

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DEL CRECIMIENTO
URBANO DE LA CIUDAD DE CAJAMARCA (PERÚ)
MEDIANTE SIG, PERÍODO 1986 – 2040**

Autor: Bach. John Darwin Chicana Campos

Asesores: M.Sc. Elgar Barboza Castillo

Mg. Nilton Beltrán Rojas Briceño

Registro:

CHACHAPOYAS – PERÚ

2024

DEDICATORIA

A MI FAMILIA

Dedico este trabajo a mis
queridos padres Luz Hilda
Campos Gil y Marco Dante
Chicana Maldonado por el
apoyo que me brindan cada día
durante las metas que me he
propuesto.

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme cada día en cada paso que doy y ser mejor persona.

A mis asesores al M.Sc. Elgar Barboza Castillo y Mg. Nilton Beltrán Rojas Briceño, por todo el apoyo incondicional brindado durante mi etapa de estudiante y también en el desarrollo de la tesis.

Al programa Beca Permanencia por ser pieza fundamental para culminar mis estudios académicos.

A los docentes de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas y miembros del jurado evaluador, por todos los conocimientos compartidos y experiencias vividas durante mi formación profesional.

Finalmente, a mi familia que me apoyaron para poder concluir satisfactoriamente con mis estudios y los éxitos logrados.

Gracias

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ
DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Ph.D. Jorge Luis Maicelo Quintana

RECTOR

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres

VICERRECTOR ACADÉMICO

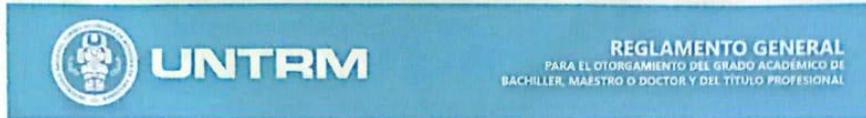
Dra. María Nelly Luján Espinoza

VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN

Ph.D. Ricardo Edmundo Campos Ramos

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS



ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM ()/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Evaluación de la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Perú) mediante SIG, período 1986-2020 del egresado John Darwin Chicana Campos de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.



Chachapoyas, 10 de Junio de 2024


Firma y nombre completo del Asesor
Elgar Baobaza Castillo

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS



ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM ()/Profesional externo (X), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Evaluación de la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Perú) mediante SIG, período 1986-2040; del egresado John Darwin Chicoma Campos de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de esta Casa Superior de Estudios.



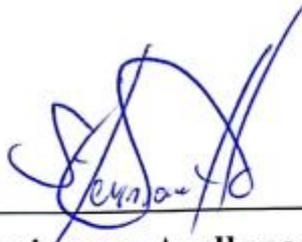
El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 10 de Junio de 2024

Firma y nombre completo del Asesor

Milton Beltrán Rojas Briceño

JURADO EVALUADOR



Dr. Erick Stevinsonn Arellanos Carrión

PRESIDENTE



Mg. Jhonsy Omar Silva López

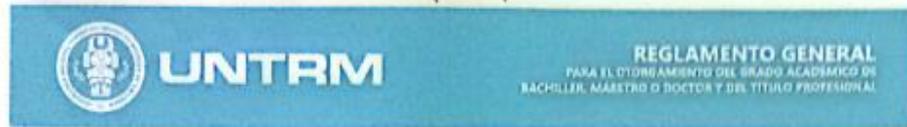
SECRETARIO



Mg. Wildor Gosgot Angeles

VOCAL

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



ANEXO 3-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Evaluación de la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Perú) mediante SIG, periodo 1986-2040;

presentada por el estudiante ()/egresado (x) John Darwin Chucana Campos

de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

con correo electrónico institucional 7360867062@untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 23 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (X) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 14 de mayo del 2024

[Signature]
SECRETARIO

[Signature]
VOCAL

[Signature]
PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

.....
.....

REPORTE DE TURNITIN

Informe de tesis (02-05-24)

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%	23%	7%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	9%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	5%
3	repositorio.untrm.edu.pe Fuente de Internet	4%
4	mail.eure.cl Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	theses.lib.polyu.edu.hk Fuente de Internet	<1%
7	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1%
8	Vicente Serrano, Sergio Martin. "Spatial and temporal evolution of droughts in the middle Ebro Valley: Causes and environmental consequences", Proquest, 20111109 Publicación	<1%


Dr. Erick Stevinson Arellanos Carrión
DNI: 44542645
Presidente del Jurado Evaluador

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS



ANEXO 3-5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 24 de mayo del año 2024 siendo las 15 horas, el aspirante: Bach. Chicara Campos John Darwin, asesorado por Mg. Milton Beltrán Rojas Briceño - M.sc. Elgor Barboza Castillo defiende en sesión pública presencial () a distancia () la Tesis titulada: Evaluación de la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Perú) mediante SIG, periodo 1986 - 2040, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: Dr. Erick Steuinsan Arce Norales Corión

Secretario: Mg. Eli Norales Rojas

Vocal: Mg. Wilber Góngol Angeles

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

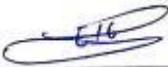
Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado () por Unanimidad ()/Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 16:30 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.


SECRETARIO


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	vi
JURADO EVALUADOR	vii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	viii
REPORTE DE TURNITIN	ix
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS	x
ÍNDICE	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
I. INTRODUCCIÓN	17
II. MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1 Área de estudio	19
2.2 Diseño metodológico	19
2.3 Identificación de factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano	21
2.4 Determinación del crecimiento urbano en el período 1986 - 2022	21
2.5 Predicción del crecimiento urbano mediante un modelo de simulación al 2040 22	
2.6 Análisis de datos	22
III. RESULTADOS	24
3.1 Identificación de factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano	24
3.2 Determinación del crecimiento urbano en el período 1986 - 2022	25
3.3 Predicción del crecimiento urbano mediante un modelo de simulación al 2040 27	
IV. DISCUSIÓN	31
V. CONCLUSIONES	33

VI. RECOMENDACIONES	34
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la ciudad de Cajamarca y área de estudio.	19
Figura 2. Flujograma metodológico para evaluar el crecimiento urbano en la ciudad de Cajamarca.	20
Figura 3. Factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano.....	25
Figura 4. Implementación del preprocesamiento y clasificación de imágenes satelitales en GEE, a) Preprocesamiento de las imágenes Landsat 5 y 8, y b) Clasificación supervisada. ..	25
Figura 5. Superficie en % de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo por año. ..	26
Figura 6. Distribución espacial de los tipos de cobertura vegetal y uso de suelo por año.	26
Figura 7. Cambio a uso antrópico por período para el ámbito de la ciudad de Cajamarca.	27
Figura 8. Área en ha por período para el ámbito de la ciudad de Cajamarca.	27
Figura 9. Variables de entrada del componente espacial para predecir el crecimiento de la ciudad de Cajamarca.	28
Figura 10. Crecimiento urbano para Cajamarca 1986 - 2040.....	28
Figura 11. Superficie en hectáreas del crecimiento urbano para la ciudad de Cajamarca.	29
Figura 12. Pérdida de área e intensidad por cada clase y período de análisis.....	29
Figura 13. Diagrama de Sankey para analizar la dinámica de cambio por clase por cada año de análisis.....	30
Figura 14. Georreferenciación de la clase urbano.....	45
Figura 15. Georreferenciación de la clase cultivo.....	45
Figura 16. Georreferenciación de la clase pasto.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las imágenes satelitales utilizadas en GEE.....	20
Tabla 2. Matriz de tabulación cruzada, tasa de cambio s e índices de cambios período 1986-2004.....	44
Tabla 3. Matriz de tabulación cruzada, tasa de cambio s e índices de cambios período 1986-2004.....	44
Tabla 4. Matriz de tabulación cruzada, tasa de cambio s e índices de cambios período 1986-2004	45

RESUMEN

En este estudio evaluamos la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Perú) mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el período 1986 – 2040. Para ello, realizamos la identificación de los factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca. Analizamos los cambios de cobertura y uso de suelos en la plataforma de Google Earth Engine (GEE) y predecimos el crecimiento urbano al 2040 aplicando Autómatas Celulares (AC). Los resultados permitieron identificar múltiples factores físicos, socioeconómicos y ambientales que podrían promover el crecimiento urbano en el área de estudio. A su vez, el análisis del crecimiento urbano entre 1986 – 2022 permitió predecir el escenario futuro al 2040 para Cajamarca, lo cual, evidenció que el incremento del área urbana dependerá del crecimiento poblacional y el desarrollo de actividades antrópicas como agricultura y ganadería. Para el 2040 se espera que la clase arbustal y herbazal represente la mayor superficie (41.72%), seguida de urbano (24.13%), pasto y cultivo (19.76%), bosque (14.24%) y agua (0.16%) del área de estudio para el 2040.

Palabras clave: Teledetección; CA; GEE; Crecimiento urbano.

ABSTRACT

In this study we evaluate the dynamics of urban growth of the city of Cajamarca (Peru) using Geographic Information Systems (GIS) for the period 1986 - 2040. To do this, we identify the physical spatial factors that determine the urban growth of the city. city of Cajamarca. We analyze changes in land cover and use on the Google Earth Engine (GEE) platform and predict urban growth to 2040 by applying Cellular Automata (CA). The results allowed us to identify multiple physical, socioeconomic and political-institutional factors that can promote urban growth in the city of Cajamarca. In turn, the analysis of urban growth between 1986 - 2022 allowed us to predict the future scenario to 2040 for Cajamarca, which showed that the increase in the urban area will depend on population growth. By 2040, it is expected that the shrub and grassland class will represent the largest area (41.72%), followed by urban (24.13%), grass and crops (19.76%), forest (14.24%) and water (0.16%) of the area. study for 2040.

Keywords: Remote sensing; CA; GEE; Urban growth.

I. INTRODUCCIÓN

La urbanización o crecimiento urbano implica un conjunto complejo de procesos económicos, demográficos, sociales, culturales, tecnológicos y ambientales que dan como resultado el crecimiento de las ciudades alrededor del 50% a escala global (Knox, 2009). El crecimiento urbano depende de los cambios demográficos como la inmigración y migración de personas desde las áreas rurales a la ciudad y crecimiento natural de la población (Al-Darwish et al., 2018). La expansión urbana no planificada tiene un impacto negativo significativo en el uso de la tierra, agua y medio ambiente (Chakroborty et al., 2020; Rakib et al., 2020). Además, influye en la pérdida de tierras agrícolas, afecta los bosques y amenaza al desarrollo urbano sostenible (Dubovyk et al., 2011; X. Li & Yeh, 2000; Poelmans & Van, 2009; Wu & Zhang, 2012).

El crecimiento de las ciudades en muchos países en desarrollo es inconsistente con sus planes y políticas, lo que, genera invasiones y asentamientos humanos informales (Dubovyk et al., 2011; Rimal, et al., 2018). Por lo tanto, el análisis técnico - científico de estas áreas es muy importante para comprender mejor los patrones y tendencias del crecimiento urbano actual y futuro (Al-Darwish et al., 2018; Rimal et al., 2018).

La información precisa, consistente y actualizada sobre las tendencias de la urbanización es importante para (i) la formulación de planes de desarrollo urbano y (ii) definición de límites del área urbana y rural con la finalidad de garantizar la ocupación sostenible del territorio (Rimal et al., 2018). Para ello, se utiliza mapas de cambios de cobertura y uso de suelo que ayudan entender la dinámica y las fuentes impulsoras de los cambios futuros que deben enfrentar las ciudades (Rimal et al., 2017). Estos mapas son generados utilizando herramientas como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección. Además, de diversos modelos geoespaciales y estadísticos de predicción urbana (Keshtkar & Voigt, 2016).

Los modelos de predicción urbana utilizan algoritmos de inteligencia artificial (ML, por sus siglas en inglés), entre ellos tenemos Autómatas Celulares (CA) (Tripathy & Kumar, 2019), Cadenas de Márkov (MC) (Baqá et al., 2021), CA-MC (Vinayak et al., 2021) y CA-regresión logística (LR) (Mustafa et al., 2018). Estos modelos utilizan capas temáticas como cobertura y uso de suelo, elevación, sombra, pendiente, distancia de a vías y ríos, entre otros (Khan & Sudheer, 2022). Las predicciones del crecimiento urbano

se han aplicado en diferentes países Nepal (Rimal et al., 2018), Bangladesh (Kafy et al., 2021), Alemania (Rienow & Goetzke, 2015), India (Vinayak et al., 2021) y Perú (Anahua, 2020; Huaman, 2022).

En los últimos años, en todo el mundo, los procesos urbanos han experimentado grandes transformaciones. América y Europa han sido testigos de un gran aumento de la urbanización debido al desarrollo económico y crecimiento poblacional de los países en desarrollo (Aurambout et al., 2018; Bueno-Suárez & Coq-Huelva, 2020). Asia en particular está siendo testigo de una urbanización preocupante, donde el crecimiento urbano de China amenaza la calidad ambiental y sostenibilidad socioeconómica (Li & Li, 2019). En América del Sur, los países enfrentan problemas de crecimiento urbano que genera una mayor presión sobre los factores de producción agrícola locales, como la tierra, el agua, los fertilizantes (orgánicos) y la mano de obra (Follmann et al., 2021; Zoomers et al., 2017). Perú, ha experimentado un crecimiento urbano en sus principales ciudades como Lima, Callao, Arequipa, Trujillo, Piura y Huancayo (Flood & Niewiadomski, 2022), sin embargo, hasta el momento no se han reportado estudios relacionados con el análisis de la expansión y dinámica del uso de suelo aplicando herramientas como computación en nube y modelos de predicción, que pueda ayudar a comprender estos cambios para realizar una planificación territorial sistemática y sostenible de las ciudades con el medio ambiente y la gestión adecuada de los recursos naturales.

La ciudad Cajamarca localizada al norte de Perú en la cordillera de los Andes, ha experimentado un enorme proceso de urbanización durante en los últimos 30 años a consecuencia del aumento de las áreas edificadas y las actividades de minería (Dávila, 2020). Por ello, la importancia de evaluar la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Perú) mediante SIG, período 1986 – 2040. Realizando i) la identificación de los factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca, ii) determinando el crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca en el período 1986 – 2040 y iii) predicción del crecimiento urbano mediante un modelo de simulación al 2040.

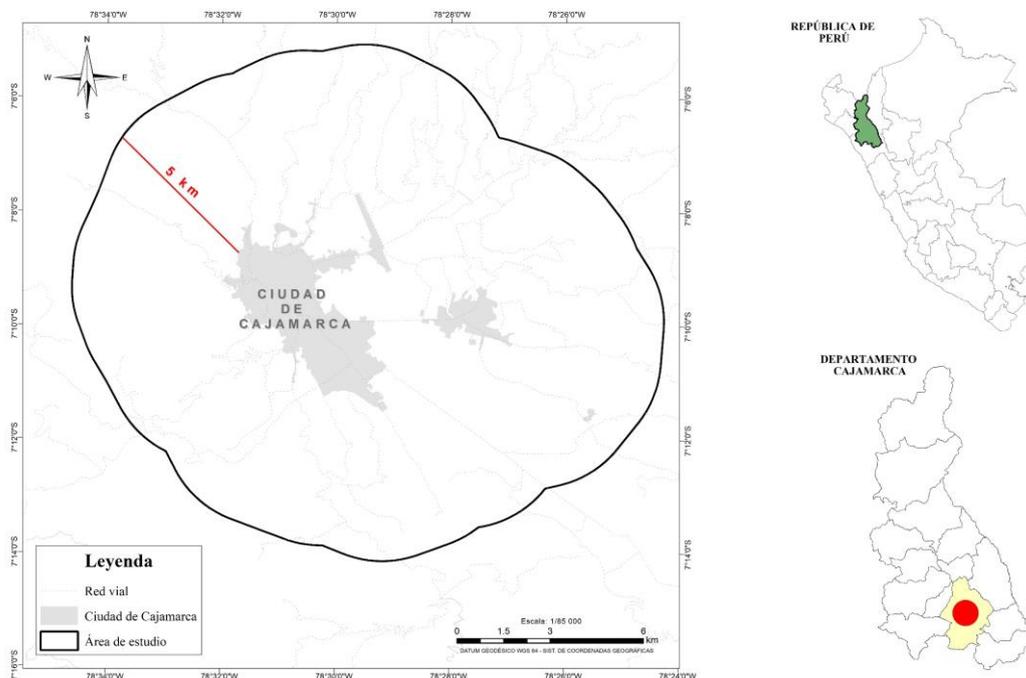
II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La ciudad de Cajamarca se ubica en el distrito y provincia de Cajamarca, en el norte del Perú, a una altitud de 2750 m.s.n.m. en la cordillera de los Andes. La ciudad es considerada como centro dinamizador que presenta un área urbana con alta densidad poblacional de aproximadamente de 311,306 habitantes (INEI, 2020). La ciudad brinda servicios públicos que incluye espacios destinados a actividades comerciales, turísticas e industriales (VIVIENDA, 2016).

Figura 1.

Ubicación de la ciudad de Cajamarca y área de estudio.

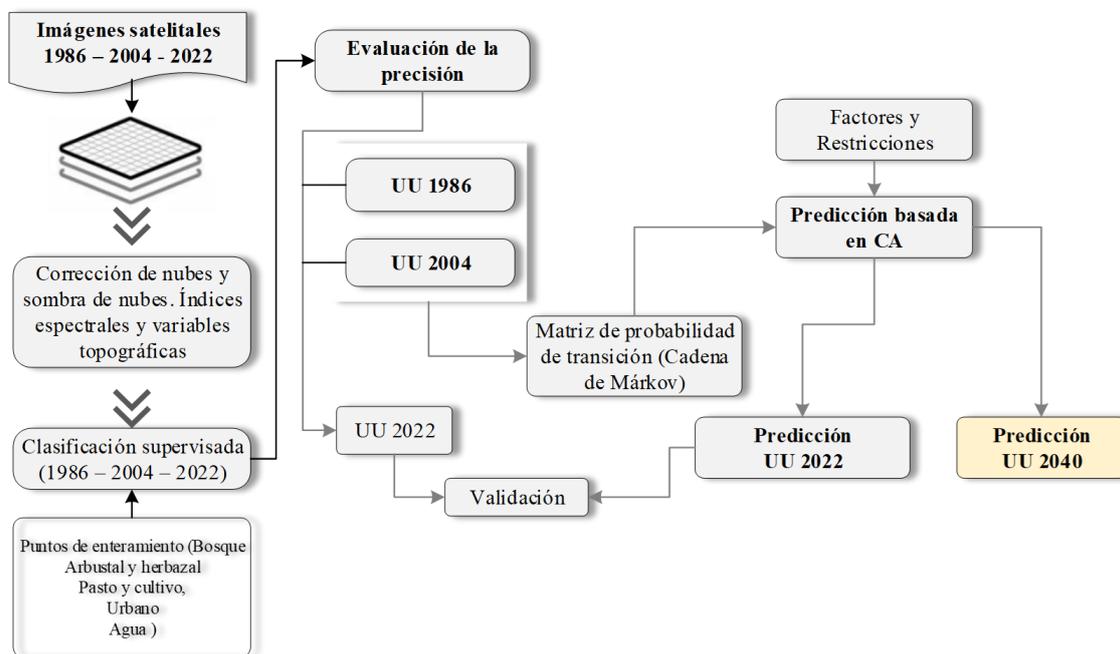


2.2 Diseño metodológico

El flujograma metodológico para evaluar la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Perú) mediante SIG, período 1986 – 2040 se presenta en la Figura 2. En la cual, se observa la selección mosaicos de imágenes satelitales para 1986, 2004 y 2022, y se procesarán mediante clasificación supervisada bajo un entorno de SIG y en la plataforma de Google Earth Engine (GEE). Posteriormente, se estimó la exactitud temática o precisión de cada mapa generado. Finalmente, se determinó los mapas de idoneidad de Uso Urbano (UU) mediante Autómatas Celulares (CA) al 2040.

Figura 2.

Flujograma metodológico para evaluar el crecimiento urbano en la ciudad de Cajamarca.



La adquisición de información espacial consistió en descargar la cartografía oficial de la carta nacional (hidrografía y elevación) y la red vial distrital. El Modelo de Elevación Digital (DEM) de 30 m de resolución (Farr et al., 2007) e imágenes de los satélites Landsat 5 TM para 1985 y 2004, y Landsat 8 OLI para 2022, las cuales se procesaron desde GEE (Tabla 1). Se consideró una cobertura de nubes menores al 30% en el área de estudio considerando la media anual.

Tabla 1. Características de las imágenes satelitales utilizadas en GEE.

Satélite	Fecha de análisis	Bandas seleccionadas	ID en GEE
Landsat 8 OLI	2022	Blue, Green, Red, NIR, SWIR1 y SWIR2	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2
Landsat 5 TM	1986 y 2004		LANDSAT/LT05/C02/T1_L2

La clasificación de las imágenes satelitales se realizó en GEE y la predicción al 2040 se realizó en el software IDRISI Taiga. Las capas espaciales en formato vectorial (puntos, líneas y polígonos) fueron georreferenciadas en el Datum WGS 1984 y Zona UTM 17 Sur (Cajamarca).

2.3 Identificación de factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano

En esta actividad se realizó la recopilación de estudios temáticos sobre uso de suelo, crecimiento urbano, planes de ordenamiento territorial u otros estudios relacionados a la investigación que permita obtener un contexto ambiental, cultural, socioeconómico de la ciudad de Cajamarca. La recopilación de documentos se permitió identificar los factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca (Anahua, 2020).

2.4 Determinación del crecimiento urbano en el período 1986 - 2022

Preprocesamiento de imágenes satelitales

El preprocesamiento de la información se realizó utilizando la colección de imágenes Landsat 5 y 8 para 1986, 2004 y 2022. El proceso consistió en aplicar filtro por fechas y porcentaje de nubes de las colecciones de imágenes (Chavez, 1988). Posteriormente, se aplicó la corrección de nubes y sombra de nubes obteniendo mosaicos anuales de buena calidad.

Se seleccionaron las bandas Blue, Green, Red, NIR, SWIR1 y SWIR2 para construir variables predictoras de clasificación supervisada. Posteriormente, las bandas espectrales calibradas se combinaron para construir imágenes multibanda para cada año de análisis (Tsai et al., 2018). Asimismo, se determinaron índices espectrales como Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de vegetación ajustado al suelo modificado (MSAVI), Índice de vegetación mejorado (EVI), Índice de vegetación de clorofila verde (GCVI), Índice de diferencia normalizada del agua (NDWI) e Índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente (ARVI). Además, de las variables topográficas como DEM, pendiente y aspecto.

Clasificación de áreas urbanas

Mediante salidas a campo se georreferenció las áreas de entrenamiento, para las clases de bosque (B), arbustal y herbazal (AH), pasto y cultivo (PC), urbano (U) y agua (A), mediante el uso de un receptor GPS. Las áreas de entrenamiento se subieron a GEE para luego aplicar la clasificación supervisada Random Forest (RF) para generar un único mapa por cada año de análisis (1986, 2004 y 2022) (Azzari & Lobell, 2017). Para mejorar las clasificaciones, se aplicó un filtro espacial para eliminar el ruido de la clasificación (coloquialmente efecto de sal y pimienta) de las imágenes. Finalmente, los mapas fueron exportados para realizar los cálculos de áreas, estimar los cambios por período y generar los mapas cartográficos.

Determinación de los índices de cambio

Se calcularon Índices de cambio (s) promedio anual de cada clase entre los períodos 1986–2004 y 2004–2022, a través la Ecuación 1 propuesta por la FAO (1996). Donde, S_1 y S_2 representan el área de cada clase en la fecha t_1 y t_2 , respectivamente. El resultado negativo de s demuestra pérdida en la clase y, si s es superior a 0, habrá un aumento de la misma clase.

$$s = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{1/t_2-t_1} - 1 \quad \text{Ecuación 1}$$

2.5 Predicción del crecimiento urbano mediante un modelo de simulación al 2040

La predicción futura del crecimiento urbano se realizó mediante la aplicación de modelos dinámicos que integren las metodologías de MC para modelar y visualizar el crecimiento urbano (Mohamed & Worku, 2020). Se aplicó el modelo CA de para realizar la predicción futura utilizando el software IDRISI Taiga. La predicción se basó en el uso de dos tipos de variables; los mapas clasificados obtenidos de los datos Landsat (en dos períodos determinados 2004 y 2022) y las variables independientes como i) distancia a carreteras, ii) distancia a ríos, iii) distancia a centro poblados, iv) elevación y v) pendiente para generar la matriz de potencial de transición (Márkov-C) (Ullah et al., 2019). Una vez obtenida la matriz potencial, se aplicó el modelo CA para simular el mapa futuro de crecimiento urbano para 2040. Además, fue necesario validar la precisión del modelo utilizando datos existentes, comprando los mapas simulados y los obtenidos (de datos de Landsat) del mismo año para el área de estudio.

2.6 Análisis de datos

Se determinó la exactitud temática de los mapas generados en tres pasos (MINAM, 2014): cálculo del número de áreas de referencia, diseño del muestreo y procesamiento de datos. El número de áreas de referencia se calculó mediante la Ecuación 2 de Cochran (1977) para cada clase de los mapas generados (1986, 2004 y 2022). Se trabajó para cada clase obteniendo puntos distribuidos aleatoriamente.

$$N = \frac{S^2 \times p \times q}{E^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

S Nivel de confianza (95%).

p y q Aciertos y errores estimados, respectivamente. $q = 1 - p$.

E Error permitido (5%).

La verificación de las áreas de validación se realizó en campo y con imágenes de alta resolución (Peralta-Rivero et al., 2015). Posteriormente, se construyó matrices de confusión que permitió evaluar la precisión de los resultados para cada año de estudio (Chuvieco, 2016). Por lo tanto, se calculó la precisión del usuario (**UA**) que corresponde al error de comisión o exclusión (desde la perspectiva del usuario), la precisión del productor (**PA**) aborda los errores de omisión o inclusión (según el creador del mapa) (Padilla et al., 2014). Asimismo, se calculará la precisión general (**OA**) (Foody, 2010), el coeficiente de Kappa (**k**) (Ecuación 3).

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^r c_{nn} - \sum_{i=1}^r a c_{n+} c_{+n}}{n^2 - \sum_{i=1}^r c_{n+} c_{+n}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- r número de filas.
- n número total de áreas de verificación.
- c_{nn} el número de observaciones en la fila n y columna n .
- c_{n+} y c_{+n} total de marginal de fila n y columna n , respectivamente.

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del trabajo de campo y el procesamiento de las imágenes satelitales en la plataforma de GEE. En primer lugar, se muestran los factores físicos espaciales identificados que influyen en el crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca, luego se muestran los mapas y cálculos de áreas de crecimiento urbano por períodos desde 1986 a 2004 y de 2004 a 2022. Finalmente, se presenta la predicción del crecimiento urbano para el 2040.

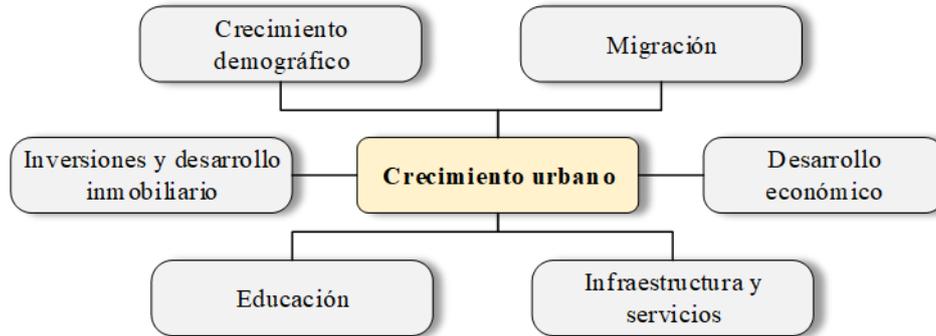
3.1 Identificación de factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano

El crecimiento urbano de una ciudad puede deberse a una variedad de factores que interactúan entre sí (López & Peña, 2017). Los factores crecimiento urbano identificados en la ciudad de Cajamarca (Figura 3) están relacionados con la región y el contexto específico de la ciudad, los cuales son los siguientes:

- a) **Crecimiento demográfico:** Que está relacionada con el aumento de la población impulsada por la demanda de viviendas, empleo, servicios y actividades urbanas en general.
- b) **Migración:** La migración de personas desde áreas rurales a urbanas o entre ciudades que influye en el crecimiento significativo en la población urbana de la ciudad de Cajamarca.
- c) **Desarrollo económico:** Las oportunidades de empleo y el desarrollo de sectores económicos, como la industria, el comercio y los servicios, atraen a personas a la ciudad en busca de trabajo y mejores condiciones de vida.
- d) **Infraestructura y servicios:** La disponibilidad de infraestructuras sólidas, como carreteras, transporte público, servicios de salud, educación (universidades públicas y privadas) y otras comodidades, puede hacer que la ciudad sea atractiva para vivir.
- e) **Inversiones y desarrollo inmobiliario:** Las inversiones en proyectos inmobiliarios, tanto residenciales como comerciales, pueden contribuir al crecimiento urbano al proporcionar nuevas opciones de vivienda y espacios para negocios.
- f) **Educación:** La presencia de instituciones educativas de calidad puede atraer a estudiantes y profesionales, generando un crecimiento significativo en la población urbana.

Figura 3.

Factores físicos espaciales que determinan el crecimiento urbano.

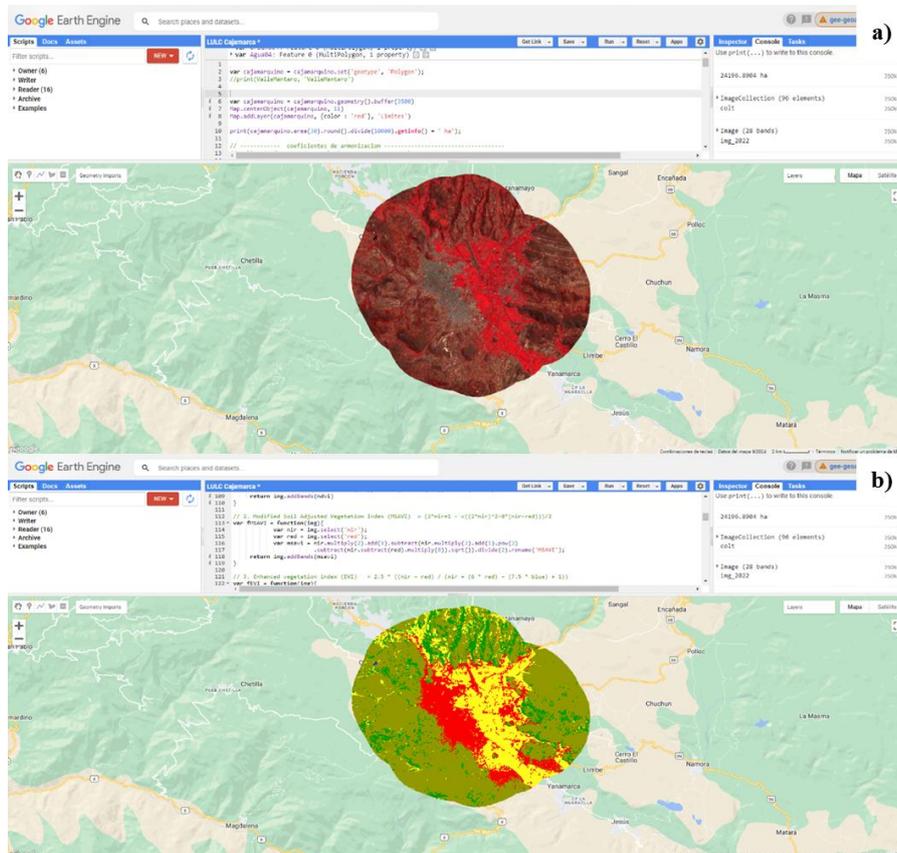


3.2 Determinación del crecimiento urbano en el período 1986 - 2022

En la Figura 4, se muestra la implementación del preprocesamiento y clasificación de imágenes satelitales en GEE. La implementación incluyó la corrección de las imágenes, cálculo de índices espectrales y variables topográficas. La creación de variables predictoras (blue, green, red, nir, swir1, swir2, NDVI, MSAVI, EVI, GCVI, NDWI, ARVI, DEM, pendiente y aspecto) permitió identificar las clases de B, AH, PC, U y A en el área de estudio.

Figura 4.

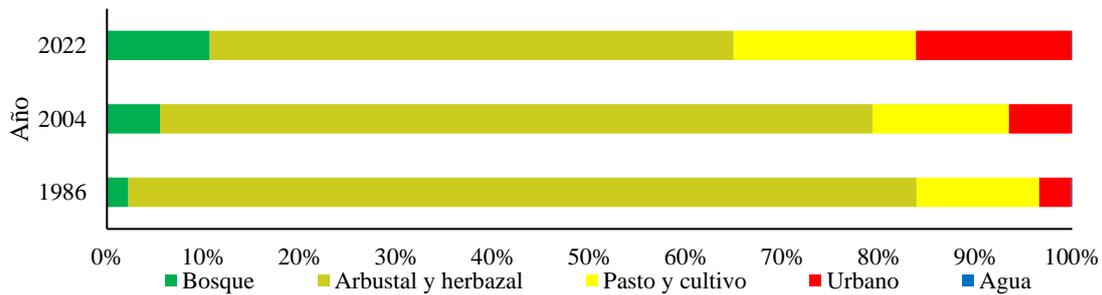
Implementación del preprocesamiento y clasificación de imágenes satelitales en GEE, a) Preprocesamiento de las imágenes Landsat 5 y 8, y b) Clasificación supervisada.



En la Figura 5, se muestra los porcentajes de superficie por clase y por cada año de análisis. El bosque muestra un incremento desde 1986 a 2022 de 531.42 a 2,549.58 ha, respectivamente. Los pastos y cultivos muestran una tendencia al incremento de superficie de 1,486.32 ha en los años de estudio. Por su parte, el área urbana se incrementó de 789.68 ha a 3,849.21 ha desde 1986 a 2022, respectivamente. Por su parte, la clase arbustal y herbazal se redujo de 19,523.40 a 12,970.98 ha del 1986 a 2022, respectivamente.

Figura 5.

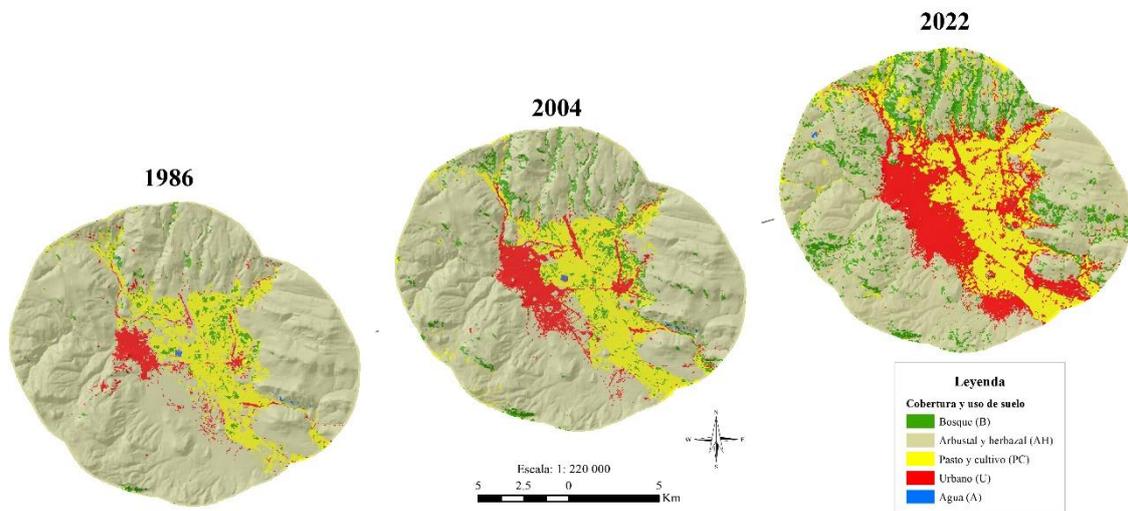
Superficie en % de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo por año.



En la Figura 6, se muestra la distribución espacial de la cobertura y uso de suelo del área de estudio. El bosque se ubica principalmente centro y norte del área de estudio, con incremento al este y oeste al 2022. La clase de arbustal y herbazal se encuentra distribuida en toda el área de estudio. La clase de pastos y cultivos se ubica en el centro del área de estudio y se observa un incremento de superficie al norte, este y sureste del área de estudio. Las métricas de precisión (índice de Kappa, UA, PA y OA) estuvieron por encima del 83%.

Figura 6.

Distribución espacial de los tipos de cobertura vegetal y uso de suelo por año.



En la Figura 7, se presentan los cambios de las clases por periodos. En el período 1 (P1) se analizó los cambios entre los 1986-2004 y el periodo 2 se analizó los cambios entre 2004 – 2022. Se observa que el cambio a uso antrópico y a cobertura natural fue mayor en el P1 (Figura 7).

Figura 7.

Cambio a uso antrópico por período para el ámbito de la ciudad de Cajamarca.

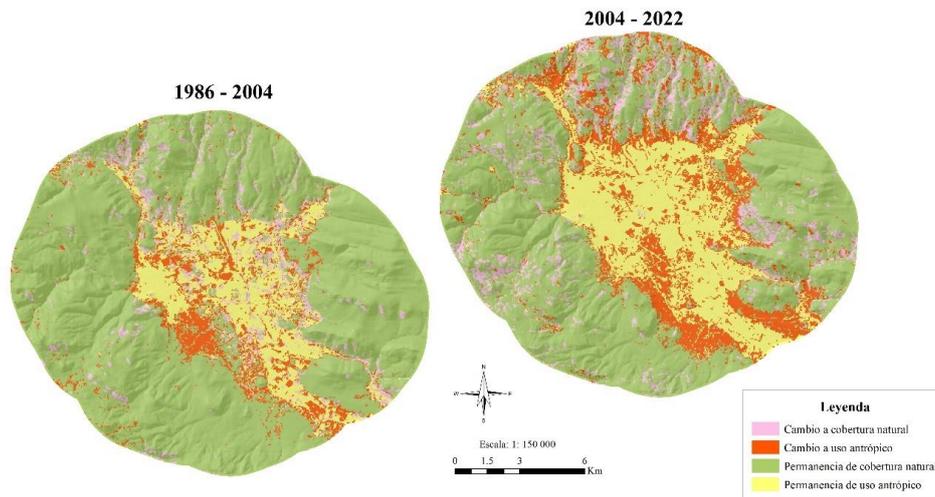
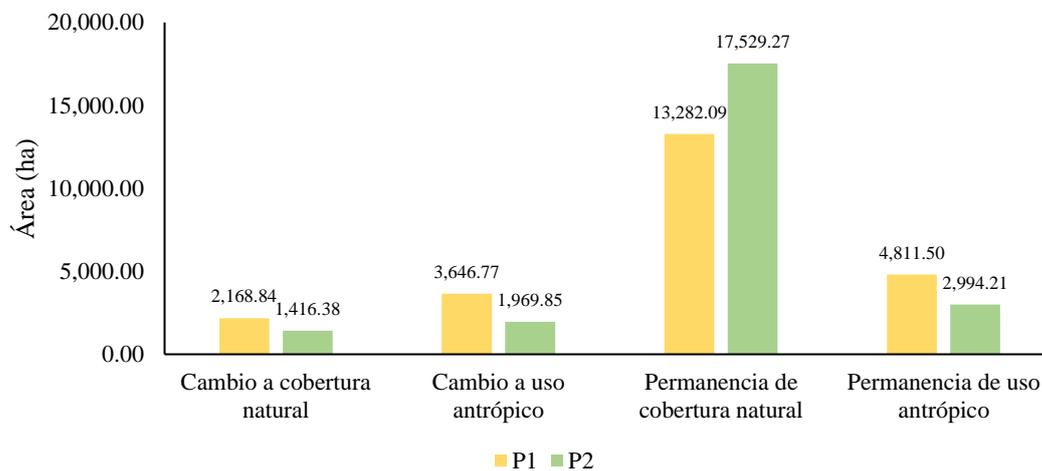


Figura 8.

Área en ha por período para el ámbito de la ciudad de Cajamarca.



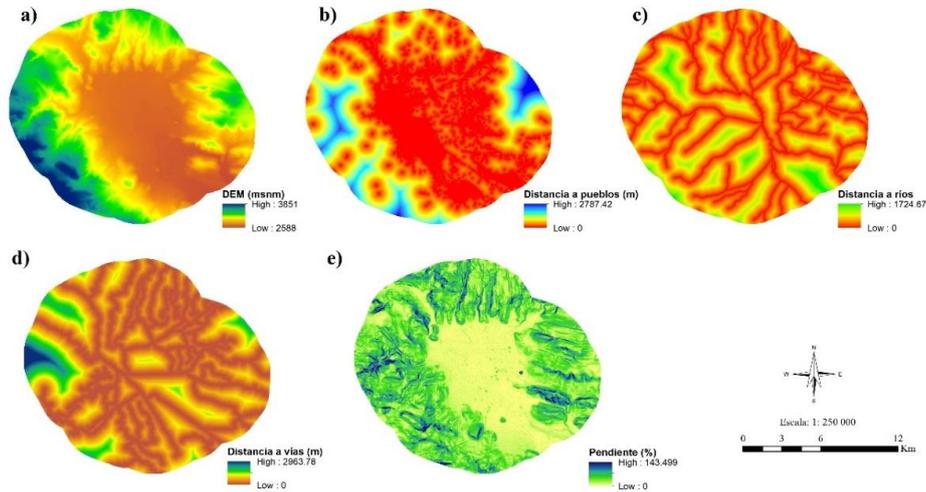
3.3 Predicción del crecimiento urbano mediante un modelo de simulación al 2040

Las variables espaciales se procesaron y agregaron como variables predictoras en el módulo de Land Change Modeler de IDRISI (<https://clarklabs.org/terrset/idrisi-gis/>) con el objetivo de predecir el crecimiento urbano al 2040 en el área de estudio. Las variables estuvieron

representadas por el DEM, distancia a pueblos urbanos, distancia a ríos, distancia a vías y pendiente del terreno (Figura 9).

Figura 9.

Variables de entrada del componente espacial para predecir el crecimiento de la ciudad de Cajamarca.



El módulo de Land Change Modeler predijo las clases de cobertura y uso de suelo. Los resultados se observan en el Anexo 2, donde se evidencia la disminución de la clase arbustal y herbazal, pero se incrementa la clase de bosque, área urbana, pasto y cultivo. Por otro lado, el modelo permitió predecir los cambios al 2040, para ello, se utilizaron los mapas del 2004 y 2022. Los mapas generados reportaron una precisión superior al 75%. La estimación de los cambios históricos en la superficie urbana para Cajamarca se estima que será de 5,768.19 ha, con expansión hacia las zonas oeste, sur y noreste de la ciudad (Figura 10 y 11).

Figura 10.

Crecimiento urbano para Cajamarca 1986 - 2040.

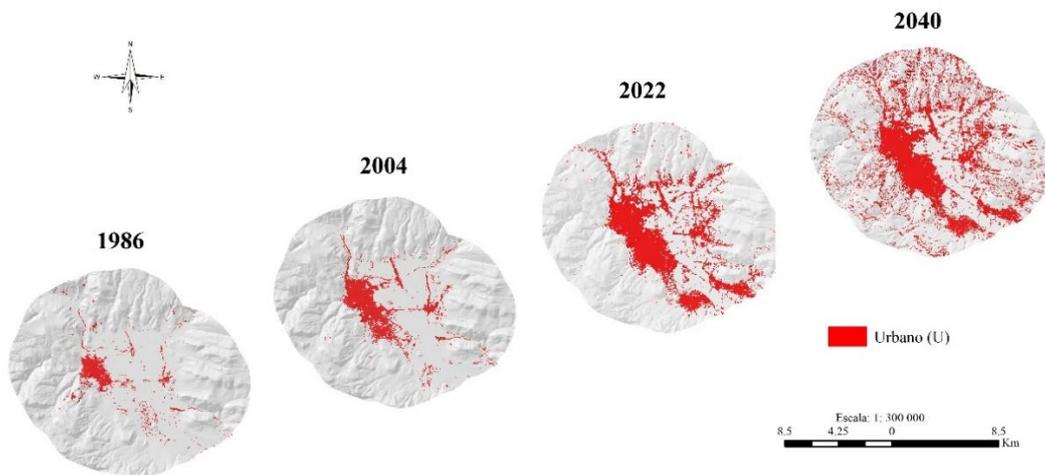
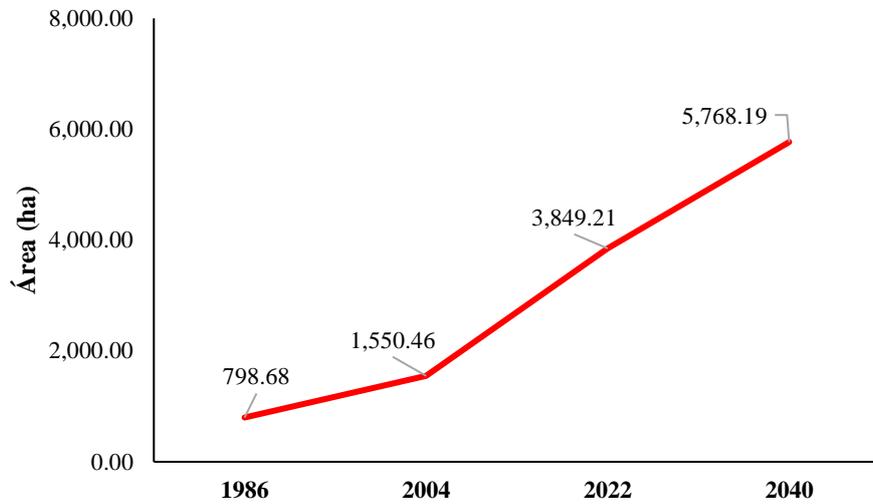


Figura 11.

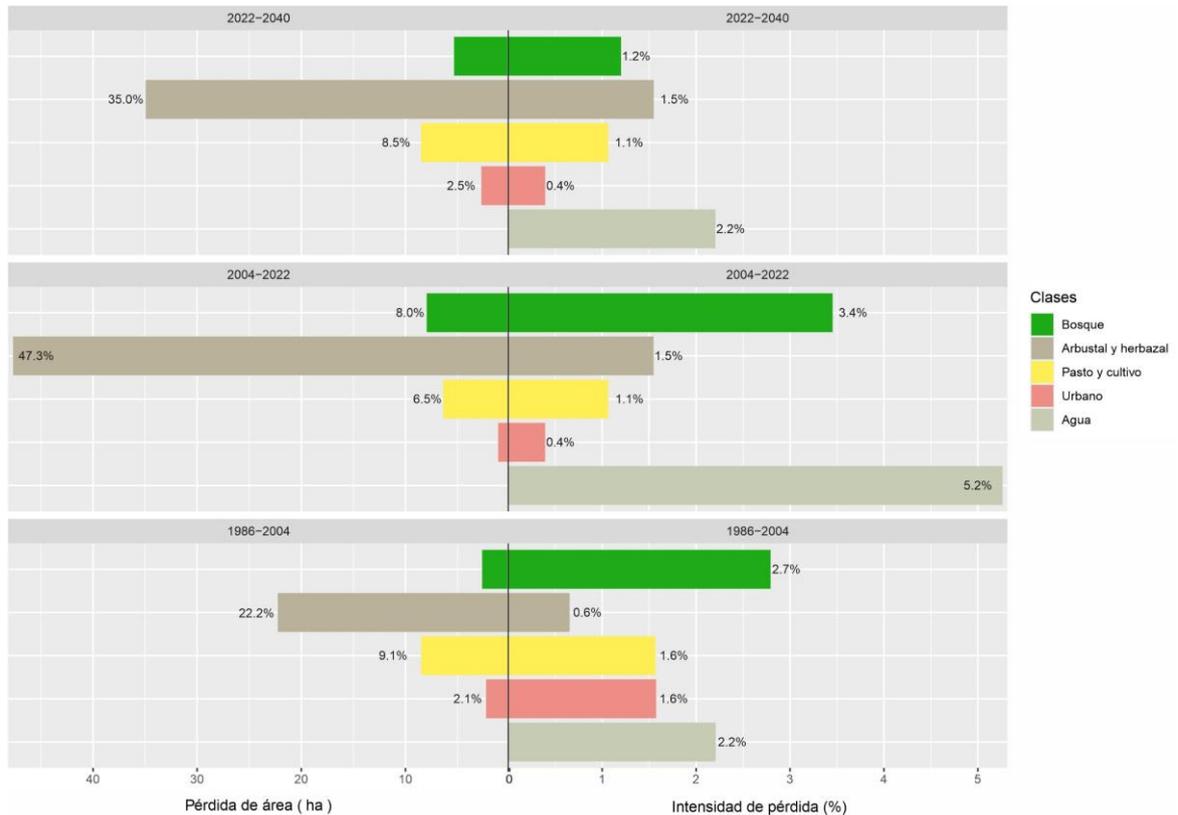
Superficie en hectáreas del crecimiento urbano para la ciudad de Cajamarca.



La Figura 12, muestra la pérdida de superficie cada una de las clases por período en el área de estudio. En el P1, P2 y P3 (2022 – 2040), la clase que mayor perdió superficie fue AH, seguido de PC. A nivel de intensidad de pérdida en el P1 fue A y B, en el P2 fue A, AH y B y en el P3 fue A, AH y B.

Figura 12.

Pérdida de área e intensidad de cambio por cada clase y período de análisis.

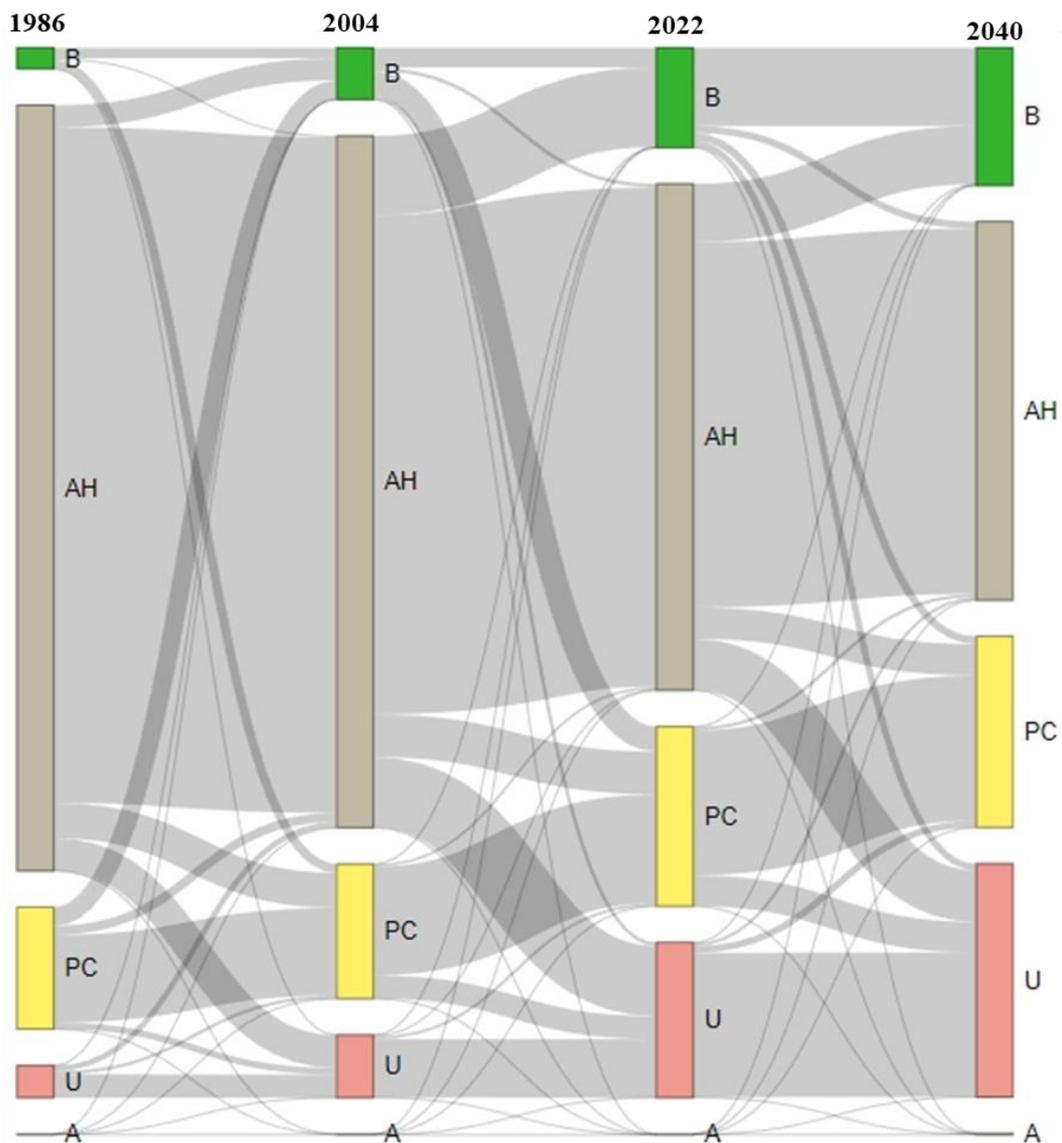


La Figura 13, muestra la dinámica de cambio de cada una de las clases por cada año. La clase de bosque en 1986 cambio a pastos y cultivos, en 2004 los cambios estuvieron distribuidos a pastos y cultivos, y áreas urbanas. Para el 2022 los pastos cambiaron a arbustal y herbazal, pastos y cultivos y áreas urbanas.

La clase arbustal y herbazal presentó una dinámica de cambio y disminución de su superficie. Los cambios estuvieron hacia las clases de bosques, pastos y cultivos, y urbano en todos los años de análisis. Por su parte la clase urbano mostró tendencia de incremento en todos los años, siendo las clases de bosque, herbazal y arbustal, y pasto y cultivo que mayor contribuyeron.

Figura 13.

Diagrama de Sankey para analizar la dinámica de cambio por clase por cada año de análisis.



IV. DISCUSIÓN

Los cambios de cobertura y uso de suelos están relacionados con el aumento poblacional y el desarrollo de las actividades antropogénicas. La evaluación de la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca mediante técnicas de SIG durante el permitió identificar cambios importantes en los 54 años de análisis. El aumento del área urbana, pastos, cultivos y bosque es notorio a partir de la reducción de los arbustales y herbazales. El crecimiento urbano en Cajamarca es importante (INEI, 2020), lo que, ha creado un territorio extendido y fragmentado. En otras ciudades del mundo los procesos de desarrollo urbano son similares, y en muchas ocasiones contribuyen al deterioro ambiental y social (Delgado et al., 2024). Aun así cuando el área urbana solo representa el 2% de la superficie mundial y ocupa más del 55% de la población que vive en ciudades (Khodakarami et al., 2023). Por lo tanto, es necesario planificar el desarrollo de las ciudades de manera sostenible que permita reducir los impactos ambientales y mejorar la calidad de vida de los habitantes.

Se ha identificado múltiples factores físicos, socioeconómicos y ambientales que pueden promover el crecimiento urbano en la ciudad de Cajamarca, ente los cuales, el crecimiento demográfico, la migración, la disponibilidad de servicios básicos como luz, agua, desagüe, educación, salud e inversiones que hace que las personas migren de las zonas rurales hacia las zonas urbanas. Estos factores en muchas ocasiones mejoran las condiciones de vida de las personas, sin embargo, en otros casos, puede afectar al medio ambiente (p.e. botaderos de residuos sólidos, contaminación ambiental, pérdida de la biodiversidad, conversión de bosque y cultivos a área urbana) (Cadenasso et al., 2007; Huang et al., 2018). Por ello, la importancia de realizar una adecuada planificación urbana con la finalidad de gestionar el desarrollo urbano y las actividades humanas en el entorno físico (Mu et al., 2016; Schuster-Olbrich et al., 2024) para abordar alternativas políticas de ocupación del suelo, cumplir la normatividad y coordinar con las partes interesadas en los diferentes niveles administrativos de toma de decisiones (Schuster-Olbrich et al., 2024).

El desarrollo del estudio permitió identificar cinco clases de cobertura y uso de suelo, a saber, bosque, arbustal y herbazal, pasto y cultivo, urbano y agua. A nivel porcentual la clase arbustal y herbazal representará la mayor superficie (41.72%), seguida de urbano (24.13%), pasto y cultivo (19.76%), bosque (14.24%) y agua (0.16%) del área de estudio para el 2040 (Anexo 1). Asimismo, a nivel de análisis por períodos, se reporta una

disminución de la clase arbustal herbazal para incrementarse las clases de bosque, pasto y cultivo y urbano. El incremento de la clase de bosque, estaría relacionada con los proyectos de reforestación ejecutados en el área de estudio (p.e. caso Granja Porcón), por su parte el incremento de la clase pasto y cultivo está muy relacionado con la instalación de nuevas parcelas agrícolas y de pastos (Barboza et al., 2018; Rojas et al., 2019; Salas et al., 2014).

El crecimiento urbano en la ciudad de Cajamarca muestra una tendencia ascendente de 798.68 ha (3.34%) a 5,768.19 ha (24.13%) desde 1986 a 2040, respectivamente. Los patrones de crecimiento urbano son similares a los reportados por Barboza (2022) para las ciudades de Bagua Grande y Chachapoyas que se incrementarán de 1,128.77 a 1,459.25 ha y de 924.50 a 1,138.05 ha entre 2021 a 2031, respectivamente. De igual manera, a los reportados por Anahua (2020), quien realizó el modelamiento dinámico espacial del crecimiento urbano mediante AC en el período 1974 al 2065 de la ciudad de Puno.

La aplicación de herramientas como GEE y SIG ayudan a mejorar la detección de cambios y predecir los usos de suelos (Aithal et al., 2014; Dubovyk et al., 2011; Rimal, Zhang, Keshtkar, Haack, et al., 2018). Las posibles zonas de expansión urbana en Cajamarca estarán localizadas al oeste, sur y noreste de la ciudad, lo que, podría estar condicionado con la creación de nuevos asentamientos humanos y asociaciones de viviendas privadas promovidas por agencias inmobiliarias que influyen en el crecimiento urbano (Kim, 2020). De hecho, la plataforma de GEE puede tener algunas limitaciones cuando se trabaja en áreas pequeñas como la resolución que no permita un análisis detallado de las coberturas. También, es posible que los datos recopilados por los satélites contengan más ruido y errores, lo que puede afectar la precisión de los análisis, así como, la disponibilidad de datos históricos y la presencia de nubes puede limitar el desarrollo de las investigaciones (English et al., 2013; Li et al., 2022). Finalmente, en este estudio reportamos las posibles zonas de expansión urbana en el ámbito de la ciudad de Cajamarca, que puede ser considerada como un insumo por las instituciones involucradas en la planificación y desarrollo urbano de las ciudades enmarcados en el desarrollo sostenible y conservación del ambiente.

V. CONCLUSIONES

En este estudio evaluamos la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Cajamarca mediante técnicas SIG y procesamiento en la nube para el período 1986 – 2040. Se identificaron múltiples factores físicos, socioeconómicos y político-institucionales que pueden promover el crecimiento urbano en la ciudad de Cajamarca como el crecimiento demográfico, migración, disponibilidad de servicios básicos como luz, agua, desagüe, educación, salud e inversiones que hace que las personas migren de las zonas rurales hacia las zonas urbanas.

El análisis de cobertura y uso de suelo permitió identificar cinco clases en el área de estudio, las cuales estuvieron representados por bosque, arbustal y herbazal, pasto y cultivo, urbano y agua. A su vez, la dinámica de los cambios cobertura y uso de suelo está influenciado por el crecimiento poblacional, a medida que se incrementan las superficies de las clases de bosque, pasto y cultivo, y área urbana; la clase arbustal y herbazal tiende a disminuir.

El análisis del crecimiento urbano entre 1986 – 2022 permitió predecir el escenario futuro al 2040 para Cajamarca, lo cual, evidenció que el incremento del área urbano dependerá del crecimiento poblacional. Se espera para el 2040 la clase arbustal y herbazal represente la mayor superficie (41.72%), seguida de urbano (24.13%), pasto y cultivo (19.76%), bosque (14.24%) y agua (0.16%) del área de estudio para el 2040.

VI. RECOMENDACIONES

Es fundamental adquirir una comprensión detallada de la dinámica vinculada a los cambios en la cobertura y uso del suelo generados por el desarrollo económico y social, con el fin de llevar a cabo una gestión adecuada del desarrollo urbano en las ciudades.

Este análisis se enfoca exclusivamente en la ciudad de Cajamarca, ubicada en la sierra del Perú. Sin embargo, la metodología puede ser replicada a otras ciudades del país.

En futuras investigaciones, resultaría crucial explorar las conexiones entre la pérdida de la cobertura vegetal y el impacto de los ecosistemas.

Los resultados obtenidos en este estudio pueden servir como referencia para la formulación de nuevas políticas y alternativas, contribuyendo así al análisis y manejo apropiado del crecimiento urbano.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aithal, B. H., Vinay, S., & Ramachandra, T. V. (2014). Landscape dynamics modeling through integrated Markov , Fuzzy-AHP and Cellular Automata. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3160–3163. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947148>
- Al-Darwish, Y., Ayad, H., Taha, D., & Saadallah, D. (2018). Predicting the future urban growth and it's impacts on the surrounding environment using urban simulation models: Case study of Ibb city – Yemen. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 2887–2895. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.10.009>
- Anahua, R. (2020). Modelamiento dinámico espacial del crecimiento urbano mediante autómatas celulares en el periodo 1974 al 2065 de la ciudad de Puno [Universidad Nacional del Altiplano]. In *Tesis*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/13733>
- Aurambout, J. P., Barranco, R., & Lavalley, C. (2018). Towards a simpler characterization of urban sprawl across urban areas in europe. *Land*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/LAND7010033>
- Azzari, G., & Lobell, D. B. (2017). Landsat-based classification in the cloud: An opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 202, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.025>
- Baqa, M. F., Chen, F., Lu, L., Qureshi, S., Tariq, A., Wang, S., Jing, L., Hamza, S., & Li, Q. (2021). Monitoring and modeling the patterns and trends of urban growth using urban sprawl matrix and CA-Markov model: A case study of Karachi, Pakistan. *Land*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/land10070700>
- Barboza, E., Salas, R., Mendoza, M., Oliva, S. M., & Corroto, F. (2018). Uso actual del suelo y calidad hidrogeomorfológica del río San Antonio: alternativas para la restauración fluvial en el Norte de Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(2), 203–214. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.364>
- Barboza, E. (2022). *Crecimiento urbano y su influencia en los cambios de cobertura y uso del suelo utilizando autómatas celulares en los distritos de Bagua Grande y*

- Chachapoyas, Perú*. Tesis de maestría, Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú. Disponible en <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/10796>
- Bueno-Suárez, C., & Coq-Huelva, D. (2020). Sustaining what is unsustainable: A review of urban sprawl and urban socio-environmental policies in North America and Western Europe. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(11). <https://doi.org/10.3390/su12114445>
- Cadenasso, M. L., Pickett, S. T. A., & Schwarz, K. (2007). Spatial Heterogeneity in Urban Ecosystems: Reconceptualizing Land Cover and a Framework for Classification. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *5*(2), 80–88. <http://www.jstor.org/stable/20440583>
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Chakroborty, S., Al Rakib, A., & Kafy, A. Al. (2020). Monitoring Water Quality Based on Community Perception In the Northwest Region of Bangladesh. *1st International Student Research Conference - 2020, January 2022*.
- Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, *24*(3), 459–479. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing An Environmental Approach* (C. Press (ed.); Second.
- Dávila, M. (2020). *Estudio del coeficiente de crecimiento urbano de los distritos de Cajamarca y Los Baños del Inca entre 1991 y 2020* [Universidad Privada del Norte]. <https://www.miciudad.pe/wp-content/uploads/Plan-Desarrollo-Urbano-Cajamarca.pdf>
- Delgado, A., Avila, C., & Ricaurte, M. V. (2024). *Sostenibilidad Urbana-Análisis a escala barrial : Guayaquil Urban Sustainability-Analysis to the Neighbourhood scale : Guayaquil*. *7*(1), 40–66.
- Dubovyk, O., Sliuzas, R., & Flacke, J. (2011). Spatio-temporal modelling of informal settlement development in Sancaktepe district, Istanbul, Turkey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *66*(2), 235–246.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.10.002>

English, S., McNally, T., Bormann, N., Salonen, K., Matricardi, M., Moranyi, A., ... & Thépaut, J. N. (2013). Impact of satellite data.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(RG2004), 1–33. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Flood, D. I., & Niewiadomski, P. (2022). The urban political ecology of fog oases in Lima, Peru. *Geoforum*, 129(October 2020), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.01.001>

Follmann, A., Willkomm, M., & Dannenberg, P. (2021). As the city grows, what do farmers do? A systematic review of urban and peri-urban agriculture under rapid urban growth across the Global South. *Landscape and Urban Planning*, 215, 104186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104186>

Foody, G. (2010). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00574_2.x

Huaman, G. D. (2022). *Escenarios de crecimiento urbano mediante análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo del distrito de Lurigancho – Lima - Perú*. <https://repositorio.usil.edu.pe/bitstreams/053243b0-99cf-4a2b-98a8-0914c99d698d/download>

Huang, C. W., McDonald, R. I., & Seto, K. C. (2018). The importance of land governance for biodiversity conservation in an era of global urban expansion. *Landscape and Urban Planning*, 173(February), 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.01.011>

INEI. (2020). PERÚ: Estimaciones y Proyecciones de Población por Departamento, Provincia y Distrito, 2018-2020. Boletín Especial N° 26. *Instituto Nacional de Estadística e Informatica*, 1–110. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1715/libro.pdf

- Kafy, A. A., Naim, M. N. H., Subramanyam, G., Faisal, A. Al, Ahmed, N. U., Rakib, A. Al, Kona, M. A., & Sattar, G. S. (2021). Cellular Automata approach in dynamic modelling of land cover changes using RapidEye images in Dhaka, Bangladesh. *Environmental Challenges*, 4(January), 100084. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100084>
- Keshtkar, H., & Voigt, W. (2016). A spatiotemporal analysis of landscape change using an integrated Markov chain and cellular automata models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0068-4>
- Khan, A., & Sudheer, M. (2022). Machine learning-based monitoring and modeling for spatio-temporal urban growth of Islamabad. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(2), 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.03.012>
- Khodakarami, L., Pourmanafi, S., Mokhtari, Z., Soffianian, A. R., & Lotfi, A. (2023). Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: Integrating spatial modellings and multi-criteria decision making approaches. *Sustainable Cities and Society*, 97(June). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104725>
- Kim, H. M. (2020). International Real Estate Investment and Urban Development: An Analysis of Korean Activities in Hanoi, Vietnam. *Land Use Policy*, 94(January), 104486. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104486>
- Knox, P. (2009). Urbanization. *International Encyclopedia of Human Geography*, 112–118. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.01108-1>
- Li, Z., Shen, H., Weng, Q., Zhang, Y., Dou, P., & Zhang, L. (2022). Cloud and cloud shadow detection for optical satellite imagery: Features, algorithms, validation, and prospects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 188, 89-108.
- Li, G., & Li, F. (2019). Urban sprawl in China: Differences and socioeconomic drivers. *Science of the Total Environment*, 673, 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.080>
- Li, X., & Yeh, A. G. O. (2000). Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 131–152. <https://doi.org/10.1080/136588100240886>

- López, J., & Peña, S. (2017). Socio-spatial segregation in Ciudad Juárez. *Region y Sociedad*, 68, 1990–2010. <http://www.scielo.org.mx/pdf/regsoc/v29n68/1870-3925-regsoc-29-68-00115.pdf>
- MINAM. (2014). Protocolo: Evaluacion de la Exactitud Tematica del Mapa de Deforestación. In *Ministerio del Ambiente*. <http://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wp-content/uploads/sites/18/2013/10/Protocolo-Validacion-Mapa-Deforestacion.pdf> (Accedido el 10 de enero de 2024),
- Mohamed, A., & Worku, H. (2020). Simulating urban land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding. *Urban Climate*, 31(August 2019), 100545. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100545>
- Mu, B., Mayer, A. L., He, R., & Tian, G. (2016). Land use dynamics and policy implications in Central China: A case study of Zhengzhou. *Cities*, 58, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.05.012>
- Mustafa, A., Heppenstall, A., Omrani, H., Saadi, I., Cools, M., & Teller, J. (2018). Modelling built-up expansion and densification with multinomial logistic regression, cellular automata and genetic algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67(October 2017), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.009>
- Padilla, M., Stehman, S. V., & Chuvieco, E. (2014). Validation of the 2008 MODIS-MCD45 global burned area product using stratified random sampling. *Remote Sensing of Environment*, 144, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.008>
- Peralta-Rivero, C., Torrico-Albino, J. C., Vos, V. A., Galindo-Mendoza, M. G., & Contreras-Servín, C. (2015). Tasas de cambios de coberturas de suelo y deforestación (1986-2011) en el municipio de Riberalta, Amazonía boliviana. *Ecología En Bolivia*, 50(2), 91–114.
- Phiri, D., & Morgenroth, J. (2017). Developments in Landsat land cover classification methods: A review. *Remote Sensing*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/rs9090967>
- Poelmans, L., & Van, A. (2009). Detecting and modelling spatial patterns of urban sprawl in highly fragmented areas: A case study in the Flanders-Brussels region. *Landscape*

and Urban Planning, 93(1), 10–19.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.018>

Rakib, A. Al, Akter, K., Rahman, M., ... S. A.-1st I. S. R., & 2020, U. (2020). Analyzing the pattern of land use land cover change and its impact on land surface temperature: a remote sensing approach in mymensingh, Bangladesh. *Academia.Edu*, December. https://www.academia.edu/download/65116756/NS_09.pdf

Rienow, A., & Goetzke, R. (2015). Supporting SLEUTH - Enhancing a cellular automaton with support vector machines for urban growth modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.05.001>

Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Haack, B. N., Rijal, S., & Zhang, P. (2018a). Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and markov chain. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/ijgi7040154>

Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Sun, X., & Rijal, S. (2018b). Quantifying the spatiotemporal pattern of urban expansion and hazard and risk area identification in the Kaski District of Nepal. *Land*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/land7010037>

Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Wang, N., & Lin, Y. (2017). Monitoring and modeling of spatiotemporal urban expansion and land-use/land-cover change using integrated Markov chain cellular automata model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi6090288>

Rojas, N. B., Barboza, E., Maicelo, J. L., Oliva, S. M., & Salas, R. (2019). Deforestación en la Amazonía peruana: índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. <https://doi.org/https://doi.org/10.21138/bage.2538a>

Salas, R., Barboza, E., & Oliva, S. M. (2014). Dinámica multitemporal de índices de deforestación en el distrito de Florida, departamento de Amazonas, Perú. *Revista INDES*, 2(1), 18–27. <https://doi.org/10.25127/indes.201401.00>

Schuster-Olbrich, J. P., Vich, G., & Miralles-Guasch, C. (2024). Expansión urbana más allá del límite urbano: un análisis de Santiago de Chile desde la planificación urbana y sus contradicciones normativas territoriales. *Eure*, 50(150), 1–22.

<https://doi.org/10.7764/eure.50.150.08>

- Tripathy, P., & Kumar, A. (2019). Monitoring and modelling spatio-temporal urban growth of Delhi using Cellular Automata and geoinformatics. *Cities*, 90(November 2018), 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.021>
- Tsai, Y. H., Stow, D., Chen, H. L., Lewison, R., An, L., & Shi, L. (2018). Mapping vegetation and land use types in Fanjingshan National Nature Reserve using google earth engine. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060927>
- Ullah, S., Ahmad, K., Sajjad, R. U., Abbasi, A. M., Nazeer, A., & Tahir, A. A. (2019). Analysis and simulation of land cover changes and their impacts on land surface temperature in a lower Himalayan region. *Journal of Environmental Management*, 245(February), 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.063>
- Vinayak, B., Lee, H. S., & Gedem, S. (2021). Prediction of land use and land cover changes in Mumbai city, India, using remote sensing data and a multilayer perceptron neural network-based Markov Chain model. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13020471>
- VIVIENDA. (2016). *D.S. N° 016-2016-VIVIENDA: Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Acondicionamiento Territorial y Desarrollo Urbano Sostenible.*
- Wu, K. Y., & Zhang, H. (2012). Land use dynamics, built-up land expansion patterns, and driving forces analysis of the fast-growing Hangzhou metropolitan area, eastern China (1978-2008). *Applied Geography*, 34, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.11.006>
- Zoomers, A., van Noorloos, F., Otsuki, K., Steel, G., & van Westen, G. (2017). The Rush for Land in an Urbanizing World: From Land Grabbing Toward Developing Safe, Resilient, and Sustainable Cities and Landscapes. *World Development*, 92, 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.11.016>

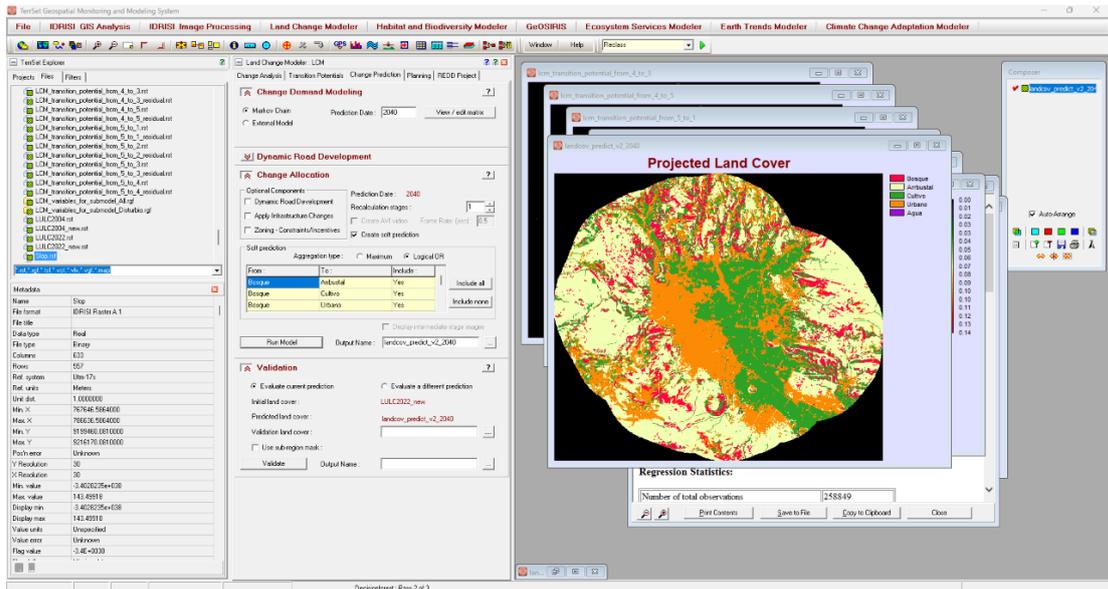
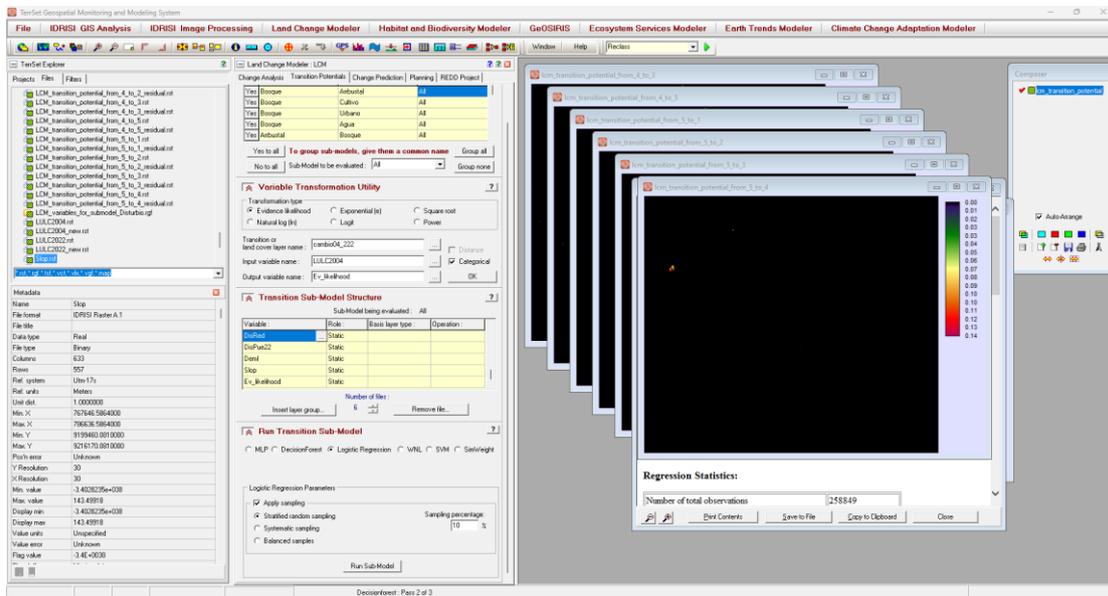
ANEXOS

Anexo 1. Superficie de cobertura y uso de suelo de la ciudad de Cajamarca.

Tabla 2. Superficie de cobertura y uso de suelo para 1986, 2004, 2022 y 2040 de la ciudad de Cajamarca.

CUS	1986	%	2004	%	2022	%	2040	%
Bosque	531.01	2.22	1,309.40	5.48	2,549.58	10.66	3,403.62	14.24
Arbustal y herbazal	19,523.35	81.66	17,653.10	73.83	12,970.98	54.25	9,975.40	41.72
Pasto y cultivo	3,035.02	12.69	3,379.10	14.13	4,521.41	18.91	4,724.82	19.76
Urbano	798.68	3.34	1,550.46	6.48	3,849.21	16.10	5,768.19	24.13
Agua	21.23	0.09	17.23	0.07	18.11	0.08	37.26	0.16
Total	23,909.29	100.00	23,909.29	100.00	23,909.29	100.00	23,909.29	100.00

Anexo 2. Predicción del crecimiento urbano al 2040 de la ciudad de Cajamarca.



Anexo 3. Matriz de tabulación cruzad para los tres períodos de análisis de la ciudad de Cajamarca.

Tabla 2. Matriz de tabulación cruzada, tasa de cambio **s** e índices de cambios período 1986-2004.

1986	2004					Total 2004	Tasa de cambio	Pérdida (L _i)	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	B	AH	PC	U	A						
B	267.47	36.10	219.586657	8.260008		531.42	5.14	49.67	245.68	146.34	99.34
AH	564.56	17248.92	899.91	805.99	3.91	19523.29	-0.56	11.65	13.72	9.58	4.14
PC	463.26	226.32	2180.51	164.56	0.44	3035.09	0.60	28.16	67.65	11.33	56.31
U	8.79	140.75	79.00	570.13		798.68	3.75	28.62	151.36	94.13	57.23
A	5.01	1.33	0.09	1.51	12.88	20.82	-1.05	38.14	59.04	17.23	41.81
Total 1986	1309.09	17653.41	3379.10	1550.46	17.23	23909.29					
Ganancia (G _j)	196.01	2.07	39.49	122.74	20.91						

Tabla 3. Matriz de tabulación cruzada, tasa de cambio **s** e índices de cambios período 2004-2022.

2004	2022					Total 2022	Tasa de cambio	Pérdida (L _i)	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	B	AH	PC	U	A						
B	507.22	92.73	621.51	85.53	2.31	1309.31	3.77	61.26	217.24	94.72	122.52
AH	2025.13	12773.98	1096.89	1750.10	7.02	17653.11	-1.70	27.64	28.75	26.52	2.23
PC	8.13	69.24	2728.67	571.26	1.78	3379.08	1.63	19.25	72.30	33.81	38.50
U	7.02	28.69	69.28	1439.37	6.11	1550.46	5.18	7.17	162.59	148.26	14.33
A	2.04	6.35	5.06	2.98	0.89	17.32	0.25	94.87	194.29	4.54	189.75
Total 2004	2549.54	12970.99	4521.41	3849.24	18.11	23909.29					
Ganancia (G _j)	155.98	1.12	53.05	155.43	99.41						

Tabla 4. Matriz de tabulación cruzada, tasa de cambio **s** e índices de cambios período 2022-2040.

2022	2040					Total 2040	Tasa de cambio	Pérdida (L _i)	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	B	AH	PC	U	A						
B	1722.93	307.47	207.63	222.10	4.05	2464.17	1.81	30.08	98.27	38.11	60.16
AH	1592.58	9374.33	804.28	1356.52	7.33	13135.05	-1.53	28.63	33.06	24.20	8.86
PC	52.68	119.05	3455.44	807.42	4.15	4438.74	0.35	22.15	50.78	6.48	44.31
U	34.93	151.94	255.52	3378.27	13.96	3834.61	2.29	11.90	74.19	50.39	23.80
A	0.19	3.73	3.35	2.45	27.01	36.73	2.42	26.47	106.74	53.80	52.94
Total 2022	3403.29	9956.52	4726.22	5766.76	56.49	23909.29					
Ganancia (G_j)	68.19	4.43	28.63	62.29	80.27						

Anexo 4. Georreferenciación en campo de las clases de cobertura y uso de suelo ámbito de la ciudad de Cajamarca.



Figura 14. Georreferenciación de la clase urbano.



Figura 15. Georreferenciación de la clase cultivo.



Figura 16. Georreferenciación de la clase pasto.