

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

AGRARIAS

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

TESIS:

IMPACTO DE LA EXPANSIÓN URBANA EN LOS ECOSISTEMAS

DE LA CIUDAD DE JAÉN, PERIODO 2000 - 2022

Para optar el Grado Académico de

DOCTOR EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Presentada por:

M.Cs. MARÍA MARLENI TORRES CRUZ

Asesor:

Dr. SEGUNDO PRIMITIVO VACA MARQUINA

Cajamarca, Perú

2025



**Universidad
Nacional de
Cajamarca**
"Norte de la Universidad Peruana"



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
MARIA MARLENI TORRES CRUZ
DNI: 70828485
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Doctorado en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental y Recursos Naturales.
2. Asesor(a): Dr. Segundo Primitivo Vaca Marquina
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☐ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☒ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
"IMPACTO DE LA EXPANSIÓN URBANA EN LOS ECOSISTEMAS DE LA CIUDAD DE JAÉN, PERIODO 2000 - 2022"
6. Fecha de evaluación: **10/11/2025**
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **9%**
9. Código Documento: **1:3405613739**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ **APROBADO** ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **10/11/2025**

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*



Dr. Segundo Primitivo Vaca Marquina
DNI: 27745479

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2025 BY
MARÍA MARLENI TORRES CRUZ
Todos los derechos reservados



Universidad Nacional de Cajamarca
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD
Escuela de Posgrado
CAJAMARCA - PERU



PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

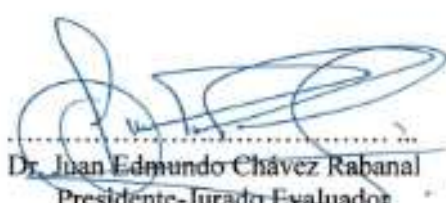
MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

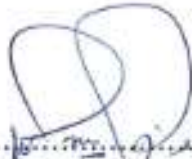
Siendo las 11.20 horas, del día 22 de setiembre del año dos mil veinticinco, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. JUAN EDMUNDO CHÁVEZ RABANAL**, **Dr. WILFREDO POMA ROJAS**, **Dr. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA**, y en calidad de Asesor, el **Dr. SEGUNDO PRIMITIVO VACA MARQUINA**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno de la Escuela de Posgrado y el Reglamento del Programa de Doctorado de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la SUSTENTACIÓN de la tesis titulada: **"IMPACTO DE LA EXPANSIÓN URBANA EN LOS ECOSISTEMAS DE LA CIUDAD DE JAÉN, PERIODO 2000 – 2022"**, presentada por la Máster Universitario en Minería Sostenible, **MARÍA MARLENI TORRES CRUZ**.

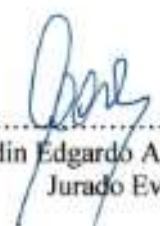
Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó aprobar con la calificación de DIECIOCHO (18) la mencionada Tesis; en tal virtud, la Máster Universitario en Minería Sostenible **MARÍA MARLENI TORRES CRUZ**, está apta para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **DOCTOR EN CIENCIAS**, Mención **GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES** de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las 12.30 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
Dr. Segundo Primitivo Vaca Marquina
Asesor


.....
Dr. Juan Edmundo Chávez Rabanal
Presidente-Jurado Evaluador


.....
Dr. Wilfredo Poma Rojas
Jurado Evaluador


.....
Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

Primero, mi gratitud se extiende a Dios, por otorgarme vida, fortaleza y la luz necesaria para completar este largo camino de formación académica y personal.

A mi familia, por ser mi pilar incondicional. ¡Gracias también por su amor y el sacrificio que implica, especialmente cuando más lo necesito! Mamá y papá (Felipe y Ediza) han ayudado a guiar mi vida por un camino donde todo es valioso, pero no necesariamente fácil. Relatar los esfuerzos realizados por Alma (mi hija) en solo esta área tomará varios capítulos también. A mi hermana Kiara Antonella, por su afecto sincero y su presencia silenciosa, pero siempre alentadora. Gracias por caminar a mi lado.

A mi esposo Billy Alexis, por su infinita paciencia, su apoyo incondicional y por creer firmemente en mí. Gracias por acompañarme en los momentos más exigentes de este proceso; tu presencia es necesaria y el ánimo ha sido crucial en cada paso de este camino. Todo esto es para ustedes también, para dar gracias y por ustedes.

A mis profesores, mentores y colegas, por compartir lo que saben y ayudarme a desarrollar exitosamente cada etapa de este proceso académico.

A mi tierra, Jaén, por darme la razón para investigar problemas como conservar su riqueza natural y darme cuenta de que necesitamos construir un futuro mucho más sostenible para las próximas generaciones.

Esta tesis significa no solo el fin de un capítulo, sino también el inicio de uno nuevo. Un nuevo compromiso con la ciencia, el ambiente y la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, doy gracias a Dios, quien me dio sabiduría, me guió, me proporcionó la fuerza espiritual y emocional necesaria para emprender este desafío académico de manera consciente y segura desde el inicio.

A mis padres, por ser mi modelo de esfuerzo, responsabilidad y valores. Les agradezco por su amor sin reservas y guía siempre a disposición durante todo este proceso.

Alma, eres la persona más cercana a mí en el mundo; mi objeto más profundo y lejano de inspiración en esta ocasión. Eres mi mayor inspiración y el motivo más profundo de este logro.

A mi esposo, por su paciencia, comprensión y apoyo en los momentos más exigentes de este proceso. Gracias por creer en mí cuando más lo necesitaba.

A mi hermana y otros miembros de la familia, por estar conmigo, decir palabras de aliento y participar (en un grado que fue doloroso) durante estos años de esfuerzo.

Por sus valiosas sugerencias, rigor académico y compromiso con la calidad en la investigación, estoy especialmente agradecido al Dr. Segundo Vaca Marquina.

Todos mis profesores y compañeros del programa de doctorado. Por darme la oportunidad de estudiar y aprender los métodos de investigación, comprometiéndose al desarrollo ambiental y académico local.

Por último, pero no menos importante, a todos los que me han echado una mano con este proyecto de una forma u otra: ¡mi más sincero agradecimiento!

ÍNDICE

MARCO TEÓRICO.....	1
2.1. Antecedentes de la investigación	1
2.2. Bases Teóricas.....	10
2.2.1. <i>Expansión Urbana.</i>	10
2.2.2. <i>Ecosistemas</i>	12
2.2.3 <i>Impactos.</i>	14
2.3. Definición de términos básicos	20
2.3.1 <i>Ecosistema.</i>	20
2.3.2 <i>Diversidad biológica.</i>	20
2.3.3 <i>Impacto ambiental.</i>	20
2.3.4 <i>Cobertura y uso del suelo (CUS).</i>	21
2.3.5 <i>Expansión urbana.</i>	21
2.3.6 <i>Zona urbana.</i>	21
2.3.7 <i>Zona periurbana.</i>	21
2.3.8 <i>Servicios ecosistémicos.</i>	22
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1. Área de estudio.....	23
3.1.1. <i>Ubicación geográfica.</i>	23
3.1.2. <i>Aspecto demográfico y social de Jaén.</i>	24
3.1.3. <i>Aspecto económico.</i>	25
3.1.3. <i>Aspecto Físico-espacial.</i>	26
3.1.4. <i>Aspecto geográfico y climático</i>	27
3.2. Materiales.....	31
3.3 Metodología	32
3.4. Diseño estadístico	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 Nuevas habilitaciones urbanas y su extensión durante los años 2000 al 2022 en la ciudad de jaén.	42

4.1.1 Nuevas habilitaciones urbanas	42
4.1.2 Extensión de áreas urbanas en Jaén	46
4.2. Tasa de crecimiento de las nuevas habilitaciones urbanas de la ciudad de Jaén	50
4.2.1 Tasa de crecimiento en el periodo 2000-2005: $164,160 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$	53
4.2.2 Tasa de crecimiento para el periodo 2005-2011: $423,767 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$	53
4.2.3 Tasa de crecimiento para el periodo 2011-2017: $453,167 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$	54
4.2.4 Tasa de crecimiento para el periodo 2017-2022: $550,900 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$	55
4.3. Descripción de ecosistemas periurbanos en tipos de coberturas de uso de suelo que han sido afectados por la expansión urbana en la ciudad de Jaén.	58
4.3.1. Tejido Urbano Continuo	62
4.3.2 Cultivos Transitorios	64
4.3.3. Herbazal	67
4.3.4. Arbustal	70
4.3.5 Arbustal / área intervenida	73
4.3.6. Herbazal / Área intervenida	76
4.3.7. Solares.....	79
4.3.8. Exactitud temática.	82
4.4 Afectación a los ecosistemas periurbanos expresado en cobertura vegetal durante los años 2000 al 2022 en la ciudad de jaén	85
4.4.1 Análisis del cambio de la cobertura de la tierra.	85
4.4.2 Análisis de la transición de la cobertura y uso de la tierra.....	100
CONCLUSIONES	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXOS.....	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: <i>Flujograma metodológico</i>	17
Figura 2: <i>Ubicación geográfica del área de estudio</i>	24
Figura 3: <i>Tejido urbano durante el periodo del año 2000 - 2022</i>	47
Figura 4: <i>Evolución de la tasa de crecimiento anual del tejido urbano en Jaén (2000–2022)</i>	52
Figura 5: <i>Cobertura vegetal y uso del suelo del año 2000 al 2022</i>	59
Figura 6: <i>Infraestructura habitacional y educativa en el área urbana</i>	63
Figura 7: <i>Áreas de cultivos permanente y transitorios</i>	65
Figura 8: <i>Área se pastizales en la zona de estudio</i>	68
Figura 9: <i>Diversidad de especies arbustivas en la zona de estudio</i>	71
Figura 10: <i>Áreas intervenidas con fines de expansión urbana</i>	74
Figura 11: <i>Área de pastizales naturales en proceso de intervención humana</i>	77
Figura 12: <i>Áreas lotizadas (solares) destinadas a futuros desarrollos urbanos</i>	80
Figura 13: <i>Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000-2005</i>	86
Figura 14: <i>Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000-2011</i>	90
Figura 15: <i>Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000 - 2017</i>	93
Figura 16: <i>Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000 – 2022</i>	96
Figura 17: <i>Porcentaje de área de cambio y no cambio de cobertura de uso de suelo entre el 2000 – 2022</i>	97
Figura 18: <i>Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 -2005</i>	101
Figura 19: <i>Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 -2011</i>	104
Figura 20: <i>Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 – 2017</i>	107
Figura 21: <i>Áreas que sufrieron transición de cobertura de uso durante el periodo 2000 – 2022</i>	110
Figura 22: <i>Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 – 2022</i>	111

LISTA DE TABLAS	Pág.
Tabla 1: <i>Series de las imágenes de satélite empleadas</i>	34
Tabla 2: <i>Nuevas habilitaciones urbanas entre el año 2000 al 2025</i>	42
Tabla 3: <i>Tasa de crecimiento entre los años 2000 al 2022</i>	51
Tabla 4: <i>Puntos de verificación en campo</i>	83
Tabla 5: <i>Índice Kappa de imágenes de cada año</i>	84
Tabla 6: <i>Nivel de impacto ambiental según porcentaje de cambio</i>	97

LISTA DE SIGLAS

AEU	Área de Expansión Urbana
BD	Base de Datos
CE	Cobertura Ecológica
CVC	Cobertura Vegetal y Cambio
DTM	Modelo Digital del Terreno (<i>Digital Terrain Model</i>)
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GIS	Sistemas de Información Geográfica (<i>Geographic Information System</i>)
GORE	Gobierno Regional
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
LULC	Uso y Cobertura del Suelo (<i>Land Use and Land Cover</i>)
MDE	Modelo Digital de Elevación
MINAM	Ministerio del Ambiente
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OT	Ordenamiento Territorial
SIG	Sistema de Información Geográfica
SNIP	Sistema Nacional de Inversión Pública
SPOT	Satélite Probatorio de Observación de la Tierra (<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>)
SRTM	Misión Topográfica del Radar Shuttle (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>)
UTM	Coordenadas Universales Transversales de Mercator
ZEE	Zonificación Ecológica y Económica

RESUMEN

La presente investigación analizó el impacto de la expansión urbana sobre los ecosistemas de la ciudad de Jaén (Cajamarca, Perú) entre los años 2000 al 2022. Se aplicó una metodología basada en el análisis multitemporal de imágenes satelitales (Landsat), SIG y el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), complementados con cartografía catastral, registros municipales y revisión documental. Los resultados muestran que el área urbana se incrementó en más de 880 ha, con tasas máximas de expansión de 550 900 m² por año ($\approx$ 55,09 ha por año), lo que evidencia un proceso acelerado y poco planificado. Los ecosistemas periurbanos más afectados fueron el arbustal (de 3 116,64 ha en 2000 a 1 495,07 ha en 2022), el herbazal (de 118,43 ha en 2011 a 17,41 ha en 2022) y los cultivos transitorios (de 1 317,45 ha en 2011 a 993,16 ha en 2022). En conjunto, se registró un cambio de la cobertura vegetal equivalente al 43,49 % del área analizada, clasificada como impacto alto.

Palabras clave: *Expansión urbana, Uso del suelo, Ecosistemas periurbanos, Cobertura vegetal, Teledetección, Fragmentación ecológica, Desarrollo urbano sostenible*

ABSTRACT

The present research aimed to analyze the impact of urban expansion on the ecosystems of the city of Jaén (Cajamarca, Peru) between 2000 and 2022. The methodology combined multitemporal analysis of Landsat satellite imagery, GIS processing, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), complemented by cadastral cartography, municipal records, and documentary review. Results indicate that the urban area increased by more than 880 ha, with maximum expansion rates of 550,900 m² per year ($\approx$ 55.09 ha per year), evidencing a rapid and weakly planned urbanization process. The most affected peri-urban ecosystems were shrubland (from 3,116.64 ha in 2000 to 1,495.07 ha in 2022), grassland (from 118.43 ha in 2011 to 17.41 ha in 2022), and annual crops (from 1,317.45 ha in 2011 to 993.16 ha in 2022). Overall, vegetation cover changed by 43.49% of the analyzed area, a level classified as high impact.

Keywords: *Urban expansion, Land use, Peri-urban ecosystems, Vegetation cover, Remote sensing, Ecological fragmentation, Sustainable urban development.*

INTRODUCCIÓN

La expansión urbana se ha posicionado como un fenómeno central a escala global, con efectos notorios sobre el paisaje y los patrones de ocupación del territorio en las ciudades. Impulsada por el crecimiento demográfico, el dinamismo económico y la demanda de infraestructura, esta dinámica reconfigura los usos del suelo y altera la organización y el funcionamiento de los espacios urbanos y periurbanos.

El crecimiento demográfico y la urbanización, fenómenos de alcance global, han reconfigurado de manera sustantiva el uso de la tierra, los servicios ecosistémicos y la calidad ambiental de las ciudades. A medida que aumentan las poblaciones y se expande la mancha urbana, se demanda más espacio para vivienda, infraestructura, comercio y servicios; en consecuencia, se acelera la conversión de suelos agrícolas, forestales y áreas naturales hacia usos urbanos. Este proceso suele traducirse en la fragmentación de hábitats y la degradación de ecosistemas de alto valor, con efectos adversos sobre la biodiversidad y la capacidad de resiliencia del ambiente (Civeira & Rositano, 2020).

Según Chamas (2020) “más del 80% de la población de América Latina y el Caribe vive en ciudades”. Así mismo en el Perú la población urbana censada se incrementó en 32,2%, entre 2007 y 2017. (INEI)

La urbanización y los cambios en el uso del suelo tienen un impacto significativo en la biodiversidad. A medida que las áreas urbanas se expanden y se desarrollan, las consecuencias para los ecosistemas naturales y la vida silvestre son considerables. Estas transformaciones impactan directamente sobre las comunidades bióticas, las cuales se reflejan en la matriz urbana, con un paisaje fragmentado y con una constante presión ambiental y humana.(Hernández et al., 2018)

Conforme a lo planteado por Berlanga et al. (2010), los cambios de cobertura y uso del suelo (CCUS) se explican, en proporción predominante, por los procesos de interacción entre las prácticas antrópicas y el sistema natural. Las evaluaciones tempranas y rigurosas de los patrones de cambio facilitan la comprensión del impacto que las actividades económicas y de desarrollo ejercen sobre el territorio y sus recursos naturales. Por lo tanto, es necesario entender los factores asociados a los procesos de cambios de cobertura y uso del suelo.

En las dos últimas décadas, la ciudad de Jaén (Cajamarca, Perú) ha experimentado una expansión urbana sostenida que ha reconfigurado sus coberturas y usos del suelo (CUS). Analizar estos cambios es clave para conocer las implicaciones ambientales y los efectos socioeconómicos asociados al crecimiento urbano. En el periodo 2000–2022, la ampliación de del área urbana y la ocupación de suelos previamente agrícolas o naturales han modificado la estructura territorial de la ciudad, por lo que una evaluación específica de estos impactos resulta esencial para comprender la trayectoria del desarrollo urbano en la región.

Entre 2000 y 2022, Jaén registró transformaciones sustantivas en su configuración territorial. La expansión del área urbana derivó en la conversión de suelos naturales y agropecuarios hacia usos residenciales, comerciales e industriales, generando presiones sobre la integridad biótica, la calidad del aire, el balance hidrológico y la fisonomía del paisaje. Estos desplazamientos de uso del suelo tienden a reducir servicios ecosistémicos esenciales —regulación climática, provisión de alimentos, regulación hídrica y soporte de hábitat—, con implicancias directas para la resiliencia socioecológica. Por lo tanto, resulta prioritario caracterizar con detalle la dinámica de coberturas y usos del suelo en Jaén durante dicho periodo, a fin de a futuro sustentar decisiones de prevención de impactos y gestión urbana sostenible.

El objetivo general de esta investigación es analizar el impacto de la expansión urbana en las coberturas de uso del suelo durante los años 2000 al 2022 en la ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca, Perú. Para alcanzar este objetivo, se han planteado los siguientes objetivos específicos: (1) determinar el número de nuevas habilitaciones urbanas y su extensión durante el periodo de estudio; (2) estimar la tasa de crecimiento de las nuevas habilitaciones urbanas; (3) describir los ecosistemas periurbanos en tipos de coberturas de uso de suelo que han sido afectados por la expansión urbana; y (4) determinar la afectación a los ecosistemas periurbanos expresado en cobertura vegetal durante los años 2000 al 2022 en la ciudad de Jaén.

La metodología aplicada integra datos municipales y teledetección para medir con precisión la expansión urbana y sus impactos, articulando el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con verificación en campo y el análisis de series históricas y registros recientes. Mediante el mapeo temático y la clasificación de coberturas y usos del suelo, se identificaron y cuantificaron las transformaciones espaciotemporales, ofreciendo una lectura nítida de la evolución del paisaje urbano de Jaén desde la perspectiva de la ingeniería ambiental.

Los resultados ofrecen una lectura integral de los efectos de la expansión urbana sobre las coberturas y usos del suelo, permitiendo determinar las clases o cobertura de uso más afectadas. En el periodo 2000–2022, la superficie urbana de Jaén aumentó en más de 880 ha, con una tasa máxima anual de 550 900 m² ($\approx$ 55,09 hectáreas por año), indicador de un proceso de urbanización acelerado y con déficits de planificación. En paralelo, los ecosistemas periurbanos registraron pérdidas significativas: los arbustales disminuyeron de 3 116,64 ha a 1 495,07 ha (–1 621,57 ha; –52,03 %), los herbazales de 118,43 ha a 17,41 ha (–101,02 ha; –85,30 %) y los cultivos transitorios de 1 317,45 ha a 993,16 ha (–324,29 ha; –24,61 %), configurando un cambio de uso del 43,49 % de la cobertura vegetal en el área

de estudio. Comprender estas tendencias es crucial para orientar un crecimiento urbano sostenible que preserve la funcionalidad ecológica y el bienestar de la población.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

En Argungu (Nigeria), Gulma y Lawal (2024), en su investigación titulada “Evaluación de la detección de cambios en el uso y cobertura del suelo en el área urbana: un enfoque de teledetección y SIG”, analizaron la dinámica de cambio de uso y cobertura del suelo entre 2013 y 2023 mediante teledetección y SIG. Utilizando imágenes Landsat 8 y técnicas de clasificación supervisada mediante ArcGIS 10.7 y programación en R, los investigadores documentaron cambios significativos en el paisaje urbano. Los resultados revelaron un incremento del 9.5% en áreas construidas, acompañado de una disminución notable del 32.9% en la cobertura vegetal y un aumento del 23.3% en suelos desnudos. La precisión del estudio fue validada mediante verificación en terreno, alcanzando una exactitud del 92.5% para 2013 y 95.2% para 2023. Los hallazgos destacan los efectos de la rápida urbanización sobre los ecosistemas naturales y enfatizan la necesidad de una mejor planificación urbana y monitoreo continuo del uso del suelo.

Asimismo, Kennedy (2024) desarrolló un estudio titulado “Cambios en la cobertura terrestre y expansión urbana en Filipinas: un análisis del crecimiento metropolitano, los factores climáticos y los impactos ambientales en el período 2017-2023”, el cual se enfocó en los cambios de cobertura del suelo y la expansión urbana en dicho país. La investigación implementó un análisis multitemporal integrando variables climáticas y técnicas de análisis espacial. Los resultados evidenciaron una transformación significativa de áreas agrícolas en zonas urbanas, acompañada de incrementos en la temperatura y alteraciones en los patrones de precipitación. El estudio enfatiza los impactos sobre la seguridad alimentaria y la pérdida de biodiversidad, subrayando la urgente necesidad de implementar estrategias de gestión sostenible, preservación de tierras agrícolas y desarrollo de infraestructura verde, junto con

una mejor gestión de recursos hídricos.

En una investigación sobre los impactos de la política de suplementación de tierras agrícolas (CSP, por sus siglas en inglés) en los servicios ecosistémicos bajo el contexto de la expansión urbana en la provincia de Hubei, China (Zhang et al., 2024), analiza cómo las políticas de protección de tierras agrícolas han alterado los ecosistemas naturales y sus servicios asociados. Mediante un modelo de simulación espacial, el estudio contrastó escenarios de protección estricta versus tierras agrícolas para 2000–2015 y estimó que la implementación de la política CSP implicó la conversión neta de 1 847,50 km² de hábitats naturales hacia usos agropecuarios, con una pérdida de valor de servicios ecosistémicos del orden de 19,53 mil millones. Bajo las trayectorias simuladas, hacia 2030 la misma política podría ocasionar una conversión adicional de 2 104,58 km², profundizando los procesos de degradación ambiental. Si bien la modelación aporta una base comparativa sólida, sus resultados dependen de supuestos sobre tasas de expansión, restricciones de uso y cumplimiento normativo; por ello, las cifras deben leerse como rangos plausibles. En conjunto, los hallazgos subrayan la necesidad de conciliar productividad agrícola y conservación mediante instrumentos de ordenamiento territorial y salvaguardas ecosistémicas. Para Jaén, la lección es directa: la interacción entre políticas sectoriales y crecimiento urbano condiciona el suministro de servicios ecosistémicos, por lo que se requieren planes de expansión con criterios de sostenibilidad y protección de coberturas sensibles.

En las zonas costeras de Sicilia, Scala et al. (2024) examinaron la evolución espaciotemporal de la cobertura del suelo entre 1988 y 2022, con especial atención a la expansión urbana sobre áreas vegetadas y ecosistemas litorales. El equipo combinó SIG con

segmentación semántica basada en redes neuronales para mapear transiciones de clase y delimitar focos de transformación. Los resultados muestran que el crecimiento urbano se asocia de manera consistente con indicadores socioeconómicos y demográficos, y que ello conlleva fragmentación de hábitats, pérdida de continuidad ecológica y presiones sobre la biodiversidad. Aunque el enfoque presenta fortalezas en detección de patrones finos, su transferibilidad puede verse condicionada por la resolución y la calidad multitemporal de las imágenes en otros contextos. Con todo, el marco metodológico ofrece una ruta replicable para evaluar la urbanización en Jaén, permitiendo explorar su interacción con la biodiversidad y los cambios de uso del suelo en entornos periurbanos y agropecuario.

En Makhado Biaba (Sudáfrica), Ingwani et al. (2024) evaluaron cómo la expansión periurbana impacta simultáneamente los servicios municipales y los servicios ecosistémicos. Mediante análisis multitemporal del uso del suelo (1990–2020) y cartografía temática en SIG, evidenciaron que el crecimiento residencial no planificado abre brechas en agua potable, electricidad y recolección de residuos, mientras compromete bosques y humedales, con la consiguiente pérdida de funciones ecológicas (regulación hídrica, hábitat y calidad ambiental). El estudio plantea integrar criterios de sostenibilidad y soluciones basadas en la naturaleza en la planificación, apoyadas en instrumentos de ordenamiento y control del crecimiento. Si bien los resultados están condicionados por el contexto institucional y la calidad de la cartografía, el enfoque aporta un marco útil para Jaén: permite vincular la expansión periurbana con la degradación de coberturas sensibles y la desigualdad en el acceso a servicios, insumo clave para una gestión urbana preventiva.

En Darfur Central - Sudán, el grupo de investigación de Zalingei (2023) examinó las transformaciones de uso y cobertura del suelo entre 1991 y 2021 mediante imágenes satelitales multitemporales, análisis SIG, clasificación supervisada e índices de vegetación, con validación en campo. El trabajo documenta una expansión marcada de la huella urbana y la contracción de coberturas naturales, junto con alteraciones en los patrones de ocupación y en la dinámica de los recursos hídricos. Aunque el enfoque permite reconstruir trayectorias espacio-temporales con solvencia, la resolución espacial/temporal de las imágenes y las condiciones atmosféricas pueden limitar la discriminación de clases finas y la detección de cuerpos de agua estacionales. En términos de gestión, los autores enfatizan la urgencia de una planificación urbana sostenible, que combine conservación de recursos y políticas de ordenamiento efectivas. Este marco metodológico resulta transferible a Jaén, donde la integración de teledetección, SIG y verificación local puede fortalecer el monitoreo de la expansión urbana y la protección de coberturas sensibles.

En las áreas protegidas de la provincia de Teherán, Sobhani (2024) examinó cómo la urbanización incide sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en territorios ecológicamente sensibles. Con base en indicadores de urbanización espacial, económica y demográfica, el estudio evidenció fragmentación de hábitats, reducción de riqueza biológica y aumento de presiones antrópicas asociadas a actividades industriales, turísticas y de construcción, con efectos negativos sobre la conectividad ecológica y la provisión de servicios. Si bien el enfoque por indicadores agregados ofrece una lectura clara de la tendencia, puede subestimar variaciones locales finas y procesos estacionales; por ello, el autor subraya la necesidad de planificación urbana sostenible y salvaguardas específicas para bordes urbano-periurbanos. Estos hallazgos son relevantes para el análisis del impacto de la expansión urbana en los ecosistemas de Jaén, ya que destacan patrones de urbanización

que amenazan la integridad de las áreas naturales y enfatizan la importancia de una gestión.

En Karaj (Irán), Mohammadyari et al. (2023) desarrollaron un marco basado en escenarios para estimar cómo la expansión urbana afecta los servicios ecosistémicos en un paisaje mixto natural-urbano. Operacionalizaron el análisis con InVEST y un módulo de escorrentía (ROS), cuantificando producción de agua, recreación al aire libre y producción de alimentos bajo dos trayectorias: “business as usual- negocios como siempre” (BAU) y “basado en la protección” (PB). En el escenario BAU, la urbanización rápida y no planificada reduce de forma apreciable la provisión de alimentos y las oportunidades recreativas, mientras el rendimiento hídrico se incrementa por la pérdida de cobertura vegetal. En contraste, PB conserva mejor los recursos y mitiga los impactos negativos. Si bien los resultados dependen de supuestos sobre coberturas y parámetros hidrológicos, el enfoque por escenarios aporta una base útil para ponderar compromisos entre crecimiento urbano y mantenimiento de servicios ecosistémicos en contextos comparables a Jaén.

La evidencia reciente confirma que la expansión urbana compromete la provisión de servicios ecosistémicos. En China, Chen et al. (2023) analizaron varias aglomeraciones urbanas (1992–2015) y constataron que la conversión de coberturas naturales a superficies impermeables reduce de manera apreciable el valor y la diversidad funcional de los servicios; los bosques resultaron la clase más sensible al cambio de uso del suelo. De forma convergente, en aglomeraciones del sur de Asia, Wang et al. (2020) vinculan el incremento de infraestructura urbana con pérdida de biodiversidad y deterioro de funciones de regulación hídrica y secuestro de carbono. En conjunto, estos trabajos muestran que no solo el crecimiento demográfico, sino el patrón espacial de expansión y el grado de sellado del suelo, explican gran parte del descenso observado. Esta lectura es útil para Jaén, donde

conviene monitorear cambios de cobertura, impermeabilización e indicadores de conectividad ecológica para anticipar impactos sobre servicios críticos.

En China, Sheng et al. (2022) evaluaron, mediante el modelo de simulación LANDSCAPE, cómo la expansión urbana y los esquemas de compensación de tierras agrícolas podrían transformar el territorio entre 2020 y 2040. Sus escenarios muestran que, al desplazarse la agricultura por el avance urbano, la compensación se materializa como nueva frontera agropecuaria sobre bosques, pastizales y humedales, con la consiguiente pérdida de hábitat y de funciones ecológicas. La pérdida del valor de los servicios ecosistémicos se estimó entre 46,53 y 54,16 mil millones de CNY, según el escenario modelado. Los autores subrayan la necesidad de políticas que equilibren seguridad alimentaria y conservación, atendiendo a los efectos indirectos de la urbanización (cambios de uso inducidos). Este enfoque es útil para Jaén, donde la expansión de la huella urbana puede generar cambios de uso sobre coberturas sensibles.

En china Yang et al. (2021) en su investigación “Efectos de la urbanización en los servicios ecosistémicos en Shandong Aglomeración urbana peninsular, en China: el caso de Ciudad de Weifang”. El cual tuvo como objetivos (1) analizar cuantitativamente la distribución de servicios ecosistémicos; (2) evaluar las características de distribución del ecosistema indicadores de servicios y urbanización; y (3) evaluar las relaciones entre el ecosistema indicadores de servicios y urbanización. El centro de datos de recursos y Ciencias Ambientales en la Academia de Ciencias de China y el Instituto de Ciencias Geográficas y Natural Resources Research proporcionaron datos de teledetección sobre el uso de la tierra, el consumo interno bruto producción (PIB), datos de población y servicios ecosistémicos. Los resultados fueron los siguientes: (1) La variación en la población, el PIB

y las áreas construidas aumentó constantemente durante el período de estudio, que los valores de los servicios ecosistémicos (ESV) disminuyeron; (2) producción de alimentos, producción de materias primas, el mantenimiento del ciclo de nutrientes y la conservación del suelo fueron servicios ecosistémicos decisivos que llevaron a reducciones en ESVs durante el proceso de urbanización; y (3) el coeficiente de correlación negativo entre las áreas construidas y los servicios ecosistémicos fue mayor que entre la población o el PIB y servicios ecosistémicos, que indicó que los impactos de la población y la urbanización económica sobre los servicios ecosistémicos quedó rezagado con respecto al impacto de la urbanización de la tierra. Este estudio proporciona referencias por reconocer plenamente los efectos ecológicos de la urbanización, y hacer sugerencias con respecto a la aplicación de los servicios ecosistémicos en el desarrollo sostenible.

En la metrópoli de Accra, Puplampu y Boafo (2021) examinan cómo la urbanización expansiva reconfigura los espacios verdes y la provisión de servicios ecosistémicos. A partir de imágenes satelitales y análisis multitemporal de cambio de uso/cobertura (1991–2018), documentan que la superficie urbanizada aumentó de 55,1 % a 83,79 %, mientras que los espacios verdes se redujeron de 41 % a 15 %. Este viraje hacia superficies impermeables disminuye la captura de carbono y la regulación hídrica, y contribuye al incremento de las temperaturas locales. Los autores proponen políticas integradas para conservar y restaurar infraestructura verde como estrategia de resiliencia climática. Si bien la serie temporal robusta es una fortaleza, la interpretación de las magnitudes depende de la precisión de las clasificaciones y del control de la expansión informal. El enfoque es pertinente para Jaén, pues permite anticipar efectos de la expansión sobre coberturas periurbanas y respalda la necesidad de corredores ecológicos, zonas de amortiguamiento y planificación del verde urbano.

En el Gran Área de la Bahía (Guangdong–Hong Kong–Macao), Wang et al. (2020) evaluaron cómo la expansión urbana incide sobre el hábitat natural y los servicios ecosistémicos. Su análisis espacial mostró una disminución significativa de dichos servicios conforme aumenta la intensidad de urbanización y una correlación espacial negativa entre ambos fenómenos. Estos resultados ofrecen insumos para procesos de “nueva urbanización” y para una planificación territorial que preserve el capital natural regional, con lecciones transferibles a otras megaciudades en rápida expansión desde la perspectiva ambiental.

En China, Xiao et al. (2020) en su investigación “Impacto de la Urbanización Rápida en la Salud de los Ecosistemas en Regiones montañosas del suroeste de China”. En este estudio, analiza el impacto de la urbanización en (EHS) Assessments of ecosystem health (ESH) con base en datos de sensores remotos y Tecnología GIS en la Prefectura de Qiannan, una zona montañosa en el sureste de China. Sus objetivos fueron (1) evaluar la dinámica ESH utilizando el marco de vigor-organización-resiliencia-servicios ecosistémicos. (2) cuantificar el nivel de urbanización. Finalmente, analizar la correlación espacial entre la urbanización y ESH en la prefectura de Qiannan mediante el cálculo del I de Moran bivariado global y el I de Moran bivariado local. Los propósitos de este estudio fueron los siguientes: (1) Medir y mapear ESH y urbanización en base a datos de uso de suelo, datos de población y datos económicos; (2) para cuantificar los efectos de la urbanización en ESH en la prefectura de Qiannan. Los resultados fueron que ESH en Qiannan disminuyó de 1990 a 2015, especialmente en el este y regiones del norte. Además, los resultados indican que la urbanización tuvo un impacto negativo en ESH, de los cuales el factor dominante fue la proporción de suelo de construcción de 1990 a 2005. Después de 2005, además, el factor dominante era el producto interno bruto. Sin embargo, hubo diferencias espaciales. El impacto negativo más significativo se encontró en el este y norte. Después de 2010, las regiones occidental y central de Qiannan mostraron una tendencia de urbanización a favor

de la salud del ecosistema. Recomendaron restauración ecológica en regiones con débil y relativamente débil Niveles de ESH para lograr un desarrollo sostenible. El estudio proporcionó una referencia y sugerencias para idear soluciones estables y política sostenible para el desarrollo local.

El artículo de Gu et al. (2019) analiza el impacto de la expansión urbana en los servicios ecosistémicos en la cuenca del lago Taihu, China, utilizando datos de luz nocturna para modelar los niveles de expansión urbana. Se identificaron tres zonas de expansión urbana: lenta, moderada y rápida, y se evaluó su influencia en ocho servicios ecosistémicos, incluyendo producción agrícola, suministro de agua, retención de suelo y regulación de inundaciones. Los resultados mostraron que niveles más altos de urbanización se correlacionaron negativamente con servicios de provisión como la producción agrícola y la retención de agua, mientras que aumentaron servicios recreativos como la forestación. Este estudio subraya la necesidad de estrategias sostenibles para equilibrar el crecimiento urbano con la conservación ambiental, aportando un marco valioso para analizar los impactos de la urbanización en ecosistemas similares, como los de la ciudad de Jaén.

En Argentina, Civeira y Rositano (2020) desarrollaron el estudio “Evaluación ambiental en áreas urbanas y periurbanas de la Región Metropolitana de Buenos Aires”, orientado a estimar el efecto de distintos usos del suelo —agropecuario extensivo, agropecuario intensivo, agricultura urbana y periurbana, y áreas verdes— sobre los servicios ecosistémicos (SE), y su vinculación con (1) la cantidad de habitantes y (2) el nivel de urbanización. Para ello, emplearon los indicadores SE por habitante (SE/HAB) y SE por superficie urbanizada (SE/URB), y cuantificaron el cambio neto ambiental (positivo/negativo) mediante matrices de impacto. Los resultados evidenciaron diferencias significativas de SE/HAB y SE/URB entre usos del suelo tanto en el ámbito urbano como

en el periurbano. La matriz de impacto ambiental situó a la RMBA en un balance negativo. Ambos indicadores aportan una perspectiva innovadora para la planificación del paisaje urbano y la toma de decisiones.

En el Perú, Rojas Briceño et al. (2019) analizaron la deforestación en la Amazonía mediante índices de cambios de cobertura y uso del suelo (CCUS) elaborados con teledetección y software SIG de código abierto. Su propósito fue caracterizar la dinámica de la CUS entre 1987–2001 y 2001–2016 en la provincia de Rodríguez de Mendoza, identificando factores locales asociados a la deforestación. El estudio precisó: (a) el intervalo con mayor tasa interanual de cambio; (b) las clases de uso/cobertura con baja o alta actividad; y (c) la estabilidad de dichos patrones entre períodos. Para ello, construyeron matrices de tabulación cruzada y estimaron tasas e índices anuales de variación. Los resultados muestran una pérdida acumulada de 918,59 km² de cobertura boscosa, con mayor intensidad de CCUS y tasa de deforestación en el segundo período. Asimismo, se observó que las concentraciones de pérdida se agrupan cerca de la red vial y corredores hídricos. Entre las causas predominantes se documentaron la ganadería y la expansión agrícola migratoria de pequeña escala, favorecidas por la accesibilidad a infraestructura de transporte.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Expansión Urbana.

Según Ravetz y Sahana et al. (2025) definen la interfase periurbana como las zonas “alrededor, más allá e incluso entre” lo urbano, destacando su rápida expansión y su carácter multidimensional —incluyendo variables como densidad poblacional, actividad económica, infraestructura y flujo de materiales. En paralelo, Tesfay et al. (2025) realizaron

una revisión sistemática centrada en el Sur Global, identificando tres enfoques teóricos fundamentales para comprender estas transformaciones: territorial (espacial), funcional (uso del suelo) y transicional (proceso de “volverse urbano”). Estos marcos teóricos ofrecen una base sólida para abordar los cambios en Jaén desde una perspectiva que integra lo espacial, lo institucional y lo socioeconómico, lo cual resulta esencial para analizar su proceso de urbanización periurbana de manera más integral y actualizada.

Aunque aún no existe un consenso único respecto a la definición conceptual de la interfase periurbana, está creciendo el reconocimiento entre profesionales e instituciones del desarrollo de que los rasgos rurales y urbanos coexisten de manera creciente dentro y fuera de los límites de las ciudades, lo que desafía los enfoques convencionales de planificación como campos autónomos. Por ejemplo, Ravetz y Sahana (2025) sostienen que las áreas “alrededor, más allá y entre” lo urbano son zonas en rápida expansión, que requieren enfoques integrados que combinen variables como densidad, infraestructura, uso del suelo y dinámicas socioeconómicas.

Desde el punto de vista de la planificación, los procesos que ocurren en la interfase periurbana han sido interpretados como el resultado de un impulso inevitable hacia la expansión de las actividades económicas urbanas en desmedro de las economías rurales tradicionales, o como dinámicas que deben ser restringidas y controladas para preservar una clara distinción entre la ciudad y el campo. Sin embargo, estudios recientes advierten que estas visiones resultan reduccionistas, ya que no siempre consideran las ventajas y desventajas de los procesos de transformación en la interfase periurbana, ni la diversidad de trayectorias que adoptan en función de cada contexto territorial (Sahana et al., 2025). En este sentido, la literatura reciente enfatiza la necesidad de analizar con mayor detalle la

naturaleza y la velocidad de las presiones que influyen en la interfaz periurbana-urbana (IPU) y su relación con la urbanización y el desarrollo local (Tsfay et al., 2025).

Asimismo, investigaciones recientes señalan que la interfaz periurbana comparte atributos con la expansión de las ‘fronteras agrícolas’: mayor presión sobre los ecosistemas, sustitución de coberturas naturales por superficies impermeables y conflictos por tenencia de la tierra y cambio de uso (Agyemang et al., 2020; Simon et al., 2023). Estos procesos también incluyen la expansión de actividades extractivas, la transformación acelerada del valor del suelo, la pérdida de actividades productivas tradicionales y la emergencia de estrategias de subsistencia basadas en la combinación de recursos rurales y urbanos, lo que refleja la complejidad de la IPU en su condición de espacio de transición.

2.2.2. Ecosistemas

El ecosistema periurbano implica abordar un complejo territorial de interfaz entre lo rural y la ciudad. De difícil definición y delimitación, se trata de un espacio transicional, en permanente transformación y frágil, por lo que resulta susceptible a nuevas intervenciones y cambios de uso (Barsky, 2005).

Von Thünen (1826/1966) fue pionero en estudiar la lógica económica subyacente en la distribución espacial de los sistemas productivos alrededor de las ciudades. Delimitando círculos concéntricos sucesivos “ideales” (en términos de fertilidad de la tierra y accesibilidad) en torno a un centro de consumo urbano (mercado), estableció que cada tipo de actividad económica se localizaba a la distancia óptima que le permitiera al productor maximizar sus ganancias según el precio del producto y los costos del alquiler de la tierra y del transporte. Determinó que en un primer cordón alrededor de la ciudad se localizaban la horticultura y la producción lechera (alquileres elevados, precios de productos altos, uso intensivo de agroquímicos y utilización de medios de transporte adecuadamente

acondicionados). En un segundo cordón, la producción forestal (muy rentable en esa época, con altos costos de transporte). En un tercer cordón, el cultivo de cereales (sin barbecho, rotando con otros cultivos). En un cuarto cordón, un tipo de agricultura menos intensivo, rotando con pasturas (forrajes, barbecho). En un quinto cordón, cultivos más extensivos con rotación trianual. Y en un sexto cordón, cría extensiva de ganado y producción de manteca (5). Desde una perspectiva geográfica, resulta de interés apreciar cómo von Thünen estableció una secuencia de intensidades decrecientes en el uso del suelo partiendo desde el borde de la ciudad. Conocimiento que tendremos en cuenta a la hora de analizar las características de los ecosistemas periurbanos.

La importancia del estudio de ecosistemas periurbano

Desde un punto de vista ecológico, el periurbano es abordado como una zona de transición o ecotono entre el campo(rural) y la ciudad (Barsky, 2005). Los especialistas que han estudiado el periurbano desde esta perspectiva han centrado su atención en la complejidad de las relaciones ecosistémicas que se dan entre la ciudad y sus bordes. La presión que sufren los ecosistemas de los bordes responde a los intensos procesos de transformación generados por el despliegue del proceso urbanizador sobre los espacios rurales circundantes.

El ecotono o zona de borde es un área de contacto entre ecosistemas (..) una interacción activa entre dos o más ecosistemas. (Di Pace, 2001). Seguidamente, afirma que “..las ciudades impactan en los sistemas circundantes, transformando su suelo y sus recursos hídricos superficiales y subterráneos: por la exportación de residuos sólidos y líquidos -domiciliarios e industriales-, la presencia de cavas, basurales a cielo abierto, etc. (..). Pero a su vez es impactado por el sistema rural: recibe la influencia de

los agroquímicos y los residuos sólidos, los contenedores de los productos agroquímicos que están constituyéndose en un elemento contaminador de importancia, etc. Es decir, el periurbano también es un sistema en mosaico que contiene relictos “naturales” o ecosistemas residuales (“parches”), (..) donde coexisten los sistemas productivos o agroecosistemas que explotan el suelo fósil, los ecosistemas consumidores o aglomeraciones urbanas, y los cada vez más reducidos ecosistemas balanceados (naturales) remanentes.”. Por lo tanto, el concepto de periurbano se corresponde con el de ecotono en tanto ecológico y espacial.

2.2.3 Impactos.

Los impactos sobre los ecosistemas periurbanos alcanzan con frecuencia niveles de intensidad que revelan la debilidad o incluso ausencia de criterios de planificación que integren principios de sostenibilidad y equilibrio ecológico. Esta situación se observa en territorios donde las dinámicas de autoconstrucción, la presión del mercado inmobiliario y la demanda de suelo industrial han prevalecido sobre la ordenación adecuada del territorio. Estudios recientes han demostrado que la urbanización no planificada suele priorizar objetivos de crecimiento económico inmediato, relegando las medidas de mitigación y adaptación hasta que los problemas alcanzan niveles críticos de degradación e irreversibilidad (Agyemang et al., 2020; Wang et al., 2020; Civeira & Rositano, 2020). En este sentido, los ecosistemas periurbanos se ven expuestos a la fragmentación ecológica, la pérdida de biodiversidad y el debilitamiento de los servicios ecosistémicos, lo que resalta la necesidad de fortalecer los marcos de gobernanza territorial y la planificación urbana sostenible.

Por tanto, los ecosistemas periurbanos aparecen geográficamente identificados como las áreas donde mayor importancia, dimensión y gravedad adquieren las afecciones ecológicas, es evidente que, dentro de las nuevas coordenadas aciertas por la etapa de la periurbanización contemporánea, la presión inducida por las formas de ocupación selectiva generadas a partir de la ciudad dominante, y de los sectores sociales más sensibilizados de sus entorno, se convierte en el factor explicativo de un drástico cambio de enfoque y de orientación de las medidas a seguir, que forzosamente ha de ser inscrito dentro del propósito de dignificación cualitativa integral de los espacios urbanos y de sus periferias, o al menos de aquellas más conectadas con la lógica selectiva que persigue acreditarlas.

A. Evaluación de impactos.

Una forma altamente confiable y rentable de monitoreo y análisis, tanto en el espacio como en el tiempo, es el uso integrado de la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), utilizando una variedad de métodos, técnicas, algoritmos y niveles de precisión que se emplean actualmente (Hathout, 2002; Phukan et al., 2013; Serra et al., 2008). La información de teledetección es muy valiosa por su visión sinóptica, observación recurrente y recopilación en tiempo real (Hegazy y Kaloop, 2015). El estudio y uso de estos datos ha permitido analizar los cambios en el uso y cobertura del suelo (CUS) de manera más rápida y económica, con mayor precisión (Kachhwala, 1985). También se asocian con los SIG como un buen entorno para realizar análisis, actualización y recuperación de datos geoespaciales (Chilar, 2000).

El Ministerio del Ambiente de Perú (MINAM), en colaboración interinstitucional regional entre el CIAT y el Banco Mundial, implementó desde 2014 un monitoreo a

nivel nacional utilizando el sistema Terra-i para estudiar los cambios en la cobertura y uso del suelo en todos los ecosistemas de Perú. A través de esto, se pueden identificar alertas de cambios aproximadamente cada 16 días y monitorear eventos de cambio forestal como pérdidas (y ganancias) en tiempo real (MINAM & CIAT, 2014; Llactayo, 2016). Este modelo se alimenta con datos de los satélites MODIS y TRMM. Sin embargo, las tierras agrícolas de menos de 0.25 km² (250 metros de resolución espacial) y la intensificación de infraestructuras no se detectan bien debido a la baja resolución espacial. Además, en paisajes heterogéneos que posee el país, la clasificación digital se favorece para clases de baja precisión temática como resultado de la alta variabilidad climática interanual (Thakkar et al., 2017), lo que no genera en algunos casos una perspectiva general sobre las dinámicas espacio-temporales locales (Rudel et al., 2009). Desde este punto de vista, existen métodos de teledetección de código abierto y herramientas SIG para garantizar la reproducibilidad, validez, seguridad y rápida generación de información (Kittle et al., 2006; Bhatt et al., 2014; Fan et al., 2015; Dile et al., 2016). Es preferible trabajar con los complementos de clasificación semiautomática (SCP, Congedo, 2013) (y Heatmap) a través de software de código abierto bajo la licencia GNU QGIS versión 2.18.4 (Marinas, 2017).

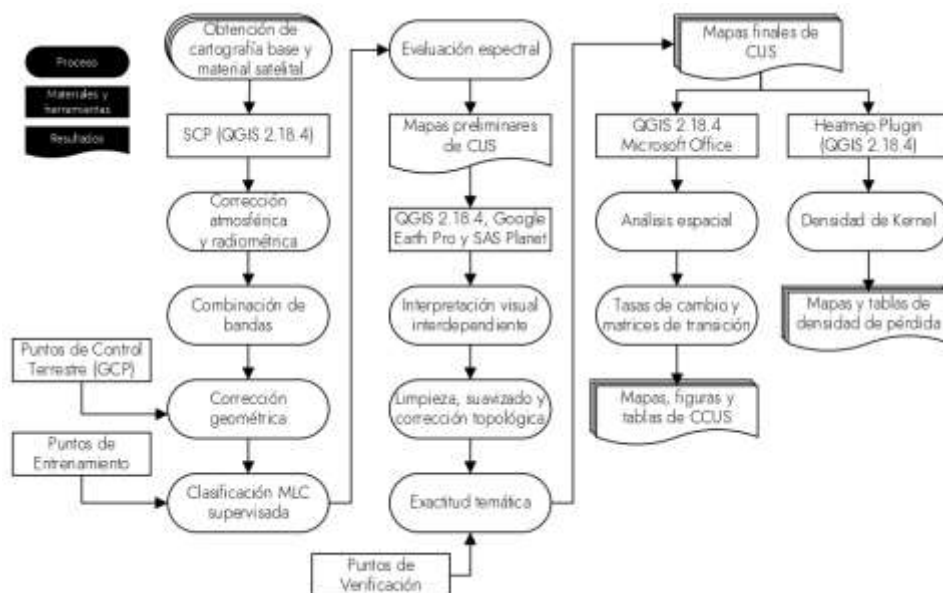
Para el detalle de los mapas de cobertura y uso del suelo, se utilizan imágenes satelitales Landsat con una resolución espacial de 30 m, recuperadas del portal USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Según (Chuvieco, 1998), los criterios de selección de imágenes deben ser: A. No deben introducir errores o sesgos; B. En el área de aplicación, no deben exceder el 10% de nubes y sombras; C. Al mismo tiempo del año para asegurarse de que la vegetación y el clima sean homogéneos, lo que podría resultar en mejores hallazgos de investigación. Para una correcta comparación y detección de cambios multitemporales, todas las bandas espectrales deben estar calibradas

atmosférica y radiométricamente "según la pista" (Chuvienco, 2002). Se deberá aplicar la corrección de Sustracción de Objeto Oscuro (DOS1) (Chavez, 1988) implementada en el SCP y para la cual los valores de radiancia espectral están disponibles en los metadatos correspondientes.

metadatos.

Figura 1

Flujograma metodológico



Nota: Adaptado de Rojas Briceño et al. (2019).

Las bandas deben fusionarse para construir imágenes multiespectrales. La corrección geométrica requiere que se establezcan Puntos de Control Terrestre (GCP), foto-interpretables, en y alrededor del área de estudio, verificados en el campo con mapas base. La transformación polinómica de segundo orden remuestrea los Niveles Digitales (DL) a una nueva ubicación bajo el criterio de interpolación del vecino más cercano, con un valor de error cuadrático medio aceptable de <0.15 (Chuvienco, 2002).

B. Clasificación de cobertura y uso del suelo.

Para esto, las clases de Cobertura y Uso del Suelo deben adquirirse con base en la metodología de CORINE Land Cover para Perú (MINAM, 2015b) y categorizar los usos de acuerdo con la Zonificación Ecológica Económica.

C. Evaluación de exactitud temática.

La a evaluación de precisión de la Clasificación de Cobertura y Uso del Suelo (CUS) debe basarse en sitios de verificación, obtenidos según la fórmula de Cochran (1977), tomando en cuenta las áreas relativas de cada clase; las cuales deben establecerse mediante un muestreo aleatorizado sistemático estratificado (MINAM, 2014b). Estos puntos deben ser verificables mediante salidas de campo.

Datos de puntos de difícil acceso deben ser soportados por datos de referencia de alta calidad, por ejemplo, imágenes de nivel 3A RapidEye de 2011 y 2012, así como imágenes de Google Earth e imágenes disponibles en SAS Planet (Osorio et al., 2015; Peralta-Rivero et al., 2015).

Se debe construir la matriz de confusión (Chuvieco, 2002) en la cual se calculan métricas de precisión (error de omisión y comisión), características métricas de evaluación de precisión a nivel de clase (precisión del "usuario" y del "productor") (Story & Congalton, 1986; MINAM, 2014b), así como se calcula la precisión total observada dividiendo el número de puntos correctamente ubicados por el número total de puntos muestreados.

El Índice Kappa (k , índice de concordancia basado en la diferencia entre clasificación y datos de referencia; Congalton & Green, 2009) se calcula utilizando la fórmula propuesta por Congalton et al. (1983):

$$k = \frac{m \sum_{n=1}^r a_{nn} - \sum_{n=1}^r a_{n+} a_{+n}}{m^2 - \sum_{n=1}^r a_{n+} a_{+n}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde r es el número de filas en la matriz; a_{nn} el número de observaciones en la fila n y columna n ; a_{n+} , a_{+n} son el total de marginal de fila n y columna n , respectivamente, y m es el total de observaciones.

Intensidad espacio temporal de la tasa de cambios y matrices de transición

Se calcula la tasa anual de cambio (s) mediante la ecuación utilizada por la FAO (1996):

$$s = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/t_2 - t_1} - 1 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde, S_1 y S_2 son las superficies de CUS en la fecha t_1 y t_2 , respectivamente. Un valor negativo de s indica una disminución de la CUS y, si s es mayor que cero, hay un aumento de esta.

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1 Ecosistema.

Un ecosistema se entiende como el sistema dinámico conformado por una comunidad de organismos vivos y el medio físico con el cual interactúan, generando flujos de energía y ciclos de nutrientes (MEA, 2005; IPBES, 2019). El concepto, acuñado inicialmente por Tansley en 1935, ha evolucionado hacia un enfoque integrador que reconoce múltiples escalas espaciales —desde un microhábitat hasta la biosfera— y resalta la importancia de las interacciones bióticas y abióticas en el mantenimiento de la resiliencia ecológica.

2.3.2 Diversidad biológica.

La diversidad biológica hace referencia a la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos los ecosistemas terrestres, marinos y acuáticos continentales, así como los complejos ecológicos de los que forman parte (CDB, 1992; Díaz et al., 2018). En ecología se reconoce que la diversidad puede evaluarse en diferentes niveles: diversidad alfa (riqueza de especies en un ecosistema), diversidad beta (variación de especies entre ecosistemas) y diversidad gamma (diversidad total a escala regional o paisajística) (Whittaker, 1972; Magurran, 2013).

2.3.3 Impacto ambiental.

Se entiende como cualquier alteración, positiva o negativa, que una acción o actividad humana produce sobre el ambiente o sobre alguno de sus componentes (ONU Medio Ambiente, 2018; Sánchez, 2019). En el campo de la evaluación ambiental, el impacto se mide a través de la comparación entre el estado del medio en un escenario sin proyecto y su estado con la intervención ejecutada, lo que permite establecer la magnitud y significancia de las alteraciones en los ecosistemas y la calidad de vida

humana.

2.3.4 Cobertura y uso del suelo (CUS).

Se refiere a la descripción biofísica de la superficie terrestre (cobertura) y al conjunto de actividades humanas que se realizan sobre ella (uso). La cartografía de CUS constituye una herramienta fundamental para el análisis de cambios espaciales y temporales asociados a procesos de urbanización, deforestación o conversión de ecosistemas naturales (FAO, 2020; Liu et al., 2021).

2.3.5 Expansión urbana.

Proceso mediante el cual el área urbana se extiende sobre territorios rurales o naturales, transformando ecosistemas y generando cambios en la cobertura y uso del suelo. Este fenómeno está asociado al crecimiento poblacional, la migración, la planificación urbana insuficiente y la especulación inmobiliaria (Angel et al., 2016; ONU-Hábitat, 2020).

2.3.6 Zona urbana.

Área territorial que concentra de manera continua infraestructura, servicios básicos, redes de transporte, equipamientos colectivos y una elevada densidad poblacional. Está destinada principalmente a actividades residenciales, comerciales, industriales y de servicios, y se encuentra regulada por la planificación urbana y los instrumentos de ordenamiento territorial (INEI, 2022; ONU-Hábitat, 2020).

2.3.7 Zona periurbana.

Espacio de transición entre lo urbano y lo rural, caracterizado por la coexistencia de usos mixtos del suelo (vivienda, agricultura, actividades extractivas e industriales). Las zonas periurbanas suelen ser las más dinámicas frente a la expansión urbana, generando tensiones en el uso del territorio y afectando ecosistemas y servicios ambientales (Allen, 2003; Aguilar, 2008; OECD, 2021).

2.3.8 Servicios ecosistémicos.

Son los beneficios que los ecosistemas proporcionan a los seres humanos, clasificados en servicios de provisión (agua, alimentos), regulación (clima, calidad del aire), soporte (ciclo de nutrientes, formación del suelo) y culturales (recreación, identidad cultural). La degradación de ecosistemas producto de la expansión urbana reduce la capacidad de generar estos servicios (MEA, 2005; Díaz et al., 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación política y geográfica del estudio

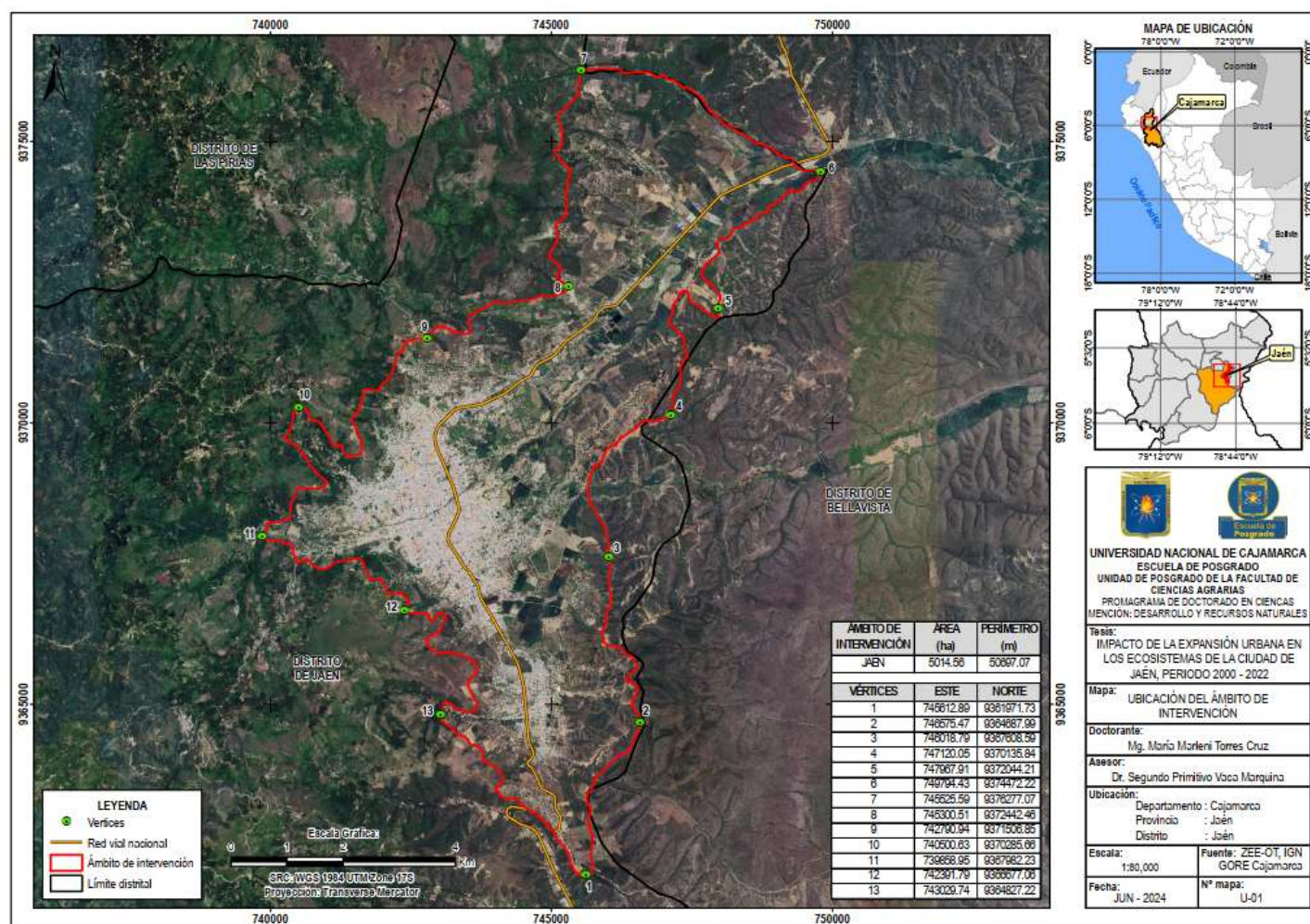
El estudio se localiza en el Perú, departamento de Cajamarca, provincia de Jaén y distrito de Jaén. Como punto geodésico urbano de referencia se considera la Plaza de Armas de la ciudad de Jaén: UTM (WGS 84), zona 17 Sur (banda M), E = 742 796.24 m y N = 9 368 525.77 m, a 731 m s. n. m. (equivalente a 5°42'31.6" S, 78°48'28.0" O).

3.1.1. Área de intervención

El ámbito de intervención es un polígono georreferenciado en WGS 84 / UTM zona 17S, con área de 5,014.56 ha y perímetro de 50,697.07 m. El polígono incluye el casco urbano de la ciudad de Jaén y sectores periurbanos adyacentes, presenta como extremos cardinales los siguientes: al norte, el vértice 7 (E = 745 525.59 m; N = 9 376 277.07 m); al sur, el vértice 1 (E = 745 612.89 m; N = 9 361 971.73 m); al este, el vértice 6 (E = 749 794.43 m; N = 9 374 472.22 m); y al oeste, el vértice 11 (E = 739 858.95 m; N = 9 367 982.23 m). Estos puntos delimitan las posiciones extremas del polígono en cada dirección y respaldan la verificación de su georreferenciación y consistencia espacial en el sistema de referencia indicado.

Figura 2

Ubicación geográfica del area de estudio



3.1.2. Aspecto demográfico y social de Jaén.

Este breve análisis se realizó para conocer como fue creciendo la ciudad de Jaén en base al incremento de la población y la actividad migratoria y de esta manera se pueda analizar y explicar la expansión urbana.

La Ciudad de Jaén al finalizar el siglo XVI e inicios del siglo XVII sufrió una grave pérdida del potencial humano en la mayoría de los pueblos indios de su Provincia, según el Censo de 1561 los indios de Chirinos eran 4000 y en 1606 disminuye a 1,055, en el

mismo censo de 1561 Jaén registra 2000 indígenas, en el de 1591 descendían a 106, en el censo de 1606 la población indígena continuó disminuyendo.

La terminación de la carretera Olmos Río Marañón en 1944, es el acontecimiento que rompe el aislamiento de la ciudad de Jaén (Provías Descentralizado, 2021), produciéndose las primeras olas migratorias que fueron, de Huancabamba, Cutervo y Chota, atraídos por la Ley de Tierras de Montañas.

El distrito de Jaén, en el año 1940, registró una población total de 4,988 habitantes, de los cuales 1,020 correspondían a la ciudad de Jaén. Posteriormente, de acuerdo con el VI Censo de Población y I de Vivienda realizado por el INEI en 1961, la población urbana ascendió a 4,420 habitantes, evidenciando un proceso de crecimiento sostenido.

Dicho crecimiento se ha intensificado en las últimas décadas. Según el Censo Nacional de Población y Vivienda 2017, el distrito de Jaén alcanzó 87,867 habitantes, mientras que la provincia en su conjunto superó los 200 mil. Según las proyecciones del INEI para 2023, la población distrital se estima en torno a los 110,000 habitantes, evidencia que refuerza la posición de Jaén como un centro de atracción y crecimiento urbano en el nororiente peruano.

3.1.3. Aspecto económico.

Las actividades económicas en Jaén son las que determinan también el número de nuevas habilitaciones urbanas y su extensión, por lo cual el resultado de esta investigación mostrara esta relación importante.

La estructura y dinámica económica de la Ciudad de Jaén están determinadas directa y fuertemente por su capital físico, entendiendo como tal a la riqueza de su suelo en el ámbito distrital y a su ubicación geoestratégica, factores que le ubican como uno de los centros de producción agroexportadora y uno de los ejes de articulación económica, más

importantes de la región Nor Oriental del país, lo que a su vez le ha generado una dinámica poblacional y ocupación urbana que la define como la segunda ciudad más poblada de la región Cajamarca.

Posicionada en dos corredores económicos de categoría binacional, la Ciudad de Jaén además de ser un centro de redistribución con dinámica propia por los flujos de entrada y salida de bienes y de personas que por ella pasan y fuertes enlaces con otras regiones: Piura, Lambayeque y Amazonas, tiene grandes perspectivas no sólo de ampliación de mercado para sus productos locales sino para convertirse en uno de los operadores logísticos de mayor importancia en los corredores económicos regionales.

3.1.3. Aspecto Físico-espacial.

Para analizar y estimar el crecimiento de las nuevas habilitaciones urbanas es necesario conocer aspectos del relieve, superficie y uso del suelo tal como lo explicamos a continuación:

A. El Relieve y Superficie.

La Ciudad de Jaén presenta un relieve accidentado, con fuertes pendientes. Las laderas superiores de Sargento Lores, Las Cochas, Chililique Alto, Chililique Bajo, Los Derrumbes, Los Vásquez, Cataratas, Magllanal, Miraflores, Pueblo Libre y Yanayacu, conforman las Laderas Oeste de la Ciudad de Jaén.

Se observan también ambientes de pie de monte, geoformas que se ubican al pie de las laderas de los cerros Chililique Alto, Chililique Bajo, Zanja Honda, Las Cochas, Los Aromos, Las Cataratas, Magllanal, Miraflores, Pueblo Libre, Yanayacu y otros.

Las altitudes oscilantes alrededor del área de ciudad Jaén varían de 600 m s.n.m. a 700 m s.n.m. y de 1,200 m s.n.m. en la Central Hidroeléctrica La Pelota.

La ciudad es atravesada por el río Amojú, que delimita dos grandes sectores urbanos. De acuerdo con registros del año 2013, la superficie de la zona urbana abarcaba aproximadamente 896,76 hectáreas.

Fue desde la apertura de la carretera Olmos – Río Marañón en el año 1944, donde comenzó un acelerado crecimiento, favorecida por los flujos comerciales que se incrementan con la interconexión de la carretera marginal de la Selva (Provías Descentralizado, 2021).

B. El Uso del Suelo en Jaén

Se han identificado diferentes tipologías del uso del Suelo en la Ciudad de Jaén, así como características diferencias referidas al uso de materiales, Altura de edificación, Procesos Constructivos utilizados entre otros.

La Ciudad de Jaén al 2013 cuenta con una extensión urbana total de 896.76 Has, la estructura de usos del suelo urbano muestra que el 27.89 % (250.10. ha) está compuesto por el área Urbana ocupada, un 18.78 % (168.45 ha) por área urbana no ocupada, y el área ocupada por vías, que representa el 31.78 % (284.95 ha).

De acuerdo con la Municipalidad Provincial de Jaén (2013), el uso del suelo en la ciudad es predominantemente residencial, con una extensión de 418,55 ha, equivalente al 46,67 % del área urbana. En orden decreciente, le siguen los usos comerciales (80,24 ha; 8,95 %), el equipamiento urbano (57,27 ha; 6,39 %), otros usos (29,79 ha; 3,32 %) e industrial (25,96 ha; 2,89 %).

3.1.4. Aspecto geográfico y climático

A. Geología: La ciudad de Jaén está flanqueada por afloramientos rocosos de areniscas, lutitas y conglomerados de color pardo rojizos, perteneciendo probablemente a la formación Bellavista, aflorante en la margen derecha del valle

Jaén, desde fila alta hasta la confluencia de la ciudad de Bellavista y el río Marañón, asignándole a estas formaciones rocosas al tercio superior de la Era Cenozoica (INGEMMET, 2007; Servicio Geológico Económico Cajamarca, s. f.).

Afloramientos rocosos de origen volcánico, ígneo extrusivo, lavas ácidas consolidadas con derrames piroclásticos, constituidos por andesitas, dacitas, riolacitas y riolíticos de colores grises a verdosos, afloran en el sector de Magllanal, margen izquierda de la quebrada Jaén, observándose afloramientos riolacítico con intercalaciones de lutitas y areniscas sacaroides blanco rojizos; observándose también la presencia de estas rocas en la parte alta de Magllanal.

La edad de estos afloramientos rocosos es de origen volcánico, probablemente de la formación Calipuy, comprendida entre el Terciario Superior al Terciario Medio de la Era Cenozoica, es así que las características de las rocas del sub-suelo de la Ciudad de Jaén pertenecen a las formaciones Calipuy, Bellavista y Tamborapa.

B. Geomorfología: La principal característica morfológica es de origen fluvial originado por los flujos hídricos gravitacionales discurrentes sobre fracturas preexistentes, fallas geológicas regionales Noroeste – Suroeste y las fallas transversales Este – Oeste como el caso de la quebrada Jaén y las quebradas que guardan orientación paralela y actuantes en las estribaciones Orientales de la Cordillera Occidental. Estos han aportado sedimentos aluviales, fluviales donde se levanta la ciudad de Jaén.

La Ciudad se caracteriza también por la presencia de tres terrazas que constituyen los suelos del valle Jaén, la primera se encuentra al Sur de la ciudad (Fila Alta, Montegrande, San Isidro), la segunda al Sur-Oeste (Fila Alta y otros en los límites de Santa Teresita) y la tercera terraza aluvial está constituida por suelos aluviales,

fluviales, bloques de roca entre 1.5 a 0.2 m de diámetro englobados en matriz gravosa, gravillosa y arena limoarcillosa que se manifiestan como cono de deyección de dirección Oeste – Este, cambiando de rumbo hacia el Norte para constituirse en afluente del río Marañón (Autoridad Nacional del Agua, 2013).

C. Topografía: La ciudad de Jaén y su entorno inmediato presenta un relieve accidentado, las altitudes oscilan entre los 600 a 700 m s.n.m. circundado por áreas agrícolas, con elevaciones en el sector Oeste y bajas en el sector Este, esta zona representa la más baja del área urbana de la Ciudad.

D. Hidrología: Dentro del área de influencia de la Provincia de Jaén El Proyecto Especial Jaén – San Ignacio – Bagua ha procesado información Hidrometeorológica de cuarenta y cinco (45) estaciones, sin embargo, para el presente estudio se ha tomado como referencia la información obtenida de diecinueve (19) estaciones meteorológicas, siendo de categoría principal la estación Jaén, ubicada en el Distrito de Jaén a una altitud de 654 m s.n.m. encontrándose dentro de la cuenca de la Quebrada Jaén.

E. Precipitación: De acuerdo con el Mapa de Peligros elaborado por el Equipo Técnico de INDECI (abril 2005) las precipitaciones son variables durante el año, siendo mínimas durante los meses de junio a septiembre, incrementándose entre los meses de enero a abril, registrándose las máximas precipitaciones en el mes de marzo.

Para el período comprendido entre los años 1,970 – 1,990 la precipitación total anual varía entre 333.2 mm a 1,051 mm, siendo el promedio de precipitación anual de

760.25 mm, por otro lado, en la ciudad de Jaén, el promedio de la precipitación máxima en 24 horas es elevado, durante el periodo de 1995 a 2003, se registró un valor máximo de 88.0 mm en un solo día (Municipalidad Provincial de Jaén, 2013).

F. *Infraestructura de Drenaje.* En la zona de estudio no cuenta con una infraestructura de drenaje agrícola artificial, existiendo un sistema de drenaje natural por las características de la topografía de la zona, discurriendo las aguas provenientes de las precipitaciones pluviales, entre los que pueden señalarse la quebradas Zánoras, Tumbillán, Shanango, Jaén, entre otros cumpliendo la función de colectores principales con pendientes apreciables; que drenan hacia el Río Marañón.

G. *Clima:* De acuerdo con las características topográficas, la ciudad de Jaén presenta altitudes menores a 1,000 m s. n. m. y un clima clasificado como semi húmedo a macrotermal, con vegetación tipo pradera y tropical (Municipalidad Provincial de Jaén, 2013).

De acuerdo con datos recientes del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI (2023), la temperatura mínima mensual oscila entre 17 °C y 20 °C, mientras que la máxima fluctúa entre 31 °C y 34 °C, con un promedio anual de aproximadamente 25,9 °C. Asimismo, la humedad relativa promedio se mantiene en torno al 74 %, alcanzando sus valores más altos entre los meses de marzo y julio.

H. *Sismicidad:* El territorio peruano está situado sobre una franja sísmica muy activa. Casi todos los movimientos sísmicos están relacionados a la subducción de la placa Oceánica de Nazca que se introduce bajo la placa Continental Sudamericana a razón de 9 cm/año, de acuerdo con el Mapa de Zonificación Sísmica para el territorio

peruano, la Ciudad de Jaén se ubica en una zona de sismicidad 3. (Municipalidad Provincial de Jaén, 2013).

- I. *Deslizamientos:*** La de ciudad de Jaén existe presencia de Quebradas, con deslizamientos de tierra y colapsos de roca de la Formación Tamborapa, sedimentos conglomerados cuaternarios pleistocénicos, compuestos por masa de arenas, gravilla, grava, canto rodado y bloques de roca, siendo las quebradas que están afectadas por deslizamientos las localizadas al Oeste de la ciudad como: las quebrada Zanja Honda – Las Cochas, Los Derrumbes, Los Vásquez – Cataratas, Catahuas – La Pochura, sargento Lores – Las Cochas (Municipalidad Provincial de Jaén, 2013).

3.2. Materiales

3.2.1 Equipos.

Los equipos que se utilizaron son: Navegador GPS, Impresora, Laptop, Cámara fotográfica, Brújula de mano, Wincha, Cinta métrica, Vernier, Software

3.2.2 Materiales.

Los materiales empleados incluyeron imágenes satelitales Landsat 4–5 y Landsat 8–9, utilizadas para el análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo, además de equipamiento de campo (botas de protección y machete) para la verificación in situ de las unidades de estudio.

3.2.3 Útiles de escritorio.

Los útiles de escritorio utilizados son: Papel bond A4, Cuadernos espirales oficial, Libreta de campo, Lapiceros, Tablero de campo, Tinta impresora color y negro

3.3 Metodología

La muestra es no probabilística: habilitaciones urbanas de expansión de 2000 al 2022. La unidad de análisis son las habilitaciones urbanas entre el 2000 y el 2022.

3.3.1 Técnicas.

- A. Observación directa e indirecta.
- B. Teledetección.
- C. Interpolación espacial.

3.3.2 Instrumentos.

- A. Fichas de colección de datos.
- B. Imágenes satelitales.

En la presente investigación se desarrolló trabajo de campo y gabinete de acuerdo con los objetivos planteados.

3.2.1. *Número de nuevas habilitaciones urbanas y su extensión durante los años 2000 al 2022 en la ciudad de Jaén.*

Se realizó mediante ficha de recolección de datos, dichos datos han sido brindados por la Municipalidad Provincial de Jaén, en su área de catastro urbano.

Para el cálculo de la extensión en área de las nuevas habilitaciones urbanas durante los años 2000 a 2022, se realizó mediante la utilización de imágenes satelitales, las cuales fueron descargadas de <https://earthexplorer.usgs.gov/> posteriormente procesadas en el software Qgis para si obtener la extensión durante estos 22 años.

Asi mismo en base a esta información se obtuvieron los mapas de cobertura de uso del año 2000 y del 2022. En base a las áreas determinadas se calculó la tasa de crecimiento anual.

3.2.2 Preparación de la cartografía base y preprocesamiento del material satelital.

La creciente demanda del software utilizado en ciencias sugiere que sea de código abierto, para garantizar la reproducibilidad, fiabilidad, seguridad y rápido despliegue de la información (Kittle et al., 2006; Bhatt et al., 2014; Fan et al., 2015; Dile et al., 2016). Por tanto, en este trabajo se priorizó el uso de los complementos de Clasificación Semiautomática (SCP, por sus siglas en inglés) (Congedo, 2013) y Heatmap, incorporados en el software de código abierto bajo licencia GNU, QGIS (versión 2.18.4) (Marinas, 2017).

Se utilizaron las hojas de la carta nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:100 000 (hidrografía e hipsografía), la red vial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y la división política provincial de la Zonificación Ecológica Económica de Cajamarca (ZEE-C) (GRA e IIAP, 2013). También, se utilizó el Modelo de Elevación Digital del Terreno (GDEM, por sus siglas en inglés) obtenido de las imágenes ALOS PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar) de 12,5 metros de resolución espacial, de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (AJAX).

Para elaborar los mapas se utilizaron imágenes del satélite Landsat, con resolución espacial de 30 metros, obtenidas del portal de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Los criterios de selección de imágenes fueron: a) no presentar errores ni distorsiones; b) tener un máximo de 10 % de nubes y sombras en el área de estudio y c) haber sido tomadas en la misma época del año, para que las condiciones de vegetación y climáticas fueran homogéneas y permitieran obtener mejores resultados en la investigación (Chuvienco, 1998). A continuación, la Tabla 1 muestra el detalle de cada una de ellas, indicando fecha, sensor y características técnicas relevantes.

Tabla 1

Serie de las imágenes de satélite empleadas

Año	Fecha de adquisición	Satélite	Identificador	Path/Row	Elevación solar	Azimut solar	Bandas espectrales utilizadas
2000	29/08/2000	Landsat 4-5 TM C2 L1	LT05_L1TP_009064_2000 0829_ 20231206_02_T1	009/064	53.421341	66.23831273	1,2,3,4,5 y 7
2005	15/01/2005	Landsat 4-5 TM C2 L1	LT05_L1TP_009064_2005 0115_ 20200902_02_T1	009/064	54.036296	118.3331464	
2011	12/08/2011	Landsat 4-5 TM C2 L1	LT05_L1TP_009064_2011 0812_ 20200820_02_T1	009/064	52.280351	56.31639129	
2017	31/10/2017	Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1	LC08_L1TP_009064_2017 1031_ 20200902_02_T1	009/064	65.292068	111.9496929	2,3,4,5,6,7
2022	30/11/2022	Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2	LC08_L1TP_009064_2022 1130_ 20221206_02_T1	009/064	61.225128	125.9950355	

Nota. Elaboración propia en base a los metadatos de las imágenes Landsat 4–5, 8 y 9 (USGS, 2000–2022).

La tabla 1 presentada muestra la serie de imágenes de satélite empleadas para el análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante los años 2000, 2005, 2011, 2017 y 2022. Se detallan las fechas de adquisición de cada imagen, los satélites utilizados (Landsat 4-5 y Landsat 8-9), y los identificadores específicos de cada imagen. Además, se indica la trayectoria y fila (Path/Row) de las imágenes, así como la elevación y el azimut solar en el momento de la captura de la imagen. Las bandas espectrales utilizadas para cada año también se especifican, variando entre las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7 según el análisis requerido.

La información presentada en la Tabla 1 constituye la base para el análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo en Jaén. Sin embargo, antes de proceder a dicho análisis, fue necesario aplicar un conjunto de procesos de pretratamiento a las

imágenes seleccionadas, con el fin de garantizar su comparabilidad y reducir al mínimo los errores derivados de las condiciones atmosféricas y radiométricas.

Para realizar una adecuada comparación y detección multitemporal de cambios se calibraron atmosférica y radiométricamente todas las bandas espectrales por separado (Chuvienco, 2002). Se aplicó la corrección de Substracción de Objetos Oscuros (DOS1) (Chavez, 1988) incorporada en el SCP, con los valores de radiancia espectral especificados en los respectivos metadatos. El supuesto básico de esta calibración es que en la imagen algunos píxeles están completamente en sombra, y sus radiancias recibidas en el sensor del satélite se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma). Esta suposición se combina con el hecho de que existen muy pocos elementos en la superficie terrestre que tienen un color negro absoluto, por lo tanto, una reflectancia asumida de 1 % es mejor que un 0 % (Chavez, 1988). El flujograma metodológico desarrollado es el siguiente:

1. Obtención de Cartografía Base y Material Satelital

- a. Herramienta: SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) en QGIS
- b. Materiales: Datos de cartografía base y material satelital

2. Corrección Atmosférica y Radiométrica

- a. Herramienta: SCP en QGIS 2.18.4
- b. Materiales: Imágenes satelitales, datos de corrección atmosférica y radiométrica.

3. Combinación de Bandas

- a. Herramienta: SCP en QGIS 2.18.4

4. Corrección Geométrica

- a. Herramienta: SCP en QGIS 2.18.4
- b. Materiales: Puntos de Control Terrestre (GCP)

5. Clasificación MLC Supervisada

- a. Herramienta: SCP en QGIS 2.18.4
- b. Materiales: Puntos de Entrenamiento

6. Evaluación Espectral

- a. Resultados: Mapas preliminares de CUS

7. Interpretación Visual Interdependiente

- a. Herramientas: QGIS 2.18.4, Google Earth Pro y SAS Planet

8. Limpieza, Suavizado y Corrección Topológica

- a. Resultados: Exactitud temática
- b. Materiales: Puntos de Verificación

9. Mapas Finales de CUS

- a. Herramientas: QGIS 2.18.4, Microsoft Office
- b. Resultados: Mapas finales de CUS

10. Análisis Espacial

- a. Herramientas: QGIS 2.18.4, Microsoft Office

11. Tasas de Cambio y Matrices de Transición

- a. Resultados: Mapas, figuras y tablas de CCUS (Cambios en Coberturas de Uso de Suelo)

12. Densidad de Kernel

- a. Herramienta: Heatmap Plugin en QGIS 2.18.4
- b. Resultados: Mapas y tablas de densidad de pérdida

Posteriormente, las bandas fueron combinadas para construir imágenes multiespectrales. Para la corrección geométrica se establecieron Puntos de Control Terrestre (GCP, por sus siglas en inglés) fotoidentificables dentro y fuera del área de estudio, verificados en campo y con apoyo de cartografía base. Se utilizó la transformación polinomial de segundo orden, donde se muestrearon los Niveles Digitales (ND) en una nueva posición mediante la interpolación del vecino más cercano, con un error cuadrático medio permisible $<0,15$ (Chuvienco, 2002).

3.2.3 Clasificación de cobertura y uso del suelo

Para el análisis y cuantificación de coberturas se identificó con base a la metodología de CORINE Land Cover adaptada para Perú (MINAM, 2015b).

Se usó el algoritmo de clasificación supervisada de máxima probabilidad (MLC, por sus siglas en inglés), incorporado en el SCP, donde las probabilidades de distribución de las clases son asumidas en forma de modelos normales multivariados (Richards & Jia, 2006), y es ampliamente utilizado en todo el mundo (Rawat & Kumar, 2015). La clasificación se realizó en base a las firmas espectrales de áreas de entrenamiento levantadas en campo. Se emplearon bandas correspondientes al espectro visible e infrarrojo, y se generaron composiciones en falso color, con el fin de resaltar

las clases de CUS para su identificación visual. Las distancias espectrales de las áreas de entrenamiento se valoraron mediante la Distancia Jeffries-Matusita (DJM), que permitió evaluar si diferentes clases son muy similares entre sí, puesto que, estos podrían causar errores de clasificación. La DJM es asintótica a 2 cuando las firmas son completamente diferentes, y tiende a 0 cuando las firmas son idénticas (Richards & Jia, 2006).

Además, para mejorar la clasificación digital de las imágenes se realizaron análisis visuales mediante el método de interpretación interdependiente de la FAO (2001). Este método se basa en el mapa de cobertura de fecha base (1987) en el que sirvió de referencia para interpretar las imágenes de las siguientes fechas (2001 y 2022) es decir, entre el año de referencia anterior y el actual (Martínez-Fernández et al., 2018, García-Álvarez y Camacho, 2017). Para ello se modificaron solo los polígonos donde se produjeron cambios de uso o errores de clasificación debido a la similitud espectral de las clases. Se tuvieron en cuenta características pictórico-morfológicas como forma, tamaño, tono y color, patrones, textura, posición geográfica y asociación para la identificación, y diferenciación visual de las diferentes clases de CUS (Vargas, 1992). Esta forma interdependiente de actualizar mapas nos permitió obtener mapas consistentes sin los falsos cambios que normalmente genera la clasificación independiente (Mas et al., 2017; Ramírez & Zubieta, 2005).

3.2.4 Evaluación de exactitud temática.

Se evaluó la exactitud de la clasificación de CUS en base a sitios de verificación, obtenidos de acuerdo con la fórmula establecida por Cochran (1977), que toma en cuenta las áreas relativas de cada una de las clases, los cuales fueron establecidos a través de un muestreo aleatorio sistemático no alineado estratificado (MINAM, 2014b).

Fórmula 1

Cochran (1977)

$$n = \frac{Z_{(\alpha/2)}^2 * p * q}{e^2}$$

La verificación de estos puntos se realizó mediante salidas a campo. Los puntos de difícil acceso se corroboraron con imágenes de referencia de alta resolución como RapidEye del año 2011 y 2012 (Nivel 3A) e imágenes de Google Earth y SAS Planet (Osorio et al., 2015; Peralta-Rivero et al., 2015).

Se elaboró una matriz de confusión (Chuvieco, 2002) , sobre la cual se calcularon métricas de precisión (error de omisión y comisión), métricas para evaluar la exactitud a nivel de clases (exactitud del usuario y del productor) (Story & Congalton, 1986; MINAM, 2014b), y la exactitud total observada, dividiendo la cantidad de puntos ubicados correctamente entre el total de puntos muestreados. El Índice Kappa (k , medida de la concordancia basada en las diferencias entre los datos de la clasificación y los de referencia; Congalton & Green, 2009) se obtuvo con la fórmula desarrollada por Congalton et al. (1983).

Fórmula 2

Índice Kappa

$$k = \frac{m \sum_{n=1}^r a_{nn} - \sum_{n=1}^r a_{n+} a_{+n}}{m^2 - \sum_{n=1}^r a_{n+} a_{+n}}$$

Donde r es el número de filas en la matriz; ann el número de observaciones en la fila n y columna n ; $an+$, $a+n$ son el total de marginal de fila n y columna n , respectivamente, y m es el total de observaciones. El interés de la matriz de confusión procede de su capacidad para plasmar conflictos entre clases (Chuvieco, 2002).

3.2.5 Intensidad espacio temporal de la tasa de cambios y matrices de transición

Se calculó la tasa de cambio (s) mediante la ecuación utilizada por la FAO (1996):

Formula 3

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

Donde, S_1 y S_2 son las superficies de CUS en la fecha t_1 y t_2 , respectivamente.

Un valor negativo de s indica una disminución de la CUS y, si s es mayor que cero, hay un aumento de esta.

En base a la superposición cartográfica de las clasificaciones de CUS, se construyeron matrices de tabulación cruzada que permitieron distinguir las transiciones de las diferentes clases evaluadas, detectar los cambios y hacer un análisis de los patrones reales que conllevan estos cambios (Pontius et al., 2004; Gallardo, 2017; Gutiérrez et al., 2016). Cada matriz contiene en el eje horizontal y vertical las clases de CUS para la fecha 1 y fecha 2, respectivamente. Las celdas en la diagonal representan el área de cada clase que no sufrió cambios durante el período evaluado, mientras que las restantes muestran el área que experimentó un cambio hacia otra clase.

Pontius et al. (2004), integraron este análisis con columnas y filas que representan Índices de Cambio. De esta manera tenemos: el intercambio (Int) entre clases, proceso en el que la pérdida de una clase en un lugar está acompañada por su ganancia simultánea en otra ubicación, calculándose como dos veces el valor mínimo de las ganancias y las pérdidas; donde la ganancia (G_j) se estima, como la diferencia del área total de la clase j en la fecha 2 ($P+j$) y la persistencia expresada en la diagonal de la matriz (P_{jj}), y la pérdida (L_i), es la diferencia entre el área total de una clase i en la fecha 1 (P_i+) y la persistencia. Para calcular el cambio total a nivel de clase (C_t) se

suman las ganancias (Gj) y las pérdidas (Li); mientras que, para el cambio neto, el cual indica un cambio definitivo, se representa como la diferencia entre el cambio total (Ct) y el intercambio (Int).

3.4. Diseño estadístico

La información de campo se tabuló en hojas de cálculo para su posterior procesamiento estadístico con estadística descriptiva. Las imágenes satelitales se procesaron mediante software especializado SIG como el QGis V 3.26.0, 2022.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Nuevas habilitaciones urbanas y su extensión durante los años 2000 al 2022 en la ciudad de Jaén.

La expansión urbana es un fenómeno clave en el desarrollo de las ciudades modernas, reflejando tanto el crecimiento poblacional como el económico. En la ciudad de Jaén, ubicada en el departamento de Cajamarca, Perú, el periodo comprendido entre los años 2000 y 2022 ha sido testigo de una transformación significativa del paisaje urbano. En este resultado se centra en el análisis de las nuevas habilitaciones urbanas y su extensión durante este periodo, proporcionando una visión detallada de cómo la urbanización ha modificado la estructura territorial de Jaén.

4.1.1 Nuevas habilitaciones urbanas

Tabla 2

Nuevas habilitaciones urbanas entre el año 2000 al 2022

Periodo	Cantidad de nuevas habilitaciones urbanas	Extensión (m ²)	Extensión (ha)
Periodo 1: 2000 - 2005	5	93694.48	9.37
Periodo 2 2006 - 2011	17	484259.65	48.43
Periodo 3 2012 - 2017	13	269794.33	26.98
Periodo 4 2018 - 2022	2	72346.32	7.23
Total	37	920095.79	92.01

Nota. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la Municipalidad Provincial de Jaén.

Se observa en la tabla 2 un aumento significativo en las habilitaciones urbanas durante el periodo 2006-2011, seguido por una reducción en los periodos subsiguientes. En total, se registraron 37 nuevas habilitaciones urbanas con una extensión de 920,095.79 m².

En el Periodo 1 (2000-2005) se muestra un crecimiento inicial con 5 habilitaciones urbanas y una extensión de 93,694.48 m², lo que indica un comienzo moderado de la expansión urbana.

Mientras que en el Periodo 2 (2006-2011) se observa un incremento significativo con 17 nuevas habilitaciones y una extensión de 484,259.65 m². Este aumento podría deberse a factores económicos y demográficos que impulsaron la urbanización. Para el Periodo 3 (2012-2017) la cantidad de habilitaciones disminuye a 13, con una extensión de 269,794.33 m². Aunque hay una reducción en comparación con el periodo anterior, la extensión sigue siendo considerable.

Sin embargo, para el Periodo 4 (2018-2022) hay una notable disminución en la cantidad de habilitaciones (2) y en la extensión (72,346.32 m²). Esto podría reflejar cambios en las políticas urbanas, restricciones de suelo, o una estabilización en la demanda de nuevas áreas urbanas.

En total, se registraron 37 nuevas habilitaciones urbanas con una extensión de 920,095.79 m² a lo largo de 22 años. Este crecimiento acumulativo destaca el proceso continuo de urbanización en Jaén, con variaciones significativas entre periodos.

Es importante considerar varios factores posibles que podrían haber influido en los patrones de expansión urbana observados en Jaén entre 2000 y 2022. En primer lugar, los factores económicos juegan un papel crucial. La expansión más pronunciada durante el periodo 2006-2011 podría estar vinculada a un auge económico o a políticas que incentivaron la construcción y el desarrollo urbano. Este crecimiento económico podría

haber aumentado la demanda de viviendas e infraestructuras, impulsando la transformación de áreas naturales y agrícolas en zonas urbanas.

Por otro lado, la drástica reducción en la tasa de habilitaciones urbanas durante el periodo 2018-2022 sugiere la posible implementación de regulaciones más estrictas sobre el uso del suelo o una desaceleración económica. Las políticas de zonificación más restrictivas podrían haber limitado la disponibilidad de terrenos para desarrollo urbano, mientras que una desaceleración económica podría haber reducido la inversión en proyectos de construcción. Ambos factores habrían contribuido a frenar la expansión urbana en estos años.

Además de los factores económicos y regulatorios, es fundamental considerar el impacto ambiental de la expansión urbana. La urbanización tiene implicaciones ambientales significativas, incluyendo la pérdida de áreas naturales y agrícolas. Estos cambios pueden resultar en la disminución de la biodiversidad, la alteración de los ecosistemas y la reducción de los servicios ecosistémicos. La reducción en la tasa de habilitación en los últimos años podría ser una respuesta a preocupaciones ambientales, indicando una mayor conciencia sobre la necesidad de proteger el entorno natural. Asimismo, podría reflejar la implementación de estrategias de desarrollo sostenible que buscan equilibrar el crecimiento urbano con la conservación del medio ambiente.

La evolución de la expansión urbana en Jaén está influenciada por una combinación de factores económicos, políticas regulatorias y consideraciones ambientales. Entender estas dinámicas es esencial para desarrollar políticas de planificación urbana que promuevan un desarrollo equilibrado y sostenible, protegiendo a la vez los recursos naturales y agrícolas que son vitales para la región.

El análisis de las habilitaciones urbanas en Jaén entre 2000 y 2022 muestra un crecimiento urbano fluctuante, con un pico significativo en el periodo 2006-2011 y una

marcada desaceleración en 2018-2022. Estos resultados reflejan la dinámica compleja de la urbanización, influenciada por factores económicos, políticas urbanas y consideraciones ambientales. Es crucial continuar monitoreando y gestionando este crecimiento para asegurar un desarrollo sostenible.

Comparando estos resultados con los hallazgos de Wang et al. (2020), quienes documentaron un crecimiento sostenido y acelerado en áreas urbanas debido a la rápida expansión de la economía y la población, se observa que el caso de Jaén sigue una tendencia diferente. En Jaén, el periodo de mayor expansión ocurrió entre 2006 y 2011, seguido de una desaceleración, posiblemente atribuida a la implementación de políticas regulatorias o cambios en las condiciones económicas locales.

Por otro lado, Xiao et al. (2020) destacan la importancia de las políticas de zonificación en la regulación del crecimiento urbano. La marcada reducción de las habilitaciones urbanas en Jaén después de 2011 puede ser una señal de que las políticas locales comenzaron a limitar el desarrollo descontrolado en este periodo, priorizando el ordenamiento territorial sobre la expansión desmesurada.

Finalmente, Yang et al. (2021) argumentan que el crecimiento urbano, cuando no es adecuadamente planificado, genera un impacto negativo significativo en los ecosistemas circundantes. Aunque Jaén muestra una disminución en la cantidad de habilitaciones urbanas recientes, es crucial considerar si esta reducción responde a políticas de conservación ambiental o a restricciones económicas. En ambos casos, estos resultados subrayan la necesidad de integrar enfoques sostenibles en la planificación urbana para garantizar un equilibrio entre el desarrollo y la preservación de los recursos naturales.

Los resultados de Jaén reflejan tanto períodos de expansión acelerada como de moderación, lo que resalta la influencia de factores económicos, sociales y regulatorios

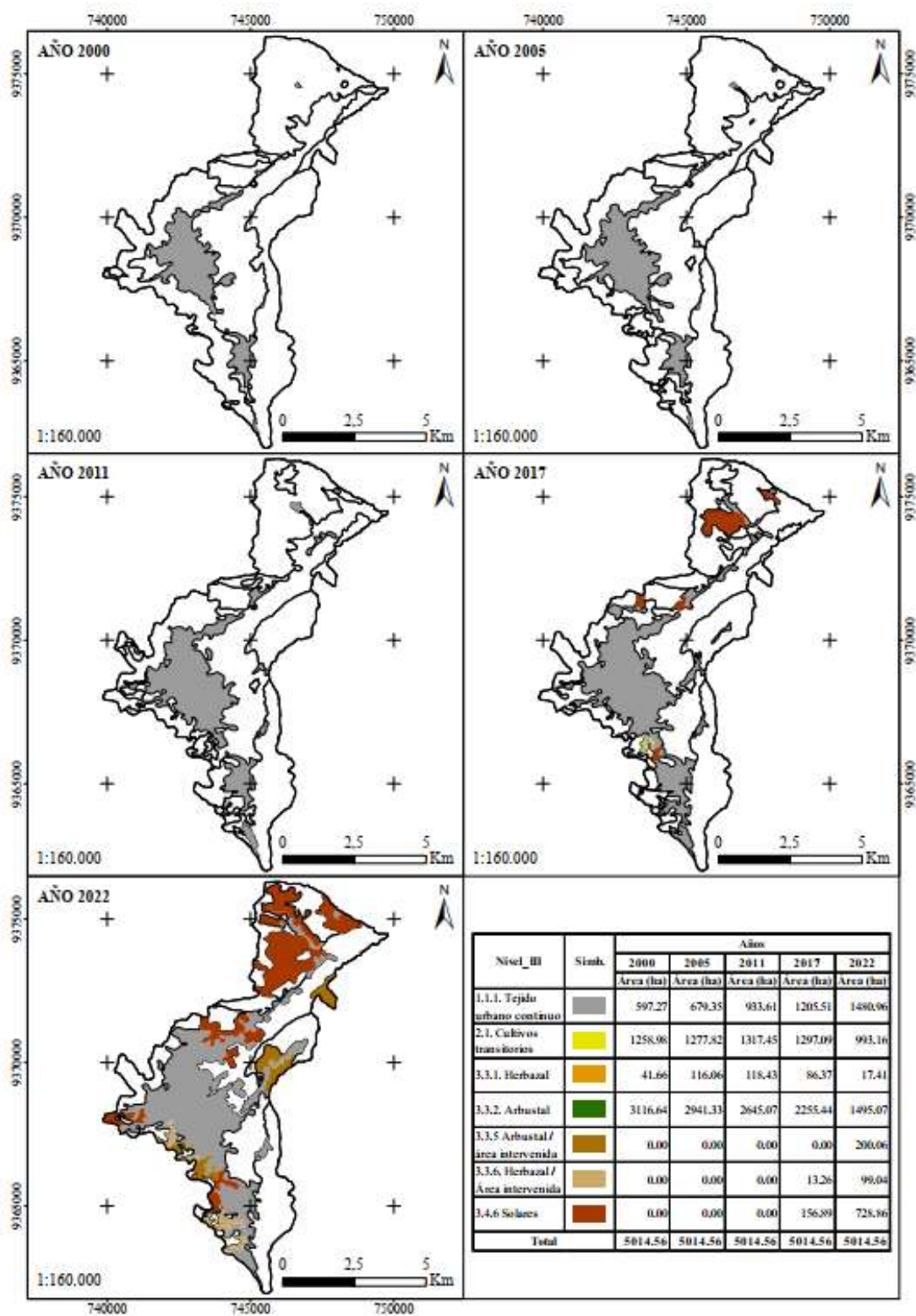
en la dinámica del crecimiento urbano. Estos hallazgos refuerzan la importancia de políticas sostenibles para gestionar el crecimiento urbano de manera que se minimicen los impactos ambientales y sociales adversos.

4.1.2 Extensión de áreas urbanas en Jaén

La ciudad de Jaén, ubicada en el departamento de Cajamarca, Perú, ha experimentado un notable crecimiento urbano en las últimas dos décadas. Este crecimiento ha transformado significativamente el tejido urbano y las coberturas de uso del suelo de la región. A continuación, se presenta una descripción detallada de estos cambios, sustentada en bases teóricas relevantes: Año 2000: 597.27 ha, Año 2005: 679.35 ha, Año 2011: 933.61 ha, Año 2017: 1205.51 ha, Año 2022: 1480.96 ha. Este aumento en el área urbana refleja la presión demográfica y económica en Jaén, que ha llevado a una mayor demanda de terrenos para vivienda, comercio e infraestructura. Para mejor apreciación mostramos en la figura 3 el tejido urbano del 2000 al 2022.

Figura 3

Tejido urbano durante el periodo del año 2000 - 2022



El crecimiento del tejido urbano continuo en Jaén entre 2000 y 2022 muestra una expansión significativa. El área ocupada por esta categoría aumentó de 597.27 ha en el año 2000 a 1480.96 ha en 2022, lo que representa un crecimiento de más del doble durante el periodo analizado. Este incremento refleja un proceso de urbanización sostenido, impulsado por factores como el crecimiento demográfico, la demanda de vivienda y la expansión económica.

El crecimiento del tejido urbano ha tenido implicaciones directas en las otras coberturas de uso del suelo. Entre las más afectadas se encuentran los cultivos transitorios, el herbazal y el arbustal.

La disminución de áreas de cultivo transitorio para el 2022 fue 993.16 ha. Esto significa que de las 1317 ha que se destinaban en el 2011, se perdieron 993.16 ha. Esto muestra que la expansión urbana ha desplazado parte de las áreas agrícolas.

En cuanto a herbazal disminuyó drásticamente de 118.43 ha en 2011 a 17.41 ha en 2022. De manera similar, el arbustal pasó de 3116.64 ha en 2000 a 1495.07 ha en 2022. Estos datos indican que las áreas naturales han sido transformadas en áreas urbanas.

En relación con los antecedentes proporcionados por Wang et al. (2020), el crecimiento acelerado del tejido urbano continuo en Jaén coincide con los patrones globales observados en ciudades de países en desarrollo, donde el aumento de la población y las inversiones económicas son factores clave en la expansión urbana. Sin embargo, mientras que en regiones como la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao el crecimiento urbano ha sido intensivo y acompañado por una industrialización acelerada, en Jaén la expansión parece responder principalmente a la necesidad de satisfacer la demanda habitacional y de servicios básicos.

Por otro lado, Yang et al. (2021) destacan que la rápida urbanización, cuando no se planifica adecuadamente, puede llevar a la pérdida de cobertura vegetal y a la

fragmentación de hábitats naturales. En Jaén, el aumento de áreas urbanas, particularmente después de 2011, coincide con una reducción drástica del arbustal (que pasó de 3116.64 ha en 2000 a 1495.07 ha en 2022) y de los cultivos transitorios (de 1258.98 ha en 2000 a 993.16 ha en 2022). Estos datos sugieren un impacto directo de la expansión urbana sobre los ecosistemas periurbanos.

Finalmente, Xiao et al. (2020) subrayan la importancia de políticas de zonificación para gestionar la expansión urbana y minimizar los impactos negativos en el entorno natural. En Jaén, el crecimiento relativamente controlado del tejido urbano continuo podría indicar la existencia de políticas locales que han moderado la expansión descontrolada. Sin embargo, la pérdida progresiva de áreas naturales y agrícolas refleja la necesidad de fortalecer dichas políticas para garantizar un equilibrio entre el crecimiento urbano y la conservación ambiental.

La expansión del tejido urbano continuo en Jaén es un reflejo de los patrones de urbanización observados en otras regiones de países en desarrollo, con impactos significativos en los ecosistemas y el uso del suelo. La comparación con estudios previos resalta la importancia de implementar estrategias de desarrollo sostenible y planificación urbana que equilibren la necesidad de crecimiento con la protección del entorno natural. Para lograrlo, es crucial fortalecer las políticas de zonificación y fomentar una urbanización que minimice la fragmentación de hábitats y la pérdida de biodiversidad.

Entre 2000 y 2022, el tejido urbano continuo de Jaén pasó de ~592,7 ha a ~1 206,5 ha (+613,8 ha), mientras que las habilitaciones formales sumaron 92,01 ha. La cartografía multitemporal muestra frentes recientes hacia el norte–noreste y occidente, sobre planicies de inundación, abanicos aluviales y bordes de valle de baja pendiente, próximos a corredores de drenaje vinculados a las quebradas Amojú, Shumba,

Tumbillán y al sistema Chamaya–Huancabamba. Esta orientación espacial coincide con la cronología de inundaciones reportadas por SENAMHI e INDECI, y con evaluaciones de CENEPRED y delimitaciones hidrológicas de la ANA: anegamientos en el centro urbano y Bellavista (2005–2006); daños y colapsos puntuales de viviendas (2006–2008); desbordes de la quebrada Amojú en marzo y mayo de 2014 con afectación en San Camilo y Las Mercedes (láminas cercanas a 1 m y anegamientos ~100 m desde la margen); crecidas del río Chamaya en ene–mar 2015 (27 viviendas afectadas y ~71 ha de cultivos); impactos del Niño Costero 2017; lluvias torrenciales de oct–nov 2021 (≈ 72 mm/24 h) con anegamientos en el centro y alrededores del Hospital General; e inundaciones y erosión fluvial en ene–mar 2022 (sector Tumi y vías urbanas). En conjunto, los hallazgos indican que una fracción del crecimiento urbano reciente no solo amplió el contorno de la ciudad, sino que lo hizo sobre áreas con función hidrológica donde la susceptibilidad a inundaciones es consistente con las evidencias institucionales citadas.

4.2. Tasa de crecimiento de las nuevas habilitaciones urbanas de la ciudad de Jaén

La tasa de crecimiento del tejido urbano en Jaén se determinó mediante la relación entre la superficie urbana identificada en cada periodo y el tiempo transcurrido entre mediciones sucesivas. Los resultados reflejan el ritmo de expansión urbana en los cuatro intervalos de estudio.

Tabla 3

Tasa de crecimiento anual del tejido urbano de Jaén entre 2000 al 2022

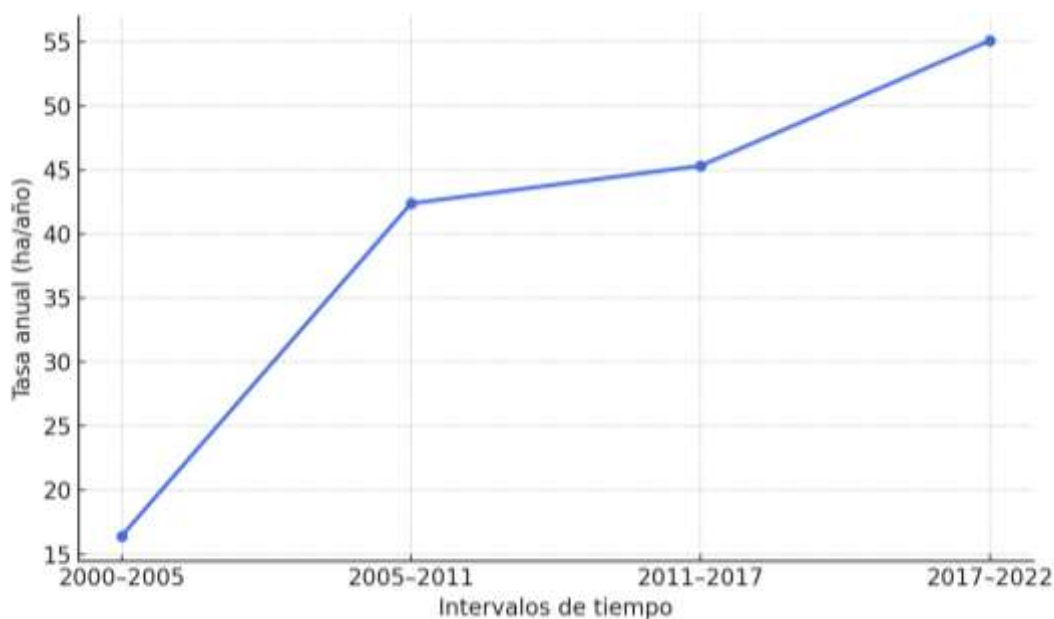
Intervalo	Años	Tasa de crecimiento anual	
1	2000-2005:	164,160 m ² /año	= 16.42 ha por año
2	2005-2011	423,767 m ² /año	= 42.38 ha por año
3	2011-2017	453,167 m ² /año	= 45.32 ha por año
4	2017-2022	550,900 m ² /año	= 55.09 ha por año

Nota. Elaboración propia en base al análisis de imágenes satelitales Landsat 4–5 y Landsat 8–9 (USGS, 2000–2022).

Los resultados presentados en la Tabla 3 evidencian que la expansión urbana de Jaén ha seguido una tendencia creciente a lo largo de los últimos 22 años. Si bien en el primer intervalo (2000–2005) la tasa anual de crecimiento fue relativamente moderada (16,42 ha por año), en los periodos siguientes se observa un incremento sostenido, alcanzando su valor más alto en el último intervalo (2017–2022) con 55,09 ha por año. Este comportamiento confirma el dinamismo del proceso de urbanización en la ciudad y permite contextualizar el análisis detallado de cada periodo.

Figura 4

Evolución de la tasa de crecimiento anual del tejido urbano en Jaén (2000–2022)



Nota. Elaboración propia en base al análisis de imágenes satelitales Landsat 4–5, 8 y 9 (USGS, 2000–2022).

La Figura 4 se muestra la evolución de la tasa de crecimiento anual del tejido urbano en Jaén entre los años 2000 y 2022. Se aprecia un comportamiento ascendente, con un crecimiento relativamente bajo en el primer intervalo (2000–2005) y un aumento significativo a partir del periodo 2005–2011. Posteriormente, el ritmo de expansión se mantiene elevado y alcanza su valor máximo en el intervalo más reciente (2017–2022), con una tasa de 55,09 ha por año. Estos resultados evidencian la consolidación del proceso de urbanización y permiten contextualizar los impactos ambientales y territoriales asociados a la expansión urbana.

A partir de los resultados generales presentados, a continuación, se expone de manera detallada la dinámica de crecimiento urbano correspondiente a cada uno de los cuatro periodos analizados. Este desglose permite identificar no solo las variaciones en la magnitud de la expansión, sino también los factores contextuales que explican las

diferencias en el ritmo de crecimiento del tejido urbano de Jaén.

4.2.1 Tasa de crecimiento en el periodo 2000-2005: 164,160 m² año⁻¹

Durante este primer intervalo, la expansión urbana de Jaén presentó una tasa de crecimiento de 164,160 m² por año equivalente a 16,42 ha por año, lo que refleja un ritmo de urbanización relativamente moderado. Este comportamiento inicial se asocia a políticas urbanas iniciales, limitaciones en infraestructura, menor presión demográfica. Este crecimiento moderado también puede reflejar una fase inicial de expansión urbana donde se empiezan a desarrollar las primeras áreas periféricas.

En este periodo de despegue moderado, el contorno urbano crece, pero aún predomina la consolidación del núcleo y la expansión contigua. A nivel país es un periodo de reactivación tras fines de los 90; en Jaén, la intermediación comercial aún es menor comparada con el ciclo posterior. Existe disponibilidad de terrenos urbanizados en las áreas periféricas, pero la demanda real (determinada por ingresos, acceso a crédito y migración neta) aún no ejerce una presión significativa.

4.2.2 Tasa de crecimiento para el periodo 2005-2011: 423,767 m² año⁻¹

En este periodo se observa un incremento significativo en la tasa de crecimiento urbano, alcanzando 42,38 ha por año equivalente 423,767 m²/año. Este aumento evidencia una intensificación del proceso de urbanización, influenciado por factores como el crecimiento poblacional, generando una mayor demanda de viviendas y servicios, lo que a su vez impulsa la expansión urbana.

En este periodo se observa el gran quiebre, el cual coincide con el boom económico nacional y con ciclos favorables del café (picos de precio internacional en 2008 y 2010–2011), lo que inyecta liquidez en Jaén y su hinterland cafetero (San Ignacio,

Utcubamba, Bagua). Más comercio, servicios y construcción empujan la demanda de suelo urbano. En paralelo, mejoras graduales de conectividad vial y de servicios básicos hacen más rentable urbanizar. Según la cartografía, en este periodo el tejido urbano se expande con mayor continuidad hacia las zonas llanas del valle.

Por otro lado, las políticas de vivienda también pueden haber desempeñado un rol importante en este aumento. Es posible que se hayan implementado políticas gubernamentales que incentivaron la construcción de nuevas urbanizaciones, proporcionando incentivos fiscales o subsidios para el desarrollo de proyectos de vivienda. Estas políticas habrían contribuido a un crecimiento más rápido y sostenido del área urbana.

Como resultado de estos factores, esta fase podría haber implicado una expansión más agresiva en áreas previamente rurales o menos desarrolladas, transformándolas en zonas urbanas. Este fenómeno no solo refleja la capacidad del crecimiento económico y demográfico para impulsar la urbanización, sino que también destaca la importancia de las políticas gubernamentales en la configuración del paisaje urbano.

4.2.3 Tasa de crecimiento para el periodo 2011-2017: 453,167 m² año⁻¹

La tasa de crecimiento se incrementa aún más entre 2011 y 2017, con un promedio de 45,32 ha por año. Este comportamiento confirma la continuidad de la tendencia expansiva.

Este periodo parece consolidar el patrón de expansión observado anteriormente. La continuación de este ritmo de crecimiento indica varios factores importantes. En primer lugar, la sostenibilidad del crecimiento económico es un aspecto crucial. La economía local probablemente continuó creciendo, lo que apoyó el desarrollo urbano y permitió una mayor inversión en infraestructura y servicios.

Durante este periodo, la tasa de crecimiento urbano en Jaén se mantuvo elevada a pesar de la crisis de la roya del café (2013–2014), que redujo rendimientos y precios a nivel local. Este comportamiento puede atribuirse, al menos, a dos mecanismos complementarios: (i) inercia urbana, dado que numerosos proyectos iniciados durante el pico anterior continuaron su ejecución (habilitaciones, lotizaciones y procesos de consolidación interna), y (ii) cambio en el patrón espacial, con una mayor dispersión perimetral —especialmente hacia los sectores norte-noreste y occidentales— que combinó expansión formal e informal y que la clasificación multitemporal Landsat registra como incremento efectivo del tejido urbano. En conjunto, estos factores sostuvieron el impulso expansivo de este periodo.

Este periodo muestra que Jaén está experimentando una urbanización rápida y sostenida, con posibles implicaciones en la planificación urbana y la sostenibilidad ambiental. La continua expansión urbana plantea desafíos para los planificadores urbanos, que deben equilibrar el crecimiento económico con la conservación del medio ambiente y la sostenibilidad a largo plazo.

4.2.4 Tasa de crecimiento para el periodo 2017-2022: 550,900 m² año⁻¹

Este último periodo de la investigación muestra la tasa de crecimiento más alta de todo el periodo de análisis, con 55,09 55,09 ha·año⁻¹. Este resultado evidencia la consolidación del proceso de expansión urbana en Jaén. Este aumento drástico puede ser resultado de varios factores importantes. En primer lugar, la expansión continua juega un papel crucial, ya que la tendencia de crecimiento se mantiene y posiblemente se acelera debido a una demanda constante o creciente de espacio urbano. Además, los grandes proyectos de infraestructura pueden haber impulsado significativamente la

expansión urbana, atrayendo más población y actividades económicas a la ciudad. La mayor inversión, tanto pública como privada, en el desarrollo urbano también contribuye a este notable incremento en la tasa de crecimiento anual.

A pesar de la pandemia (2020–2021), la tasa de crecimiento alcanzó su máximo histórico ($55,09 \text{ ha}\cdot\text{año}^{-1}$). Este repunte es consistente con tres vectores propios de ciudades intermedias: (i) la reconstrucción y relocalizaciones posteriores al Niño Costero 2017, que promovieron obras y ocupación en cotas relativamente más altas y bordes accesibles; (ii) la migración de retorno y reconfiguración residencial durante y después de la pandemia, con hogares que dejaron grandes urbes en busca de suelo más asequible en Jaén, dinamizando las lotizaciones periurbanas; y (iii) un segundo ciclo favorable del café (2021–2022), que elevó ingresos de productores y comercializadores e impulsó inversión en vivienda y comercio locales. La cartografía multitemporal del estudio refleja, en consecuencia, un crecimiento más rápido y periférico, con abundante presencia de solares y áreas intervenidas en los márgenes urbanos, las cuales son etapas previas a su plena consolidación.

Asimismo, la presión sobre los recursos naturales aumentará considerablemente. La demanda sobre recursos como agua y energía incrementará, requiriendo estrategias eficaces para su gestión. Este panorama destaca la necesidad de abordar de manera integral y sostenible los desafíos que plantea la rápida expansión urbana, asegurando un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación del medio ambiente.

Si bien las cantidades de nuevas urbanizaciones para este periodo es menor referente a los periodos anteriores, pero la tasa de creciendo de area urbana o tejido urbano sigue en aumento, esta relación inversa puede ser el resultado de la implementación de políticas rígidas para la formalización de nuestras urbanizaciones y por ende está avanzando el informalismo.

La tendencia ascendente en las tasas de crecimiento anual del tejido urbano en Jaén desde 2000 hasta 2022 refleja un proceso de urbanización acelerada. Este crecimiento presenta tanto oportunidades como desafíos para la ciudad. Por un lado, puede impulsar el desarrollo económico y mejorar la infraestructura. Por otro lado, plantea riesgos para la sostenibilidad ambiental y la gestión eficiente de los recursos.

El análisis de la tasa de crecimiento del tejido urbano en Jaén desde el año 2000 hasta el 2022 revela una tendencia creciente en la expansión urbana, lo cual coincide con estudios realizados en otras ciudades y regiones que experimentan procesos similares de urbanización acelerada.

Civeira y Rositano (2020) destacan que, en América Latina, la urbanización a menudo ocurre a expensas de áreas agrícolas y bosques, reduciendo la biodiversidad y alterando los ecosistemas locales. Los resultados de Jaén son coherentes con esta tendencia, subrayando la necesidad de políticas urbanas sostenibles que integren la conservación ambiental. En conclusión, el crecimiento urbano en Jaén no solo refleja tendencias globales de urbanización, sino que también pone de manifiesto la importancia de implementar estrategias de desarrollo sostenible para mitigar los impactos ambientales negativos asociados con la expansión urbana.

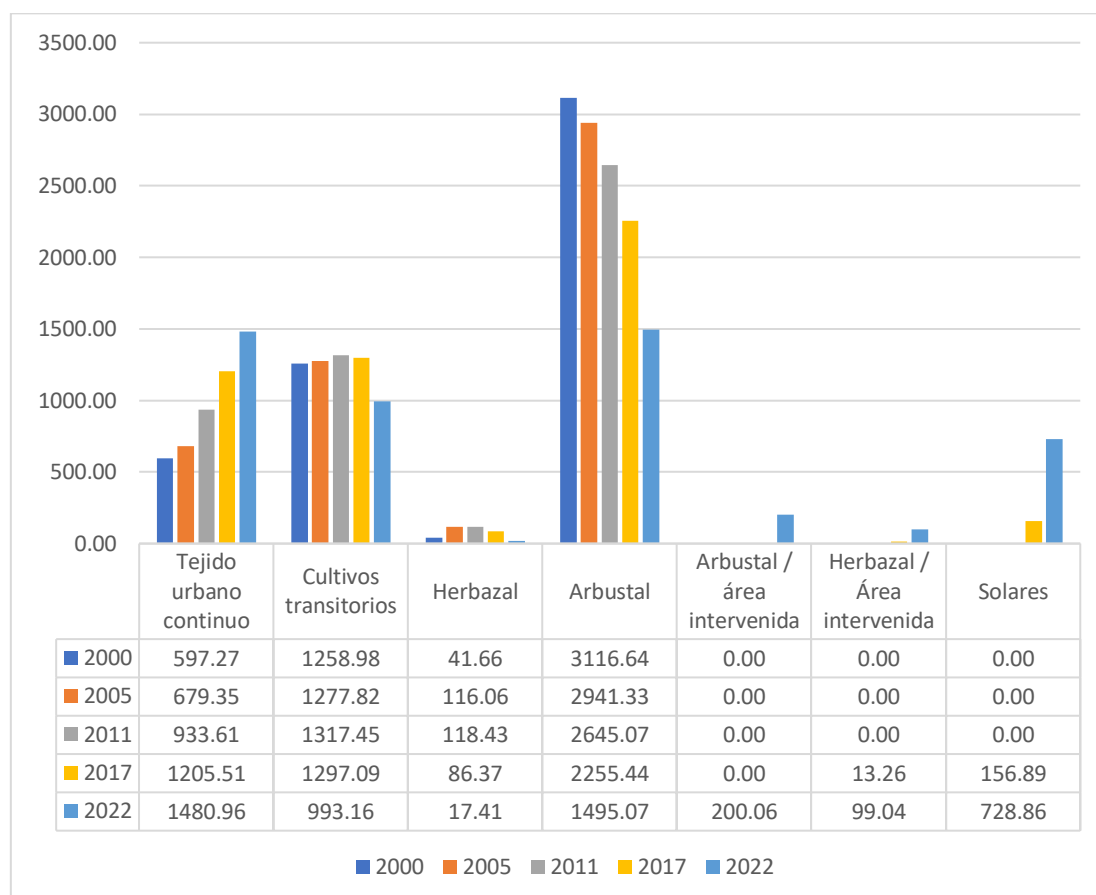
El análisis del crecimiento urbano en Jaén y su comparación con investigaciones de otros autores resaltan tanto las oportunidades como los desafíos asociados con la rápida urbanización. Para abordar estos desafíos, es esencial adoptar enfoques de planificación urbana que integren consideraciones ambientales y promuevan un desarrollo sostenible. Esto ayudará a asegurar que Jaén pueda crecer de manera que beneficie tanto a sus habitantes como a su entorno natural.

4.3. Descripción de ecosistemas periurbanos en tipos de coberturas de uso de suelo que han sido afectados por la expansión urbana en la ciudad de Jaén.

La expansión urbana en la ciudad de Jaén entre los años 2000 y 2022 ha tenido un impacto significativo en los ecosistemas periurbanos debido a la magnitud de los cambios en el uso del suelo y sus consecuencias ambientales y sociales. Uno de los principales indicadores de este impacto es la pérdida de cobertura vegetal y biodiversidad. Por ejemplo, el arbustal, que en el año 2000 ocupaba 3116.64 hectáreas, se redujo a 1495.07 hectáreas en 2022, lo que representa una pérdida superior al 50%. Este cambio afecta directamente a los hábitats de flora y fauna, reduciendo la resiliencia ecológica de la región.

Figura 5

Cobertura vegetal y uso del suelo del año 2000 al 2022



Así mismo, la transformación de tierras agrícolas es otro aspecto destacado. Los cultivos transitorios, que desempeñaban un papel importante en la sostenibilidad alimentaria y en la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, disminuyeron de 1258.98 hectáreas en 2000 a 993.16 hectáreas en 2022. Esta reducción no solo afecta la producción agrícola, sino también los servicios ambientales esenciales para el equilibrio del ecosistema.

Por otro lado, el crecimiento del tejido urbano continuo es un reflejo claro de la urbanización acelerada. Este tipo de uso del suelo pasó de 597.27 hectáreas en 2000 a

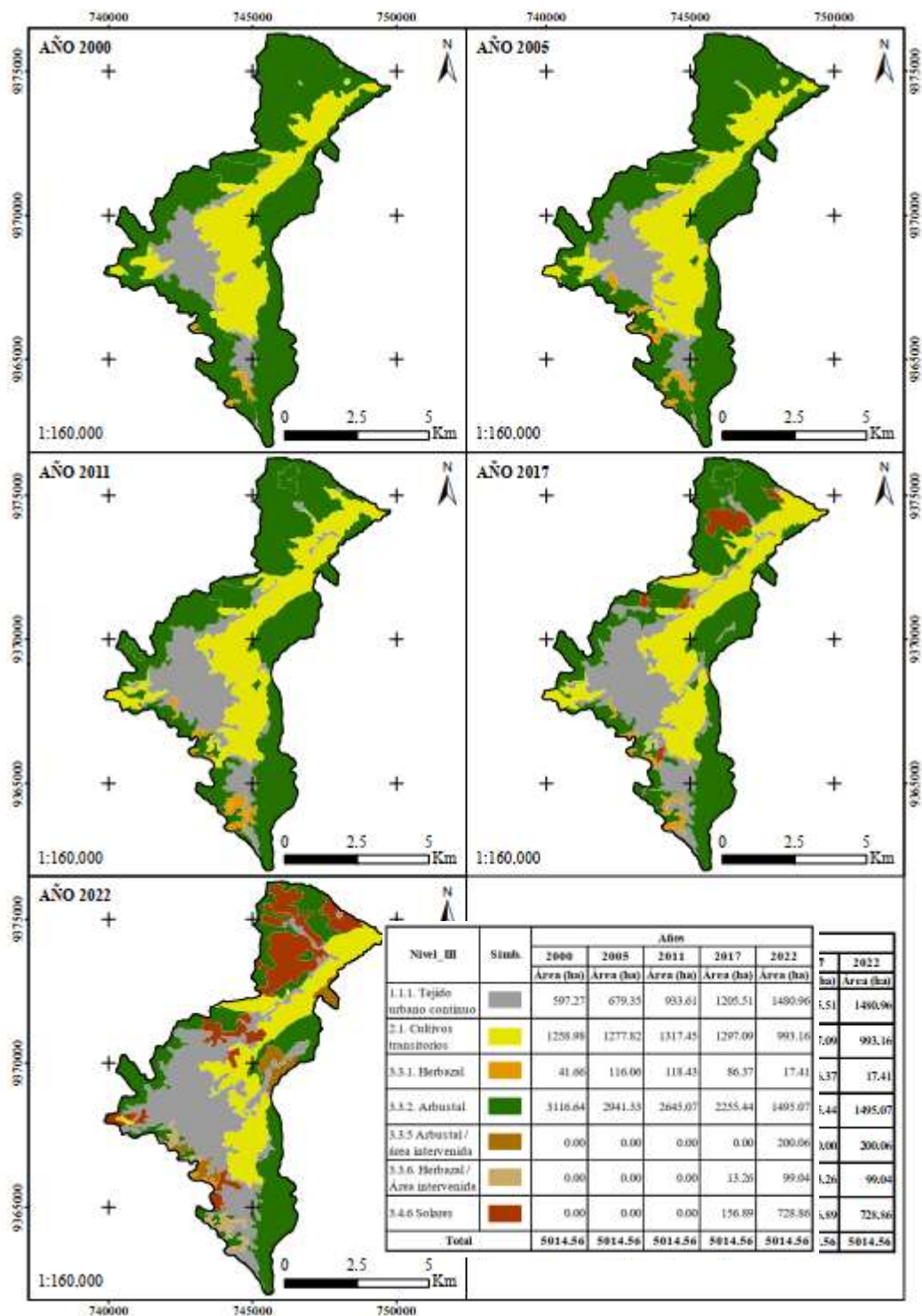
1480.96 hectáreas en 2022, lo que representa un aumento de más del 148%. Este incremento implica la impermeabilización del terreno, lo que afecta la infiltración de agua, aumenta la escorrentía superficial y eleva el riesgo de inundaciones en las zonas urbanas y periurbanas.

Asimismo, la fragmentación de los hábitats naturales se ha convertido en una de las consecuencias más preocupantes. El avance del tejido urbano ha reducido la conectividad entre los ecosistemas, dificultando procesos ecológicos esenciales como el desplazamiento de especies y la polinización. Esta fragmentación también compromete la regeneración natural de las áreas afectadas y la funcionalidad general de los ecosistemas.

La presión sobre los recursos naturales es otro impacto significativo. La expansión urbana incrementa la demanda de agua, energía y suelo, lo que genera conflictos entre el uso agrícola, la conservación ambiental y el desarrollo urbano. Además, la transformación del uso del suelo contribuye al efecto isla de calor, alterando el microclima local y generando condiciones menos favorables para los ecosistemas y los habitantes de Jaén.

Figura 5

Cobertura vegetal y uso del suelo del año 2000 al 2022



La expansión urbana en Jaén ha transformado significativamente diversos tipos de coberturas de uso del suelo. A continuación, se describen los tipos de coberturas encontrados en los 22 años estudiados, sustentados por citas bibliográficas de estudios y artículos académicos relevantes:

4.3.1. *Tejido Urbano Continuo*

El tejido urbano continuo son áreas densamente construidas que abarcan infraestructuras residenciales, comerciales e industriales. Estas zonas representan los espacios más desarrollados dentro de la planificación urbana y son un indicador clave del crecimiento urbano en una ciudad. En el caso de Jaén, la evolución de esta categoría durante el periodo 2000-2022 muestra un crecimiento significativo. La superficie ocupada por el tejido urbano continuo pasó de 597.27 ha en el año 2000 a 1480.96 ha en 2022, evidenciando un aumento de más del doble en poco más de dos décadas. Este crecimiento refleja la expansión urbana asociada al incremento poblacional, la demanda de vivienda y el desarrollo de actividades económicas en la región.

Figura 6

Infraestructura habitacional y educativa en el area urbana



Este crecimiento es consistente con las tendencias observadas en otras ciudades de países en desarrollo, donde el incremento demográfico, las políticas de vivienda y el desarrollo económico impulsan la urbanización. Según Wang et al. (2020) identifican un crecimiento urbano acelerado en la región de la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao, atribuible al rápido desarrollo económico e industrial. Aunque Jaén no comparte el mismo nivel de industrialización, su crecimiento urbano puede interpretarse como un reflejo de una urbanización moderada impulsada por la demanda de vivienda e infraestructura básica. En ambos casos, el crecimiento del tejido urbano está vinculado a un aumento en la densidad de construcción y al uso intensivo del suelo.

Asi mismo Yang et al. (2021) destacan los impactos ambientales asociados con la urbanización rápida y no planificada, como la pérdida de cobertura vegetal y la fragmentación de hábitats. En Jaén, el crecimiento del tejido urbano continuo ha implicado la reducción de otras categorías de uso del suelo, como arbustales y cultivos transitorios, lo que sugiere una presión directa sobre los ecosistemas periurbanos.

Finalmente, Xiao et al. (2020) subrayan la importancia de las políticas de zonificación para manejar el crecimiento urbano de manera sostenible. En el caso de Jaén, el aumento sostenido del tejido urbano continuo podría indicar la falta de políticas estrictas que limiten el crecimiento en ciertas áreas o prioricen el uso del suelo para actividades agrícolas y de conservación. Este resultado pone de manifiesto la necesidad de fortalecer las estrategias de ordenamiento territorial para equilibrar el desarrollo urbano y la protección del medio ambiente.

4.3.2 Cultivos Transitorios

Zonas dedicadas a cultivos de ciclo corto, como granos y vegetales, que se cosechan una o dos veces al año. Tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo. Para el caso de la zona en estudio el cultivo transitorio predominante es el arroz. La superficie de cultivos transitorios en Jaén disminuyó de 1317.45 ha en 2011 a 993.16 ha en 2022.

Figura 7

Áreas de cultivos permanente y transitorios



La disminución de la superficie de cultivos transitorios en Jaén, de 1317.45 ha en 2011 a 993.16 ha en 2022, refleja un proceso evidente de transformación del uso del suelo, probablemente asociado con la expansión urbana y las dinámicas socioeconómicas de la región. Este resultado destaca cómo la urbanización está ejerciendo una presión significativa sobre las áreas agrícolas, transformando tierras productivas en zonas urbanizadas, lo que coincide con los hallazgos de diversos estudios previos.

Zhang et al. (2024) destacaron que, en China, las políticas para proteger tierras agrícolas han sido esenciales para mitigar los efectos de la urbanización, aunque con limitaciones que afectan a los servicios ecosistémicos. En contraste, en Jaén parece haber una falta de estrategias robustas de ordenamiento territorial que prioricen la conservación de áreas agrícolas frente a la expansión urbana. Esto subraya la necesidad de implementar políticas que equilibren el desarrollo urbano y la protección de tierras agrícolas estratégicas para mantener la sostenibilidad ambiental y económica.

Así mismo Mohammadyari et al. (2023) analizaron cómo la urbanización altera los servicios ecosistémicos, especialmente en áreas donde predominan cultivos agrícolas. Los autores concluyeron que la pérdida de cultivos afecta no solo la producción alimentaria, sino también la regulación hídrica y la captura de carbono. En Jaén, la disminución de las áreas de cultivo transitorio no solo tiene implicaciones productivas, sino que también podría afectar la dinámica del ciclo hidrológico en una región que depende del arroz como cultivo clave, el cual es altamente demandante de agua.

Wang et al. (2020) en su investigación Impactos de la Urbanización en las Áreas Agrícolas identificaron que la urbanización en áreas periurbanas de Asia provocó una conversión masiva de tierras agrícolas en zonas residenciales e industriales, reduciendo la capacidad de las ciudades para garantizar su autosuficiencia alimentaria. En Jaén, la disminución de los cultivos transitorios, particularmente del arroz, que es un cultivo esencial para la región, puede indicar un proceso similar, donde las áreas urbanas avanzan sobre terrenos agrícolas, comprometiendo tanto la producción local como la seguridad alimentaria.

La disminución de cultivos transitorios en Jaén evidencia un patrón de urbanización que pone en riesgo la producción agrícola y los servicios ecosistémicos asociados. Comparando estos resultados con antecedentes como los de Wang et al. (2020), Mohammadyari et al. (2023), y Zhang et al. (2024), se resalta la importancia de políticas integradas que preserven las áreas agrícolas y promuevan un desarrollo urbano sostenible. Este enfoque es crucial para garantizar un equilibrio entre el crecimiento urbano y la conservación de recursos esenciales, como el suelo agrícola y el agua, que son vitales para la región.

4.3.3. *Herbazal*

Áreas dominadas por vegetación herbácea, como pastizales y praderas. Esta cobertura está constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos, los cuales forman una cobertura densa(>70% de ocupación) o abierta (30% - 70% de ocupación). Una hierba es una planta no lignificada o apenas lignificada, de manera que tiene consistencia blanda en todos sus órganos, tanto subterráneos como epigeos (Font Quer, 1982). Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o sus intervenciones han sido selectivas y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IGAC, 1999). La evolución de esta superficie en Jaén creció de 41.66 ha en 2000 a 118.43 ha en 2011, para luego reducirse drásticamente a 17.41 ha en 2022.

Figura 8

Área se pastizales en la zona de estudio



La evolución de las áreas de herbazal en Jaén, que crecieron de 41.66 ha en 2000 a 118.43 ha en 2011, seguida de una drástica reducción a 17.41 ha en 2022, refleja dinámicas complejas en el uso del suelo. Este patrón puede estar influenciado por una combinación de expansión urbana, cambios en las prácticas de manejo del territorio y presiones económicas y ambientales. Los resultados encontrados tienen correlaciones claras con estudios previos que examinan los impactos de la urbanización en áreas vegetadas.

Según Mohammadyari et al. (2023), las áreas de herbazal desempeñan un papel crucial en la regulación hídrica, la captura de carbono y la provisión de hábitats para especies nativas. La reducción del herbazal en Jaén pone en riesgo estos servicios ecosistémicos, particularmente en una región donde la vegetación natural puede ser clave para amortiguar los impactos del cambio climático y la variabilidad hídrica.

Asi mismo Yang et al. (2021) señalaron que la pérdida de áreas naturales, como los herbazales, está directamente asociada con la fragmentación del hábitat y la disminución de la biodiversidad. En Jaén, la reducción del herbazal probablemente ha resultado en la pérdida de conectividad ecológica, afectando las interacciones entre especies y limitando su capacidad para adaptarse a cambios ambientales. Esto pone de manifiesto la necesidad de integrar estrategias de conservación en la planificación territorial.

Tambien Wang et al. (2020) destacaron que la urbanización rápida en áreas periurbanas conduce a la conversión de coberturas vegetales como pastizales y herbazales en zonas urbanas e industriales. En Jaén, el aumento inicial del área de herbazal hasta 2011 podría estar relacionado con la expansión de zonas de vegetación natural debido a la reducción de actividades agrícolas intensivas. Sin embargo, la disminución significativa después de este periodo refleja una presión urbana que probablemente absorbió estas áreas para usos residenciales o comerciales.

Finalmente, Xiao et al. (2020) enfatizan que las políticas de conservación deben priorizar la protección de áreas vegetadas frente a la expansión urbana. En Jaén, la reducción de herbazales evidencia una falta de políticas robustas que limiten la conversión de estas áreas en terrenos urbanizados. La implementación de políticas de zonificación estrictas y la restauración de áreas degradadas podrían ser estrategias efectivas para mitigar estos impactos.

La evolución de las áreas de herbazal en Jaén refleja las tensiones entre la expansión urbana y la conservación de espacios naturales. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Mohammadyari et al. (2023), Xiao et al. (2020) y Yang et al. (2021), se evidencia que la urbanización no planificada pone en riesgo servicios ecosistémicos clave y la biodiversidad local. Es imperativo que las estrategias

de planificación urbana en Jaén incluyan la preservación de áreas de herbazal para garantizar la sostenibilidad ambiental y mejorar la resiliencia ecológica frente al crecimiento urbano.

4.3.4. Arbustal

Comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 2, fuertemente ramificado en la base y sin copa definida (FAO, 2001).

En la zona de estudio se ha logrado identificar especies predominantes como son: *Tetrasida chachapoyensis*, *Croton turrifer*, *Ceiba insignis*, *Leucaena thyiodes*, *Cordia iguaguana*, *Capparidastrium scabrida*, *Cyathostegia matewsii*. Estas especies han sido identificadas por el especialista Dr. José Luis Marcelo Peña, responsable del Laboratorio de plantas vasculares y herbario ISV de la Universidad Nacional de Jaén.

Figura 8

Diversidad de especies arbustivas en la zona de estudio



El arbustal en Jaén ha experimentado una reducción significativa, pasando de 3116.64 ha en el año 2000 a 1495.07 ha en 2022, lo que refleja una pérdida de más del 50% de su cobertura en dos décadas. Este cambio evidencia una transformación sustancial en el uso del suelo, impulsada principalmente por la expansión urbana y posiblemente por prácticas agrícolas intensivas. Estos resultados están en línea con las tendencias observadas en otros contextos, donde la urbanización afecta negativamente la cobertura vegetal.

Mohammadyari et al. (2023) enfatizaron que los arbustales desempeñan un papel crucial en la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación del suelo. La disminución de arbustales en Jaén implica una reducción significativa en estos servicios ecosistémicos esenciales, lo que podría exacerbar problemas como la erosión del suelo, la pérdida de fertilidad y la reducción en la capacidad de los ecosistemas para mitigar el cambio climático. Asimismo, Zhang et al. (2024) subrayaron que las políticas insuficientes para proteger áreas vegetadas contribuyen a la pérdida de servicios ecosistémicos críticos, un desafío que también parece evidente en Jaén.

Sobhani et al. (2024) identificaron que la implementación de políticas de conservación es esencial para evitar la degradación ambiental y proteger ecosistemas sensibles. En el caso de Jaén, la disminución continua del arbustal sugiere la necesidad de políticas de zonificación que limiten la expansión urbana sobre áreas naturales y promuevan la restauración ecológica. Estas políticas deben priorizar el equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación ambiental.

Wang et al. (2020) identificaron que la urbanización rápida en áreas periurbanas de Asia ha transformado significativamente las coberturas de vegetación natural, como arbustales, en áreas urbanas e industriales. En Jaén, el aumento del tejido urbano continuo, que pasó de 597.27 ha en 2000 a 1480.96 ha en 2022, parece haber sido un factor clave en la disminución del arbustal. Este fenómeno evidencia cómo la urbanización intensiva puede desplazar áreas naturales, priorizando el desarrollo residencial e infraestructural.

Yang et al. (2021) y Xiao et al. (2020) destacaron que la pérdida de áreas naturales, como los arbustales, lleva a una fragmentación significativa de los hábitats, lo que afecta negativamente la biodiversidad. En Jaén, esta fragmentación ha limitado los corredores ecológicos y afectado la movilidad y el acceso a recursos para muchas

especies. Este proceso no solo disminuye la conectividad ecológica, sino que también aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas ante perturbaciones externas.

Finalmente, Gu et al. (2019) analizaron cómo la pérdida de coberturas naturales incrementa la vulnerabilidad al cambio climático. En Jaén, la transformación de arbustales en áreas urbanas podría estar contribuyendo al efecto isla de calor y reduciendo la resiliencia climática local.

La disminución de los arbustales en Jaén refleja patrones globales de urbanización no planificada y sus impactos negativos en los ecosistemas. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Yang et al. (2021), Mohammadyari et al. (2023), y Zhang et al. (2024), se evidencia que la pérdida de arbustales afecta gravemente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, además de aumentar la vulnerabilidad al cambio climático. Para mitigar estos efectos, es crucial adoptar estrategias integrales de planificación territorial que combinen el desarrollo urbano con la restauración y conservación de los ecosistemas naturales.

4.3.5 Arbustal / área intervenida

Zonas donde la vegetación predominante son los arbustos, pero que han sido significativamente modificadas por actividades humanas. Estas áreas intervenidas pueden incluir: Desbroce y Limpieza, Actividades Agropecuarias, Desarrollo Urbano Inicial.

Figura 10

Áreas intervenidas con fines de expansión urbana



La aparición de la categoría "Arbustal / Área Intervenida" en los últimos años del periodo estudiado (2018-2022), con 200.06 hectáreas reportadas en 2022, refleja una tendencia significativa en la transformación del uso del suelo en Jaén. Esta categoría evidencia la presión de las actividades humanas sobre los ecosistemas naturales, principalmente debido a actividades agropecuarias, desbroce y limpieza, y la preparación para el desarrollo urbano. Este fenómeno resalta la interacción entre la expansión urbana y la conservación de áreas vegetadas y se alinea con los hallazgos de diversos estudios que analizan los impactos de la urbanización en los ecosistemas.

Wang et al. (2020) estudiaron cómo la urbanización en áreas periurbanas de Asia genera transiciones graduales en los ecosistemas, donde las áreas naturales se ven

primero intervenidas antes de ser completamente convertidas en áreas urbanas. Este patrón es evidente en Jaén, donde las 200.06 hectáreas de arbustal intervenido sugieren una etapa inicial de transformación, posiblemente vinculada a la expansión de infraestructuras y asentamientos urbanos.

También Mohammadyari et al. (2023) destacaron que las áreas intervenidas pierden gradualmente su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos clave, como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación del suelo. En Jaén, el arbustal intervenido representa un punto crítico donde los servicios ecosistémicos están en riesgo, incluso antes de que estas áreas sean completamente urbanizadas, lo que subraya la necesidad de políticas de conservación y manejo sostenible.

Así mismo Yang et al. (2021) observaron que las áreas intervenidas, aunque no completamente urbanizadas, contribuyen a la fragmentación del hábitat, afectando la conectividad ecológica y la biodiversidad. En Jaén, las 200.06 hectáreas de arbustal intervenido probablemente han reducido la capacidad de las especies para desplazarse y adaptarse, comprometiendo la resiliencia ecológica del área.

También Zhang et al. (2024) estudiaron cómo las áreas intervenidas actúan como una transición en la transformación del uso del suelo, donde las actividades humanas modifican el paisaje de manera incremental antes de la urbanización completa. Este proceso es evidente en Jaén, donde el arbustal intervenido podría representar una etapa intermedia antes de convertirse en tejido urbano continuo o en áreas agrícolas.

Finalmente, Xiao et al. (2020) enfatizaron que las políticas de zonificación y planificación sostenible deben abordar tanto las áreas naturales como las intervenidas, ya que estas últimas son vulnerables a la pérdida total de cobertura vegetal. En Jaén, la aparición reciente de esta categoría refleja la necesidad urgente de estrategias de conservación que protejan las áreas intervenidas de una transformación completa y que

prioricen su restauración ecológica.

La categoría "Arbustal / Área Intervenida" en Jaén representa una etapa crítica en la transformación del uso del suelo, evidenciando la presión de las actividades humanas sobre los ecosistemas. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Mohammadyari et al. (2023), Yang et al. (2021), Zhang et al. (2024), y Xiao et al. (2020), se observa que estas áreas son vulnerables a la pérdida de servicios ecosistémicos y biodiversidad. Para mitigar estos impactos, es crucial implementar políticas de conservación que limiten la transformación de áreas intervenidas, fomenten la restauración ecológica y promuevan un desarrollo urbano sostenible. Estos esfuerzos no solo protegerían los ecosistemas existentes, sino que también contribuirían a mantener la funcionalidad ambiental y la resiliencia ecológica en Jaén.

4.3.6. *Herbazal / Área intervenida*

Zonas donde la vegetación predominante es herbácea, pero que han sido significativamente modificadas por actividades humanas. Estas áreas pueden incluir: Terrenos en Proceso de Urbanización es decir en sus etapas iniciales de desarrollo urbano donde la vegetación herbácea todavía domina, pero se están preparando para la construcción, también pueden incluir áreas de Restauración Ecológica, que están son áreas donde se permite la regeneración de la vegetación herbácea después de haber sido utilizadas para otros fines, como la agricultura intensiva.

Figura 11

Área de pastizales naturales en proceso de intervención humana



El surgimiento y aumento de la categoría "Herbazal / Área Intervenida" en Jaén, que pasó de 13.26 hectáreas en 2017 a 99.04 hectáreas en 2022, evidencia un cambio significativo en el uso del suelo, impulsado principalmente por la expansión urbana y la transformación de áreas naturales y agrícolas en terrenos preparados para el desarrollo. Este patrón resalta la presión humana sobre las áreas vegetadas y está alineado con investigaciones que examinan las implicaciones ecológicas y sociales de la intervención en ecosistemas herbáceos.

Según Mohammadyari et al. (2023), en lo respecta a impactos en los servicios ecosistémicos, los ecosistemas herbáceos juegan un papel crucial en la regulación hídrica, la captura de carbono y la provisión de hábitats para especies locales. En Jaén, el aumento de áreas intervenidas podría comprometer estos servicios debido a la perturbación en el suelo y la vegetación, especialmente en terrenos destinados a urbanización. Además, este proceso también podría exacerbar problemas como la erosión del suelo y la pérdida de fertilidad.

También Wang et al. (2020), en lo que respecta a transformación del uso del suelo en áreas intervenidas destacaron que, en regiones periurbanas, las áreas vegetadas son frecuentemente sometidas a intervenciones graduales que preceden al desarrollo urbano completo. En Jaén, el aumento de Herbazal / Área Intervenida refleja estas dinámicas, donde las áreas de pastizales y vegetación herbácea son utilizadas como una transición hacia usos urbanos, lo que a menudo resulta en la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos.

Así mismo Yang et al. (2021) señalaron que las áreas intervenidas contribuyen a la fragmentación del hábitat, lo que afecta la conectividad ecológica y la resiliencia de los ecosistemas. En Jaén, el aumento de Herbazal / Área Intervenida sugiere que las actividades humanas están generando una fragmentación que limita la movilidad de especies y la regeneración natural de la vegetación.

Por otro lado, Xiao et al. (2020) resaltaron que las áreas intervenidas pueden representar oportunidades para la restauración ecológica, siempre y cuando se implementen estrategias efectivas para promover la regeneración de la vegetación nativa. En Jaén, estas áreas podrían ser utilizadas como puntos clave para recuperar servicios ecosistémicos perdidos y reforzar la resiliencia ambiental frente a la expansión urbana.

Finalmente, Zhang et al. (2024) enfatizaron la importancia de políticas que integren la planificación urbana con la conservación y restauración ecológica. En Jaén, el aumento de Herbazal / Área Intervenida evidencia la necesidad de implementar estrategias que regulen la intervención en áreas herbáceas, prioricen su conservación y promuevan un desarrollo urbano que minimice los impactos negativos sobre el medio ambiente.

La aparición y expansión de Herbazal / Área Intervenida en Jaén refleja un cambio en el uso del suelo asociado principalmente con la urbanización y las actividades humanas. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Mohammadyari et al. (2023), Yang et al. (2021), Xiao et al. (2020), y Zhang et al. (2024), se destaca que estas áreas son vulnerables a la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos, pero también ofrecen oportunidades para la restauración ecológica. Para mitigar los impactos negativos y maximizar los beneficios potenciales, es esencial integrar estas áreas en estrategias de planificación territorial sostenible que equilibren el desarrollo urbano con la conservación y la recuperación ambiental.

4.3.7. Solares

Terrenos baldíos o no desarrollados destinados a futuros desarrollos urbanos. Comprende aquellos territorios en los cuales la vegetación no existe o es escasea, compuestas principalmente por suelos desnudos y/o quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos.

Figura 12

Áreas lotizadas (solares) destinadas a futuros desarrollos urbanos



En la zona de estudio los solares, inexistentes hasta el año 2000, aparecieron con 156.89 ha en 2017 y aumentaron a 728.86 ha en 2022.

La aparición y expansión de los solares en Jaén, que pasaron de 156.89 hectáreas en 2017 a 728.86 hectáreas en 2022, evidencia un cambio profundo en el uso del suelo asociado con la urbanización acelerada. Estos terrenos, destinados a futuros desarrollos urbanos, representan una etapa inicial en el proceso de urbanización que genera impactos ambientales significativos, como la pérdida de servicios ecosistémicos y la fragmentación del hábitat. Este fenómeno se conecta con patrones globales de urbanización estudiados por diversos autores.

Wang et al. (2020) destacaron que en áreas periurbanas, el proceso de urbanización a menudo comienza con la conversión de tierras vegetadas o baldías en solares, lo que marca una transición hacia usos urbanos. Este patrón es evidente en Jaén, donde el

aumento significativo de solares refleja la preparación del suelo para satisfacer las demandas de vivienda e infraestructura derivadas del crecimiento poblacional. Este proceso transforma el paisaje y altera las dinámicas ecológicas, introduciendo presiones sobre los ecosistemas locales.

Según Mohammadyari et al. (2023), la urbanización temprana en solares reduce la capacidad del suelo para proporcionar servicios ecosistémicos clave, como la retención de agua y la regulación climática. En Jaén, la transformación de suelos desnudos en áreas urbanas no solo incrementa la impermeabilización del terreno, sino que también exacerba problemas como la erosión, el aumento de la escorrentía superficial y la reducción de la fertilidad del suelo.

También, Yang et al. (2021) y Xiao et al. (2020) subrayaron que la fragmentación del hábitat es uno de los impactos más significativos de la urbanización inicial. En Jaén, los solares fragmentan las áreas naturales circundantes, afectando la conectividad ecológica y limitando la movilidad de especies. Esta fragmentación interrumpe los procesos ecológicos esenciales y compromete la resiliencia de los ecosistemas locales frente a perturbaciones antropogénicas y naturales.

Por otro lado, Zhang et al. (2024) enfatizaron que las políticas de zonificación son cruciales para gestionar los impactos de los solares y asegurar un desarrollo urbano sostenible. En Jaén, la rápida expansión de solares sugiere la necesidad de estrategias de planificación territorial que prioricen el equilibrio entre el crecimiento urbano y la conservación ambiental. La falta de vegetación y el uso proyectado de estas áreas para desarrollos urbanos futuros subrayan la importancia de implementar medidas de restauración ecológica y uso eficiente del suelo.

Comparando con regiones similares, los hallazgos de Gu et al. (2019) en la cuenca del lago Taihu, donde la expansión urbana inicial causó una significativa reducción de

servicios ecosistémicos, son aplicables al caso de Jaén. En ambas regiones, la conversión de terrenos en solares marca un punto crítico en el proceso de urbanización, con consecuencias negativas para el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente.

La expansión de solares en Jaén refleja una etapa clave en el proceso de urbanización, caracterizada por impactos negativos en los ecosistemas y la funcionalidad del suelo. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Mohammadyari et al. (2023), Yang et al. (2021), Xiao et al. (2020), Zhang et al. (2024) y Gu et al. (2019), se observa un patrón consistente de transformación del suelo asociado con la urbanización inicial. Para mitigar estos efectos, es esencial adoptar enfoques de planificación territorial sostenible que integren la conservación ecológica y la restauración de servicios ecosistémicos en las áreas destinadas a futuros desarrollos urbanos. Estas medidas garantizarán un desarrollo equilibrado que minimice los impactos negativos sobre el medio ambiente y maximice los beneficios para la sociedad.

4.3.8. Exactitud temática.

A fin de verificar la correcta asignación de usos de suelo se ha realizado verificación en campo en un total de 155 puntos los cuales fueron distribuidos de manera aleatoria.

Tabla 4*Puntos de verificación en campo*

N°	Nivel_III	Simbología	Área (ha)	Porcent. (%)	Puntos de verificación
1	1.1.1. Tejido urbano continuo		1480,96	29,53	45
2	2.1. Cultivos transitorios		993,16	19,81	30
3	3.3.1. Herbazal		17,41	0,35	3
4	3.3.2. Arbustal		1495,07	29,81	46
5	3.3.5 Arbustal / área intervenida		200,06	3,99	6
6	3.3.6. Herbazal / Área intervenida		99,04	1,98	3
7	3.4.6 Solares		728,86	14,53	22
			5014,56	100,00	155

La tabla presenta los puntos de verificación en campo utilizados para corroborar las áreas de diferentes coberturas de uso del suelo en Jaén. Se incluyen siete categorías de uso del suelo, detalladas según el Nivel III de clasificación Corine Land Cover, como tejido urbano continuo, cultivos transitorios, herbazal, arbustal, arbustal/área intervenida, herbazal/área intervenida y solares. Cada categoría muestra el área en hectáreas y su porcentaje respecto al total, con el tejido urbano continuo y el arbustal representando las mayores áreas (29.53% y 29.81%, respectivamente). Los puntos de verificación en campo totalizan 155, distribuidos entre las diferentes categorías para asegurar la precisión de los datos.

Asi mismo tambien se calculó el índice Kappa para cada imagen procesada:

Tabla 5

Índice Kappa de imágenes de cada año

Año	Índice Kappa (K)
2000	0.95
2005	0.96
2011	0.98
2017	0.96
2022	0.98

Se obtuvo un índice Kappa mayores de 0.95, por lo que según la valoración Kappa indica que la fuerza de concordancia es casi perfecta. Este índice indica el grado de precisión de la clasificación, si el valor de K es próximo a 1 indica una concordancia plena entre la realidad y el mapa, mientras que un valor negativo cercano a cero o negativo sugiere que la clasificación es pobre (Chuvieco, 1990).

4.4 Afectación a los ecosistemas periurbanos expresado en cobertura vegetal durante los años 2000 al 2022 en la ciudad de Jaén

4.4.1 Análisis del cambio de la cobertura de la tierra.

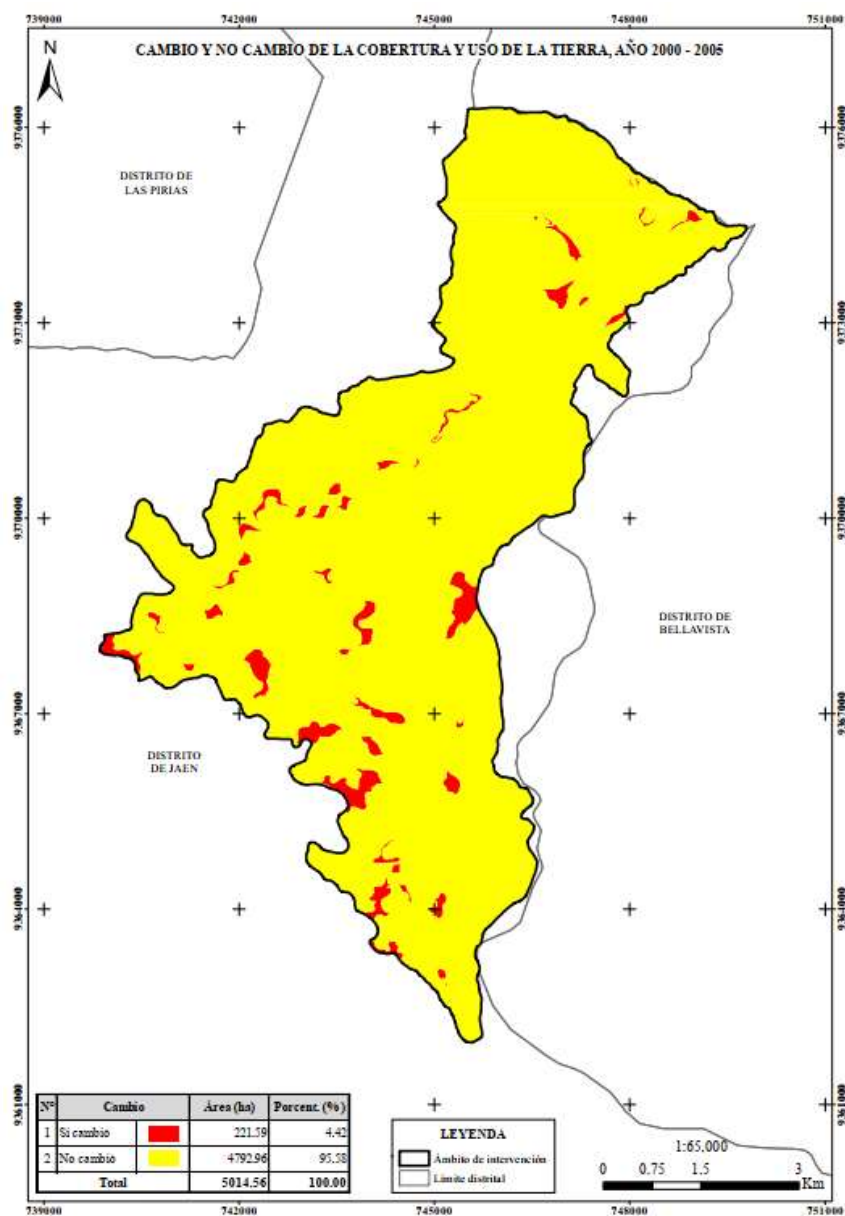
Este análisis se hizo mediante la intersección general de los polígonos por clase de cobertura obtenidos, de esta forma se obtuvo el resultado del área cambiante y la que no sufrió cambio en su cobertura durante el periodo de estudio.

A. Áreas de cambio y no cambio de uso de la tierra periodo 2000 – 2005

El análisis de la cobertura y uso de la tierra en Jaén durante el periodo 2000-2005 muestra que el área que cambió fue de 221.59 hectáreas, lo cual representa el 4.42% del total, mientras que el área que no cambió fue de 4792.96 hectáreas, es decir, el 95.58% del total.

Figura 13

Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000-2005



El área que cambió representa las zonas donde hubo un cambio significativo en el uso del suelo o la cobertura vegetal. Este cambio puede incluir la conversión de áreas naturales en terrenos urbanizados, la transformación de áreas agrícolas en zonas residenciales y otros tipos de desarrollo urbano o industrial. La cantidad relativamente

pequeña de cambio (4.42%) sugiere que, durante este periodo, Jaén experimentó un desarrollo urbano moderado, con la mayor parte del territorio permaneciendo sin cambios significativos.

Por otro lado, el área que no cambió comprende la gran mayoría del territorio (95.58%), donde no hubo cambios significativos en la cobertura y uso del suelo. Esto indica una estabilidad en el uso del suelo en la mayor parte de Jaén durante este periodo.

El análisis de las áreas de cambio y no cambio de uso de la tierra en Jaén durante el periodo 2000-2005 muestra que el 4.42% del territorio (221.59 ha) experimentó cambios significativos en su cobertura y uso del suelo, mientras que el 95.58% (4792.96 ha) permaneció estable. Este resultado sugiere que Jaén atravesó un desarrollo urbano moderado en este periodo, con la mayoría del territorio mostrando estabilidad en el uso del suelo. Comparando estos hallazgos con estudios previos, se puede entender mejor la dinámica territorial de la región en relación con patrones globales de cambio en el uso del suelo.

Según Wang et al. (2020), en las primeras etapas de urbanización, las tasas de cambio en el uso del suelo suelen ser moderadas, particularmente en regiones con un crecimiento económico gradual. Los resultados en Jaén coinciden con esta tendencia, ya que el bajo porcentaje de cambio (4.42%) refleja una transición temprana hacia la urbanización, probablemente impulsada por demandas localizadas de vivienda e infraestructura.

También, Mohammadyari et al. (2023) señalaron que incluso pequeños cambios en la cobertura del suelo pueden tener un impacto desproporcionado en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, especialmente cuando implican la conversión de áreas naturales en terrenos urbanizados.

Por otro lado, Yang et al. (2021) destacaron que la estabilidad en grandes áreas del territorio, como la observada en Jaén (95.58%), puede indicar prácticas agrícolas consolidadas o la persistencia de ecosistemas naturales resistentes a las presiones de urbanización. Este resultado es un indicativo positivo para la región, ya que sugiere la existencia de territorios que aún no han sido significativamente afectados por la urbanización.

Finalmente, Zhang et al. (2024) enfatizaron que la implementación de políticas de zonificación es crucial para gestionar los cambios en el uso del suelo y minimizar sus impactos negativos. En Jaén, la baja tasa de cambio sugiere que, durante este periodo, la región pudo haber tenido un crecimiento controlado, pero la planificación territorial efectiva será esencial para evitar que áreas no urbanizadas sean transformadas sin estrategias de conservación en futuros periodos.

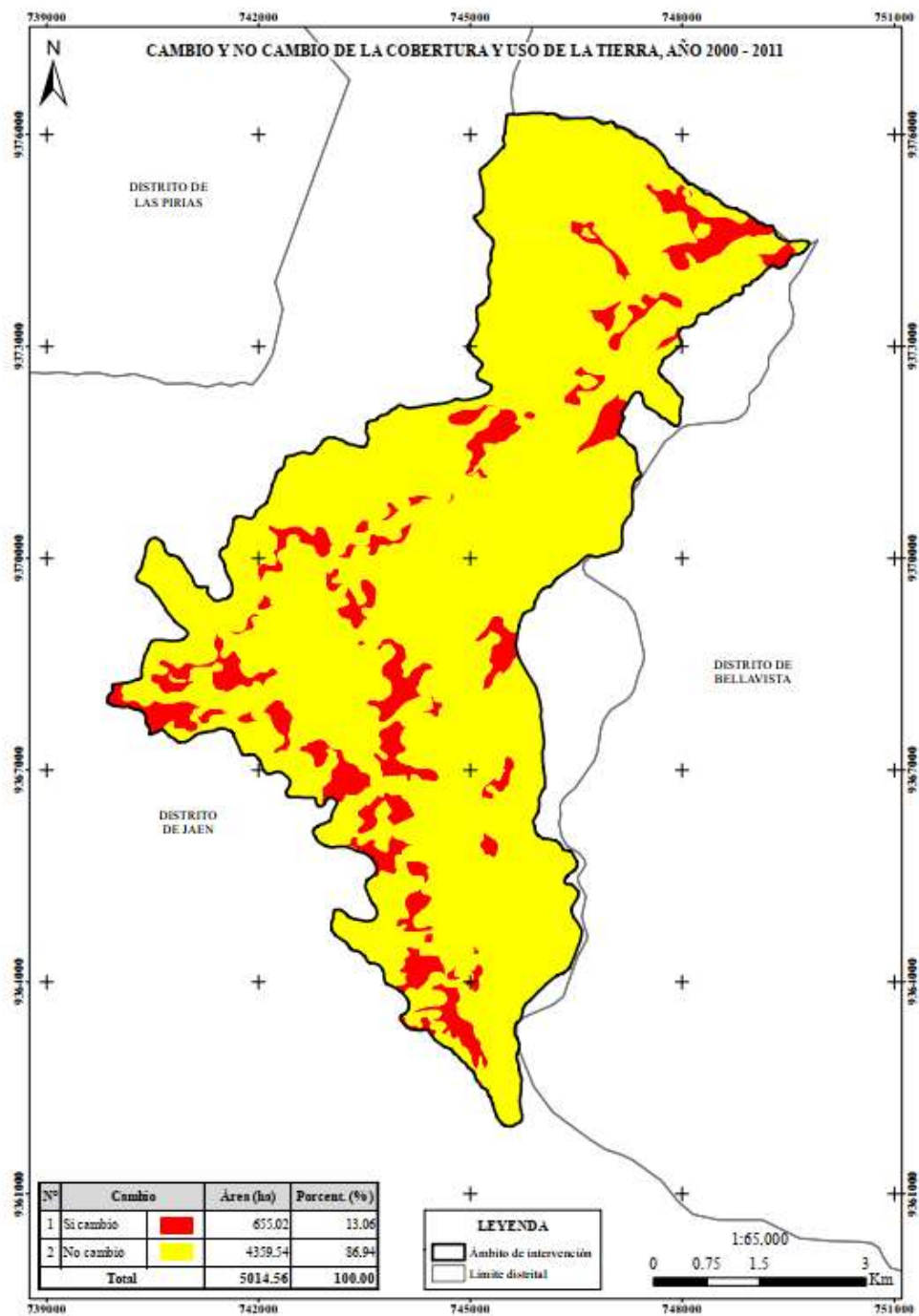
El análisis de las áreas de cambio y no cambio en Jaén entre 2000 y 2005 refleja un desarrollo urbano moderado y una estabilidad significativa en el uso del suelo. Comparando estos resultados con los antecedentes de Wang et al. (2020), Mohammadyari et al. (2023), Yang et al. (2021), Xiao et al. (2020) y Zhang et al. (2024), se observa que, aunque la tasa de cambio es baja, los impactos en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos pueden ser significativos.

B. Áreas de cambio y no cambio de uso de la tierra periodo 2000 – 2011

El análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante el periodo 2000-2011 muestra cambios significativos en la distribución del territorio. El área que cambió representa el 13.06% del total (655.02 hectáreas), mientras que el área que no cambió comprende el 86.94% (4359.54 hectáreas). La cantidad relativamente pequeña de cambio sugiere que, durante este periodo, Jaén experimentó un desarrollo urbano moderado, con la mayor parte del territorio permaneciendo sin cambios significativos. Esta estabilidad en el uso del suelo indica que la mayor parte de Jaén mantuvo su uso de suelo sin alteraciones importantes, reflejando posiblemente una resistencia al cambio o políticas de conservación efectivas.

Figura 14

Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000-2011



Al comparar estos resultados con estudios de otros autores, se observan patrones y diferencias interesantes. Wang et al. (2020) encontraron que la urbanización en la región de la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao contribuyó significativamente a

la pérdida de cobertura vegetal y la degradación de los ecosistemas. Aunque Jaén muestra una menor proporción de cambio, el impacto de la urbanización sobre las áreas naturales podría seguir un patrón similar, donde el crecimiento urbano contribuye a la disminución de áreas agrícolas y naturales. Por otro lado, Xiao et al. (2020) subrayan la importancia de las políticas de zonificación y planificación urbana para gestionar la expansión urbana. La estabilidad observada en Jaén podría estar relacionada con políticas locales que limitan el crecimiento descontrolado y protegen ciertas áreas. Sin embargo, si estas políticas no se aplican de manera efectiva, podrían llevar a una urbanización desordenada. El caso de Jaén, con un cambio moderado, podría ser un ejemplo de políticas parcialmente efectivas o una combinación de factores económicos y regulatorios que influyen en la tasa de urbanización.

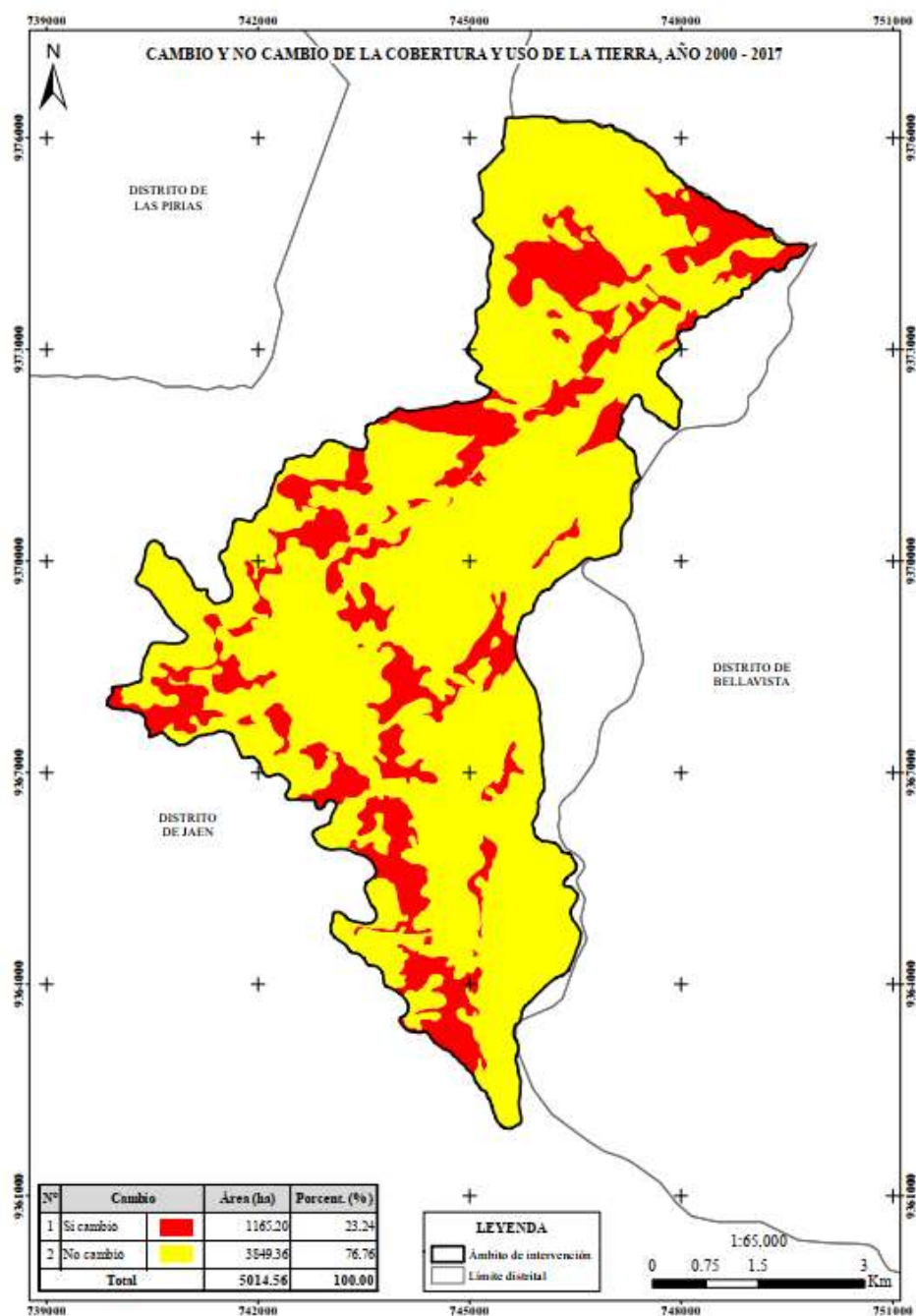
En conclusión, los resultados de la cobertura y uso del suelo en Jaén entre 2000 y 2011 muestran una tendencia de urbanización moderada con una mayor parte del territorio permaneciendo estable. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020) y Xiao et al. (2020), se observa que Jaén podría estar en una fase inicial de urbanización, donde las políticas locales y la economía influyen significativamente en la expansión urbana. Es esencial continuar monitoreando estos cambios y adaptar las políticas de planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible que equilibre el crecimiento con la conservación del medio ambiente.

c. Áreas de cambio y no cambio de uso de la tierra periodo 2000 – 2017.

El análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante el periodo 2000-2017 muestra cambios significativos en la distribución del territorio. El 23.24% del área (1165.20 hectáreas) experimentó cambios, mientras que el 76.76% (3849.36 hectáreas) permaneció sin cambios. La proporción significativa de cambio sugiere que, durante este periodo, Jaén experimentó un desarrollo urbano considerable, reflejando un aumento en la urbanización y la transformación del uso del suelo en respuesta a presiones demográficas y económicas. Por otro lado, la estabilidad del 76.76% del territorio indica que una gran parte de Jaén mantuvo su uso de suelo sin alteraciones significativas, posiblemente debido a políticas de conservación o áreas menos afectadas por la urbanización.

Figura 15

Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000 - 2017



Comparando estos resultados con estudios de otros autores, se observan patrones y diferencias interesantes. Wang et al. (2020) encontraron que la urbanización en la región de la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao llevó a una pérdida significativa

de cobertura vegetal y biodiversidad debido a la rápida expansión urbana. De manera similar, en Jaén, el cambio del 23.24% del área sugiere que la expansión urbana ha tenido un impacto considerable en las áreas naturales y agrícolas. Sin embargo, mientras que la región estudiada por Wang et al. muestra un desarrollo urbano intensivo y altamente industrializado, Jaén podría estar en una fase menos industrializada, pero con una urbanización notable que sigue patrones similares de transformación del uso del suelo.

Asimismo, Xiao et al. (2020) subrayan la importancia de las políticas de zonificación y planificación urbana para manejar la expansión urbana. La estabilidad del 76.76% en Jaén podría estar relacionada con políticas locales que limitan el crecimiento descontrolado y protegen ciertas áreas. Esta gestión efectiva puede ser responsable de mantener una gran parte del territorio sin cambios significativos. No obstante, en algunos casos, Xiao et al. observan que la falta de políticas efectivas puede llevar a una urbanización desordenada. En contraste, Jaén parece haber implementado algunas medidas de planificación que han ayudado a moderar la tasa de cambio, aunque la urbanización aún ha progresado significativamente.

Los resultados de la cobertura y uso del suelo en Jaén entre 2000 y 2017 muestran una tendencia de urbanización considerable con una parte significativa del territorio manteniéndose estable. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020) y Xiao et al. (2020), se observa que Jaén está experimentando una expansión urbana que, aunque significativa, ha sido gestionada hasta cierto punto por políticas locales. Es crucial continuar monitoreando estos cambios y adaptar las políticas de planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible que equilibre el crecimiento con la conservación del medio ambiente.

D. Áreas de cambio y no cambio de uso de la tierra periodo 2000 – 2022.

El análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante el periodo 2000-2022 muestra cambios significativos en la distribución del territorio. El 43.49% del área (2180.89 hectáreas) experimentó cambios, mientras que el 56.51% (2833.67 hectáreas) permaneció sin cambios. La proporción considerable de cambio indica que, durante este periodo, Jaén experimentó un desarrollo urbano notable, reflejando un aumento en la urbanización y la transformación del uso del suelo en respuesta a presiones demográficas y económicas. Por otro lado, la estabilidad del 56.51% del territorio sugiere que una parte significativa de Jaén mantuvo su uso de suelo sin alteraciones significativas, lo que podría deberse a políticas de conservación o a áreas menos afectadas por la urbanización.

Figura 16

Áreas que sufrieron cambio y las que se mantienen sin alteración entre el 2000 – 2022

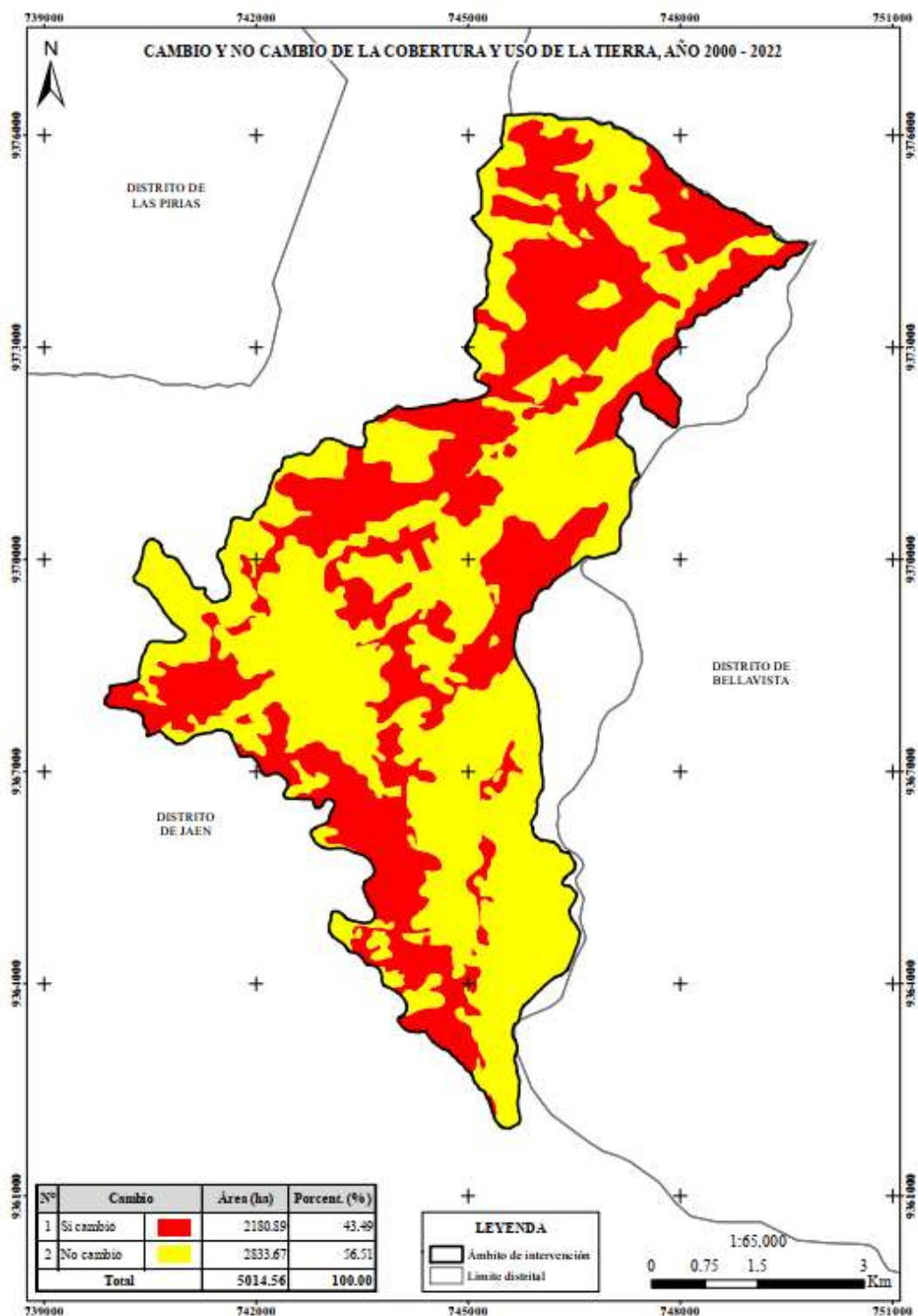
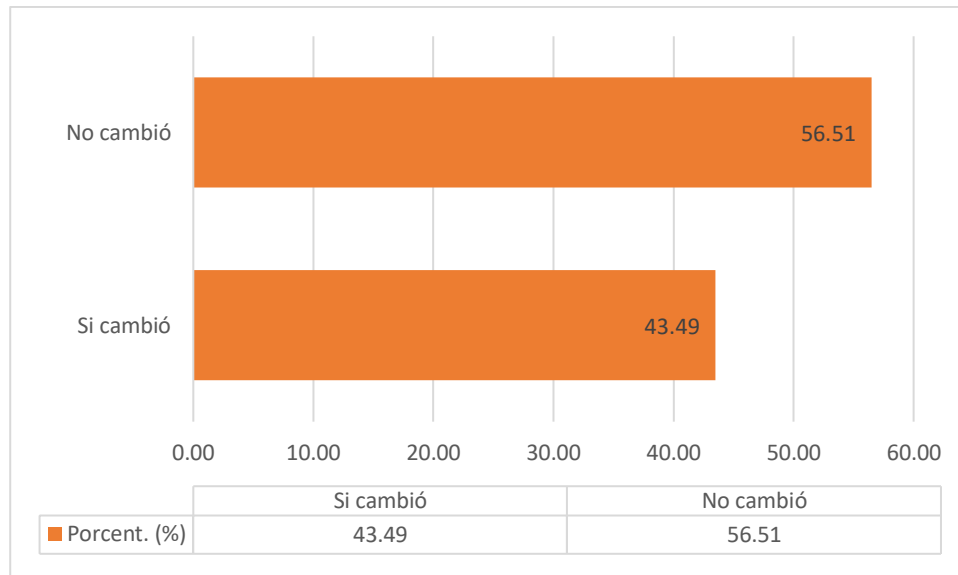


Figura 17

Porcentaje de área de cambio y no cambio de cobertura de uso de suelo entre el 2000 – 2022



Tomado en cuenta criterios de umbrales de impacto usados en la literatura, como los de ELI (Environmental Law Institute – Conservation Thresholds) (2003) – donde se considera que perder entre el 20 % y el 60 % de cobertura natural es crítico, y entre 10 % y 40 % representa impactos moderados – ajustándolos a percentiles que resultan pertinentes para el contexto de Jaén, se considera la siguiente tabla:

Tabla 6:

Nivel de impacto ambiental según porcentaje de cambio

Nivel de impacto ambiental	% de Tasa de Cambio
Alto	$\geq 41 \%$
Medio	11 % – 40 %
Bajo	$< 10 \%$

**Estos niveles están basados en criterios reconocidos pero calibrados para la esta investigación, lo cual aporta rigor y justificación teórica.*

Dado que el resultado del análisis muestra que el 43.49 % del área de la ciudad de Jaén ha experimentado un cambio en el uso del suelo entre los años 2000 y 2022, este valor es interpretado como un impacto alto conforme al umbral propuesto por la tabla de referencia adaptada de Environmental Law Institute (2003), donde un cambio igual o superior al 41 % se clasifica como de alta intensidad.

Este nivel de transformación territorial implica que casi la mitad del espacio geográfico ha sido modificado, lo que conlleva importantes consecuencias sobre la funcionalidad ecológica, la conectividad de los ecosistemas y la pérdida de servicios ambientales. La expansión urbana, en este caso, habría sido lo suficientemente acelerada como para reemplazar extensas zonas de vegetación natural o agrícola por áreas urbanizadas o intervenidas, como solares, vías y edificaciones.

Tal resultado es coherente con lo advertido por autores como Lambin et al. (2001), quienes señalan que tasas de cambio superiores al 40 % en zonas periurbanas se traducen en presiones críticas sobre la biodiversidad, disponibilidad de agua y estabilidad del paisaje. A su vez, el informe de ELI (2003) advierte que cambios masivos en la cobertura natural más allá del 40 % generan un umbral de ruptura en los servicios ecosistémicos, afectando desde la regulación climática local hasta la recarga hídrica y el control de erosión.

En cuanto a la pérdida de biodiversidad (2000–2022), para efectos de esta investigación, se estimó mediante la pérdida de hábitat natural (proxy) dentro del límite urbano–periurbano de Jaén, considerando como coberturas naturales al Arbustal y Herbazal. En el año 2000, la superficie natural sumó 3158.30 ha (Arbustal 3116.64 ha; Herbazal 41.66 ha) y en 2022 descendió a 1512.48 ha (Arbustal 1495.07 ha; Herbazal

17.41 ha). La pérdida absoluta fue de 1645.82 ha, equivalente a un 52.11 % de reducción respecto al 2000, lo que, conforme al umbral de clasificación por porcentaje de cambio, corresponde a un impacto alto. Adicionalmente, en 2022 se registraron 299.10 ha de áreas intervenidas (Arbustal/Área intervenida: 200.06 ha; Herbazal/Área intervenida: 99.04 ha), que evidencian una degradación avanzada del hábitat y representan el 19.78 % del hábitat natural remanente; si se descuenta esta superficie degradada, la pérdida funcional de hábitat alcanza 61.58 %. Estos resultados se vuelven particularmente críticos porque Jaén se inserta en un mosaico de Bosques Tropicales Estacionalmente Secos (BTES), bosques montanos y páramos, reconocido por su alto endemismo y sensibilidad a la fragmentación; en los BTES del valle del Marañón (ambientes afines al arbustal/herbazal de este estudio) se han documentado endémicos y casi endémicos como el colibrí gorgiescamado o colibrí gorgipunteado (*Thaumasius taczanowskii*), la pava-pecho-café del Marañón (Marañón crescentchest, *Melanopareia maranonica*), la paloma peruana (*Patagioenas oenops*), el espinero dorsicastaño (*Phacellodomus dorsalis*) y los inca-finches (*Incaspiza spp.*), además del lagarto ameiva del Marañón (*Ameiva aggerescusans*). La evidencia regional confirma que la pérdida de hábitat en estos sistemas implica pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos, reforzando la conclusión de una presión urbana significativa sobre ecosistemas de alto valor biológico en Jaén.

Asi mismo comparando estos resultados con estudios de otros autores, se observan patrones similares como Wang et al. (2020) encontraron que la urbanización en la región de la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao llevó a una pérdida significativa de cobertura vegetal y biodiversidad debido a la rápida expansión urbana. De manera similar, en Jaén, el cambio del 43.49% del área sugiere que la expansión urbana ha tenido un impacto significativo en las áreas naturales y agrícolas.

Además, Yang et al. (2021) subrayan que la urbanización rápida y no planificada puede conducir a una fragmentación significativa de los hábitats naturales, afectando negativamente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. En Jaén, la alta tasa de cambio puede estar contribuyendo a la fragmentación de los hábitats, similar a las observaciones de Yang et al., lo que enfatiza la necesidad de una planificación urbana más sostenible y efectiva para mitigar estos impactos.

Por tanto, el 43.49 % de cambio en la cobertura y uso del suelo en Jaén entre 2000 y 2022 no solo confirma una fuerte presión antrópica, sino que ubica a este territorio dentro de un escenario de alta vulnerabilidad ambiental, donde urge aplicar estrategias de planificación territorial, conservación ecológica y manejo sostenible del crecimiento urbano, por lo es que es crucial continuar monitoreando estos cambios y adaptar las políticas de planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible que equilibre el crecimiento con la conservación del medio ambiente.

4.4.2 Análisis de la transición de la cobertura y uso de la tierra

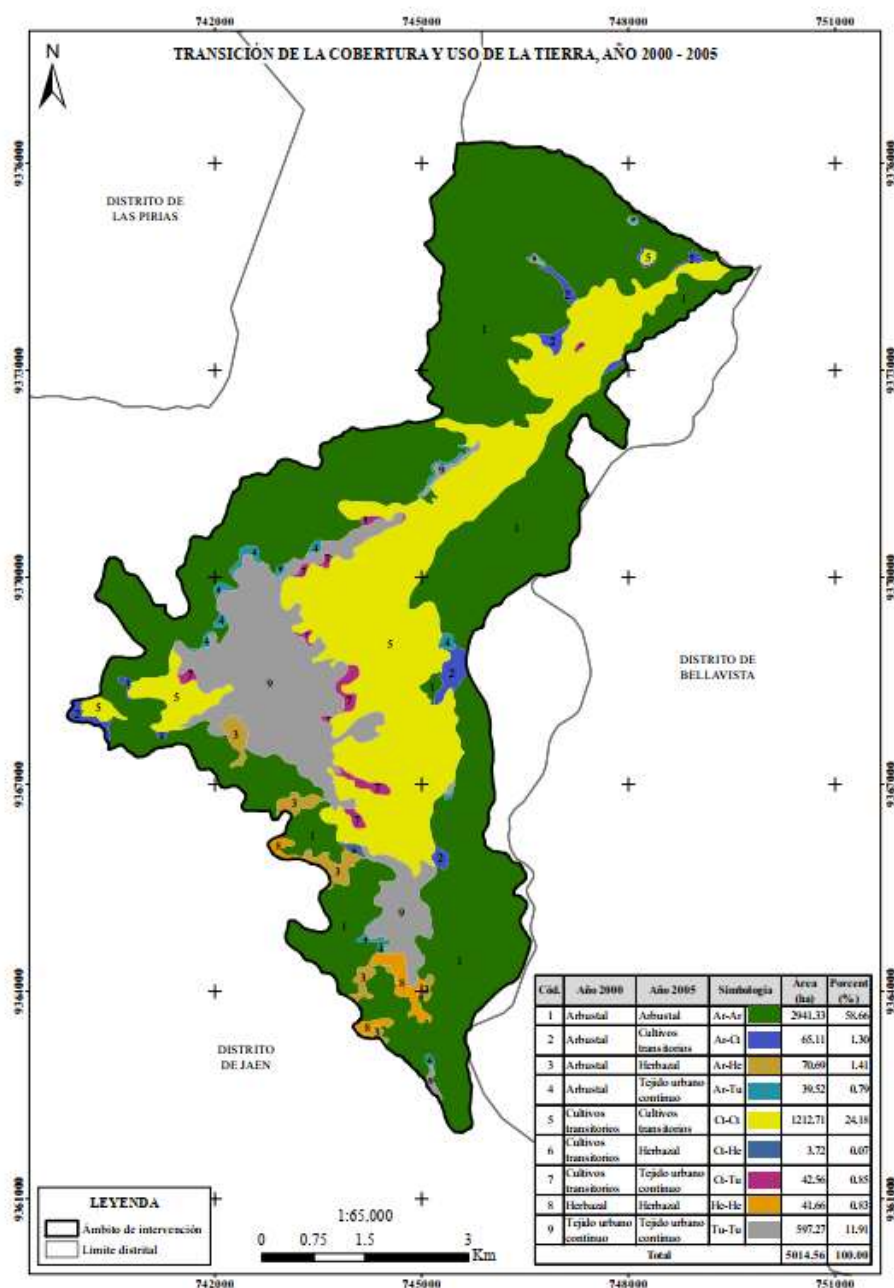
Este análisis consistió en identificar y evaluar todas las coberturas que experimentaron algún tipo de cambio durante el periodo de estudio, es decir, aquellas que fueron reemplazadas por otras coberturas. Para cada periodo analizado, se consideró una cobertura inicial y una cobertura final, lo que permitió visualizar y cuantificar la magnitud y dirección de las transformaciones en el uso del suelo.

A. Cambios de cobertura y uso de la tierra durante el periodo 2000-2005

El análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante el periodo 2000-2005 muestra varios cambios notables.

Figura 18

Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 -2005



Los datos indican que el arbustal, que cubría una gran parte del área, experimentó una notable estabilidad, manteniéndose como arbustal en un 58.66% de la superficie total. Sin embargo, también hubo conversiones significativas, como el 1.30% del arbustal que se transformó en cultivos transitorios y el 0.79% que se convirtió en tejido

urbano continuo. De manera similar, los cultivos transitorios mantuvieron una estabilidad del 24.18%, pero un 0.85% de esta categoría se transformó en tejido urbano continuo. Estos cambios reflejan una tendencia de urbanización moderada y una transformación gradual del uso del suelo en respuesta a las necesidades demográficas y económicas.

Comparando estos resultados con estudios de otros autores, se observan patrones y diferencias interesantes. Wang et al. (2020) encontraron que la urbanización en la región de la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao llevó a una pérdida significativa de cobertura vegetal y biodiversidad debido a la rápida expansión urbana. De manera similar, en Jaén, aunque la tasa de cambio es menor, el impacto de la urbanización sobre las áreas naturales podría seguir un patrón similar, donde el crecimiento urbano contribuye a la disminución de áreas agrícolas y naturales.

Por otro lado, Yang et al. (2021) subrayan que la urbanización rápida y no planificada puede conducir a una fragmentación significativa de los hábitats naturales, afectando negativamente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. En Jaén, la conversión de arbustales y cultivos transitorios en áreas urbanas sugiere que este tipo de fragmentación podría estar ocurriendo, aunque a una escala moderada, lo que destaca la necesidad de una planificación urbana más sostenible y efectiva para mitigar estos impactos.

Finalmente, Xiao et al. (2020) destacan la importancia de las políticas de zonificación y planificación urbana para manejar la expansión urbana. La estabilidad del 58.66% de arbustales y el 24.18% de cultivos transitorios en Jaén podría estar

relacionada con políticas locales que limitan el crecimiento descontrolado y protegen ciertas áreas. Esta gestión efectiva puede ser responsable de mantener una gran parte del territorio sin cambios significativos. Sin embargo, la conversión a áreas urbanas, aunque moderada, indica la necesidad continua de políticas robustas para equilibrar el crecimiento urbano con la conservación ambiental.

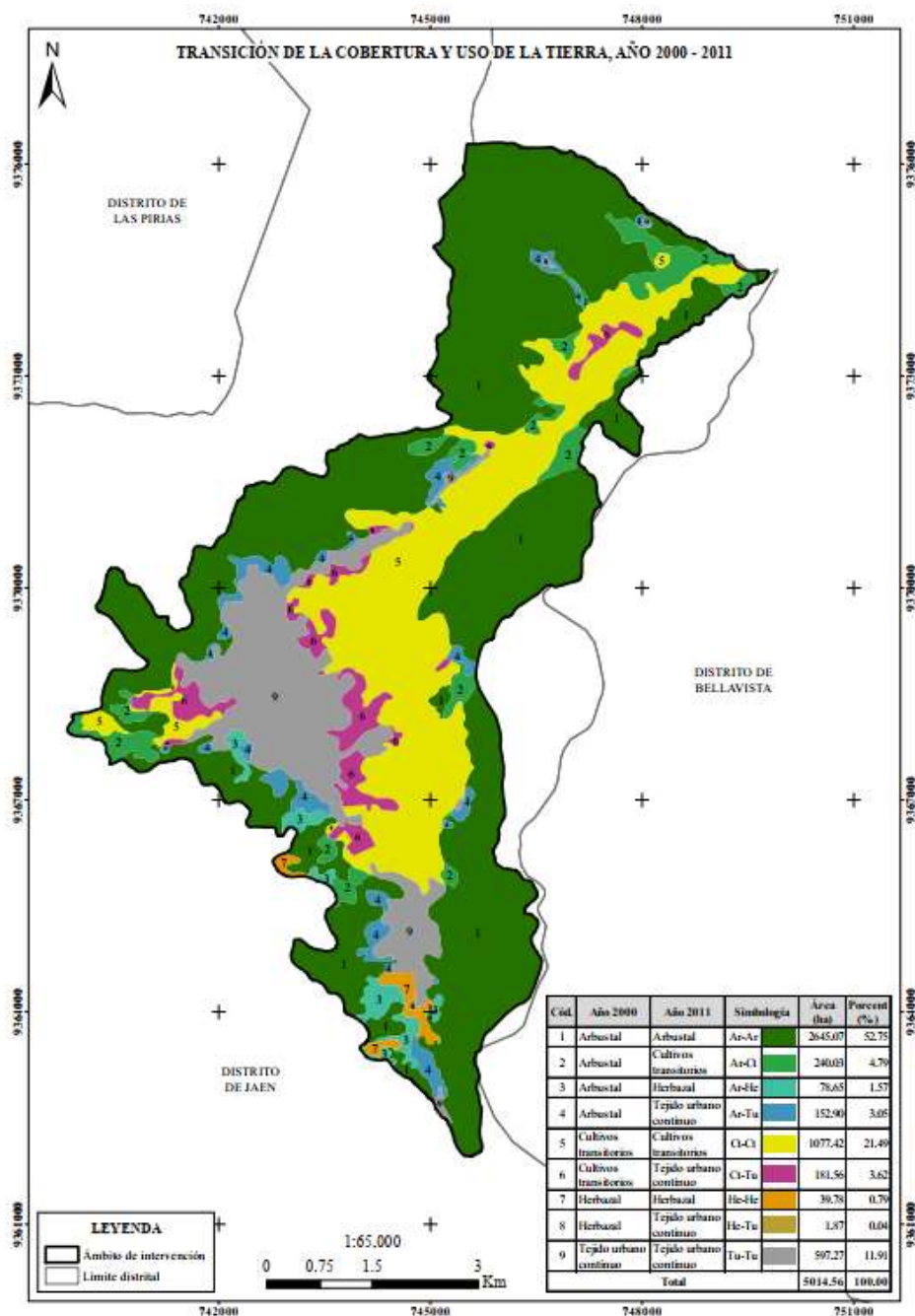
Los resultados de la cobertura y uso del suelo en Jaén entre 2000 y 2005 muestran una tendencia de urbanización moderada con una parte significativa del territorio manteniéndose estable. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Yang et al. (2021), y Xiao et al. (2020), se observa que Jaén está experimentando una expansión urbana que, aunque significativa, ha sido gestionada hasta cierto punto por políticas locales. Es crucial continuar monitoreando estos cambios y adaptar las políticas de planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible que equilibre el crecimiento con la conservación del medio ambiente.

B. Cambios de cobertura y uso de la tierra durante el periodo 2000 – 2011

El análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante el periodo 2000-2011 muestra varios cambios significativos en la distribución del territorio.

Figura 19

Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 -2011



Según los datos, el arbustal se mantuvo como arbustal en un 52.75% de la superficie total, pero también experimentó conversiones importantes, como el 4.79% que se transformó en cultivos transitorios y el 3.05% que se convirtió en tejido urbano continuo. Además, los cultivos transitorios se mantuvieron estables en un 21.49%,

aunque un 3.62% se transformó en tejido urbano continuo. Estos cambios reflejan una tendencia de urbanización moderada y una transformación gradual del uso del suelo en respuesta a presiones demográficas y económicas.

Comparando estos resultados con estudios de otros autores, se observan patrones y diferencias interesantes. Wang et al. (2020) encontraron que la urbanización en la región de la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao llevó a una pérdida significativa de cobertura vegetal y biodiversidad debido a la rápida expansión urbana. De manera similar, en Jaén, el cambio del 43.49% del área sugiere que la expansión urbana ha tenido un impacto considerable en las áreas naturales y agrícolas.

Por otro lado, Yang et al. (2021) subrayan que la urbanización rápida y no planificada puede conducir a una fragmentación significativa de los hábitats naturales, afectando negativamente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. En Jaén, la alta tasa de cambio puede estar contribuyendo a la fragmentación de los hábitats, similar a las observaciones de Yang et al., lo que enfatiza la necesidad de una planificación urbana más sostenible y efectiva para mitigar estos impactos.

Finalmente, Xiao et al. (2020) destacan la importancia de las políticas de zonificación y planificación urbana para manejar la expansión urbana. La estabilidad del 56.51% en Jaén podría estar relacionada con políticas locales que limitan el crecimiento descontrolado y protegen ciertas áreas. Esta gestión efectiva puede ser responsable de mantener una gran parte del territorio sin cambios significativos. Sin embargo, la conversión a áreas urbanas, aunque moderada, indica la necesidad continua de políticas robustas para equilibrar el crecimiento urbano con la conservación ambiental.

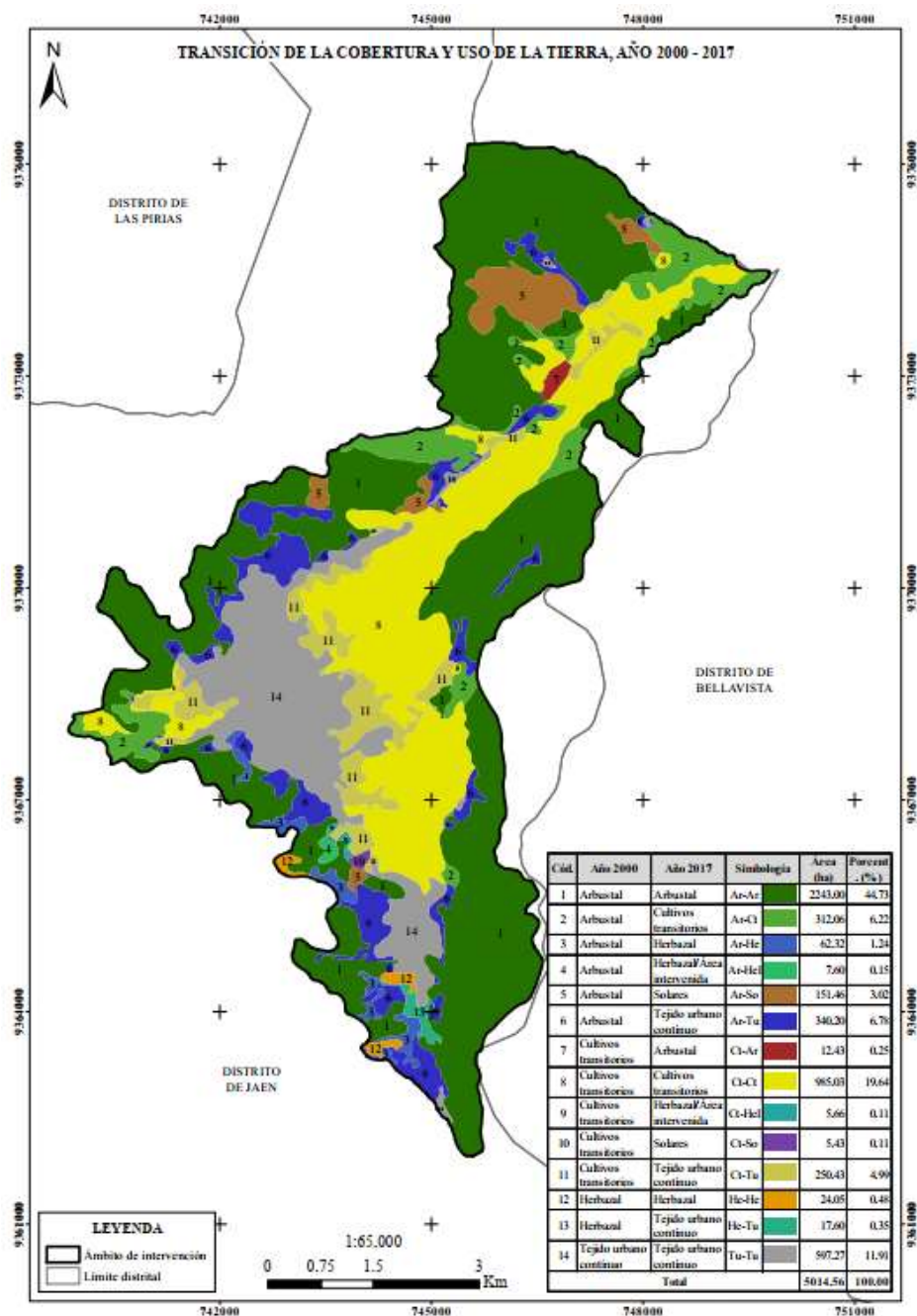
Los resultados de la cobertura y uso del suelo en Jaén entre 2000 y 2011 muestran una tendencia de urbanización considerable con una parte significativa del territorio manteniéndose estable. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Yang et al. (2021), y Xiao et al. (2020), se observa que Jaén está experimentando una expansión urbana significativa que, aunque gestionada hasta cierto punto por políticas locales, todavía presenta desafíos en términos de conservación ambiental y sostenibilidad. Es crucial continuar monitoreando estos cambios y adaptar las políticas de planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible que equilibre el crecimiento con la conservación del medio ambiente.

C. Cambios de cobertura y uso de la tierra durante periodo 2000 – 2017

El análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante el periodo 2000-2017 muestra varios cambios significativos.

Figura 20

Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 – 2017



Según los datos, el arbustal se mantuvo como arbustal en un 44.73% de la superficie total, pero también experimentó conversiones importantes, como el 6.22% que se transformó en cultivos transitorios y el 6.78% que se convirtió en tejido urbano continuo. Asimismo, los cultivos transitorios se mantuvieron estables en un 19.64%,

aunque un 4.99% se transformó en tejido urbano continuo. Estos cambios reflejan una tendencia de urbanización moderada y una transformación gradual del uso del suelo en respuesta a presiones demográficas y económicas.

Comparando estos resultados con estudios de otros autores, se observan patrones y diferencias interesantes. Wang et al. (2020) encontraron que la urbanización en la región de la Bahía de Guangdong-Hong Kong-Macao llevó a una pérdida significativa de cobertura vegetal y biodiversidad debido a la rápida expansión urbana. De manera similar, en Jaén, el cambio del 43.49% del área sugiere que la expansión urbana ha tenido un impacto considerable en las áreas naturales y agrícolas.

Por otro lado, Yang et al. (2021) subrayan que la urbanización rápida y no planificada puede conducir a una fragmentación significativa de los hábitats naturales, afectando negativamente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. En Jaén, la alta tasa de cambio puede estar contribuyendo a la fragmentación de los hábitats, similar a las observaciones de Yang et al., lo que enfatiza la necesidad de una planificación urbana más sostenible y efectiva para mitigar estos impactos.

Finalmente, Xiao et al. (2020) destacan la importancia de las políticas de zonificación y planificación urbana para manejar la expansión urbana. La estabilidad del 56.51% en Jaén podría estar relacionada con políticas locales que limitan el crecimiento descontrolado y protegen ciertas áreas. Esta gestión efectiva puede ser responsable de mantener una gran parte del territorio sin cambios significativos. Sin embargo, la conversión a áreas urbanas, aunque moderada, indica la necesidad continua de políticas robustas para equilibrar el crecimiento urbano con la conservación

ambiental.

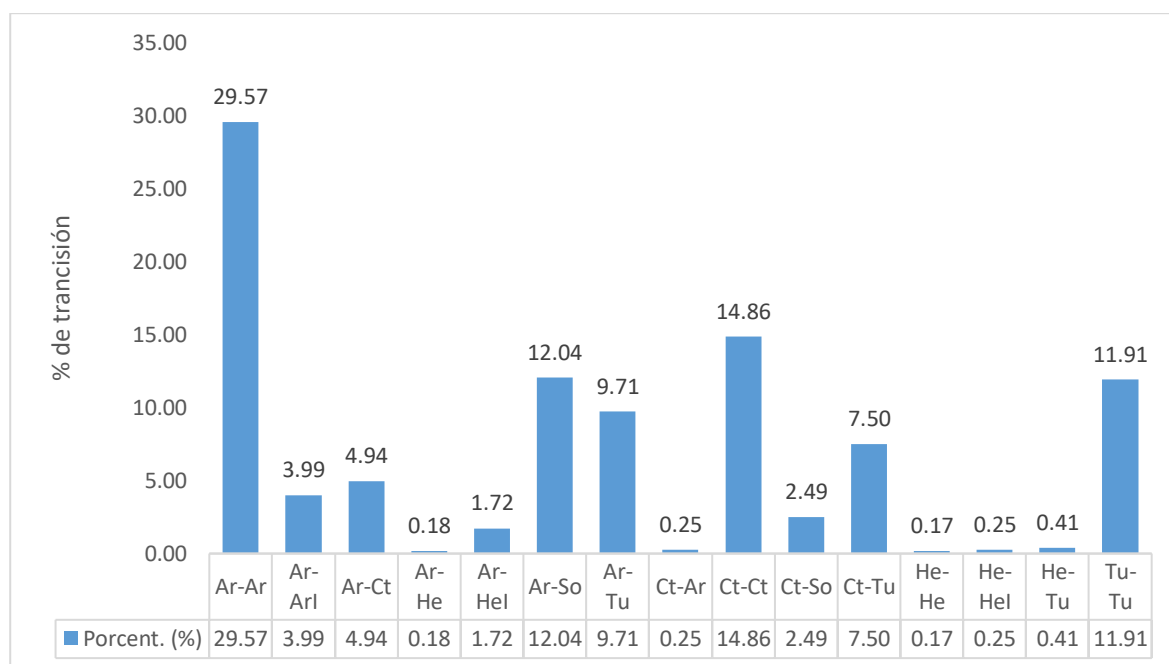
Los resultados de la cobertura y uso del suelo en Jaén entre 2000 y 2017 muestran una tendencia de urbanización considerable con una parte significativa del territorio manteniéndose estable. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Yang et al. (2021), y Xiao et al. (2020), se observa que Jaén está experimentando una expansión urbana significativa que, aunque gestionada hasta cierto punto por políticas locales, todavía presenta desafíos en términos de conservación ambiental y sostenibilidad. Es crucial continuar monitoreando estos cambios y adaptar las políticas de planificación urbana para asegurar un desarrollo sostenible que equilibre el crecimiento con la conservación del medio ambiente.

D. Cambios de cobertura y uso de la tierra periodo 2000 – 2022

El análisis de la cobertura y uso del suelo en Jaén durante el periodo 2000-2022 muestra varios cambios significativos.

Figura 21

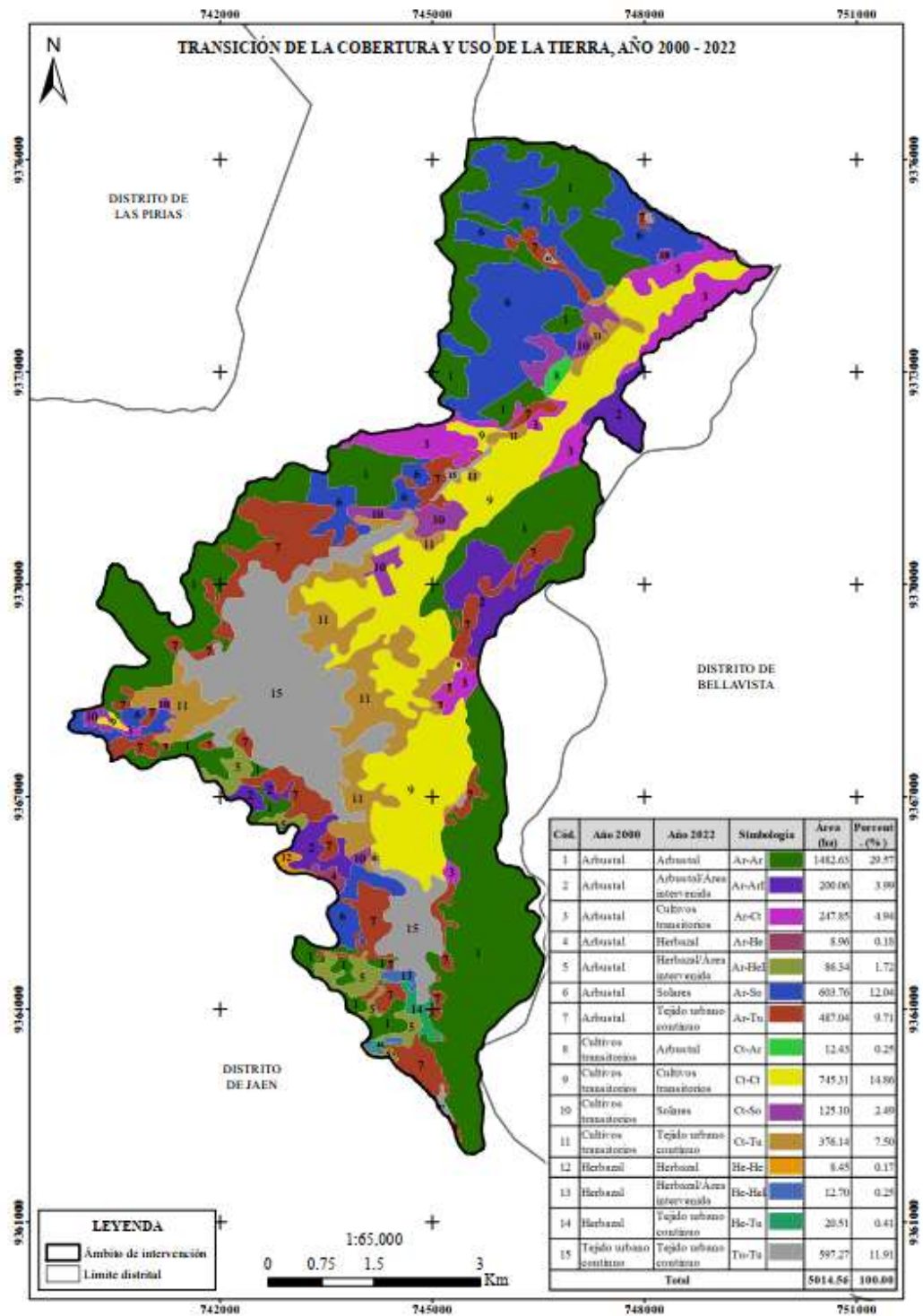
Áreas que sufrieron transición de cobertura de uso durante el periodo 2000 – 2022



Según los datos, el arbustal se mantuvo solo en un 29.57% de la superficie total, experimentó conversiones importantes: el 12.04 % se transformó en solares, el 9.71% en tejido urbano continuo y el 4.94% se transformó en cultivos transitorios. Los cultivos transitorios se mantuvieron estables en un 14.86%, aunque un 7.50% se transformó en tejido urbano continuo. Estos cambios reflejan una tendencia de urbanización notable y una transformación del uso del suelo en respuesta a presiones demográficas y económicas.

Figura 22

Mapa de áreas que sufrieron transición en su cobertura de uso durante el periodo 2000 – 2022



Comparando estos resultados con estudios de otros autores, se observan patrones y diferencias interesantes. Wang et al. (2020) describen cómo las áreas vegetadas, como

los arbustales, son particularmente vulnerables a la urbanización en zonas periurbanas, donde se convierten en terrenos urbanizados o solares en etapas iniciales de desarrollo. En Jaén, la transformación del 12.04% del arbustal en solares y del 9.71% en tejido urbano continuo resalta la presión ejercida por el crecimiento poblacional y la demanda de infraestructuras. Estos cambios también ilustran la conversión progresiva de ecosistemas naturales en terrenos urbanos, una dinámica que se observa en otras regiones en desarrollo.

Según Mohammadyari et al. (2023), la pérdida de cultivos transitorios debido a la expansión urbana tiene consecuencias significativas para la seguridad alimentaria y los servicios ecosistémicos, como la regulación hídrica y la captura de carbono. En Jaén, el cambio del 7.50% de cultivos transitorios hacia tejido urbano continuo refleja una tendencia global donde las áreas agrícolas son absorbidas por la urbanización, comprometiendo no solo la producción de alimentos, sino también la biodiversidad y la sostenibilidad ambiental.

Yang et al. (2021) destacaron que la fragmentación del paisaje es un efecto común de la urbanización, afectando negativamente la conectividad ecológica y los procesos naturales. En Jaén, los cambios en el arbustal y los cultivos transitorios no solo alteran la estructura del paisaje, sino que también dificultan la movilidad de especies y la regeneración de ecosistemas. Esta fragmentación puede tener efectos acumulativos que reducen la resiliencia del ecosistema frente a perturbaciones externas.

Xiao et al. (2020) subrayaron que los cambios significativos en el uso del suelo requieren políticas de zonificación y gestión sostenible para equilibrar el desarrollo urbano con la conservación ambiental. En Jaén, los resultados destacan la necesidad de

implementar estrategias que regulen el uso del suelo, priorizando la preservación de ecosistemas clave, como los arbustales, y minimizando la pérdida de áreas agrícolas.

Zhang et al. (2024) identificaron en sus estudios de transición del uso del suelo que las dinámicas observadas en Jaén son consistentes con patrones globales donde la urbanización desplaza gradualmente los ecosistemas naturales y agrícolas. Este desplazamiento puede ser mitigado mediante la integración de prácticas sostenibles en el desarrollo urbano y la restauración ecológica.

Los cambios en la cobertura y uso del suelo en Jaén entre 2000 y 2022 reflejan un proceso claro de urbanización que transforma arbustales y cultivos transitorios en áreas urbanizadas y solares. Comparando estos resultados con estudios de Wang et al. (2020), Mohammadyari et al. (2023), Yang et al. (2021), Xiao et al. (2020), y Zhang et al. (2024), se concluye que estas transiciones presentan desafíos significativos para la sostenibilidad ambiental y la resiliencia ecológica. Para abordar estos desafíos, es fundamental implementar estrategias de planificación territorial sostenible que integren la conservación de ecosistemas clave, la restauración ecológica y un desarrollo urbano equilibrado. Estas acciones son cruciales para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la región y sus recursos naturales.

CONCLUSIONES

El análisis del impacto de la expansión urbana en los ecosistemas de la ciudad de Jaén durante el periodo 2000–2022 evidencia una transformación sustancial en la cobertura y uso del suelo, con un cambio del 43.49% de la cobertura vegetal total, confirmando una transformación sustancial del uso del suelo en el ámbito de estudio.

En cuanto al primer objetivo específico, el análisis realizado permitió identificar un total de 37 nuevas habilitaciones urbanas en la ciudad de Jaén entre los años 2000 y 2022, con una extensión acumulada de aproximadamente 92,01 hectáreas. La evolución de este proceso no ha sido homogénea, pues se observaron periodos de mayor dinamismo y otros de menor intensidad. En términos de superficie, el crecimiento más significativo se registró entre 2006 y 2011, con un incremento de 48,43 ha distribuidas en 17 habilitaciones urbanas, lo que representa el periodo de mayor expansión en términos absolutos. Esta variabilidad evidencia la influencia de factores demográficos, económicos y de planificación urbana en la dinámica de ocupación del suelo.

Respecto al segundo objetivo, la tasa de crecimiento de las habilitaciones urbanas muestra una tendencia creciente, aunque con variaciones significativas entre los intervalos analizados. La tasa promedio pasó de 16,42 ha por año en el primer periodo (2000–2005) a 55,09 ha por año en el último intervalo (2017–2022), lo que evidencia una intensificación del proceso de urbanización en el transcurso de las dos últimas décadas.

En relación con el tercer objetivo, los ecosistemas periurbanos más afectados fueron los arbustales, que disminuyeron de 3,116.64 ha en 2000 a 1,495.07 ha en 2022, los herbazales, que se redujeron de 118.43 ha en 2011 a 17.41 ha en 2022, y los cultivos transitorios, que

pasaron de 1,317.45 ha en 2011 a 993.16 ha en 2022. Estos resultados evidencian que la expansión urbana se desarrolló a costa de la pérdida de ecosistemas estratégicos.

Finalmente, se determinó que el cambio de la cobertura vegetal en el periodo de estudio generó impactos significativos altos sobre la dinámica ecológica local, afectando la conectividad de los hábitats, reduciendo la biodiversidad y limitando servicios ecosistémicos clave como la regulación hídrica, la captura de carbono y el suministro de hábitats para la fauna silvestre.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achard, F., Boschetti, L., Brown, S., Brady, M., Defries, R., Grassi, G., ... Souza, C. (2014). *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forest remaining forests, and forestation*. Wageningen, Netherlands: GOF-C-GOLD.
- Ahmed, H. O., Kheiry, M. A., & Yasin, E. H. E. (2023). Land-use land-cover change detection using geospatial techniques in Zalingei, Central Darfur, Sudan. *Journal of Information Systems and Informatics*, 5(4), 1676–1686. <https://doi.org/10.51519/journalisi.v5i4.624>
- Aguilar, A. G. (2008). Peri-urbanization, illegal settlements and environmental impact in Mexico City. *Cities*, 25(3), 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2008.02.003>
- Agyemang, F. S., Silva, E., y Poku-Boansi, M. (2020). *Understanding peri-urbanization through the lens of land-use change: Insights from Ghana*. *Land Use Policy*, 99, 104993. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104993>
- Allen, A. (2003). Environmental planning and management of the peri-urban interface: perspectives on an emerging field. *Environment and Urbanization*, 15(1), 135–147. <https://doi.org/10.1177/095624780301500103>
- Autoridad Nacional del Agua. (2013). *Estudio de suelos de la zona Jaén–San Ignacio*. Supervisión Nacional de Recursos Hídricos.
- Barsky, A. (2005). El periurbano productivo, un espacio en constante transformación. introducción al estado del debate, con referencias al caso de Buenos Aires. *REVISTA ELECTRÓNICA DE GEOGRAFÍA Y CIENCIAS SOCIALES*, IX(194), 36. <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-194-36.htm>
- Berberoglu, S., & Akin, A. (2009). Assessing different remote sensing techniques to detect land use/cover changes in the eastern Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(1), 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2008.06.002>
- Berlanga R., C. A., García C., R. R., López B., J., & Ruiz L., A. (2010). Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973–2000). *Investigaciones geográficas*, 72, 7–22. <https://doi.org/10.14350/rig.56770>

- Bhatt, G., Kumar, M., & Duffy, C. J. (2014). A tightly coupled GIS and distributed hydrologic modeling framework. *Environmental Modelling & Software*, 62, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.003>
- Chamas, P. (2020). *Gestión de la salud ambiental en las zonas urbanas: aire, agua, edificaciones, cambio climático, inactividad física*. <https://blogs.iadb.org/ciudades-sostenibles/es/gestion-urbana-salud-ambiental-humana-calidad-medio-ambiente-aire-agua-edificacion-cambio-climatico-ciudad-barrio-vivienda-pandemia/>
- Chen, W., Wang, G., & Zeng, J. (2023). Impact of urban expansion on ecosystem services in different urban agglomerations in China. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04830-y>
- Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de teledetección*, 10(1–9).
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- Chavez Jr., 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).
- Cihlar, J. (2000). Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. *International journal of remote sensing*, 21(6–7), 1093–1114. <https://doi.org/10.1080/014311600210092>
- Civeira, G., & Rositano, F. (2020). Evaluación ambiental en áreas urbanas y periurbanas de la Región Metropolitana de Buenos Aires: ¿cuál es la relación entre servicios de los ecosistemas e indicadores demográficos? *Cuaderno Urbano*, 28(28), 181–198. <https://doi.org/10.30972/CRN.28284330>
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Congalton, R. G., Oderwald, R. G., & Mead, R. A. (1983). Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 49(12), 1671–1678.

- Congedo, L. (2013). Semi-Automatic Classification Plugin for QGIS. Rome: Sapienza University. Retrieved from http://www.academia.edu/download/34540581/WPemiAutomatic_Classification_Plugin_for_QGIS.pdf
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2016). Introducing a new open-source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental modelling & software*, 85, 129– 138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004>
- Environmental Law Institute. (2003). *Conservation thresholds for land use planners*. Washington, DC: Environmental Law Institute. Disponible en <https://www.eli.org>
- Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Collischonn, W., Ames, D. P., & Rigo, D. (2015). Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges. *Environmental Modelling & Software*, 64, 58– 71. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.012>
- FAO (1996). Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes (Forestry Paper 130). Rome, Italia: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm>
- Font Quer, P. (1982). *Diccionario de Botánica*. Editorial Labor.
- Gobierno Regional de Cajamarca; INGEMMET. (2010). *Geomorfología del departamento de Cajamarca: identificación de terrazas aluviales y procesos fluviales*. Secretaría Técnica del ZEE Cajamarca.
- Gu, Y., Qiao, X., Xu, M., Zou, C., Liu, D., Wu, D., & Wang, Y. (2019). Assessing the impacts of urban expansion on bundles of ecosystem services by DMSP-OLS nighttime light data. *Sustainability*, 11(21), 5888. <https://doi.org/10.3390/su11215888>
- Hathout, S. (2002). The use of GIS for monitoring and predicting urban growth in East and West St Paul, Winnipeg, Manitoba, Canada. *Journal of Environmental management*, 66(3), 229– 238. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)90596-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)90596-7)
- Hegazy, I. R., & Kaloop, M. R. (2015). Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.02.005>

- Hernández, I. G., Dorantes, A., & Feldman, R. E. (2018). La urbanización y su impacto en la variación estacional de las aves de la Ciudad de Mérida. *Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.*
- Impacto, impacto social y evaluación del impacto.* (2007). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352007000300008
- Ingwani, E. M., Makhado, R. A., & Biaba, N. (2024). The impacts of peri-urban expansion on municipal and ecosystem services: Experiences from Makhado Biaba Town, South Africa. *Urban Forum* 35, 297–327 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12132-023-09499-7>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (1999). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia*. Subdirección de Agrología, IGAC.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2022). *Glosario de términos estadísticos*. Lima: INEI.
- Kachhwala, T. S. (1985). Temporal monitoring of forest land for change detection and forest cover mapping through satellite remote sensing. In *Proceedings of the 6th Asian Conf. on Remote Sensing* (pp. 77–83). Hyderabad.
- Kennedy, Y. (2024). Land cover changes and urban expansion in the Philippines: Analyzing metropolitan growth, climate factors, and environmental impacts from 2017 to 2023. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/385252083>
- Ke, X., Zhou, Q., Zuo, C., Tang, L., & Turner, A. (2020). Spatial impact of cropland supplement policy on regional ecosystem services under urban expansion circumstance: A case study of Hubei Province, China. *Journal of Land Use Science*, 15(5), 673–689. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2020.1817166>
- Kittle, J. L., Duda, P. B., Ames, D. P., & Kinerson, R. S. (2006). The BASINS watershed analysis system–Integrating with open source GIS. Presented at *GIS and Water Resources IV-AWRA 2006 Spring Specialty Conference*. Houston, Texas, May 8–10.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2001). *Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions*. Annual Review of Environment and Resources.
- Lawal, I. A., & Gulma, U. L. (2024). Assessment of land use and land cover change detection for Argungu Urban: A remote sensing and GIS approach. *International Journal of Science and Research Archive*, 13(2), 1434–1439. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.2.2278>

- Llactayo L., W. (2016). *Resultados del análisis de deforestación en la Amazonía Peruana para el período 2014–2015* (Report n. 0028-2016 MINAM/DVMDERN/DGOT/WLLACTAYO). Lima, Peru: MINAM.
- Manero, F. (1998). Diversidad de impactos y su protección ambiental en espacios periurbanos. *XXIV Congreso de La OICI*, 463–475.
- Marinas, D. I., Serrato, F. B., & Iborra, J. R. (2017). El impacto territorial del uso agrícola y turístico del litoral: evolución de los cambios de uso del suelo en las cuencas litorales del sur de la Región de Murcia (1956–2013). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 73, 295–311. <https://doi.org/10.21138/bage.2419>
- MINAM & CIAT (2014). *Convenio marco de cooperación interinstitucional entre el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Ministerio del Ambiente (MINAM)*. Peru. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/4.-CIAT.pdf>
- MINAM (2014a). *Mapas kernel como indicador de la concentración de la pérdida de bosques húmedos amazónicos del Perú*. Lima, Peru: Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático, MINAM. Retrieved from http://www.bosques.gob.pe/archivo/81ea34_nota_tecnica_1_2016.pdf
- MINAM (2014b). Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación. Dirección General de Ordenamiento Territorial. Lima, Peru: MINAM. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wpcontent/uploads/sites/18/2013/10/Protocolo-Validacion-Mapa-Deforestacion.pdf>
- MINAM (2015a). Cuantificación y Análisis de la Deforestación en la Amazonia Peruana en el período 2010–2011–2013–2014. Lima, Perú: MINAM. Retrieved from http://infobosques.com/portal/wpcontent/uploads/2017/03/Memoria_Descriptiva_Cambios_Cobertura_Bosque_2014.pdf
- MINAM (2015b). Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. Memoria descriptiva. Lima, Perú. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wpcontent/uploads/sites/6/2013/10/MAPA-NACIONAL-DE-COBERTURA-VEGETALFINAL.compressed.pdf>
- Mohammadyari, F., Zarandian, A., Mirsanjari, M. M., Suziedelyte Visockiene, J., & Tumeliene, E. (2023). Modelling impact of urban expansion on ecosystem services: A scenario-based approach in a mixed natural/urbanised landscape. *Land*, 12(291). <https://doi.org/10.3390/land12020291>

- Municipalidad Provincial de Jaén. (2013). *Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad de Jaén 2013–2025*. Jaén: Municipalidad Provincial de Jaén.
- Municipalidad Provincial de Jaén. (2013). *Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad de Jaén 2013–2025* (Mapa de Peligros elaborado por INDECI, abril 2005). Jaén, Perú: Municipalidad Provincial de Jaén.
- Nations, U., of Economic, D., Affairs, S., & Division, P. (2018). *World Urbanization Prospects The 2018 Revision*.
- ¿Qué es un ecosistema? | Biodiversidad Mexicana. (n.d.). 2020. Retrieved July 1, 2022, from <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/quees>
- OECD. (2021). *Rural-Urban Partnerships: An Integrated Approach to Economic Development*. OECD Publishing.
- ONU-Hábitat. (2020). *World Cities Report 2020: The value of sustainable urbanization*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.
- Osorio, L. P., Mas, J. F., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México. *Investigaciones geográficas*, 88, 60–74. <https://doi.org/10.14350/rig.43853>
- 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.
- Puplampu, D. A., & Bofo, Y. A. (2021). Exploring the impacts of urban expansion on green spaces availability and delivery of ecosystem services in the Accra metropolis. *Environmental Challenges*, 5, 100283. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100283>
- Phukan, P., Thakuria, G., & Saikia, R. (2013). Land use land cover change detection using remote sensing and GIS techniques: a case study of Golaghat district of Assam, India. *International Research Journal of Earth Sciences*, 1(1), 11–15. Retrieved from http://www.isca.in/EARTH_SCI/Archive/v1/i1/2.ISCA-IRJES-2013-003.pdf
- Ravetz, J. y Sahana, M. (2025). ¿Dónde está el periurbano? Mapeando las áreas «alrededor, más allá y entre». *Fronteras en ciudades sostenibles*, 7 (1436287). <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1436287>
- Rojas Briceño, N. B., Barboza Castillo, E., Maicelo Quintana, J. L., Oliva Cruz, S. M., & Salas López, 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*, 81. <https://doi.org/10.21138/bage.2538a>
- Rudel, T. K., Defries, R., Asner, G. P., & Laurance, W. F. (2009). Changing drivers of deforestation and new opportunities for conservation. *Conservation Biology*, 23(6), 1396– 1405. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01332.x>
- Sahana, M., Sajjad, H., Patel, P. P., & Patel, N. (2025). *Understanding peri-urbanization: Exploring definitions, dynamics, and dimensions*. *Frontiers in Sustainable Cities*, 7, 1436287. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1436287>
- Scala, P., Toimil, A., Álvarez-Cuesta, M., Manno, G., & Ciraolo, G. (2024). Mapping decadal land cover dynamics in Sicily's coastal regions. *Scientific Reports*, 14(1), 22222. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73085-5>
- SENAMHI. (2023). *Valores climatológicos de la estación Jaén*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe>
- Servicio Geológico Minero del Perú [INGEMMET]. (2007). *Estudio de geología temática para zonificación ecológica y económica del Gobierno Regional de Cajamarca*. INGEMMET.
- Servicio Geológico Económico Cajamarca. (s. f.). *Estudio geológico-económico de rocas y minerales industriales en la Región Cajamarca* (Boletín 33). Gobierno Regional de Cajamarca.
- Serra, P., Pons, X., & Saurí, D. (2008). Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: a spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*, 28(3), 189–209. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.001>
- Sheng, S., Yang, B., & Kuang, B. (2022). Impact of cereal production displacement from urban expansion on ecosystem service values in China: Based on three cropland supplement strategies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4563. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084563>
- Sobhani, P. (2024). Urban development impacts on natural ecosystems in urban protected areas of Tehran province, Iran. *Heliyon*, 10(e40572). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40572>
- Story, M., & Congalton, R. G. (1986). Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, 52(3), 397–399.
- Tesfay, K. B., Gebregiorgis, F. A., & Ayele, W. T. (2025). *Peri-urbanization in the Global South: A systematic review of concepts, theories, and methods*. *Land*, 14(7), 1483. <https://doi.org/10.3390/land14071483>

- Thakkar, A. K., Desai, V. R., Patel, A., & Potdar, M. B. (2017). Post-classification corrections in improving the classification of Land Use/Land Cover of arid region using RS and GIS: The case of Arjuni watershed, Gujarat, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.11.006>
- USGS. (2000–2022). *Landsat 4–5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS, Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 Collection 2 Level-1*. U.S. Geological Survey. <https://earthexplorer.usgs.gov>
- von Thünen, J. H. (1966). *The isolated state* (C. M. Wartenberg, Trad.; P. Hall, Ed.). Pergamon Press. (Obra original publicada en 1826).
- Wang, W., Wu, T., Li, Y., Xie, S., Han, B., Zheng, H., & Ouyang, Z. (2020). Urbanization impacts on natural habitat and ecosystem services in the Guangdong-Hong Kong-Macao “Megacity.” *Sustainability (Switzerland)*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/su12166675>
- Xiao, Y., Guo, L., & Sang, W. (2020). Impact of fast urbanization on ecosystem health in mountainous regions of southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17030826>
- Yang, Y., Zhang, H., Zhao, X., Chen, Z., Wang, A., Zhao, E., & Cao, H. (2021). Effects of Urbanization on Ecosystem Services in the Shandong Peninsula Urban Agglomeration, in China: The Case of Weifang City. *Urban Science*, 5(3), 54. <https://doi.org/10.3390/urbansci5030054>

ANEXOS

A. Mapas elaborados

1. Mapa de ubicación.
2. Mapa de cobertura vegetal al año 2000
3. Mapa de cobertura Vegetal al año 2005
4. Mapa de cobertura Vegetal al año 2011
5. Mapa de cobertura Vegetal al año 2017
6. Mapa de cobertura Vegetal al año 2022
7. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2000-2005
8. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2000-2011
9. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2000-2017
10. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2000-2022
11. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2005-2011
12. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2005-2017
13. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2005-2022
14. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2011-2017
15. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2011-2022
16. Mapa de cambio y no cambio de cobertura entre los años 2017-2022
17. Mapa de transición de cobertura entre los años 2000-2005
18. Mapa de transición de cobertura entre los años 2000-2011
19. Mapa de transición de cobertura entre los años 2000-2017
20. Mapa de transición de cobertura entre los años 2000-2022
21. Mapa de transición de cobertura entre los años 2005-2011
22. Mapa de transición de cobertura entre los años 2005-2017
23. Mapa de transición de cobertura entre los años 2005-2022
24. Mapa de transición de cobertura entre los años 2011-2017
25. Mapa de transición de cobertura entre los años 2011-2022
26. Mapa de transición de cobertura entre los años 2017-2022