 2020 fueron 7619.34 hectáreas que se transformaron entre las dos categorías establecidas. Las transformaciones más críticas corresponden a la categoría Natural, que

involucran áreas de bosque natural, puesto que en dicho periodo se perdieron 6196.57 hectáreas que pasaron a ser dedicadas en su mayoría a mosaico de pastos, cultivos y plantaciones forestales, es decir, dentro de la categoría Antrópico y que están influenciadas por las variables de relieve, pendiente, precipitación, temperatura, distancia de vías y distancia a los centros poblados; lográndose determinar una tasa de deforestación anual promedio de 310 has/año. Las simulaciones futuras predicen un comportamiento similar, con pérdidas importantes de bosque natural y también una reconversión en menor grado de Antrópico a bosque natural. Las simulaciones futuras predicen un comportamiento similar, pues para los años 2030 y 2040 la superficie de la clase Natural será de 37742.47 y 35987.51 hectáreas, respectivamente; mientras que la clase Antrópico cubrirá una superficie de 30127.95 y 31882.91 hectáreas para los años mencionados.

2.2. Bases teóricas científicas

2.2.1. Cambios en la cobertura del suelo o uso del suelo

El cambio en la cobertura del suelo es un tema de interés global por las implicaciones de la dinámica en la evolución del suelo y sus tendencias, ya sea como consecuencia de los cambios geográficos (cambios en la cobertura del suelo, degradación del suelo, degradación forestal, entre otros) o los cambios sociales (ocupación y transformación del suelo, expansión de la población, entre otros) (Nágera et al., 2010).

Como menciona Lambin y Meyfroidt (2011) en las últimas décadas, las actividades antropogénicas han repercutido aceleradamente en el cambio de uso de suelo que las naturales, siendo una de las preocupaciones ambientales más álgidas por la alteración de los bienes y servicios que brindan los ecosistemas a escala planetaria.

Actualmente el uso de la tierra tiene un sentido netamente económico a través de las diversas actividades que se pueden desarrollar en base a ellas

como la agricultura, residencial, comercial entre otros, pues la sociedad contemporánea necesita de datos precisos sobre el uso de la tierra con fines académicos, científicos y administrativos; por otro lado, los cambios en el uso del suelo repercuten en la planificación económica local y regional, por lo que con el buen uso del suelo se asegura una adecuada y diversa estructura del paisaje (Campbell y Wynne, 2011).

El cambio de uso de suelo es un proceso complejo debido a las interacciones de los factores ambientales y sociales en distintas escalas espaciales y temporales (Valbuena et al., 2008).

Lambin et al (2001) proponen tres requisitos para poder comprender los patrones de cambio de uso del suelo: 1) Enlazar el comportamiento de las personas y sociedad en su interacción con el uso de suelo 2) Comprender el tipo de relaciones que establece la sociedad con su ambiente 3) Un criterio multitemporal para incorporar los eventos pasados y presentes, en el contexto de la interacción de la sociedad con el ambiente.

2.2.2. Teledetección

Chuvieco (2008) define a la teledetección como una tecnología que puede obtener información digital de objetos en la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo con ellos; para ello es necesario que exista algún tipo de interacción entre el objeto y el sensor, como el flujo de energía procedente de la energía emitida por el propio sensor, o el reflejo de la luz solar sobre la superficie de la tierra. De esta forma, se puede obtener información de capas u objetos por reflexión, emisión o reflexión de emisión.

Similar concepción infiere Lillesand y Kiefer (1994) al manifestar que la teledetección es la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de la información lograda por un dispositivo que no entra en contacto con el objeto, área o fenómeno en estudio.

La teledetección consta de dos procesos en general, que es la adquisición de información y el análisis de la información (Lillesand y Kiefer, 1994). En cuanto a sus elementos fundamentales la teledetección consta de tres: el sensor, el objeto observado y un flujo energético que permita poner a ambos en relación; el flujo puede venir del objeto por reflexión de la luz solar o por energía emitida del mismo objeto, así como del sensor (Padilla et al., 2015).

2.2.3. Las imágenes satelitales su aplicación

Las imágenes satelitales actualmente son ampliamente usadas por entes gubernamentales como privados con fines de investigación, económicas, entre otros; sus aplicaciones son diversas como la identificación y asociación de suelos, análisis de la cobertura y producción forrajera, clasificaciones regionales de uso de suelo y generación de foto- mapas, exploración minera y de petróleo, monitoreo de la polución, cartografía e interpretación geológica, mediciones de la magnitud de nieve, monitoreo del movimiento de glaciales, detección de la erosión de playas, detección del grado de estrés en asociaciones vegetales, clasificación de la cobertura vegetal, y monitoreo de incendios forestales, demostrándose el alto potencial de utilidad para el monitoreo de la superficie terrestre (Coronado, 2001). Precisamente, la capacidad de monitorear los cambios de cobertura y uso de suelo mediante las imágenes satelitales es una de las aplicaciones de mayor importancia a nivel mundial (Aide et al., 2013).

2.2.4. Modelamiento Geoespacial de cambio de cobertura y uso del suelo

Aguayo et al (2007) manifiestan que los modelos de cambio de uso del suelo se han convertido en una poderosa herramienta para el análisis espacial, principalmente dirigido a (1) explorar los diferentes mecanismos que impulsan el cambio de uso del suelo, las variables sociales y los impactos económicos y espaciales sobre ellas. impactos ambientales, sociales y económicos potenciales debido al cambio de uso de la tierra; (3) Evaluar el impacto de

diferentes políticas y sistemas de gestión en el uso de la tierra y patrones de desarrollo.

Los modelos de cambio de uso del suelo usan parámetros simples, incluyendo la extensión de las actuales áreas urbanas, las principales vías de transporte, la distancia a los mercados de trabajo, bienes e insumos, las condiciones topográficas y la existencia de tierras en situación especial (i.e. áreas protegidas, zonas de drenaje). El foco principal en el esfuerzo de la modelación, es la identificación de los factores físicos y socioeconómicos que determinan o condicionan la presión sobre el cambio de uso del suelo en un territorio determinado (Henríquez, 2006).

La modelación de cambios de uso del suelo principalmente se basa en regresión y transición espacial; la primera se establece con variables predictivas y la probabilidad del cambio de uso del suelo.

Generalmente, en la modelación en base a regresión se han usado aproximaciones lineales, como la regresión logística, no lineales, vinculadas a redes neuronales, y modelos aditivos generalizados (Pijanowski et al., 2005). Por otro lado, los modelos basados en transición espacial emplean los métodos de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares, las cuales se explican en otro ítem.

Una herramienta imprescindible que se suma a los modelos antes mencionados son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) por la facilidad del manejo, análisis, cuantificación, evaluación y visualización espacial de las variables asociadas a los modelos de cambio de uso de suelo.

2.2.5. Autómatas Celulares (AC)

Los autómatas celulares son redes simples de autómatas conectados localmente. Cada autómata simple produce una salida a partir de varias entradas y cambia su estado en el proceso de acuerdo con una función de transición. En términos generales, en los autómatas celulares, el estado de una

celda en una generación determinada depende completamente del estado de las celdas vecinas y de su propio estado en la generación anterior (Tapia y Aranguen., 2008). La razón de tal modelo de AC es que puede representar fenómenos en los que las variables varían discretamente según su estado en lugar de depender continuamente de una función matemática.

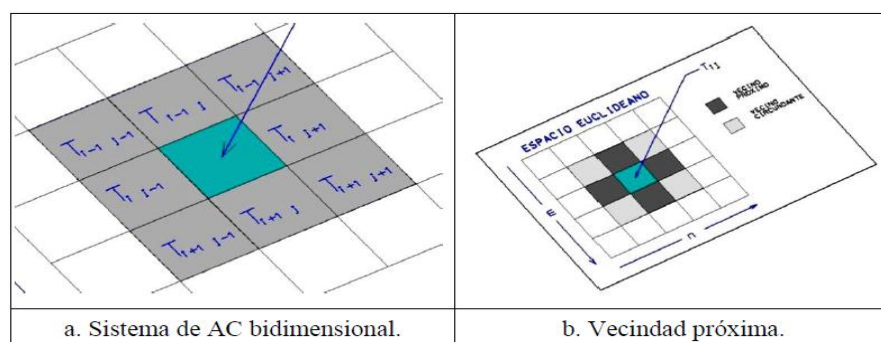
Para llegar a un modelo de CA, se deben seguir ciertas pautas, entre las que destacan las reglas de transformación en cada iteración. Por lo tanto, el estado de un AC en el tiempo $t+1$ (E_{p+1Tij}) es función de su estado en el tiempo t (E_{pTij}) y de los estados de todos los elementos ubicados en su vecindad, y se puede expresar de la siguiente manera (Figura 1):

$$E_{p+1Tij} = f(E_{p+1Tij}, E_{pT_{i-1}j-1}, E_{pT_{i-1}j}, E_{pT_{i-1}j+1}, E_{pT_{ij-1}}, E_{pT_{ij}}, E_{pT_{ij+1}}, E_{pT_{i+1}j-1}, E_{pT_{i+1}j}, E_{pT_{i+1}j+1})$$

Donde:

- T_{ij} representa el AC o celda de la posición i,j en el espacio (Figura 1a).
- E_p representa el conjunto $[a, b, c, d, \dots, n]$ de estados que puede tomar el AC en el tiempo o iteración p
- E_{p+1Tij} representa el estado particular de un AC en función del estado de sus vecinos y de las reglas de transición planteadas.

Figura 1. Ilustración del modelo de AC



Fuente: *Revista Geoespacial - ESPE, Padilla. Q*

Representa el principio de funcionamiento de los autómatas celulares, donde cada celda del territorio cambia de estado según su propio valor y el de sus celdas vecinas. Este modelo se usa para simular procesos espaciales

Se puede hacer la premisa de que las celdas que están más juntas tendrán un mayor impacto que las celdas en la diagonal. Es decir, un vecino con el mismo estado, pero en la diagonal ($T_{i-1 j-1}$, $T_{i-1 j+1}$, $T_{i+1 j-1}$, $T_{i+1 j+1}$) tendría una regla adicional además de Diferentes transiciones a vecinos inmediatamente consecutivos (Fig. 1b), que incluirán sus estados vecinos.

2.2.6. Cadenas de Markov

Las cadenas de Markov son herramientas para analizar el comportamiento y la gobernanza de ciertos tipos de procesos estocásticos, es decir, procesos en torno a la evolución no determinista (CCS) de un conjunto de estados a lo largo del tiempo. Así, una cadena de Markov representa un sistema que cambia de estado con el tiempo, y cada cambio es una transición del sistema.

Si, en un modelo basado en cadenas de Markov, la distribución espacial del uso y/o cobertura del suelo analizada en el tiempo t es el resultado de la situación en el tiempo anterior $t-1$, significa que la probabilidad de que ocurra un evento está en el estado anterior para ese evento (Buzai, 2005).

El método de análisis espacial significa que hay dos medidas de tiempo t_1 y t_2 . Genera una matriz de probabilidad de cambio (P) a partir de ella. Multiplica esta matriz de probabilidad por el número de píxeles de cada clase en t_2 para obtener el área estimada (o el número de píxeles) de cada clase para t_3 . Por lo tanto, la matriz P está en el corazón del proceso de transición porque la probabilidad de cambiar de una clase a otra se ha medido durante un período de tiempo y es útil para extrapolar cálculos a un período futuro.

Si el estado de un sistema (tomado de Buzai, 2005) puede ser definido como:

$$X(t)=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$$

Donde x_i representan las proporciones de cada categoría (p.e. píxeles) para el tiempo t , el estado del sistema para el tiempo $t+1$ se logra multiplicando el vector $(x(t))$ por la matriz de probabilidad (P) de cambios de la forma:

$$X(t+1) = X(t) \cdot P$$

Y de esta forma continuaría hacia los momentos $t_1, t_2, \dots, t_n$

$$X(t+2) = X(t+1) \cdot P = X(t) \cdot P^2$$

$$X(t+3) = X(t+2) \cdot P = X(t+1) \cdot P^2 = X(t) \cdot P^3$$

Por lo que el estado del sistema queda definido por: $X(t+k) = X(t) \cdot P^k$

2.2.7. Sistemas de información geográfica (SIG).

Un sistema de información geográfica (SIG) es un sistema informático para capturar, almacenar, consultar, analizar y mostrar datos geoespaciales (Chang, 2016).

En las últimas décadas, los sistemas de información geográfica (SIG) se han convertido en uno de los componentes más importantes del arsenal de herramientas a disposición del geógrafo, así como en una de las formas más importantes en las que se pueden aplicar los resultados de la investigación geográfica a la solución de los problemas cotidianos.

Desde su creación, los SIG han sido importantes en la gestión de recursos, la planificación del uso del suelo, la evaluación de riesgos naturales, el análisis del hábitat de la fauna, el control de las zonas ribereñas y la gestión del tiempo. Los SIG también se han utilizado para la planificación de emergencias, el análisis de la delincuencia, la salud pública, la gestión de registros de tierras, las aplicaciones de transporte, la agricultura de precisión y las operaciones militares.

Los datos geoespaciales describen tanto la ubicación como los atributos de las características espaciales. Por ejemplo, para describir una carretera, se

hace referencia a su ubicación (es decir, dónde está) y a sus atributos (por ejemplo, longitud, nombre, límite de velocidad y dirección). Un SIG permite al usuario gestionar los datos de las carreteras y muchos otros datos geoespaciales, lo que lo distingue de los sistemas de gestión empresarial que tratan datos no espaciales. Un SIG incluye hardware, software, personal y organización, además de datos geoespaciales (Douglas et al., 2016).

2.2.8. Land Change Modeler (LCM) en TerrSet: El Análisis de Cambio de Uso del Suelo

El Modelo de Cambio del Suelo (LCM), incorporado en el programa TerrSet (creado por Clark Labs), es un instrumento especializado para el estudio, modelado y proyección de variaciones en la cobertura y utilización del terreno. Su estructura fusiona métodos sofisticados de geotecnología y modelado espacial, siendo frecuentemente empleada en estudios ambientales, organización territorial y preservación de ecosistemas (Clark Labs., 2023).

- **Fundamentos Teóricos del Land Change Modeler (LCM)**

El modelo de cambio de tierras (LCM) de TerrSet se basa en un robusto marco teórico interdisciplinario que incorpora conceptos de ecología del paisaje, estadística espacial y teoría de sistemas complicados. Su principal enfoque se centra en el estudio de patrones espacio-temporales de variación en la cobertura terrestre, basándose en la teoría de la transición de usos del suelo planteada por Lambin et al. (2001). Esta teoría sostiene que las modificaciones en el paisaje se originan debido a interacciones complejas entre elementos biofísicos (como el clima y la topografía) y socioeconómicos (como las políticas de desarrollo y expansión popular).

El modelo emplea cadenas de Markov para medir las probabilidades de transición entre distintas categorías de uso del suelo, fundamentándose en la suposición de que los patrones de cambio histórico pueden ser proyectados hacia el futuro. No obstante, en contraposición a los modelos

convencionales, LCM sobrepasa las restricciones de los métodos puramente estadísticos a través de la incorporación de Redes Neuronales Artificiales (RNA), las cuales facilitan la identificación de vínculos no lineales entre las variables conductoras del cambio. Las RNA en LCM operan a través de un proceso de aprendizaje automático que detecta patrones encubiertos en la información, incrementando de manera significativa la exactitud predictiva (Eastman, 2016).

Además, el módulo incluye Autómatas Celulares (AC) para representar la dimensión espacial de la transformación. Los AC funcionan basándose en el principio de que la condición futura de una celda en el paisaje no solo se basa en sus propiedades inherentes, sino también en las condiciones de las celdas contiguas. Esta perspectiva resulta especialmente beneficiosa para simular procesos como el crecimiento urbano o la división de hábitats, en los que los impactos de la vecindad son cruciales.

- **Funcionalidades Clave Detalladas**

- **Análisis retrospectivo de cambios:**

LCM proporciona instrumentos sofisticados para el estudio diacrónico de variaciones en el paisaje. Su algoritmo para detectar cambios facilita la identificación de transiciones entre categorías con una exactitud que supera el 85% al emplear imágenes de resolución media-alta. El módulo produce matrices de transición exhaustivas que no solo detallan las tasas brutas de cambio, sino también las rutas concretas de conversión (como, por ejemplo, de bosque primario a agricultura intensiva) (Eastman, 2016).

- **Modelado predictivo avanzado:**

La aplicación de RNA en LCM comprende una estructura de tres niveles (entrada, oculta y salida) con características de activación sigmoide,

mejorada a través del algoritmo de retropropagación. Esta estructura posibilita al modelo:

1. Gestionar varias variables predictivas al mismo tiempo.
2. Capturar relaciones complicadas entre factores. Identificar interacciones complejas entre elementos.
3. Elaborar mapas de probabilidad de variación con una resolución espacial precisa.

- **Validación robusta:**

LCM incluye protocolos de validación estrictos que sobrepasan los procedimientos tradicionales:

- ✓ Estudio de sensibilidad para medir el efecto de cada variable predictiva.
- ✓ Evaluación de la influencia de cada variable predictiva.
- ✓ Verificación temporal (hindcasting) que examina el modelo en épocas históricas.
- ✓ Índices de concordancia espacial que no solo evalúan la precisión temática, sino también la exactitud en la ubicación de las variaciones.

- **Aplicaciones en investigación científica**

Dentro del marco de la planificación territorial, LCM ha evidenciado su eficacia en:

- ✓ Analizar perspectivas alternativas de crecimiento urbano.
- ✓ Detectar zonas de prioridad para la conservación
- ✓ Estimar los efectos acumulativos de los proyectos de infraestructura

- **Limitaciones y consideraciones metodológicas**

Pese a su capacidad analítica, LCM tiene restricciones que los investigadores deben tener en cuenta:

- **Dependencia de datos de calidad:**
 - ✓ Necesita largas series de tiempo (>15 años) para calibrar correctamente los modelos.
 - ✓ La resolución espacial de las imágenes restringe la identificación de variaciones en paisajes diversos.
 - ✓ Los fallos en la clasificación inicial se difunden y potencian en las proyecciones.
 - ✓ Los errores en la clasificación inicial se intensifican y se propagan en las proyecciones posteriores.
- **Supuestos metodológicos:**
 - ✓ Admite estacionariedad en los patrones de cambio (no registra momentos de cambio o cambios bruscos).
 - ✓ Las ARN operan como "cajas negras", lo que complica la comprensión causal de las relaciones.
 - ✓ Los AC facilitan las relaciones espaciales bajo normas de vecindad establecidas
- **Retos computacionales:**
 - ✓ El manejo de zonas amplias (>1 millón de ha) necesita de hardware especializado. El manejo de áreas amplias (>1 millón de ha) demanda equipos especializados.
 - ✓ La calibración de parámetros en ARN puede resultar demandante en términos de tiempo.
 - ✓ Los formatos de salida podrían necesitar una conversión para fusionarse con otros SIG.

Estas restricciones no anulan la eficacia del modelo, pero subrayan la importancia de enriquecer sus hallazgos con labores de campo, análisis cualitativos y otras técnicas de modelación.

2.3. Definición de términos conceptuales

- **Uso de la tierra:** se define como los arreglos, actividades y demás aportaciones realizadas por las personas en un tipo de cubierta determinado, la cual puede ser de origen natural o antropogénico (FAO, 2010).
- **Cambio de uso de la tierra:** se refiere al cambio en el uso o manejo de la tierra por los seres humanos, que puede inducir un cambio de la cubierta terrestre (IPCC, 2012).
- **La cadena de Markov:** También conocida como modelo de Markov o proceso de Markov, es un concepto desarrollado dentro de la teoría de la probabilidad y la estadística que establece una fuerte dependencia entre un evento y otro suceso anterior. Su principal utilidad es el análisis del comportamiento de procesos estocásticos. (Sánchez, J. 2016 – Economipedia.com).
- **Autómata Celular:** Es un modelo matemático para un sistema dinámico que consiste en una rejilla formada por celdas que pueden cambiar de estado o no dependiendo diversas leyes. Es un espacio regular. Tiene un conjunto de estados finito y cada elemento toma un valor de este conjunto de estados. Presenta una función de transición local que es la regla de evolución que determina el comportamiento del autómata.

2.4. Enfoque filosófico – epistémico

La investigación se enfoca en la geografía como disciplina científica, que ha pasado por diversos paradigmas a lo largo del tiempo para abordar el espacio geográfico. Corrientes como la geografía tradicional y las posteriores a la segunda guerra mundial han dado forma a enfoques cuantitativos, sistemáticos, ambientales y culturales. En particular, la geografía ambiental y automatizada son relevantes para los objetivos de la tesis. La geografía ambiental, con raíces

desde la antigüedad, ha enfrentado obstáculos debido a visiones fragmentarias. Sin embargo, en las décadas de 1980 y 1990, se retomó su importancia frente a las problemáticas ambientales generadas por la sociedad tecnológica y consumista. Por otro lado, la geografía automatizada surge como una respuesta al paradigma tecnológico actual, con un enfoque instrumental holístico en creación. A partir de 1980, se aceleró la automatización de los procedimientos de análisis espacial, impactando significativamente en diversas disciplinas científicas. Estos enfoques geográficos son vitales en la educación, concientización y preservación ambiental, siendo decisivos en la prevención y solución de problemáticas en diferentes países. (Oropeza y Díaz, 2007).

Formulación de hipótesis

Hipótesis General:

Las condiciones ambientales y antrópicas influyen significativamente en la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito de Pozuzo, provocando una reducción progresiva de las áreas boscosas y un incremento del mosaico agropecuario proyectado al año 2050.

Hipótesis Específicas:

- ✓ Las variables ambientales (pendiente, altitud y precipitación) determinan la distribución natural de los tipos de cobertura en el distrito de Pozuzo.
- ✓ Las variables antrópicas (deforestación, expansión agropecuaria y cercanía a vías y centros poblados) son las principales causas del cambio de uso del suelo.
- ✓ El modelo predictivo basado en Cadenas de Markov y Autómatas Celulares permite simular con alta precisión la dinámica futura del cambio de cobertura y uso del suelo hasta el año 2050.

Identificación de variables

Variable independiente:

- ✓ Condiciones ambientales y antrópicas

Comprende los factores naturales y humanos que influyen en la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito de Pozuzo. Entre ellas se encuentran: altitud, pendiente, precipitación, temperatura, red hídrica, red vial, centros poblados y tendencia a la deforestación. Estas variables determinan el comportamiento espacial del territorio y su grado de transformación

Variable dependiente:

- ✓ Cambio de cobertura y uso del suelo

Se refiere a la variación espacial y temporal de las categorías de cobertura (bosque, pastizal, mosaico agropecuario, áreas sin vegetación e infraestructura, cuerpos de agua) durante los años 2000, 2010, 2021 y su proyección al año 2050. Estas transformaciones fueron determinadas mediante el modelamiento geoespacial con el módulo Land Change Modeler del software TerrSet.

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se caracteriza por ser cualitativa, empleando la técnica documental (Cadena *et al.*, 2017), es decir se usó datos del Geoportal MapBiomas Perú para luego organizar, analizar e interpretar mediante tablas e ilustraciones (mapas) los cambios de uso de suelo y cobertura del distrito de Pozuzo.

Asimismo, por las características de la investigación es del tipo aplicada, ya que permite prospectar el cambio de uso del suelo para el año 2050 mediante software especializado.

3.2. Nivel de investigación

Según los objetivos de la presente investigación el nivel corresponde al predictivo (Supo, 2024), ya que se desea conocer mediante la evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas el cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito de Pozuzo para el año 2050.

3.3. Característica de la investigación

Dada las características de la presente investigación se concluye que corresponde a una investigación mixta (Hamui-Sutton, 2013) dado que se ha

recopilado, analizado e integrado tanto investigación cuantitativa como cualitativa, con el fin de comprender mejor el problema de investigación.

3.4. Método de investigación

3.4.1. Lugar de ejecución

La ejecución del presente proyecto se ejecutó en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, Región Pasco. Latitud Sur: 10° 04' 11" S. Longitud Oeste: 75° 33' 02" W. Altitud: 824 m s. n. m. Superficie: 716.11 km² o 71,610.50 ha.

3.4.2. Metodología

El método de investigación aplicable para la presente investigación es del tipo "Mixta", pues es Cuantitativo al pretender cuantificar las áreas o superficies de cambio de cobertura y uso del suelo en periodos determinados (2000, 2010, 2021 y 2050); pero a su vez es Cualitativo porque trata de explicar la influencia de las variables independientes e intervinientes sobre el incremento o reducción del cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito de Pozuzo mediante herramientas y tecnología geoespacial.

3.5. Diseño de investigación

El diseño de la investigación se alinea al tipo no experimental Debido a que no se realizará la manipulación de variables, pues solo se observará la realidad del territorio tal y como se da en su contexto natural para los años 2000, 2010 y 2021 del distrito de Pozuzo mediante software Arcgis 10.6 y Terrset, y simular su cambio para el año 2050.

3.6. Procedimiento del muestreo

3.6.1. Población

Se considerará como población al territorio político del distrito de Pozuzo, el cual cubre una superficie de 71610.5 ha (716.11 Km²).

3.6.2. Muestra

Las muestras aplican para la validación de los mapas que se generarán para los años 2000, 2010 y 2021 mediante el índice de Kappa, el cual se detalla más adelante. Se coleccionará un determinado número de muestras mediante una distribución binomial de probabilidad, para lo cual se usará la siguiente función:

$$n = \frac{Z^2 \times p(1 - p) \times N}{e^2(N - 1) + Z^2 \times p(1 - p)}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra a ser encuestada.

N = Tamaño de la población.

Z = Nivel de confianza del 95% (margen de error del 5%) de acuerdo a la tabla de distribución normal le corresponde un valor de 1.96

p = Probabilidad a favor de 50% (valor de 0.5)

e = Error estándar de estimación de 5% (valor de 0.05)

$$n = \frac{(1.96)^2 * 0.5(0.5 * 71610.5)}{(71610.5 - 1) * 0.05^2 + 1.96^2 + (0.5 * 0.5)} \quad n = 383$$

Esta muestra se distribuirá en toda el área de estudio a través de un modelo de muestreo probabilístico, en el que se consideran las unidades de muestreo ubicadas en el área de estudio con probabilidad mayor a cero, y a este tipo de probabilidad de selección se le denomina probabilidad de inclusión.

François et al., (2003) manifiesta “las técnicas de muestreo más empleadas en el proceso de evaluación de la contabilidad temática son: aleatorio simple, aleatorio estratificado, sistemático, sistemático no alineado y por conglomerados”.

La clasificación de las clases o categorías de cobertura y uso del suelo se basaron en la Clase Nivel 2 establecida por MapBiomás Perú homologada con el Mapa de Cobertura vegetal (MINAM, 2015) y adaptadas según las necesidades de la presente investigación.

Tabla 1. Descripción de Clases o categorías de cobertura y uso del suelo para el distrito de Pozuzo

Clase Nivel 1	Clase Nivel 2	Bioma	Código
1. Formación boscosa	Bosque	Amazonía	3
2. Formación natural no boscosa	Pastizal/herbazal	Amazonía /Andes	12
	Matorral y formaciones no boscosas	Amazonía /Andes	13
3. Área agropecuaria	Pasto	Amazonía /Andes	15
	Mosaico agropecuario	Amazonía /Andes	21
4. Área sin vegetación	Infraestructura	Amazonía	24
	Áreas sin Vegetación	Amazonía/Andes	25
5. Cuerpo de agua	Río	Amazonía	33

Fuente: Adaptación en base a MapBiomass Perú

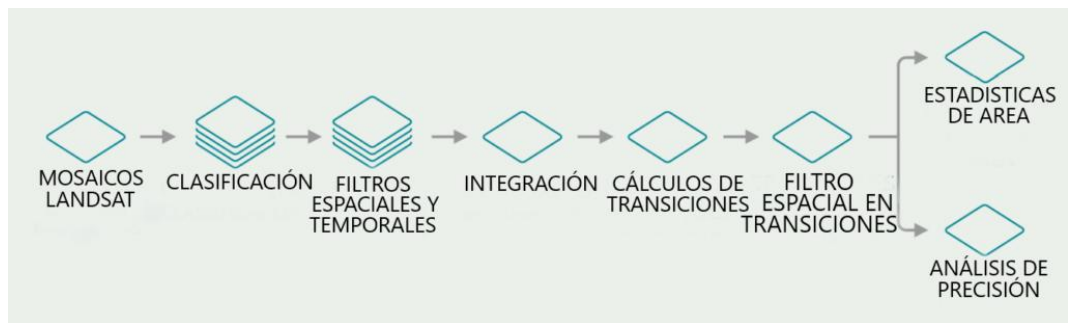
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1. Mapas de cobertura y uso del suelo

La ejecución de la presente investigación hizo uso de mapas de cobertura y uso del suelo en formato GeoTiff del geoportal MapBiomass Perú de los años 2000, 2010 y 2021. La metodología general empleada por MapBiomass Perú para la generación de mapas parte desde la clasificación píxel a píxel de imágenes del satélite Landsat (Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 para el presente estudio). Todo el proceso es realizado con algoritmos de machine learning a través de la plataforma Google Earth Engine, la cual ofrece inmensas capacidades de procesamiento en la nube.

En el siguiente diagrama se ilustra las principales etapas del proceso de generación de los mapas anuales de cobertura y uso de la tierra de MapBiomass Perú y de los mapas de transición.

Figura 2. Etapas para la generación de Mapas del geoportal MapBiomás Perú



Fuente: <https://peru.mapbiomas.org>.

Fuente: Revista Geoespacial – ESPE, Padilla. O.

Muestra el flujo metodológico que utiliza el proyecto MapBiomás Perú para elaborar mapas de cobertura y uso del suelo a partir de imágenes satelitales Landsat. Incluye la clasificación automática, validación y generación de series históricas anuales

3.7.2. Drivers o variables explicativas ambientales y antrópicas

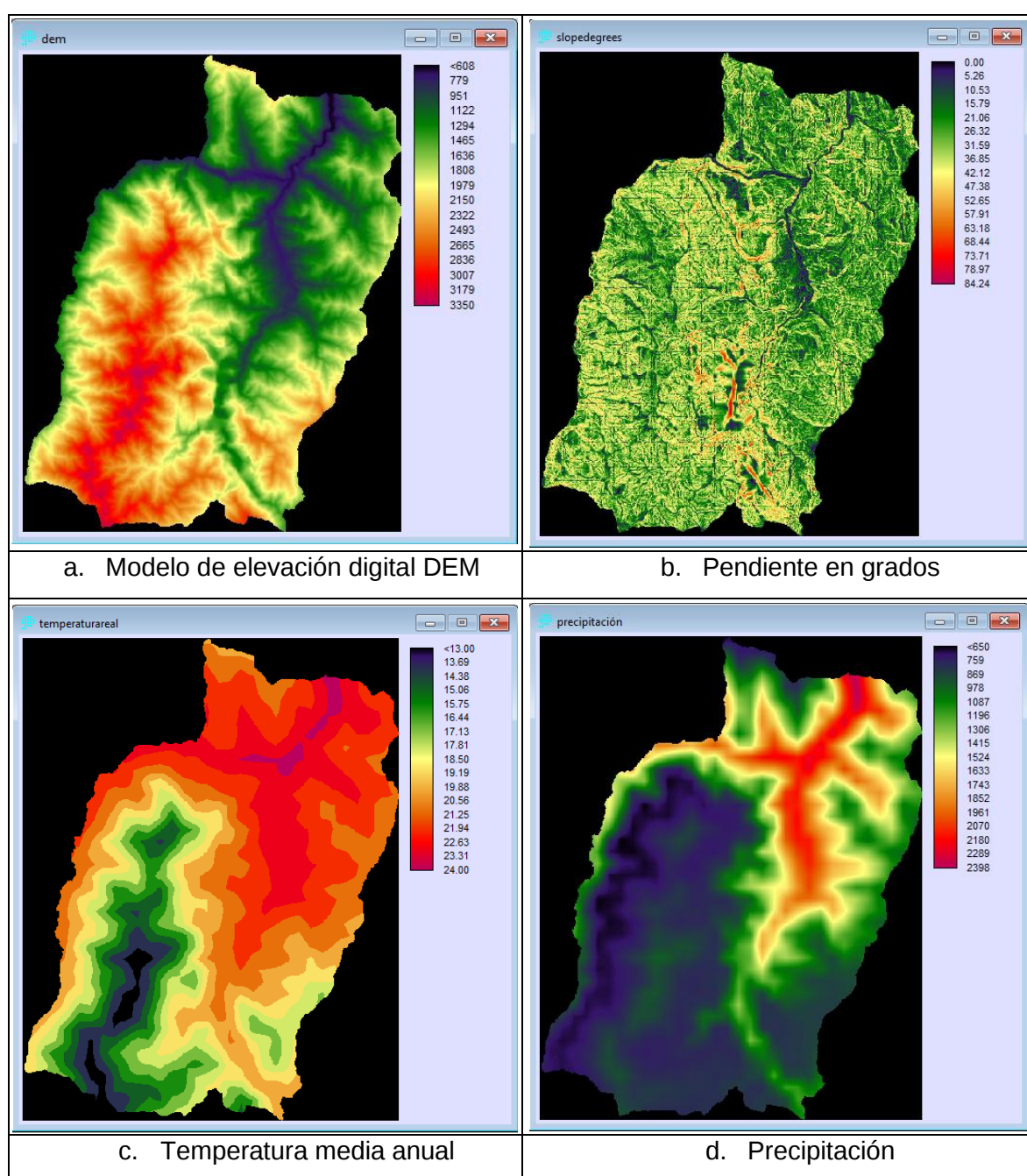
Se necesita conocer los drivers ambientales y antrópicos que modelan el territorio, es decir, que condicionan el uso del suelo en el distrito de Pozuzo. Se identificaron 8 drivers luego de una exhaustiva revisión bibliográfica en estudios similares (Hamdy et al. 2017; Tahmasebi, Karami, y Keshavarz 2020b; Zhou, Li, y Liu 2020): El modelo de elevación digital (altitud), pendiente, precipitación, temperatura, red hídrica y red vial, centro poblados y tendencia de deforestación.

Tabla 2. Drivers o variables explicativas recopiladas o elaboradas

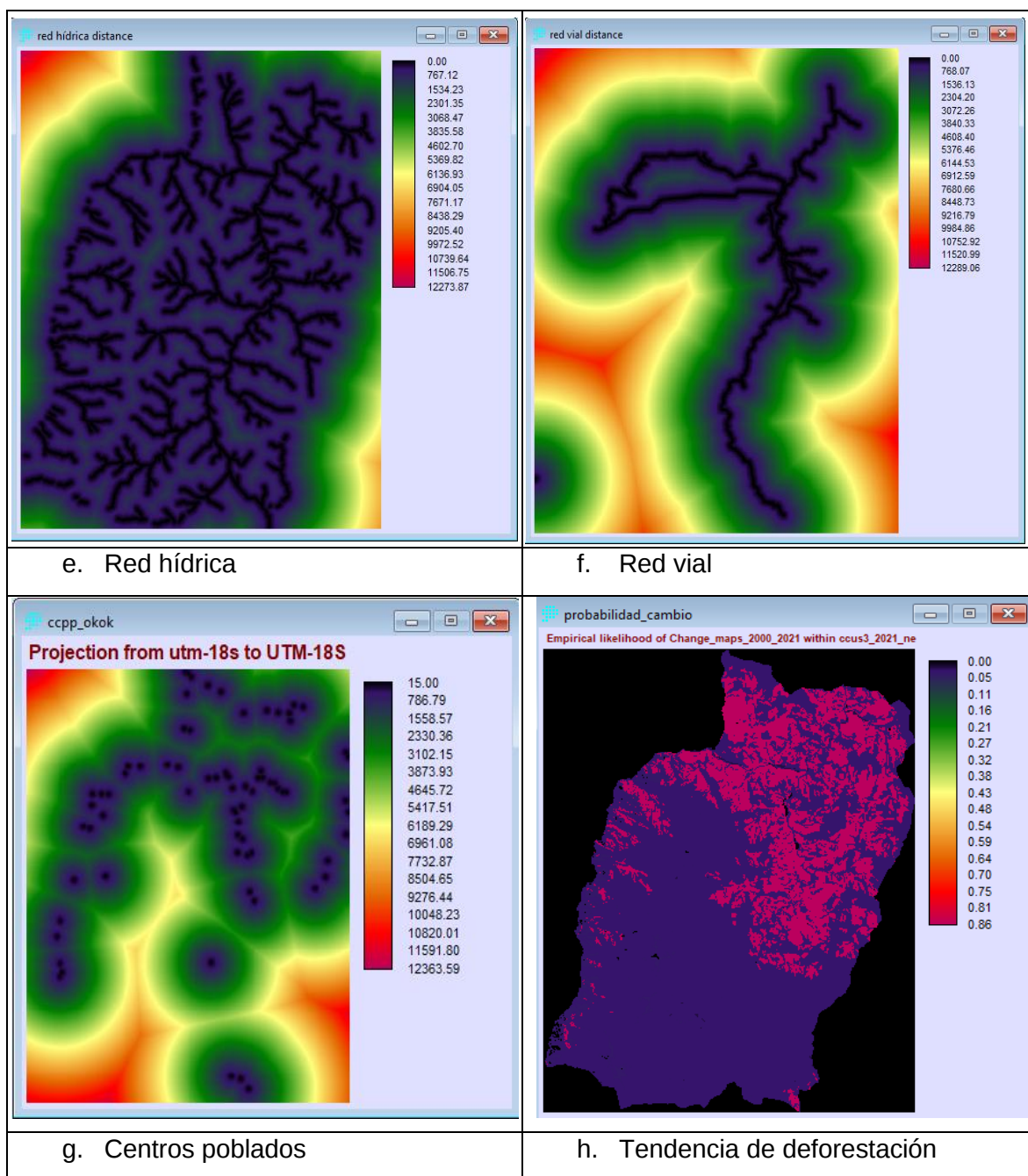
Drivers	Descripción	Modelo	Fuente
MDT (Elevación)	Las tierras planas de menos elevación son más adecuadas para la expansión urbana, rural que las elevaciones más altas	Raster	NASA
Pendiente	Suelos con pendientes altas, menos apta es la zona para el crecimiento urbano, rural y actividad económica; cuanto más bajas son las pendientes, más adecuadas para el crecimiento urbano, rural y actividad económica	Raster	Elaboración propia
Red vial	Las vías o carreteras son una característica innegable de la actividad humana, y tienen un papel importante en la apertura de regiones boscosas tropicales y la explotación de sus recursos	Vectorial	MTC
Red hidrográfica	El patrón actual de recursos hídricos es un reflejo histórico de los seres humanos; la disponibilidad de agua se ha relacionado directamente con los asentamientos humanos	Vectorial	Elaboración propia
Temperatura °C	La temperatura tiene una respuesta positiva o negativa sobre el crecimiento vegetal	Raster	World Clim
Precipitación	La precipitación tiene una respuesta positiva sobre el crecimiento vegetal	Raster	World Clim
Centros poblados	EL hombre hace uso de los recursos	Vectorial	INEI
Tendencia de deforestación	Patrón de movilización espacial de pérdida de cubierta (deforestación)	Raster	Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Variables independientes de la modelación



MapBiomás Perú.- Conjunto de ocho mapas que representan las variables o “drivers” empleados en el modelo predictivo: altitud, pendiente, temperatura, precipitación, red hídrica, red vial, centros poblados y tendencia de deforestación. Estas capas explican cómo los factores ambientales y humanos condicionan el cambio de uso del suelo en Pozuzo



Fuente: Elaboración propia

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

En esta etapa se procedió al análisis estadístico descriptivo, para lo cual se usó la herramienta Land Change Modeler (LCM) del software TerrSet. El módulo permite el análisis de las ganancias y pérdidas de superficie sufridas por el cambio de cobertura y uso del suelo, así como sus tendencias, la predicción de su desarrollo futuro, la evaluación y el impacto de los cambios en el hábitat y

la biodiversidad basados en cadenas de Markov y células autómatas (Eastman, 2012).

3.8.1. Análisis de cambio

Se evaluó el cambio entre dos tiempos, es decir los mapas de cobertura y uso de suelos de los años 2000 y 2010. En este sentido, los cambios que se identifican son transiciones dominantes, determinadas entre los tiempos mencionados, los cuales se agrupan para modelar submodelos, Figura N° 4 y 5.

3.8.2. Potencial de transición

En este proceso se identifica el potencial del terreno a la transición entre las clases o categorías entre los años 2000 y 2010. Se generarán mapas de potencial de transición que están condicionadas o determinadas por variables o drivers que fueron identificadas para el presente estudio según se indicó en el apartado 3.6.2. ver Figura N° 6 y 7.

Figura 4 Módulo LCM, Análisis de cambios

Change Analysis | Transition Potentials | Change Prediction | Planning | REDD Project

LCM Session Parameters ?

☒ Create new session : CCUS_2000_2010 ...

☐ Use existing session :

Earlier land cover image : 2000_1new ...  Date : 2000

Later land cover image : 2010_1new ...  Date : 2010

☐ REDD project

Basis roads layer (optional) : ... 

Elevation model (optional) : Dem_okOK ... 

☐ Use special palette

Continue ...

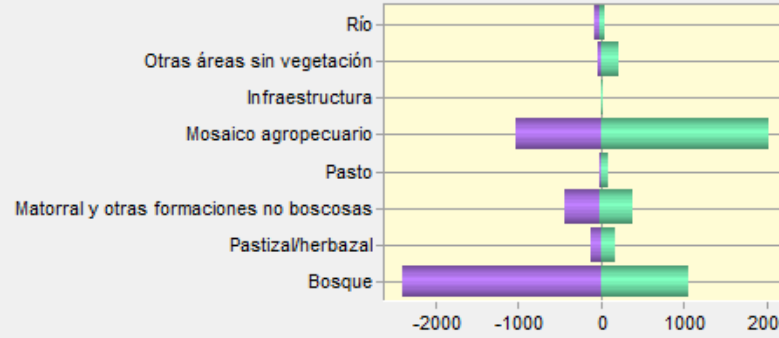
Change Analysis ?

☒ Gains and losses by category Units : hectares ▾

☐ Net change by category

☐ Contributors to net change experienced by : Bosque ▾

Gains and losses between 2000 and 2010



Categoría	Cambio (hectáreas)
Rio	-100
Otras áreas sin vegetación	-200
Infraestructura	-100
Mosaico agropecuario	1800
Pasto	-100
Matorral y otras formaciones no boscosas	-500
Pastizal/herbazal	-200
Bosque	-1800

Change Maps ?

☒ Map changes ☒ Ignore transitions less than 1 hectares ▾

☐ Map persistence

☐ Map gains / losses in : Pastizal/herbazal ▾ ☐ Include Persistence

☐ Map the transition from : Bosque ▾ to : Pastizal/herbazal ▾

☐ Exchanges between : Pastizal/herbazal ▾ and Pastizal/herbazal ▾

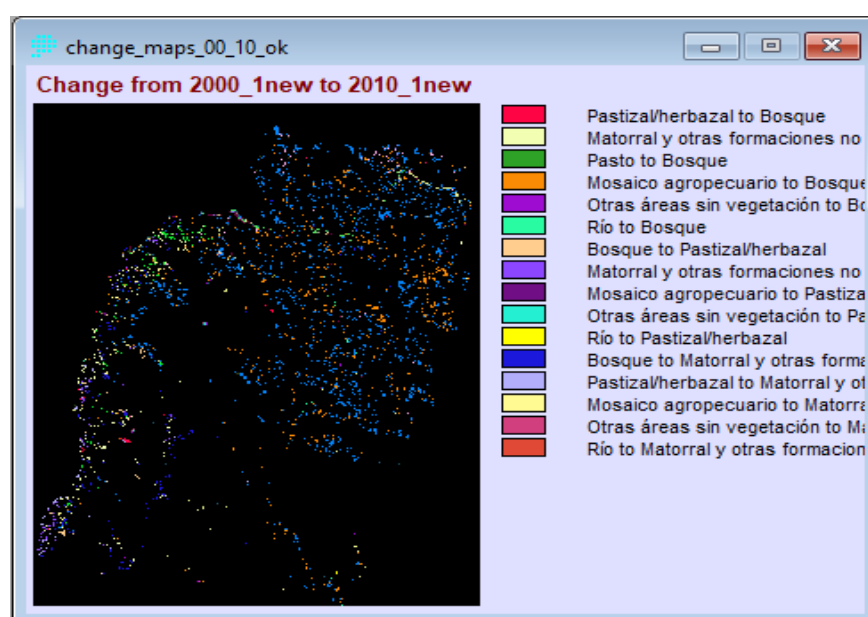
Output name (optional) : Change_maps_00_10_ok ... 

Create Map

Fuente: Elaboración propia

Mapas multitemporales del distrito de Pozuzo que evidencian la reducción del bosque y el incremento del mosaico agropecuario en las dos últimas décadas.

Figura 5. Mapa de cambios o transiciones predominantes 2000 a 2010



Fuente: Elaboración propia

Proyección obtenida mediante el modelo Land Change Modeler, que muestra las áreas donde se prevé un aumento de la actividad agropecuaria y una notable disminución de la cobertura boscosa.

Figura 6. Submodelos de transición de 2000 a 2010

Transition Sub-Models : Status

	From :	To :	Sub-Model Name :
Yes	Bosque	Pastizal/herbazal	Cambios_00_10_okok
Yes	Bosque	Matorral y otras formaciones	Cambios_00_10_okok
Yes	Bosque	Pasto	Cambios_00_10_okok
Yes	Bosque	Mosaico agropecuario	Cambios_00_10_okok
Yes	Bosque	Otras áreas sin vegetación	Cambios_00_10_okok

Sub-Model to be evaluated : Cambios_00_10_okok

Variable Transformation Utility

Transformation type

☒ Evidence likelihood
 ☐ Exponential (e)
 ☐ Square root
 ☐ Natural log (ln)
 ☐ Logit
 ☐ Power

Transition or land cover layer name : Change_maps_00_10_ok

☐ Distance

Input variable name : 2010_1new

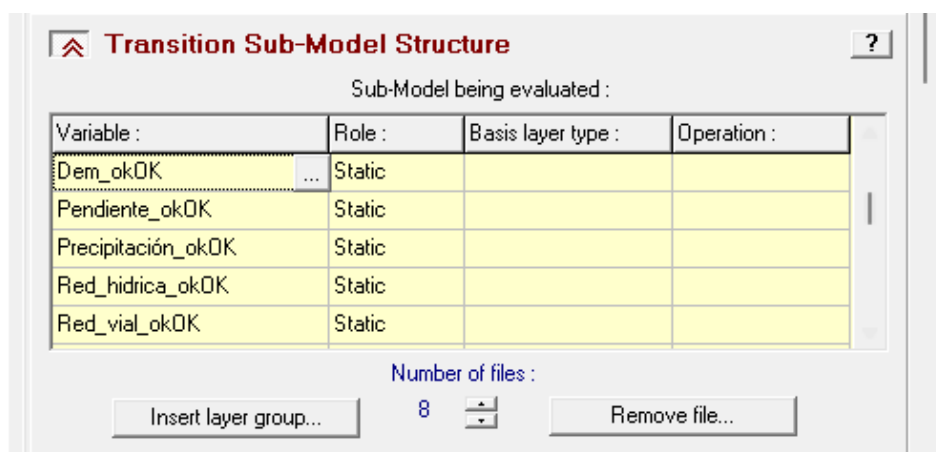
☒ Categorical

Output variable name : Tendencia_cambio_00_10

Fuente: Elaboración propia

Ilustra la probabilidad espacial de cambio entre clases de cobertura, destacando las zonas más vulnerables a la deforestación o transformación antrópica.

Figura 7. Variables ambientales y antrópicas usadas para el módulo LCM

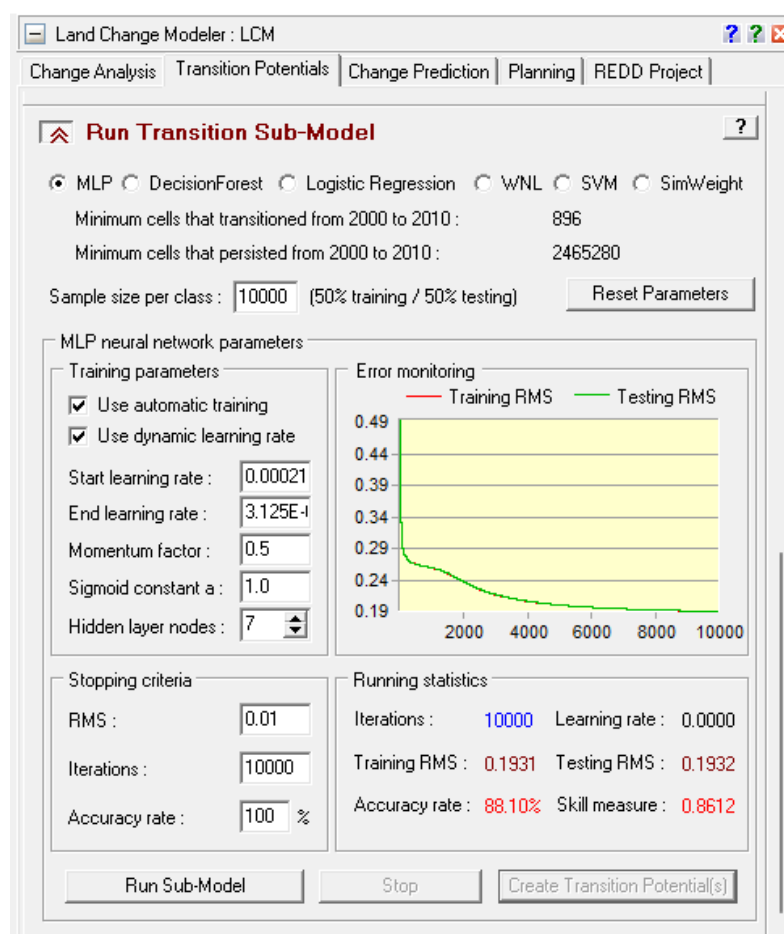


Fuente: Elaboración propia

Para generar los mapas de potencial de transición se usó el submodelo en base a MLP Neural Network. Según Eastman (2012) la precisión de cada diseño tiene que estar sobre el 75% para poder considerar un modelo aceptable y este a su vez ligados a las variables usadas. El presente estudio mostró 88.10 % de precisión y un RMS aceptable de 0.19; asimismo, la medida de habilidad muestra un buen comportamiento de 86.12 %. Figura N° 8.

Con respecto a las transiciones y persistencia (Tabla N° 5) de las categorías o clases antes descritas, la medida de habilidad muestra un comportamiento positivo para las transiciones de Bosque a Pastizal/herbazal con 91.52 %, Bosque a Matorral y otras formaciones con 95.11 %, Bosque a Río con 59.04 %, Bosque a otras áreas sin vegetación con 54.01 % y de Bosque a Mosaico agropecuario con 100 %; mientras que, una transición negativa de Bosque a Pasto con -5.21 %. En cuanto a la persistencia del Bosque es positiva con 88.65 %.

Figura 8. Submodelo de transición para los años 2000 – 2010, LCM



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Comportamiento del submodelo por transición y persistencia

Class	Skill measure
Transition : Bosque to Pastizal/herbazal	0.9152
Transition : Bosque to Matorral y otras formaciones	0.9511
Transition : Bosque to Pasto	-0.0521
Transition : Bosque to Mosaico agropecuario	1.0000
Transition : Bosque to Otras áreas sin vegetación	0.5401
Transition : Bosque to Río	0.5904
Persistence : Bosque	0.8865

3.8.3. Predicción de cambios

En base a la información generada del análisis de cambios y potencial de transición se genera un escenario futuro. El modelo determinó los drivers que influyen en los cambios futuros con la información generada entre los años 2000 y 2010 para predecir al año 2021 y comparar con el mapa 2021. Para determinar

la precisión del mapa 2021 y mapa predictivo 2021 se hizo uso del índice de Kappa, que ya fue explicado líneas arriba. La predicción para el año 2050 se basó en los mapas 2000 y 2021.

3.8.4. Tratamiento estadístico

La validación de la clasificación supervisada se aplicará para los años 2000, 2010 y 2021, para lo cual se utilizará el estadístico KAPPA sugerido por Wilkie y Finn (1996) para determinar la precisión de los mapas temáticos obtenidos de los usos de suelo. Este método permitirá calcular la precisión de las clasificaciones de uso de suelo utilizando una muestra estratificada. KAPPA es reconocido como un método multivariado discreto el cual compara clases a través de una matriz de error (Kellenberger y Itten, 1996). De esta forma, KAPPA puede ser usado como una medida de acuerdo entre los modelos simulados y la realidad (Congalton, 1991). Para este estudio, se asumirá que el conocimiento empírico del área es suficiente para discriminar los usos de suelo de la Subcuenca del río Chorobamba.

KAPPA es representado por la siguiente ecuación matemática:

$$K_{APPA} = \frac{N \sum^k X_{ii} \sum^k (X_{i+} * X_{+i})}{N^2 - (X_{i+} * X_{+i})}$$

Donde:

N= número total de observaciones; K= número de filas en la matriz; X_{ii}= número de observaciones en la fila i y columna i; X_{i+}* X_{+i} = total marginal para la fila i y columna i.

Un valor de KAPPA igual a 1 indica una similitud de 100 % entre los valores simulados y los reales. Por el contrario, un valor cercano a 0 sugiere una similitud cercana a 0 % entre los valores simulados y los reales.

Para la validación, se realizará una salida de campo con la finalidad de tomar datos del terreno y contrastar con los datos generados en gabinete a través de una Matriz de Confusión e Índice de Kappa.

3.9. Orientación ética

La ejecución de la investigación no asumirá ningún riesgo para el Tesista y colaboradores, pues se tuvo en cuenta la autenticidad de los resultados, la consideración por la propiedad intelectual y consideración por la biodiversidad y el medio ambiente. El levantamiento, procesamiento y análisis de datos de campo se realizó como se establece por la metodología de estudio.

CAPITULO IV

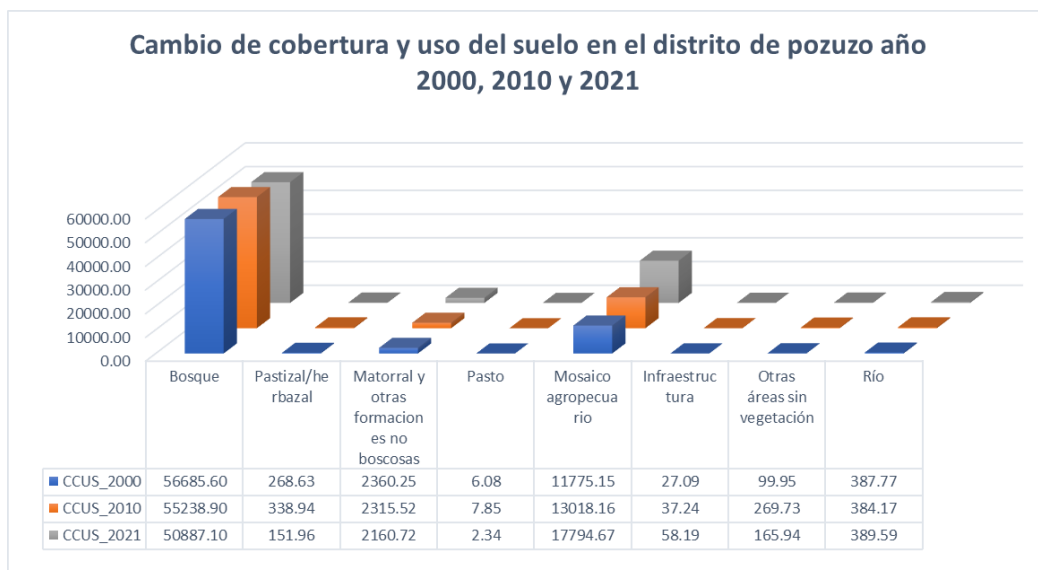
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.1.1. Análisis de la dinámica multitemporal de cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021 mediante sensores remotos en el distrito de Pozuzo.

El análisis de la descarga de mapas obtenidos del website MapBiomass para el distrito de Pozuzo, revelan las diferencias significativas del cambio de cobertura y uso del suelo entre los años 2000, 2010 y 2021, según se muestran en la Figura N°9. Las categorías con mayores evidencias de cambio fueron: Bosque y Mosaico Agropecuario.

Figura 9. Cobertura y uso de suelo del distrito de Pozuzo año 2000, 2010 y 2021.



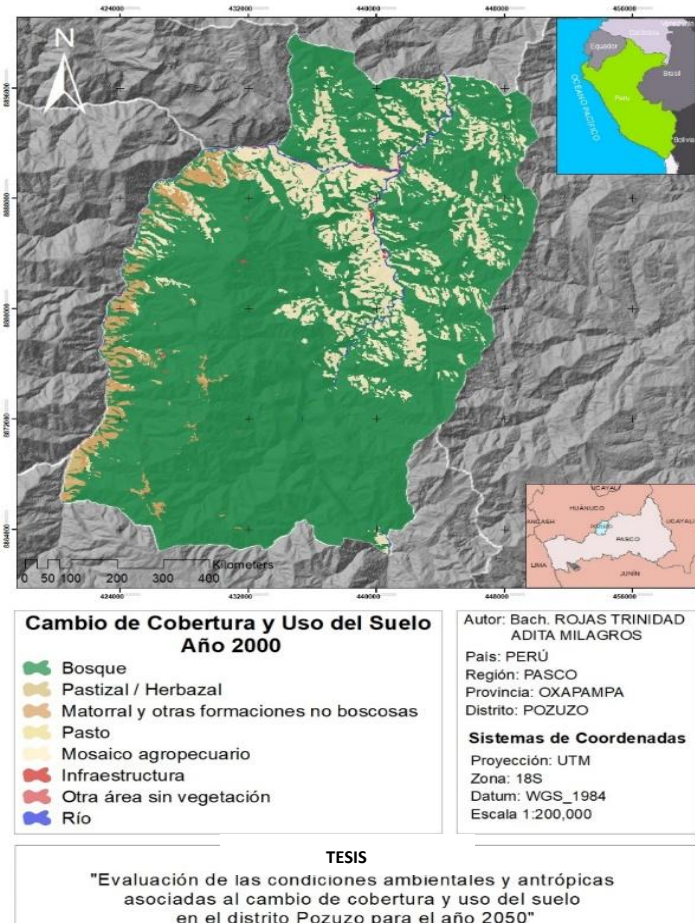
De lo anterior, la Tabla N°6, precisa a nivel de hectáreas (ha) y porcentaje el aumento o reducción de las distintas categorías. Entre el año 2000 y 2021 hubo una reducción de 5798.50 ha de bosque, que está directamente relacionado con el incremento del Mosaico agropecuario de 6019.52 ha. Otra de las categorías que presentó una reducción significativa dada su superficie inicial (268.63) fue Pastizal/herbazal con 116.67 ha que representa el 43.43 %, similar situación se presenta en la categoría Pasto (61.48 %). A nivel infraestructura, que se relaciona con el crecimiento del casco urbano del distrito de Pozuzo se puede apreciar un crecimiento sustancial en un 114.78 % o 31.10 ha.

Tabla 4. Aumento y reducción de la cobertura y uso del suelo 2000 – 2021 en el distrito de Pozuzo

Categoría	Aumento 2000 - 2021		Reducción 2000 - 2021	
	Ha	%	Ha	%
Bosque	0	0	5798.50	10.23
Pastizal/herbazal	0	0	116.67	43.43
Matorral y otras formaciones no boscosas	0	0	199.53	8.45
Pasto	0	0	3.74	61.48
Mosaico agropecuario	6019.52	51.12	0	0
Infraestructura	31.10	114.78	0	0
Otras áreas sin vegetación	65.99	66.03	0	0
Río	1.82	0.47	0	0

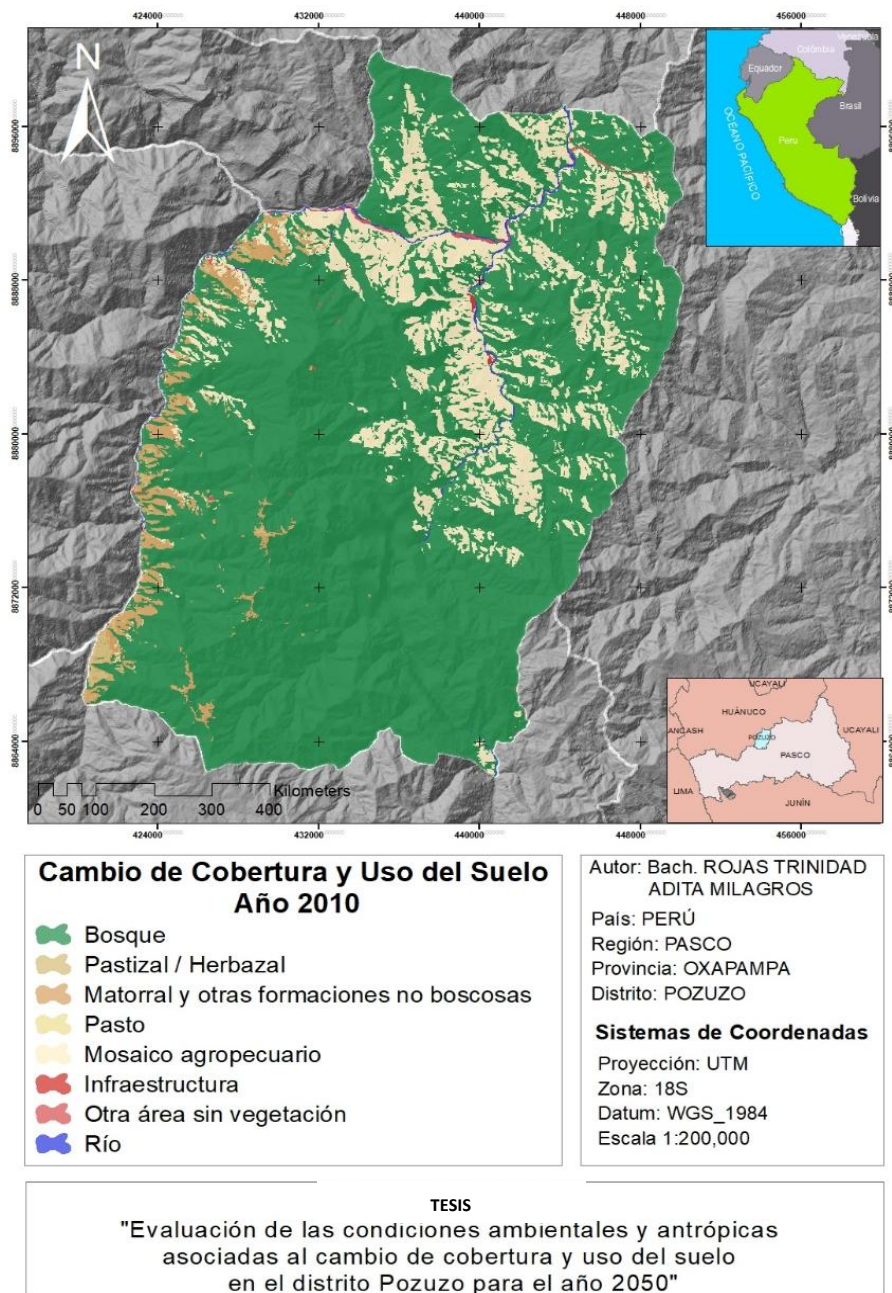
Ganancias y pérdidas en hectáreas y porcentajes, por categoría de 2000 a 2021 en el distrito de Pozuzo.

Figura 10. Mapa de cobertura y uso del suelo, zona terrestre norte PNM en 1990.



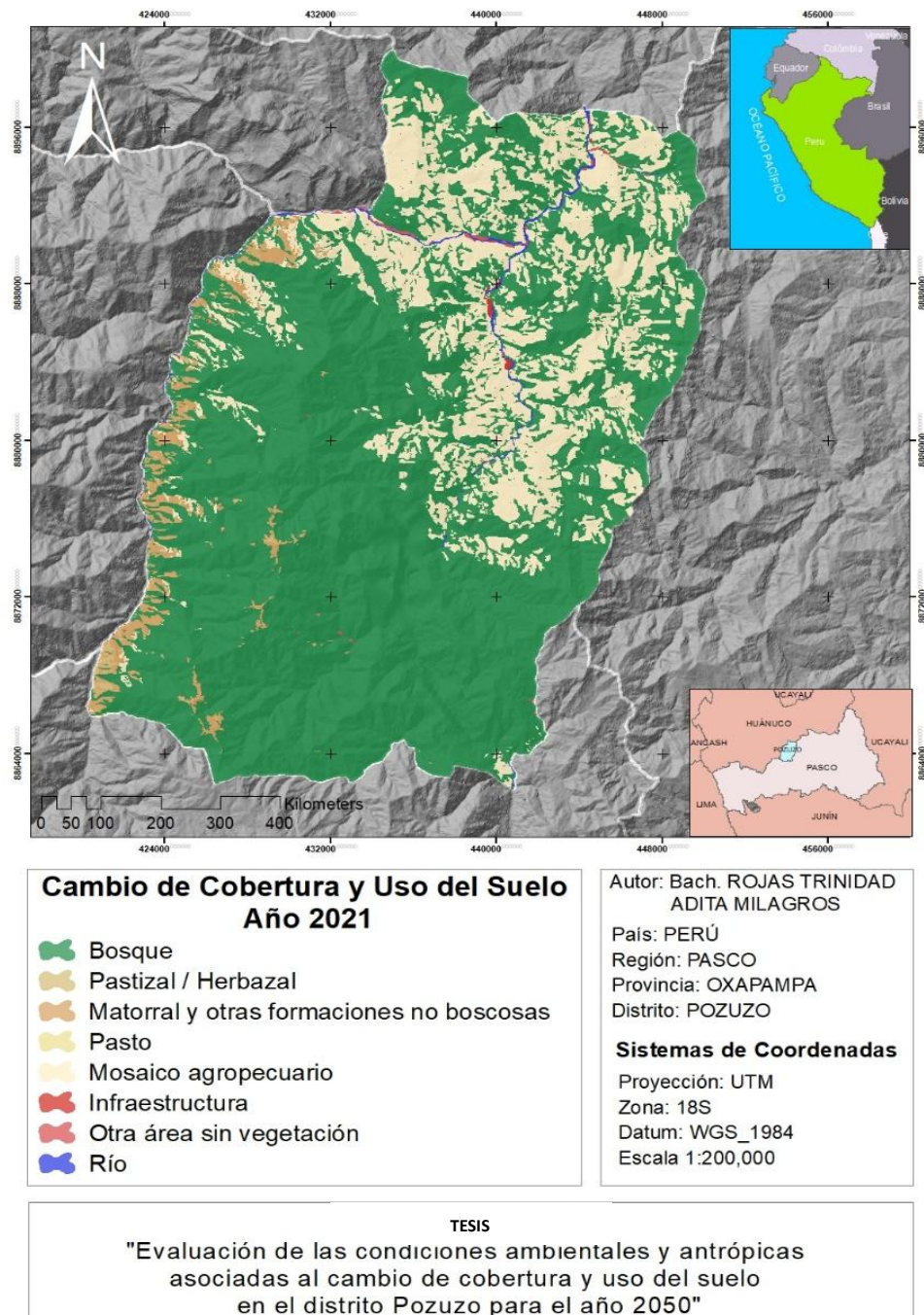
De igual forma la Figura N°11, muestra el cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2010, se puede observar que hay incremento significativo de la categoría Mosaico agropecuario por consiguiente una reducción del bosque.

Figura 11. Mapa de cobertura y uso del suelo, zona terrestre norte PNM en 1990.



Y la Figura N° 12, muestra el cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2021. La tendencia del aumento significativo del mosaico agropecuario y la pérdida del bosque es evidente desde el año 2000.

Figura 12. Mapa de cobertura y uso del suelo, zona terrestre norte PNM en 1990.



Producto del modelamiento en base a los mapas del año 2000 y 2010, el módulo de predicción del software Terrset determinó los cambios de cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2021. Estos resultados fueron comparados con el mapa base MapBiomias modificado 2021, observándose que a pesar de las diferencias en números de ha en todas las clases o categorías,

lo cual es normal, el modelo subestima en las categorías como Pastizal/herbazal, Pasto y otras áreas sin vegetación, sin embargo, éstas no connotan una dificultad pues a nivel de hectáreas con parados con otras categorías son muy insignificativas. Ver Tabla N°7 y Figura N°13.

Tabla 5. Comparación de resultados entre Mapa relidad MapBiomias y Mapa Predictivo para el año 2021

Categoría	Mapa 2021 Mapbiomas modificado	Mapa 2021 predictivo	Diferencia porcentual %
	ha	ha	
Bosque	50887.10	52313.98	2.80
Pastizal/herbazal	151.96	420.26	176.56
Matorral y otras formaciones no boscosas	2160.72	2610.56	20.82
Pasto	2.34	7.68	228.01
Mosaico agropecuario	17794.67	15415.82	13.37
Infraestructura	58.19	40.46	30.46
Otras áreas sin vegetación	165.94	365.33	120.16
Río	389.59	436.41	12.02
Total	71610.50	71610.50	100

Precisamente, con el fin de validar el mapa modelado del año 2021 versus el mapa 2021 descargado y reajustado del portal de MapBiomias, para posteriormente ser usado en las predicciones para escenarios futuros (2050) se aplicó el Índice de Kappa, mediante el módulo VALIDATE del software Terrset, resultando $K_{standard} = 0.8363$, $K_{no} = 0.8838$, $K_{localition} = 0.8871$ y $K_{locationStrata} = 0.8871$, mostrando una considerable precisión al ser cercanas a 1 por ende se utilizó en la construcción de escenarios prospectivos (Figura N°14).

Figura 13. Mapa predictivo de cobertura y uso del suelo año 2021

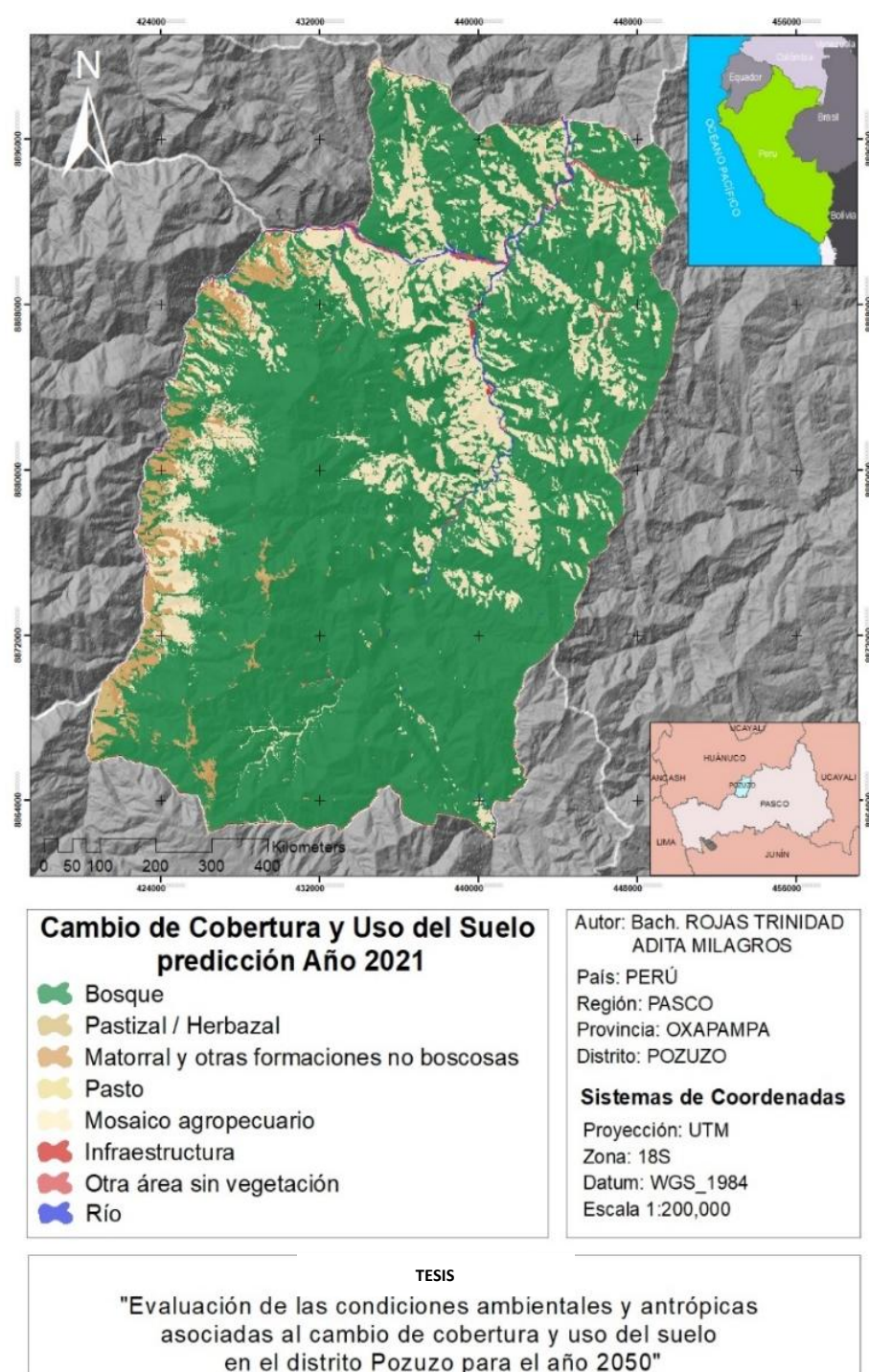
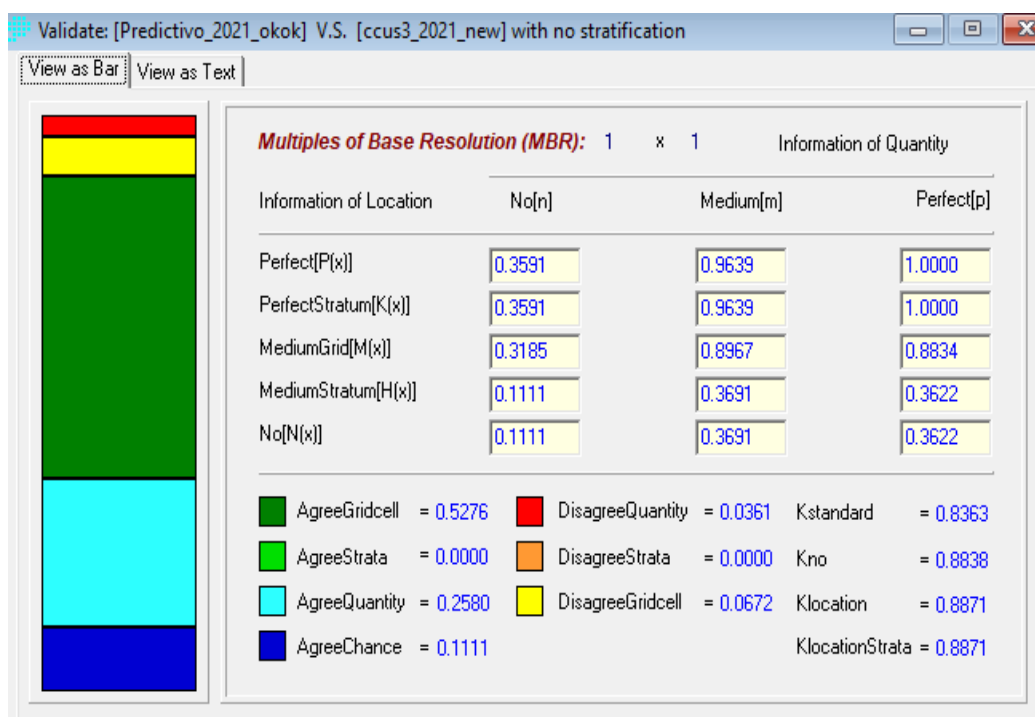


Figura 14. Resultados del módulo validate mapa modelo 2021 vs mapa 2021 MapBiomass ajustado en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, Pasco – Perú.



4.1.2. Evaluación y modelación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo de los años 2000, 2010 y 2021, mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov con el fin de simular el cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050

En base al buen ajuste del modelo predictivo 2021 se simuló el mapa de cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2050. Si bien todas las categorías son importantes, el bosque y mosaico agropecuario representan en el año 2021, el 95.91 % de la totalidad del territorio de Pozuzo, por ende, su análisis se prioriza en estas dos categorías, sin minimizar las otras. La Tabla N°8 muestra la disminución de la categoría Bosque, de 50,887.10 ha en el año 2021 a 40,674.87 ha para el año 2050, es decir 10,212.23 ha menos. A su vez la categoría Mosaico agropecuario en el año 2021 representaba 17,794.67 ha, sin embargo, para el año 2050 se incrementa a 27,338.83 ha (9,544.16 ha).

Tabla 6. Reporte de clasificación año de referencia 2021 y prospectiva al año 2050.

Categoría	Año 2021		Año 2050	
	ha	%	ha	%
Bosque	50887.10	71.06	40674.87	56.80
Pastizal/herbazal	151.96	0.21	165.40	0.23
Matorral y otras formaciones no boscosas	2160.72	3.02	2636.21	3.68
Pasto	2.34	0.00	2.34	0.00
Mosaico agropecuario	17794.67	24.85	27338.83	38.18
Infraestructura	58.19	0.08	68.36	0.10
Otras áreas sin vegetación	165.94	0.23	235.44	0.33
Río	389.59	0.54	489.06	0.68
Total	71610.50	100	71610.50	100

Elaboración propia a partir de resultados

La Figura N°15 simula el mapa para el año 2050, mostrando un incremento de la actividad agropecuaria y disminución del bosque. Un aspecto a resaltar es que según la simulación la categoría mosaico agropecuario se extiende dentro de los límites del Parque Nacional Yanacha Chemillen.

Asimismo, el submodelo permitió la contrastación de las variables por etapas, siendo la precisión general con todas las variables de un 88.10 % indicando que todas las variables son necesarias para el modelamiento final y su influencia en el modelamiento del territorio. La Tabla N°9, muestra el análisis de sensibilidad donde solo una variable se mantiene constante permitiendo identificar el más influyente a la variable “Tendencia a deforestación” y el menos influyente la variable “Red hídrica”; mientras que, la Tabla N°10 muestra al modelo con todas las variables, luego mantiene constante cada variable para determinar cuál tiene el menor efecto en la habilidad del modelo, iniciando con el paso 1, donde mantiene constante la variable que tiene menor efecto negativo (Red hídrica) sobre la habilidad, pues sin esa variable la exactitud y la medida de habilidad muestran un buen comportamiento superiores al 80 %; en ese mismo sentido se procede hasta el paso 7, donde una sola variable “Tendencia a deforestación” representa a la más influyente con valores superiores al 40 %.

Tabla 7. Sensibilidad del modelo con respecto a variables o divers a ser constantes

Modelo	Exactitud (%)	Medida de habilidad	Orden de influencia
Con todas las variables	88.10	0.8612	N/A
Var. 1 constant	82.81	0.7994	5
Var. 2 constant	61.50	0.5509	3
Var. 3 constant	87.42	0.8533	7
Var. 4 constant	71.99	0.6733	4
Var. 5 constant	88.00	0.8600	8 (least influential)
Var. 6 constant	87.39	0.8529	6
Var. 7 constant	52.98	0.4514	2
Var. 8 constant	29.77	0.1806	1 (most influential)

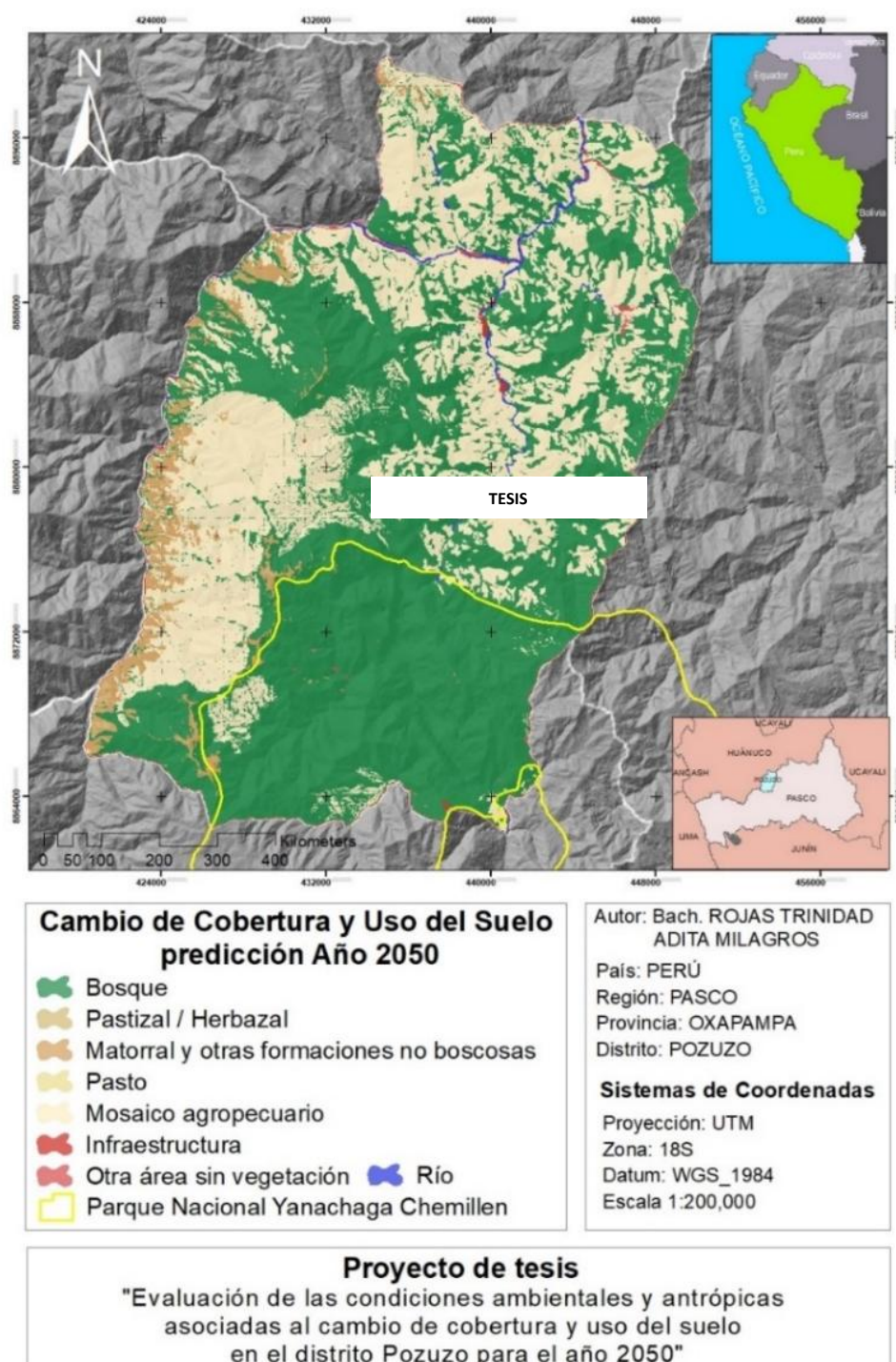
Centros poblados (1), DEM (2), Pendiente (3), Precipitación (4), Red hídrica (5), Red vial (6), Temperatura (7) y Tendencia de deforestación (8)

Tabla 8. Contrastación de variables por etapas

Modelo	Variables incluidas	Precisión (%)	Medida de habilidad
Con todas las variables	Todas las variables	88.10	0.8612
Step 1: var.[5] constant	[1,2,3,4,6,7,8]	88.00	0.8600
Step 2: var.[5,6] constant	[1,2,3,4,7,8]	87.01	0.8484
Step 3: var.[5,6,3] constant	[1,2,4,7,8]	86.60	0.8436
Step 4: var.[5,6,3,1] constant	[2,4,7,8]	81.37	0.7826
Step 5: var.[5,6,3,1,2] constant	[4,7,8]	63.97	0.5796
Step 6: var.[5,6,3,1,2,4] constant	[7,8]	53.09	0.4527
Step 7: var.[5,6,3,1,2,4,7] constant	[8]	49.89	0.4154

Centros poblados (1), DEM (2), Pendiente (3), Precipitación (4), Red hídrica (5), Red vial (6), Temperatura (7) y Tendencia de deforestación (8)

Figura 15. Resultados del módulo validate mapa modelo 2021 vs mapa 2021 MapBiomas ajustado en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, Pasco – Perú.



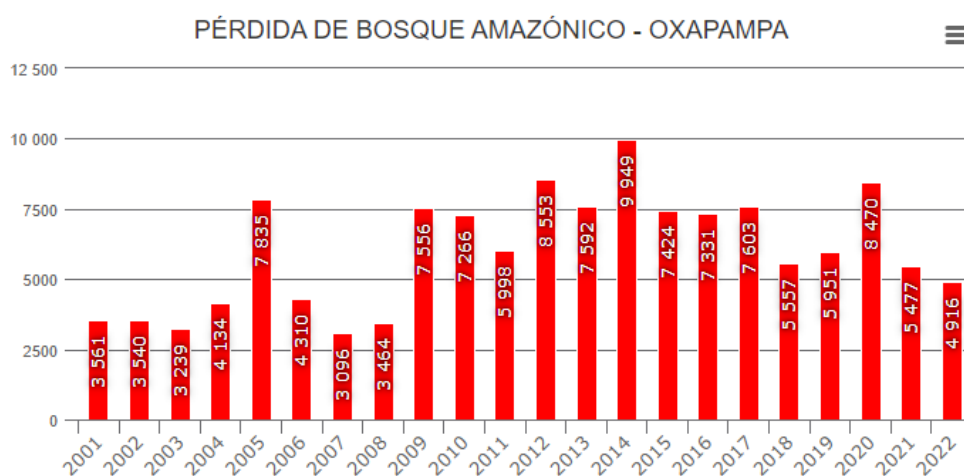
4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Análisis de la dinámica multitemporal de cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021 mediante sensores remotos en el distrito de Pozuzo.

Los resultados muestran que hay una relación directa entre el incremento de hectáreas (ha) de la categoría *Mosaico agropecuario* y una reducción en ha de Bosque, precisando que el mosaico agropecuario involucra las actividades ganaderas y de agricultura, y que para ampliar las fronteras agropecuarias se tiene que deforestar.

Con respecto a la deforestación según el Plan Estratégico de Desarrollo Económico Local de la provincia de Oxapampa 2024 – 2034, La deforestación o pérdida de bosque primario en el ámbito de la provincia de Oxapampa es un problema que genera impactos negativos hacia la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos, esta mala práctica está relacionada con la expansión de actividades agropecuarias (agricultura migratoria y ganadería). Según plataforma de monitoreo de los cambios sobre la cobertura de los bosques “Geo Bosque”, en la provincia de Oxapampa desde el 2001 al 2022 ha habido una pérdida de bosque de 132,823 ha, ver Figura N°16.

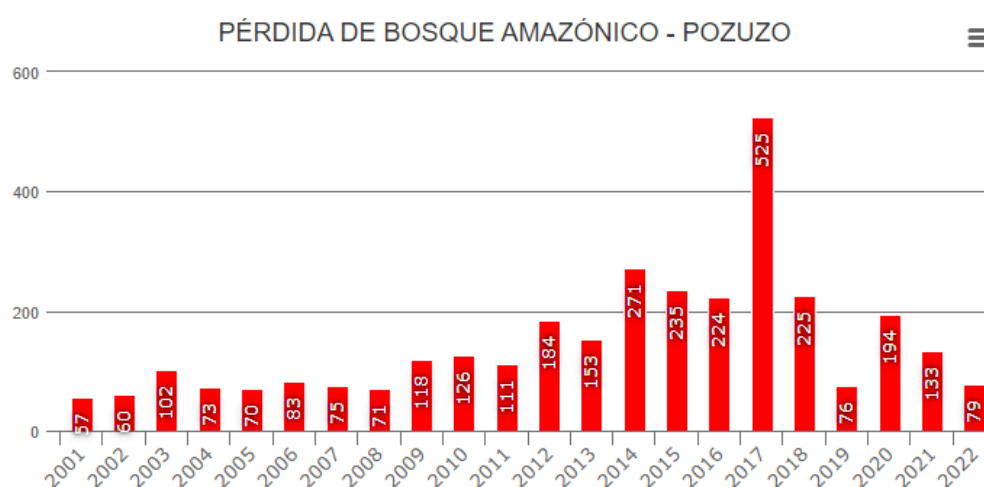
Figura 16. Pérdida de bosque 2001 – 2022 en la provincia de Oxapampa.



Fuente: www.geobosques.minam.gob.pe/

Mientras que, según el portal antes mencionado, para el distrito de Pozuzo hubo una pérdida de Bosque entre el 2001 y 2022 de 3,244 ha, lo cual, comparado con los datos obtenidos en el presente estudio son inferiores versus a 5798.50 ha, esto puede deberse a varios factores como la metodología, software, algoritmos, objetivos, resolución de imágenes, entre otros, ver Figura N°17.

Figura 17. *Perdida de bosque 2001 – 2022 en el distrito de Pozuzo.*



Con respecto al potencial productivo de Pozuzo, la principal actividad económica es la ganadería vacuna, también se considera al café y las frutas exóticas, los se comercializan en la ciudad de Lima. El sistema productivo de la ganadería es extensivo, la cual aprovecha los recursos naturales y permite una gestión más sostenible, aunque es, junto con la agricultura comercial, la mayor causa de deforestación en América Latina (Communications, 2024), asimismo, en el año 2021, la pérdida de bosques húmedos en Perú, fue principalmente debido al cambio de uso de la tierra para la agricultura migratoria, actividades extractivas ilegales e informales, y la expansión de la infraestructura industrial y de comunicación, alcanzó las 137 976 hectáreas (Ceplan, s. f.). Se prevé que la demanda mundial de productos ganaderos, especialmente en los países en desarrollo, aumentará aproximadamente un 70% para alimentar a una población que se estima llegará a 9,600 millones de personas en el año 2050.

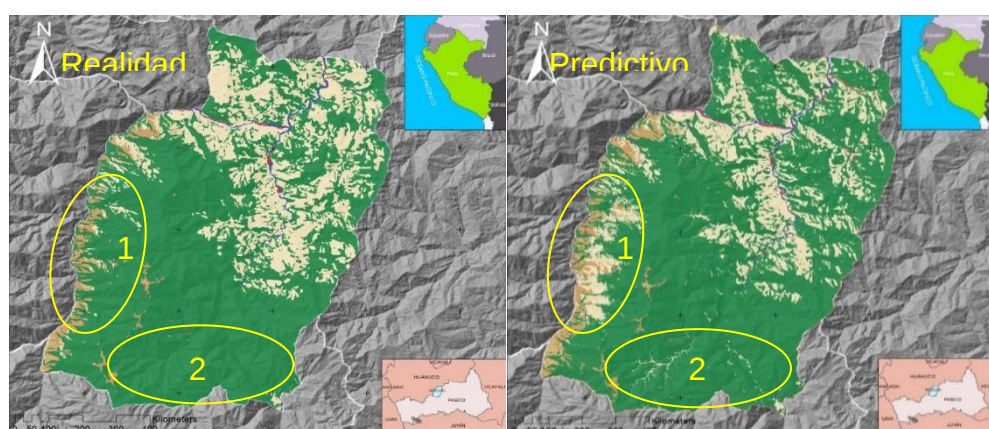
El gobierno de Perú lanzó en 2017 el Plan Nacional de Desarrollo Ganadero, cuyo objetivo es promover una industria ganadera próspera e integrada a los mercados nacionales e internacionales para 2027. El plan busca impulsar una ganadería de alta calidad y productividad. Sin embargo, la implementación de este ambicioso plan de desarrollo ganadero podría generar un fuerte impacto ambiental y aumentar los niveles de deforestación en el país. Por lo tanto, si bien el Plan Nacional de Desarrollo Ganadero tiene como meta fortalecer la industria ganadera peruana, su ejecución deberá armonizarse con las estrategias de conservación forestal y protección del medio ambiente, para evitar que los objetivos productivos terminen perjudicando los ecosistemas del país.

4.2.2. Evaluación y modelación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo de los años 2000, 2010 y 2021, mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov con el fin de simular el cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050

De forma gráfica o visual, en la siguiente Figura N° 18 (basadas en las Figuras N° 12 y 13) podemos observar 2 zonas encerradas donde el modelo predictivo 2021 es diferente al de la realidad para el mismo año, esto puede deberse a los patrones que el la técnica de autómatas celulares asume para una predicción basado de los años anteriores y los drivers designados; sin embargo considerando la implicancia de dificultades de calibrar este tipo de modelos predictivos y nivel de detall de la información con la que se contó, se considera según según el estadístico del índice de Kappa como muy buenos por lo que se usaron para el modelo predictivo del año 2050. Asimismo, la zona encerrada “2” corresponde al área natural protegida del Parque Nacional Yanachaga Chemillen, con escasa o nula intervención antrópica; mientras que la zona encerrada “1” si presenta varios centros poblados como San Juan, Pucayacu,

Nuevo Miraflores, Lucmapata, Mushuyunca, Cañachacra y Alto Cañachacra donde se ha podido observar en la validación de campo que existe actividad ganadera a menor escala por ahora, pues parte de las actividades económicas sobresalen la caficultura y otros de subsistencia (plátano, maíz, frejol, yuca, entre otros). De lo anterior también se comprende que los territorios pueden tener dinámicas de cambio diferentes, pues en el distrito de Pozuzo se diferencia perfectamente dos zonas, la parte baja vincula íntimamente a la producción pecuaria y la parte alta donde se dedican al cultivo de café y otros que se mencionó, además podemos añadir que esta ligada a culturas diferentes que han aprendido a convivir en un territorio complejo y accidentado geográficamente, en la parte baja descendientes austro alemanes y la baja descendientes andinos de la región Huánuco, pero esta realidad no son analizados o ponderados en los drivers o factores que modifican el territorio, por ende la matriz markoviana asume implícitamente como un todo, ello indica la necesidad de poder realizar modelamiento por separados de las drivers más significativos o de aquellos que el modelo considere necesarios, además de analizar otras variables como social, cultural, entre otras.

Figura 18. Comparación de cambio de cobertura y uso de suelos año 2021 realidad vresus predictivo según cadenas de Markov.



Debido al buen ajuste del modelo prospectivo al 2021, se realizó la predicción para el periodo 2050, tomando como base los años 2000 y 2021, es

decir, 29 años a partir del periodo de referencia (2021). Los resultados mostrados en la Tabla N°6 indican que el paisaje sufrirá cambios significativos en cuanto a la pérdida de bosque con una tasa de cambio anual de 3.53 %, que principalmente este asociado al incremento de la categoría Mosaico agropecuario con una tasa de 3.28 %. El modelo prospectivo reportó 40674.87 ha de Bosque y 27338.83 ha para la categoría de Mosaico agropecuario (Tabla N°8 y Figura N°15).

Con referencia a la influencia de las variables ambientales y antrópicas el modelo permitió contrastar su influencia en los procesos asociados a cada categoría; sin embargo, si bien el objetivo no es discriminar las categorías que representan la cobertura y uso actual del suelo en el distrito de Pozuzo, es evidente que la categoría Mosaico agropecuario es la más dinámica con tendencia a incrementarse anualmente, por ende el análisis de la influencia de las variables o driver se enfocaron a explicar precisamente el efecto sobre esta categoría. En tal sentido, una vez entrenado el sistema con todas la variables o drivers, el sistema prueba el poder relativo de las mismas manteniendo selectivamente constantes las entradas de las variables seleccionadas, luego utiliza el modelo modificado, el procedimiento MLP repite la prueba de habilidad utilizando los datos de validación, proporcionando así la información sobre el poder de la variable, tal como se mostró en la Tabla N°9. Por otro lado, iniciando constante todas las variables para luego mantener constante cada variable se puede determinar cuál tiene el menor efecto en la habilidad del modelo, tal como podemos visualizar en la Tabla N°10, donde se evidencia que la Variable ambiental “Red hídrica” (paso 1) es la que tiene menor efecto negativo sobre la habilidad del modelo, indicando que tiene poco valor pudiendo ser eliminada del análisis, caso contrario se muestra en el paso 7, donde la Variable Antrópica “Tendencia a Deforestación” representa una habilidad del 49.89%, siendo imprescindible o de alto valor para el modelo; asimismo, unidos los drivers

Precipitación, Temperatura y Tendencia a deforestación suman una habilidad de 63.97 %, por ende considerandos de mayor valor para el modelo.

Por otro lado, y en base al análisis de los drivers modeladores del territorio, llama la atención que el driver “Red Vial” no sea considerado como influyente, pues muchas investigaciones consideran que tiene un efecto preponderante y directamente relacionado con la deforestación y actividad económica; sin embargo esto estaría explicado por el sistema de producción extensiva del ganado vacuno donde para su movilización y/o transporte es por senderos hasta una carretera principal, pues el territorio de Pozuzo presente muy pocas vías de comunicación secundarias o vecinales. En la misma tendencia se presentan el DEM, pendiente, centros poblados.

CONCLUSIONES

- Los mapas usados del portal de MapBiomass Perú empleadas para la predicción del cambio de cobertura y uso del suelo del distrito de Pozuzo fueron satisfactorias, determinándose que la categoría “Bosque” es la más predominante, pero con tendencia marcada a su disminución superficial para los años 2000, 2010 y 2021 con 56,685.60 ha, 55,238.90 ha y 50,887.10 ha, respectivamente. La segunda categoría predominante para los años antes mencionados es “Mosaico agropecuario” pero con tendencia marcada a su crecimiento superficial con 11,775.15 ha, 13,018.16 ha y 17,794.67 ha, respectivamente.
- La comparación de los mapas del portal MapBiomass versus el Mapa Predictivo para el año 2021 bajo análisis estadístico de índice de Kappa mostraron una precisión estándar de 83.63 % considerado como excelente, lo cual permitió que se considere para la predicción del año 2050.
- El modelo predictivo para el año 2050 muestran una disminución significativa de la categoría “Bosque” con 40,674.87 ha, y un incremento de la categoría “Mosaico agropecuario” de 27,338.83 ha.
- Los drivers de mayor efecto o influyentes fueron Tendencia a deforestación, Temperatura y precipitación; mientras que las de menor efecto figuran Red Hídrica, Pendiente, Red Vial y Centro Poblado.
- El análisis multitemporal de las coberturas de suelo en el distrito de Pozuzo permitió evidenciar una disminución significativa de las áreas boscosas y un aumento constante del mosaico agropecuario, lo que refleja un proceso sostenido de deforestación y expansión de actividades agrícolas.
- Las condiciones ambientales y antrópicas influyen directamente en el cambio de cobertura y uso del suelo; siendo las variables antrópicas (deforestación, red vial y proximidad a centros poblados) las de mayor incidencia, frente a las ambientales (pendiente, precipitación, altitud).

- La modelación realizada con el software TerrSet (Land Change Modeler) demostró que, de mantenerse las tendencias actuales, para el año 2050 la cobertura boscosa se reducirá aproximadamente en un 20%, mientras que el mosaico agropecuario aumentará a 27,338.83 hectáreas.

RECOMENDACIONES

- Si bien los mapas provistos MapBiomás Perú han sido de mucha ayuda en innumerables trabajos de investigación, sería necesario realizar una clasificación supervisada de imágenes y comparar los resultados.
- Sería necesario incluir para estudios similares drivers social y económico dado que los territorios son diversos y complejos, los cuales nos permitiría poder modelar con mayor precisión.
- Implementar programas de reforestación con especies nativas en las zonas más afectadas por la deforestación, priorizando áreas de alta pendiente y márgenes de ríos.
- Regular y monitorear el avance de la frontera agrícola, estableciendo límites de uso del suelo acorde a su capacidad de uso mayor.
- Incorporar los resultados del estudio en el Plan de Ordenamiento Territorial del distrito de Pozuzo y en políticas regionales de conservación ambiental.
- Fomentar la educación y participación ambiental de las comunidades locales, promoviendo prácticas agropecuarias sostenibles que reduzcan la presión sobre los ecosistemas.
- Continuar investigaciones futuras utilizando imágenes satelitales de mayor resolución y periodos más recientes, para actualizar la información y validar los escenarios proyectados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguayo, Mauricio & Wiegand, Thorsten & Azócar, Gerardo & Wiegand, Kerstin & Vega, Claudia. (2007). Revealing the Driving Forces of Mid-Cities Urban Growth Patterns Using Spatial Modeling: a Case Study of Los Ángeles, Chile. *Ecology and Society*. 12. 10.5751/ES-01970-120113.
- Aide, T.; Clark, M.; Grau, H.; López-Carr, D.; Levy, M.; Redo, D. and Muñiz M. (2013). Deforestation and reforestation of Latin America y the Caribbean (2001–2010). *Biotropica*, 45(2) 262-271.
- Buzai, G. (2005). Actualizaciones de cálculos y distribuciones espaciales a través de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares. Pérdida de suelos en el área Metropolitana de Buenos Aires. GEPAMA – FADU – UBA. Consultado el 10 de junio del 2022. Disponible en <http://www.gepama.com.ar/buzai/publicaciones/Buzai-JEP.pdf>.
- Campbell, J. and Wynne, R. (2011). Introduction to remote sensing. 5a ed. Editorial. The Guilford Press New York y London, U.S.A y U.K.
- Ceplan. (s. f.). Observatorio Nacional de Prospectiva. <https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t61>.
- Chang, Kang-tsung. (2014). Introduction to Geographic Information Systems, 7th edn. New York: McGraw-Hill.
- Chinaqui, J. y Vilca, L. (2022). Análisis multiespectral a través de imágenes satelitales del crecimiento urbano y su impacto en el cambio de uso del suelo agrícola en la ciudad de Juli (2000-2019). Tesis para título profesional en ingeniero topógrafo y agrimensor. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. 91 p.
- Chuvieco E. (1996). Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: análisis cuantitativo y representación cartográfica. *Serie Geográfica*, 6, 131-147.
- Chuvieco E., (2008). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. (3.^a ed.). Barcelona: Editorial Ariel, S.A.

Communications. 2024. Ganadería intensiva y extensiva: ¿Cuáles son sus diferencias?

BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/ganaderia-intensiva-y-extensiva-cuales-son-sus-diferencias/>

Coronado, L. (2001). Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica.

Cuadra, D. E. (2017). Los enfoques de la geografía en su evolución como ciencia. *Geográfica Digital*, 11(21), 1. <https://doi.org/10.30972/geo.11212186>

Eastman, J.R. (2012) IDRISI Selva Manual. IDRISI Tutorial. s.l. Clark University, Worcester. www.clarklabs.org.

FAO. Glosario de la FAO sobre Cambio Climático y la Bioenergía. (2010). Disponible en: <http://termportal.fao.org/faocc/cc/pages/index.jsp>. Fecha de consulta: junio del 2022.

Henríquez, Cristián, & Azócar, Gerardo. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (36), 61-74. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>.

HENRÍQUEZ. C. (2006). Cambio de uso de suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. Consultado el 10 de julio 2022. Disponible en http://www.geo.puc.cl/html/revista/PDF/RGNG_N36/art04.pdf.

IPCC. (2012). Glossary of terms. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.. Disponible en: http://www.ipcc.ch/pdf/specialreports/srex/SREX-Annex_Glossary.pdf. Fecha de consulta: junio del 2022.

- Jensen, J.; Lin, H.; Yang, X and Ramsey, III E. (1991). The measurement of mangrove characteristics in southwest Florida using SPOT multispectral data. *Geocarto International*, 6(2), 13-21.
- Kellenberger, T. y Itten, K. (1996). Limitations for multispectral classification of temperate forests scaling problems of ground truth and satellite data. *IEEE*. 26:2326-2329.
- Lambin, E. and Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108:3465-3472.
- Lambin, Eric F., B.L.Turner, Helmut J. Geist, Samuel B. Agbola, Arild Angelsen, John W. Bruce, Oliver T. Coomes, Rodolfo Dirzo, Gunther Fischer, Carl Folke, P.S. George, Katherine Homewood, Jacques Imbernon, Rik Leemans, Xiubin Li, Emilio F. Morán, Michael Mortimore, P.S. Ramakrishnan, John F. Richards, Helle Skanes, Will Steffen, Glenn D. Stone, Uno Svedin, Tom A. Veldkamp, Coleen Vogel y, Jianchu Xu. (2001). «The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths». *Global Environmental Change* 11: 261–269.
- Lillesand, T. and Kiefer, R. (1994). *Remote sensing and photo interpretation*. John Wiley and Sons: New York, 750.
- Ministerio del Ambiente. 2015. Mapa de Cobertura Vegetal del Perú. Memoria Descriptiva-Perú.108p.<https://sinia.minam.gob.pe/repositorio-demapas?page=11>
- Nágera, O.; Bojórquez, J.; Cifuentes, J. y Flores, M. (2010). Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. México. *Revista Biociencias*. pp. 20.
- Oropeza, Mónica y Díaz, Norelis (2007). La geotecnología y su inserción en el pensamiento geográfico. *Terra*. Vol. 23, Nº 34. Caracas, Venezuela.
- Padilla, M.; Stehman, S.; Ramo, R. and Corti, D. (2015). Comparing the accuracies of remote sensing global burned area products using stratified random sampling and estimation. *Remote sensing of environment*, 160, 114-121.

- Pijanowski, B.; Pithadia, S.; Shellito, B. and Alexandridis, K. (2005). Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States. *International Journal of Geographical Information Science*. Nº 19, Vol. 2, p. 197-215.
- Pijanowski, Bryan & Pithadia, Snehal & Shellito, Bradley & Alexandridis, Kostas. (2005). Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States. *International Journal of Geographical Information Science*. 19. 197-215. 10.1080/13658810410001713416.
- Pinos, J. (2015). Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial Caso cantón Cuenca. Tesis de grado en Ordenamiento Territorial. Universidad de Cuenca, Ecuador. 130 p.
- Plan Estratégico de Desarrollo Económico Local de la Provincia de Oxapampa 2024-2034.
- Plan Nacional de Desarrollo Ganadero - 2017 – 2027. Ministerio de Agricultura y Riego. <http://repositorio.minagri.gob.pe:80/jspui/handle/MINAGRI/330>.
- Pontius, R. and Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*. Nº 19, Vol. 2, p. 243-265.
- Qi, Y., Wu, J. (1996). Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. *Landscape Ecol* 11, 39–49. <https://doi.org/10.1007/BF02087112>.
- Richardson, Douglas; Castree, Noel; Goodchild, Michael F.; Kobayashi, Audrey; Liu, Weidong; Marston, Richard A. (2016). *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology (People, the Earth, Environment and Technology)* || *Geographic Information System*. , (), 1–9. doi:10.1002/9781118786352.

- Sandoval, G. (2009). Análisis del proceso de cambio de uso y cobertura de suelo en la expansión urbana del gran Valparaíso, su evolución y escenarios futuros. Tesis profesional de Geógrafo, Universidad de Chile. 79 p.
- Tapia, F. y Aranguen, R. (2008). Autómatas celulares. Red científica, tecnológica y pensamiento, GAIA. Consultado el 05 de junio 2022. Disponible en <http://www.redcientifica.com/gaia/ac/index.html>.
- Tuesta, E. (2017). Prospectiva del cambio de uso de suelo en el distrito de Iberia, Tahuamanu – Madre de Dios, periodo 2004-2030. Tesis profesional en Ingeniero forestal y medio ambiente. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. 164 p.
- Valbuena, D.; Verburg, P. and Bregt, A. (2008). A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. *Agr. Ecosyst. Environ.* 128:27-36.
- Wilkie, D. y Finn, J. (1996). Remote sensing imagery for natural resources monitoring. 1a ed. Editorial Columbia University Press, New York, E.U.A.
- Zhou, G. & Liebhold, A. (1995). Forecasting the Spatial Dynamics of Gypsy-Moth Outbreaks Using Cellular Transition Models. *Landscape Ecology*. N°10, Vol.3, pp 177-189.
- Cadena-Iñiguez, P., Rendón-Medel, R., Aguilar-Ávila, J., Salinas-Cruz, E., de la Cruz-Morales, F. D. R., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2017). Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1603-1617.
- Supo, J. (2024, 10 abril). Objetivos de nivel predictivo. BIOESTADISTICO. <https://bioestadistico.com/objetivos-de-nivel-predictivo#:~:text=El%20nivel%20predictivo%20de%20la,prevenir%20la%20ocurrencia%20del%20acontecimiento>.
- Hamui-Sutton, Alicia. (2013). Un acercamiento a los métodos mixtos de investigación en educación médica. *Investigación en educación médica*, 2(8), 211-216. Recuperado en 02 de noviembre de 2024, de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-50572013000400006&lng=es&tlng=es

Aguayo, Pauchar, Azócar y Parra. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena De Historia Natural - REV CHIL HIST NAT.* 82. 10.4067/S0716-078X2009000300004.

Pontius R. G. Jr. (2000). "Quantification error versus location error in comparison of categorical maps". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66: 1011-1016. ISSN 0099-1112. American Society of Photogrammetry. USA.

Lambin, Eric & Geist, Helmut & Lepers, Erika. (2003). Dynamics of Land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 20. 49205-41.

Nájera, O., J. Bojórquez, J. Cifuentes y S. Marceleño. 2010. Cambio de cobertura y uso del suelo en la Cuenca del Río Mololoa, Nayarit. *Biociencias* 1 (1):19-29.

Ojeda, Y. (2023). *Modelamiento y prognosis espacial del cambio de uso en el suelo de la Subcuenca Chorobamba, Oxapampa - Pasco, 2000-2030* [Tesis de maestría inédita]. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Clark Labs. (2023). Land Change Modeler for Ecological Sustainability. Recuperado de Clark University. https://www.clarku-edu.translate.google.com/centers/geospatial-analytics/terrset-liberagis-features/land-change-modeler/?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=tc

Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., ... & Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)

Eastman, J. R. (2016). TerrSet Manual. Clark University.

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de datos

	FICHA 1 DATOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES LANDSAT
1. DATOS PERSONALES	
Apellidos	Rojas Trinidad
Nombres	Adita Milagros
Universidad	Daniel Alcides Carrión – filial Oxapampa
Escuela	Ingeniería Ambiental
2. DATOS DE LA TESIS	
Titulo	“Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050”
Línea de investigación	Biodiversidad y cuidado del medioambiente
Ubicación del Proyecto	Distrito de Pozuzo, Provincia de Oxapampa, Departamento de Pasco.
Periodo de análisis	2000, 2010 y 2021
Software	Arcgis 10.6, TerrSet 2020, Google Earth Engine
3. DATOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES	
Fuente de adquisición	Web de MapBiomass
Satélite	LandSat 5 y 8
Sensor	Thematic Mapper (TM), Operational Land Imager (OLI)
Resolución espacial	Banda multiespectral de 30 metros
Combinación de bandas de imágenes LandSat	RGB
Fechas de toma de imágenes	2000, 2010 y 2021
Resolución radiométrica	8 – 16 bits
Path/Row	P - R
Datum	WGS - 84
Zona UTM	18 S



FICHA 2
COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE
CONTROL PARA LOS TIPOS DE
COBERTURAS

1. DATOS PERSONALES

Apellidos	Rojas Trinidad
Nombres	Adita Milagros
Universidad	Daniel Alcides Carrión – filial Oxapampa
Escuela	Ingeniería Ambiental

2. DATOS DE LA TESIS

Título	“Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050”
Línea de investigación	Biodiversidad y cuidado del medioambiente
Ubicación del Proyecto	Distrito de Pozuzo, Provincia de Oxapampa, Departamento de Pasco.
Periodo de análisis	2000, 2010 y 2021
Software	Arcgis 10.6, TerrSet 2020, Google Earth Engine

3. DATOS DE LAS COORDENADAS PARA LOS PUNTOS DE
CONTROL SEGÚN TIPOS DE COBERTURAS

N°	TIPOS DE COBERTURAS	COORDENADAS	
		LATITUD	LONGITUD
1	Bosque		
2	Pastizal / Herbazal		
3	Matorral		
4	Mosaico agropecuario		
5	Infraestructura		
6	Otras áreas sin vegetación		
7	Río		

Procedimiento de validación y confiabilidad

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

- 1.1 **Apellidos y nombres:** Flores Guzmán, Rudy Benedicto
- 1.2 **Cargo e Institución donde labora:** Gerente de la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Tarma
- 1.3 **Especialidad o línea de investigación:** SIG En Recursos Hídricos
- 1.4 **Nombre del instrumento motivo de evaluación:** "Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050"
- 1.5 **Autor de instrumento:** Rojas Trinidad, Adita Milagros

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE				MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible									X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.										X	
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.									X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales.										X	
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de las hipótesis.										X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas, objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X	
9. METODOLOGÍA	La estrategia muestra la metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.									X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al método científico.									X		

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

SI

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

93

Firma y sello del evaluador:


 Rudy Benedicto Flores Guzmán
 Conservación de Suelos y Agua
 CIP 223966

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

- 1.1 **Apellidos y nombres:** Ojeda Enríquez, Yoseph Cronwell.
- 1.2 **Cargo e Institución donde labora:** Subgerente de Reserva de Biosfera Oxapampa Asháninka Yánesha.
- 1.3 **Especialidad o línea de investigación:** Mg.Sc (c) Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas.
- 1.4 **Nombre del instrumento motivo de evaluación:** "Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050"
- 1.5 **Autor de instrumento:** Rojas Trinidad, Adita Milagros

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE				MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible									X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.									X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.									X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.									X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales.										X	
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de las hipótesis.									X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X	
9. METODOLOGÍA	La estrategia muestra la metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.									X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al método científico.									X		

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

SI

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

91.50

Firma y sello del evaluador:



 MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE OXAPAMPA



 Ing. Yoseph Cronwell OJEDA ENRIQUEZ

 SUBGERENTE DE RESERVA DE BIOSFERA

 OXAPAMPA - ASHANINKA YANESHA

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

- 1.1 **Apellidos y nombres:** Esteban Luis Navarro Espinoza
- 1.2 **Cargo e Institución donde labora:** Docente Asociado de la Escuela Profesional Zootecnia UNDAC Sede Oxapampa.
- 1.3 **Especialidad o línea de investigación:** Mg. Medio Ambiente y Gestión del Territorio.
- 1.4 **Nombre del instrumento motivo de evaluación:** "Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050"
- 1.5 **Autor de instrumento:** Rojas Trinidad, Adita Milagros

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE				MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible										X	
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.										X	
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.									X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales.										X	
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de las hipótesis.										X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.									X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.									X		
9. METODOLOGÍA	La estrategia muestra la metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.									X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al método científico.									X		

III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

SI

IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

92.5

ESTEBAN L. NAVARRO ESPINOZA
Firma del evaluador.
CIP 88744

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: “Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050”

Determinación del problema	Objetivos	Metodología	Población y muestra
Problema general ¿Cómo las condiciones ambientales y antrópicas se asocian en la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021, mediante el uso de sensores remotos, autómatas celulares y Cadenas de Márkov con el fin simular el cambio de uso de suelo para el año 2050 en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco? Problemas específicos (PE) PE1: ¿Cuál es la dinámica multitemporal del cambio de cobertura y uso del suelo para los años 2000, 2010 y 2021 mediante el uso de sensores remotos en el distrito de Pozuzo? PE2: ¿Evaluar y modelar condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo ocurrido durante los años 2000, 2010 y 2021 mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov nos permitirán simular la dinámica de cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050?	Objetivo general Analizar y modelar las condiciones ambientales y antrópicas que se asocian en la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021 mediante de sensores remotos, autómatas celulares y Cadenas de Márkov con el fin simular el cambio de uso de suelo para el año 2050 en el distrito de Pozuzo, provincia de Oxapampa, región Pasco. Objetivos específicos (OE) OE1: Analizar la dinámica multitemporal de cambio de cobertura y uso del suelo en los años 2000, 2010 y 2021 mediante sensores remotos en el distrito de Pozuzo. OE2: Evaluar y modelar las condiciones ambientales y antrópicas asociadas a los cambios de cobertura y uso del suelo de los años 2000, 2010 y 2021, mediante Autómatas Celulares y Cadenas de Markov con el fin de simular el cambio de cobertura en el distrito de Pozuzo para el año 2050.	Tipo de investigación La presente investigación se caracteriza por ser cualitativa. Diseño de la investigación El diseño de la investigación se alinea al tipo no experimental Debido a que no se realizará la manipulación de variables Método de investigación Mixta: Cuantitativo y cualitativo	Población Distrito de Pozuzo Muestra 383 puntos de muestreo