



Simulación de escenarios de crecimiento urbano mediante Sistemas de Información Geográfica, Redes Neuronales Artificiales y Autómatas Celulares para el municipio de Jamundí

Laura Isabel López Ibarra

Tipo de documento para optar al título de Magíster en Tecnologías de la Información Geográfica

Asesores de recursos académicos: Juan Pablo Charry Osorio (asesor bibliográfico)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia
2026

Cita	(López Ibarra, 2026)
Referencia	López Ibarra, L. I. (2026). <i>Simulación de escenarios de crecimiento urbano mediante Sistemas de Información Geográfica, Redes Neuronales Artificiales y Autómatas Celulares para el municipio de Jamundí, Valle del Cauca</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica, Seleccione cohorte posgrado

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Copilot, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1 Planteamiento del problema	12
1.1 Antecedentes	12
2 Justificación.....	25
3 Objetivos	27
3.1 Objetivo general	27
3.2 Objetivos específicos.....	27
4 Hipótesis.....	28
5 Marco teórico	29
6 Metodología	43
6.1 Recolección de información cartográfica y documentos oficiales del área de estudio	43
6.2 Cuantificación de cambios del suelo urbano y la red vial	44
6.3 Simulación de crecimiento urbano	44
6.5 Escenarios de crecimiento futuro de acuerdo con los instrumentos de planificación	46
7 Resultados	47
7.1 Identificación de cambios.....	47
7.1.1 Cambios en la ocupación urbana	47
7.1.2 Cambios en la infraestructura vial	53
7.1.3 Patrones de ocupación.....	58
7.1.3 Cambio de cobertura	61
7.2 Simulación de crecimiento urbano	72
7.2.1 Evaluación de correlación.....	72

7.2.2 Área de cambio	73
7.2.3 Modelado del potencial de transición	76
7.2.3 Simulación de Autómata Celulares.....	77
7.2.4 Validación	80
7.3 Escenarios de crecimiento urbano futuro – instrumentos de planificación.....	81
7.3.1 Plan de Desarrollo Municipal 2024 – 2027 Jamundí se transforma	81
7.3.2 Plan Básico de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Jamundí 2002.....	86
7.3.4 Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Farallones de Cali.	91
8 Discusión	95
9 Conclusiones	96
10 Recomendaciones	99
Referencias	100

Lista de tablas

Tabla 1	Superficie urbana e incremento en la ocupación para el período.....	51
Tabla 2	Modificaciones clasificación de usos del suelo.....	52
Tabla 3	Longitud en kilómetros de las vías para el período 2002-2022	54
Tabla 4	Propiedades de las imágenes satelitales Landsat.....	62
Tabla 5	Muestra por categorías	68

Lista de Figuras

Figura 1	Componente de autómata celular genérico	37
Figura 2	Proceso de transición de autómatas celulares	38
Figura 3	Representación de un perceptrón multicapa	40
Figura 4	Flujo metodológico	43
Figura 5	Modelo de ocupación urbana del Plan Básico de Ordenamiento Territorial	50
Figura 6	Cambios de los perímetros urbanos	51
Figura 7	Plano No U20 Sistema Vial Actual y propuesto POT	53
Figura 8	Sistema vial rural actual y propuesto U21 POT	54
Figura 9	Vías digitalizadas	55
Figura 10	Trama urbana residencial compacta	56
Figura 11	Trama urbana residencial dispersa	57
Figura 12	Trama metropolitana	58
Figura 13	Patrón agregado	59
Figura 14	Patrón de crecimiento en urbanización	60
Figura 15	Patrón de crecimiento nodal	61
Figura 16	Imágenes Earth Explorer	62
Figura 17	Imagen corregida	63
Figura 18	Histogramas de las bandas	64
Figura 19	Composición de bandas	65
Figura 20	Parámetros estadísticos	66
Figura 21	Cobertura del suelo 2000	69
Figura 22	Cobertura del suelo 2012	70
Figura 23	Cobertura 2023	71
Figura 24	Resultado de la evaluación de correlación	72

Figura 25 Matriz de cambio de cobertura 2000 - 2012	74
Figura 26 Matriz de transición de cobertura	74
Figura 27 Transición de coberturas	75
Figura 28 Curva de aprendizaje de la red neuronal.....	77
Figura 29 Simulación de cobertura 2023	78
Figura 30 Simulación de cobertura 2023	79
Figura 31 Magnitud de error a diferentes espaciales	80
Figura 32 Comparación de coberturas simuladas de la cuenca baja del río Timba	82
Figura 33 Comparación de coberturas simuladas en los suelos clase 2 y 3	85
Figura 34 Plano U12 Áreas de protección POT	87
Figura 35 Comparación de coberturas simuladas en las áreas de protección de los nacimientos.....	88
Figura 36 Comparación de coberturas simuladas en las áreas de protección de los drenajes	89
Figura 37 Comparación de cobertura simuladas en las áreas de protección del río Cauca	90
Figura 38 Zonificación del Plan de Manejo PNN	91
Figura 39 Comparación de coberturas simuladas del PNN Farallones.....	94

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AC	Autómatas Celulares
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
MOLUSCE	Modules for Land Use Change Simulations
PBOT	Plan Básico de Ordenamiento Territorial
POMCH	Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas
PNN	Parque Nacional Natural
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
RNA	Redes Neuronales Artificiales
SIG	Sistemas de Información Geográfica

Resumen

El municipio de Jamundí pasará de 96.993 habitantes en 2005 a 181.942 en 2025 según proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE, este crecimiento se debe principalmente a políticas de Estado implementadas, como los macroproyectos de viviendas de interés social y programas de gratuidad a nivel nacional, en el Valle del Cauca construidos en zonas de gran valor ecosistémico como el río Cauca y en zonas de riesgo de inundación. Con el agravante que este crecimiento disperso no se ve reflejado en el crecimiento vial, equipamientos y servicios lo que ha generado problemas de carácter ambiental, económico y social.

Debido a las problemáticas generadas por el crecimiento urbano sin planificación, este trabajo aplicó un modelo de simulación de escenarios futuros que contribuya a la planificación territorial en el municipio de Jamundí, para ello en primer lugar identificó los cambios de las zonas urbanas con fotografía aéreas y satelitales, a continuación, definió el potencial de transición de uso cobertura del suelo con el método de Redes Neuronales Artificiales, seguidamente, aplicó el modelo de Autómatas Celulares para simular el crecimiento urbano y finalmente se analizaron espacialmente los escenarios de crecimiento futuro de acuerdo con los instrumentos de planificación existentes en el territorio, con lo que se pretende obtener datos para implementar políticas públicas en los diferentes plazos que contribuyan a generar un desarrollo deseable a determinadas zonas y no hacia otras.

Palabras clave: Simulación, crecimiento urbano, redes neuronales artificiales, autómatas celulares y planificación territorial.

Abstract

The municipality of Jamundí is projected to grow from 96,993 inhabitants in 2005 to 181,942 in 2025, according to the National Administrative Department of Statistics (DANE). This growth is primarily due to the implementation of government policies such as large-scale social housing projects at the national level and subsidized housing programs. In the Valle del Cauca region, these projects have been developed mainly along environmentally valuable areas such as the Cauca River and in zones at clear risk of flooding. However, this dispersed growth has not been matched by significant development in transportation infrastructure, facilities, and services, leading to environmental, economic, and social problems.

Due to the problems generated by unplanned urban growth, this work aims to develop a simulation model of future scenarios that contributes to territorial planning in the municipality of Jamundí. To this end, changes in urban areas will first be identified using aerial and satellite photography. Subsequently, the potential for land use/cover transition will be modeled using Artificial Neural Networks. Next, urban growth will be simulated using a Cellular Automata model. Finally, future growth scenarios will be spatially analyzed according to existing planning instruments in the territory. The aim is to obtain data to implement short-, medium-, and long-term public policies that contribute to generating desirable development in certain areas and not in others.

Keywords: Simulation, urban growth, artificial neural networks, cellular automata, and territorial planning.

Introducción

La urbanización acelerada en el municipio de Jamundí, propiciada principalmente en el Corredor Metropolitano Cali –Jamundí como única zona de expansión de la Ciudad de Cali establecida por el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Santiago de Cali mediante el Acuerdo 0373 de 2014, ha generado grandes impactos ambientales, sociales, económicos y culturales, creando la necesidad de unir esfuerzos administrativos, técnicos y académicos que contribuyan a comprender mejor la dinámica del territorio actual y futuro que aporten a una mejor planificación urbana.

Para planear el crecimiento urbano desde una mejor y más informada planificación territorial, es necesario analizarlo mediante herramientas como los modelos de simulación que han demostrado su capacidad para explorar escenarios posibles, probables o deseables de cambios de usos del suelo de manera general y en lo particular del crecimiento urbano.

De los diferentes modelos utilizados, llama la atención los que se basan en Redes Neuronales Artificiales (RNA) y Autómatas Celulares los cuales son los más utilizados en las últimas décadas, para estudiar principalmente el crecimiento urbano, estos modelos emplean una imagen regular del territorio a partir de datos raster que proporciona imágenes de satélite y que proporcionan una mayor capacidad y flexibilidad para el análisis espacial.

El presente proyecto tiene como propósito aplicar un modelo de simulación de escenarios de crecimiento urbano mediante Sistemas de Información Geográfica y Redes Neuronales Artificiales y Autómatas Celulares con el fin de generar resultados que contribuyan a la planificación territorial del municipio de Jamundí. Para ello, se parte de la definición y el análisis de los cambios en las zonas urbanas, los cuales obedecen a una correlación entre variables, como la facilidad de acceso a vías y las pendientes de terreno, entre otras, que generan efectos de atracción y repulsión de la expansión urbana.

1 Planteamiento del problema

La transformación del territorio en las últimas décadas responde a los cambios de los usos del suelo relacionados principalmente con el crecimiento de las áreas urbanas, la explotación agrícola, ganadera, industrial y minera que busca satisfacer la necesidad creciente de productos y servicios para la población producto del crecimiento demográfico a nivel mundial, lo que genera presiones relevantes sobre los recursos naturales que causan impactos irreversibles sobre algunos sistemas naturales, de ahí la importancia de la planificación urbana como alternativa que promueva el desarrollo sostenible.

Estos cambios se demuestran en el municipio de Jamundí con el incremento del crecimiento poblacional pasando de 96.933 en 2005 a 182.290 en 2026, con una variación de 85.357 habitantes. Y el aumento de la división político-administrativa de 2 veredas en la zona rural de 22 barrios, 51 agrupaciones humanas (urbanizaciones, conjuntos, condominios y parcelaciones) 7 ciudadelas y 3 planes parciales en la zona urbana, ente el periodo 2016 y 2024.

1.1 Antecedentes

La revisión de antecedentes se realizó en tres partes: la primera relacionada con los avances teóricos del proceso de crecimientos urbano a diferentes niveles, una segunda parte con las investigaciones en el área de estudio y una tercera parte relacionada con aproximaciones metodológicas que aportan al presente trabajo.

Frente al crecimiento urbano en Colombia, la Universidad Externado de Colombia (2007), aporta información sobre el proceso de concentración acelerado de la población colombiana en las zonas urbanas que contrario a lo esperado, no ha disminuido y en cambio ha presentado un incremento debido al decaimiento de la agricultura, la pobreza rural, la concentración de la tierra y al conflicto armado. En cuanto al fenómeno de la metropolización identifican que corresponde a que, en las ciudades grandes e intermedias, el crecimiento se ha desbordado hacia las zonas rurales colindantes de los centros poblados que, en ausencia de planeación y de concertación de intereses, se convierten en dormitorio, y en la mayoría de los casos los barrios periféricos son los que reciben la población migrante y más pobre. Y concluye importantes reflexiones alrededor de hacia donde debe orientarse a futuro la política pública, enfatizando el fortalecimiento de procesos de

planeación para superar los retos que los procesos de urbanización en el mediano y largo plazo, lo cual es precisamente lo que se propone para la presente investigación.

Diez años después, el Departamento Nacional de Planeación, encontró que Colombia, al igual que muchos otros países de América Latina y el Caribe, se ha urbanizado en las últimas décadas y que la población de los centros urbanos (34,7 millones) equivale a un 78%, y alcanzará el 83,5% en 2035, según proyecciones, lo que equivalente a 45 millones, la población total actual del país hoy. Por otra parte, las ciudades con más de 100 mil habitantes pasaron de 6 a 53 en la actualidad. Y la población de las ciudades del 40% en 1951 al 78% en 2010, y se estima que para el 2050 alcance 86%. Por lo anterior, frente a este contexto mundial consideran que los municipios debe preparar su crecimiento e incluir en el POT el crecimiento urbano que permita tener una expansión urbana ordenada que sea sostenible ambientalmente sostenibles, inclusiva socialmente y económicamente productivos, lo que demuestra la importancia que puede cobrar las simulaciones de crecimiento urbano en el entendido que los POT se formulan a largo (12 años) mediano (8 años) y corto (4 años) plazo (Galarza et al., 2017)

Más adelante, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2021) en el informe de estadística sociodemográfica aplicada realizó un ejercicio de reconstrucción de series historias poblacionales con el que identifico que en Colombia los niveles de urbanización son superiores al 90%, y se relaciona principalmente con las migraciones internas donde han sido fundamental el atractivo de los centros económicos e industriales. Sin dejar de lado la transición demográfica que ha generado cambios estructurales que superan la organización de jerarquías urbanas, fenómenos como la metropolización y aglomeración urbana de varios municipios, con déficits en vivienda y acceso a servicios básicos en las ciudades, el aumento de hogares que residen en apartamentos y la disminución de los que lo hacen en viviendas en ciudades grandes e intermedias, entre otros.

Finalmente, Fedesarrollo, por su parte realizó un diagnóstico que demuestra que en los últimos 30 años la población de las ciudades aumentó 1,6 veces, mientras que la mancha urbana creció 2,1 veces en promedio, lo que quiere decir que el crecimiento de la mancha fue superior que el crecimiento de la población. De igual manera, evidenció que hay mayor saturación de las ciudades y que la densidad de las ciudades de análisis ha disminuido en un 21,9%. Además, logró identificar que en Colombia prima es mayor el crecimiento horizontal y en expansión que el vertical y en relleno. Por último, en cuanto al tipo de suelo ocupado el análisis arrojó que en promedio para las ciudades y aglomeraciones de más de 100.000 habitantes y sus municipios aglomerados el 26%

del crecimiento se dio en suelo que no se tenía previsto para el desarrollo, ubicándose en suelo rural o suburbano (Saavedra et al., 2022).

Esta parte de la revisión de antecedentes aportó en el conocimiento sobre las razones del proceso de crecimiento urbano, las cuales se pueden identificar en el municipio de estudio. Adicionalmente, se puede ver que conforme avanzan el tiempo en las investigaciones las cifras continúan en aumento y aparecen las preocupaciones sobre impactos y la necesidad de incorporar el ordenamiento territorial este proceso, precisamente el objetivo de la simulación que pretende realizar el presente estudio.

Respecto a los antecedentes de investigaciones realizadas en el área de estudio, Ramírez, Loaiza, Buitrago y Martínez, analizaron la visión regional y metropolitana en los instrumentos de planificación de los municipios del área de influencia inmediata de Cali, a partir de cuatro procesos metodológicos: 1) La búsqueda de convergencias metropolitanas o intermunicipales, regionales a través de una lectura operativa de la suficiencia y articulación de los Planes de Ordenación Territorial; 2) la articulación cartográfica de una visión regional y metropolitana identificada desde las perspectivas que plantea cada municipio en los modelos territoriales o que permita reconocer una visión regional y metropolitana; 3) la incorporación en los POT de la propuesta de lineamientos de la “Carta de Intención de Cooperación Horizontal”; 4) y la identificación de la visión metropolitana a través de los elementos para su construcción. Los resultados de este estudio mostraron las discontinuidades y fragmentaciones espaciales en los modelos territoriales municipales, lo cual indica una ausencia de visión de conjunto en cada entidad territorial, evidenciando la necesidad de construcción colectiva de visiones compartidas, soportadas en alguna figura asociativa como las que prevé la Constitución y la Ley colombiana (Ramírez et al., 2008).

Posteriormente, la Gobernación del Valle del Cauca y Universidad de San Buenaventura, formularon un ordenamiento territorial equilibrado y sostenible a través de modelo físico para el Valle del Cauca, que buscaba articular la red de ciudades intermedias para propender en la población una mejor calidad de vida. Este también, aporta información histórica del proceso de poblamiento y urbanización desde época precolombina hasta la actualidad y sobre el medio biofísico que soporta el sistema. La investigación concluye con unas políticas de ordenamiento territorial para el Valle del Cauca de acuerdo con el modelo territorial propuesto a partir de tres elementos estructurantes: La estructura espacial de centros urbanos (re-categorización urbana), una directriz asociada con la complementariedad funcional que apunta a la diversificación de funciones

según las escalas territoriales y una directriz de conectividad en diferentes sentidos (Falla et al., 2009).

Continuando con el proceso de identificación de la metropolización, Londoño (2012) identificó y explicó las transformaciones territoriales ocurridas en el entorno metropolitano de Cali desde 1980 a 2010, teniendo como punto de partida las hipótesis y escenarios propuestos en la obra de Jacques Aprille-Gnisset: Las tipologías urbanas del Valle del Cauca, el contexto regional, del año 1979. Como conclusión el estudio identifico que el proceso de ocupación del entorno metropolitano entre 1980 y 2010, se debió a las limitaciones económicas y el crecimiento poblacional generando la gran expansión urbana de Cali hacia el oriente, norte y sur. También, resalta el crecimiento de la suburbanización en el corredor vial Cali-Jamundí.

Frente a las propuestas, la Universidad del Valle, realizó en 2018 el “diagnóstico, definición y propuesta de conformación del área metropolitana del Sur del Departamento del Valle del Cauca y Norte del Departamento del Cauca –AMVACA”. El cual aporta información relacionada con el análisis de los subsistemas biótico-físico, funcional, económico, político y social, y caracteriza la urbanización en perspectiva histórica (evolutiva), actual y tendencias de todas las cabeceras de los municipios objeto de estudio, entre la cual se encuentra la de Jamundí, objeto de este estudio. Como conclusión la universidad identifico que existe un proceso evidente y creciente de metropolización en el sur del Valle y norte del Cauca con elementos universales o que se corresponden a leyes generales de la urbanización y características particulares que dependen de la realidad geográfica, histórica, política y socioeconómica (Patiño & Martínez, 2018).

En el mismo sentido, Alarcón (2015), planteó un ordenamiento regional que oriente el crecimiento del entorno conurbado de la región metropolitana de Cali como instrumento para promover su integración municipal, disminuir los desequilibrios territoriales y proteger las condiciones ecosistémicas de la región. La investigación analiza el proceso de conurbación del área metropolitana de Cali a través de las diferentes dinámicas urbano – regionales y consolida una propuesta dirigida a integrar los cinco municipios en una región a través de sus entornos conurbados y así proteger de la desnaturalización a las zonas rurales entre ellos, dentro de los cinco municipios se encuentra el objeto del presente estudio.

Teniendo en cuenta que parte del crecimiento urbano del municipio de Jamundí se debe principalmente al municipio de Cali se encontró que parte este Sevillano y Bravo (2018) realizaron un análisis multitemporal de la cobertura urbana de Cali para los años 1986, 1998 y 2014 mediante

el uso de herramientas de percepción remota, evidenciando un aumento con una tasa anual de cambios de 0.9845 Km/año, equivalente a 2.756,6 Ha de área urbana de 1986 a 2014.

Por su parte, Arteaga, Escobar y Galindo, estudiaron la migración y las transformaciones urbanas - crecimiento poblacional en Cali, en cuatro fases: 1) análisis de crecimiento poblacional a partir de datos de las instituciones oficiales, encontrando tres pasos; 2) análisis multitemporal de expansión urbana, esta fase muestra el impacto en la superficie urbana relacionada con el aumento de los pobladores, destacándose el periodo 1986-1998, en el cual el aumento requirió aproximadamente un 17% del área urbana, pasando de 7.472,17 Ha a 8.724,85 Ha, y el año 2014 aumento próximo al 37%, dejando como resultado 10.228,70 Ha; 3) análisis de evolución del área urbana, de acuerdo a la información del Plan de Ordenamiento Territorial, encontrando que en los 90s, fueron aprobadas 3.402 hectáreas, de las cuales el 30% son del año 95 y el otro 40% del año 2000; y 4) análisis de distribución poblacional, en esta fase encontraron que hay una distribución heterogénea de la población y con un rango amplio de variación en las comunas del municipio, observando que las comunas donde se presentó un crecimiento de las viviendas fueron la 1, 2, 6, 13, 14, 15, 17, 18, 19 y 21. Sobresaliendo las comunas 6 y 17 donde aumentaron 10.000 viviendas en el periodo de estudio. Lo cual permite interpretar que sus superficiales se han mutado drásticamente al ser foco de desarrollo urbano y la expansión (Arteaga et al., 2020).

Así mismo, Trochez (2019), estudio la dinámica del acuífero aluvial del río Cauca al sur de la ciudad de Santiago de Cali en la zona de expansión urbana, con el objetivo de determinar si la expansión urbanística amenaza la recarga del acuífero, también, evaluó el riesgo por agotamiento del acuífero para cada uno de los planes parciales, a partir del balance de agua entrada y salida de los escenarios de modelación numérica, y posterior a ello se comparó los escenarios con y sin intervención, obteniendo como resultado que los planes parciales propuestos hacia el Suroccidente de la zona de expansión afectará la dinámica del acuífero en cuanto su balance que los que se propone al Nororiente, por último se plantea una metodología para que el desarrollo urbanístico no afecte el balance de agua del acuífero en la zona de expansión.

Para el caso del municipio de Jamundí se encontró que Betancourt (2015), analizó la dinámica espacial y temporal en los cambios de la cobertura del suelo en el área de influencia del corredor metropolitano Cali – Jamundí (Valle del Cauca, Colombia) entre 1984 y 2013. El trabajo evaluó los cambios de cobertura del suelo mediante un análisis multitemporal de 3 imágenes Landsat de los años 1984, 1998 y 2013, calculó estadísticas de cambios de coberturas aplicando la

técnica de tabulación cruzada, y genero mapas con las cualidades ambientales y paisajísticas y mapas de la ocupación del suelo destacando las zonas estables y los procesos territoriales implicados en los cambios. El estudio aporta en la construcción de una base cartográfica útil en la planeación y ordenación del territorio.

También, Arroyave (2021), analizó el fenómeno de metropolización y sus efectos sobre el territorio en el área metropolitana de Cali, generando cartografías y esquemas de cada uno de los aspectos que le concierne a una entidad metropolitana: estructura del territorio, estructura ecológica principal – base natural de soporte, infraestructura de conexión y movilidad, infraestructura de servicios públicos, servicios sociales y equipamientos, sistema de ciudades y asentamientos, así mismo, consultó las normativas colombianas que le competen a una entidad metropolitana y su posible conformación, determinando que se encuentran las condiciones legales para llevarse a cabo.

Por su parte, López (2021) caracterizó y analizó el fenómeno de la expansión urbana que se viene presentando desde el año 1990 hasta 2020 en el municipio de Jamundí, su trabajo contextualiza los antecedentes del proceso de urbanización del municipio desde el contexto histórico espacial; describe el proceso de expansión mediante una recopilación de los acuerdos modificatorios del PBOT 2002, que permitieron la incorporación de nuevos suelos urbanos al municipio y caracteriza la dinámica de la vivienda y los grandes proyectos urbanísticos que transformaron morfológica y funcionalmente el territorio; e identifica y analiza los rasgos de la ciudad dispersa y fragmentada en el municipio de Jamundí, obteniendo como resultados las consecuencias e impactos del modelo de ciudad reflejado en el territorio.

En cuanto al tema de la vivienda, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y la Cámara Colombiana de la Construcción (2021), realizó el documento técnico municipal de Jamundí, en el que concluyo que la generación de vivienda se ha cuadruplicado en la última década. Entre los años 2012 y 2013 en el municipio se vendieron al año cerca de 1.200 viviendas; incrementándose a 5.600 para el periodo 2015-2020, y a 8.000 unidades para 2021, debido fundamentalmente al desequilibrio entre la oferta y la demanda de vivienda en Cali que propicia el proceso migratorio hacia Jamundí.

Esta parte aporta algunos insumos importantes para la explicación del crecimiento urbano del municipio de Jamundí, el cual no se puede dar sin conocer el de Cali, así como algunos cartográficos y metodológicos.

Finalmente, en lo relacionado con las aproximaciones metodológicas primero se revisaron los antecedentes de análisis multitemporal apoyado en técnicas de percepción remota encontrando a Aguirre (2022) que realizó el análisis multitemporal del crecimiento urbano de uso y cobertura en la ciudad de Neiva – Huila, con imágenes Sentinel 1 y Landsat 5, 7 de los años 2011, 2014, 2017 y 2021, metodológicamente descargó las imágenes de la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS, las recorto y les aplicó correcciones de los gaps y radiométricas con el Model Maker mediante Erdas Image, después se seleccionó la combinación de bandas con el índice de factor óptimo que es un valor estadístico que proporciona la mejor combinación de las tres bandas para conservar la mayor información espectral (mayores covarianzas entre bandas) y evita la duplicidad de información (menores correlaciones entre bandas), y finalmente, aplico la clasificación no supervisada por el algoritmo de K-Means y la supervisada por el método de máxima verosimilitud, adicionalmente aplico 10 puntos de control para cada clase con Google Earth Pro. De manera global, los resultados que obtenidos son consistentes para las coberturas, el estadístico kappa, estuvo en el intervalo de 80% a 92%, es decir, que las coberturas generadas tuvieron una exactitud de más del 80% respecto a si la clasificación hubiese sido aleatoria.

También, Niño (2020) realizó una investigación para identificar y analizar la dinámica de cambio de usos de suelo del municipio de San Francisco de Sales en el departamento de Cundinamarca, mediante un análisis multitemporal con dos imágenes satelitales, una imagen Landsat-4 1998 y la otra Sentinel-2 del 2018 las dos con baja cobertura de nubes y con firmas espectrales que presentaban características similares, a las cuales se les aplicó una combinación RGB que resaltaban zonas de interés y les aplico filtros y contrastes apoyados por visitas de campos con los que se pudieron obtener muestras y firmas espectrales de cada una de los usos del suelos usando la leyenda Corine Land Cover para Colombia en Nivel 1. Para la clasificación de las imágenes se usaron métodos supervisados del software ENVI que después se validaron con el cálculo de la matriz de confusión, que confronta los resultados de la clasificación, finalmente con los mapas generados se calcularon los cambios con la matriz de tabulación cruzada que sirve para determinar las áreas que cambiaron de uso y las que persistieron entre las dos fechas.

Por su parte, Suárez (2020) realizó un análisis multitemporal del municipio de Chia en el departamento de Cundinamarca con tres imágenes Landsat-5, Landsat-7 y Landsat-8 para los años 1991, 2003 y 2018 a las que se les aplico un proceso de refinado pancromático (Landsat 7 y 8), posteriormente, se ejecutó una clasificación supervisada de máxima probabilidad del software

Erdas Image, a la cual se le aplicó un filtrado morfológico para aumentar la coherencia y continuidad de los píxeles clasificados, y se vectorizó. También, determino la población para los tres años de estudio para determinar el comportamiento de la densidad poblacional encontrando que el municipio presentó un alto crecimiento demográfico, aunque la densidad poblacional era decreciente, esto debido a que el área urbana también había crecido considerablemente respondiendo de manera positiva al aumento poblacional dando como resultado un ambiente de poca aglomeración urbana.

González (2021) realizó el monitoreo del crecimiento urbana mediante imágenes satelitales Landsat en Rionegro Antioquia, se descargaron las imágenes del portal web de USGS, dos imágenes Landsat-8 para los años 2020 y 2013 y dos imágenes Landsat-5 para los años 1997 y 1986 las cuales se recortaron y se les realizó una corrección radiométrica y atmosférica mediante sustracción de objetos oscuros (DOS), la cual se realizó usando el lenguaje de programación Python y un modelo de transferencia radiactiva que incluye el software de ENVI llamado FLAASH Atmospheric Correction. Posteriormente, se realizó la clasificación supervisada en la que se definieron las muestras de entrenamiento usando como imágenes auxiliares para el año 2020 las de Google Earth para las clases: territorios artificializados, superficie de agua, territorios de vegetación, suelos desnudos o degradados y nubes a través del software ENVI con los algoritmos de mínima distancia y el algoritmo de máxima probabilidad, para los cuales se obtuvieron fiabilidades globales altas, mayores al 80%.

También, se encontraron estudios que analizaron el crecimiento urbano sin técnicas de percepción remota como el de Angarita (2015) que analizó el proceso de transformación de Chía en el período 2002-2012, en base a tres aspectos claves: el primero, relacionado con el crecimiento poblacional acelerado del municipio, que durante el 2000-2012 aumento en un 17%, lo que equivale a 16.985 habitantes evidenciados en el aumento en la cantidad de hogares, la necesidad de equipamiento e infraestructura y el aumento en la prestación de servicios públicos; el segundo, el saldo migratorio de Bogotá al municipio de Chía, el cual aumento en un 36% en los diez años de estudio y estuvo relacionado principalmente por continuidad a la capital, menor tráfico vial y mejor calidad de vida; y el tercer aspecto, es el aumento de las zonas urbanas y el incremento del perímetro urbano de Chía, que fue del 1%, al pasar de tener un total de 7.923 Ha a 7.987 en 2012. Finalmente, este estudio pudo evidenciar que el fenómeno de expansión y la transformación del

municipio requiere trabajarse articuladamente con los diferentes instrumentos de gestión y planificación.

Frente a la simulación, Aguilera (2008), presenta el análisis, simulación y valoración de los cambios espaciales en la Aglomeración Urbana de Granada en aproximadamente los últimos 30 años, con el objetivo de desarrollar instrumentos y criterios aplicables en la planificación y toma de decisiones en entornos metropolitanos, donde se analizaron los cambios y se diseñó e implemento un modelo de simulación de los cambios en la ocupación urbana basada en Autómatas Celulares para finalmente elaborar un conjunto de criterios de planificación, especialmente en lo que respecta a las cuestiones eco-paisajísticas, así como un modelo conceptual para un sistema de ayuda a la decisión que aglutine las diferentes herramientas e instrumentos desarrollados. Este estudio aporta en la parte metodológica del presente trabajo.

Por otra parte, Márquez (2008), realizó la simulación del probable patrón de crecimiento urbano en Ciudad Juárez durante los próximos años hasta el 2030, por medio de un modelo de crecimiento urbano calibrado con datos históricos de la expansión en la región, los cuales permitieron pronosticar el crecimiento, usando Autómatas Celulares, aplicados en países desarrollados, usando el contexto en países menos desarrollados. Como resultado se pudo evidenciar que sin tener en cuenta las restricciones establecidas en los programas e instrumentos de planificación para el año 2030 la mancha seria tres veces la actual, mientras que con ellas sería un poco más del doble.

Así mismo, Valdivia y Linares (2013), con autómatas celulares integrados a sistemas de información geográfica simularon con un modelo dinámico de contagio el crecimiento económico de los municipios y delegaciones de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), encontrando intensa interacción local de los municipios o delegaciones, lo que ha permitido obtener una tasa de crecimiento promedio del PIB inferior a la presentada en los últimos años.

En Colombia Tovar (2013) realizó la simulación digital del modelo de desarrollo urbano de la ciudad de Cartagena de Indias, a fin de soportar la emisión de políticas públicas tendientes al desarrollo de la ciudad, utilizando dinámica de sistemas. Como conclusión, el estudio encontró al analizar los diferentes factores de la ciudad de Cartagena se tiene que la población es fundamental, e influye ya sea directa o indirectamente en los demás factores de la ciudad. Así mientras mayor sea la población, más viviendas se construirán, estas ocupan parte del área de la ciudad, por lo que el suelo ocupado será mayor, tanto por las viviendas como por las vías e industrias. La población

también aumenta la demanda de empleo, por lo que las industrias y empleos de igual manera ocupan un lugar en la simulación, así como las vías y el transporte.

Y Polo (2013) presenta la proyección del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Barranquilla para los próximos 20 años; por medio del análisis espacial con herramientas de Sistemas de Información Geográficas -SIG y un análisis retroproyectivo del crecimiento urbano de la metrópoli analizando las dinámicas y transformaciones de la expansión urbana. De este trabajo nos interesa el análisis multitemporal y los datos estadísticos correlacionados de los censos de vivienda y población que permitieron la identificación de las tendencias del crecimiento urbano.

En cuanto a los modelos de simulación Valenzuela combino autómatas celulares y cadenas de Markov para desarrollar un modelo prospectivo del uso y cobertura de suelo para el año 2020 para la ciudad San Luis de Potosí. Para ello, ortorectificó fotografías aéreas de donde extrajo las coberturas para los años 1983, 2000 y 2010, encontrando, por ejemplo, que hubo pérdida de vegetación natural al pasar de un 64% en 1983 a un 55% en el 2000 y finalmente a un 44% en el 2010. Posteriormente, espacialmente selecciono variables explicativas para ajustar los modelos de regresión logística a las diferentes coberturas analizadas obtener imágenes de probabilidad de cambio, determinando que, por ejemplo, para la cobertura vegetal, la distancia a ríos y precipitaciones no influyen, como si lo hace la pendiente y la actividad antrópica. Para la simulación del año 2010 realizó la validación con subíndices de ubicación de kappa, los cuales generaron ajustes excelentes, simulando la posición del 91% de los píxeles correctamente y el kappa de cantidad al 87%, que muestra la cantidad de píxeles de cada clase del mapa simulado con el observado. El ajuste global del modelo se expresado en el índice kappa fue del 84%, lo que significa que la simulación efectuada representa muy bien los cambios ocurridos en el periodo de estudio (Amuzurrutia et al., 2015).

Por otro lado, Gutiérrez (2017) realizó la modelación espacio temporal del crecimiento urbano y cambio de uso del suelo a través de autómatas celulares, su trabajo tiene dos partes: la primera, muestra un análisis del proceso de urbanización utilizando como punto de partida un modelo de epidemias para la representación temporal de dicha dinámica, que posteriormente se generaliza, y la segunda parte en la que se utilizan las cadenas de Markov y los autómatas celulares como alternativa para el análisis de la dinámica espacio temporal del proceso. Dando como resultados, algoritmos en R Versión 3.2.5 para la interpretación de imágenes y para la generación de mapas de la mancha un autómata que generó la simulación del crecimiento urbano.

También, Linares y Picone (2018) modelizaron los cambios de usos del suelo en espacios urbanos con el propósito de conocer el impacto del crecimiento urbano en la conservación del paisaje natural en la ciudad de Tandil, Argentina. Para ello utilizó el software LanduseSim y ArcGIS para simular un escenario proyectivo (2033) de las tendencias actuales y analizó las distribuciones espaciales de estos procesos sobre el área a conservar, la cual por Ley Provincial es Área de Paisaje Protegido Tandil.

Por otro lado, Peraza (2020) presenta un nuevo modelo de agente cognitivo que forma parte de un modelo basado en agentes para llevar a cabo simulaciones de crecimiento urbano, integrando Autómatas Celulares – AC y Redes Neuronales Artificiales – RNA en Culiacán – México, por medio de cuatro fases: en la primera analizó los cambios de uso de los suelos urbanos, para ello digitalizó y clasificó la zona de estudio para los años 1997, 2004 y 2011 para posteriormente generar los mapas ráster. Con la herramienta CrossTab de Idrisi, obtuvo las matrices de tabulación cruzada, con las que analizó las pérdidas y ganancias de cada uso urbano. Posteriormente, con el módulo Land Chage Modeler – LCM de Idrisi, observó los mapas de pérdidas y ganancias para cada una de las categorías. Además, a través de una regresión logística espacial analizó el grado de influencia que tienen ciertos factores con respecto al crecimiento; en la segunda fase realizó las simulaciones con el autómata celular, la primera simulación fue la de 1997 a 2004, el resultado de la comparación del mapa real del 2004 versus el simulado al 2004, muestra una coincidencia de moderada a baja según los índices estadísticos Cramer's y Kappa. Posteriormente, definió las vecindades y las variables de entrada, además, definió las matrices de calibración, las cuales afectaron a cada uno de los factores de entrada; en la tercera fase: definió la red neuronal, la cual es capaz de generar probabilidades de cambio para distintos usos, exploró su uso en conjunto con el AC y definió el mecanismo de cálculo; en la cuarta fase definió el agente cognitivo (integrando la RNA con el agente), el cual pueda modelar factores sociales como, escolaridad, nivel de ingresos y edad. Además, se estableció la interacción del agente cognitivo con el autómata celular, con el objetivo de generar simulaciones prospectivas que aborden temáticas territoriales y socioeconómicas.

De igual forma, Jiménez, Garrocho y Chávez, diseñaron una metodología de modelado de carácter general fundamentada en Autómatas Celulares en Cascada, que permite construir modelos específicos de la expansión de ciudades mexicanas con características contrastantes, como lo son: las áreas metropolitanas de Tijuana, Acapulco y Toluca, considerando diversas restricciones al

crecimiento físico de la ciudad, como, por ejemplo: calles, espacios públicos, áreas no urbanizables por normatividad, por razones ambientales o por límites político-administrativos, entre muchas otras. Lo interesante de este trabajo es el filtro en cascada que permite identificar la regla de transición que mejor replica la realidad observada, al incorporar indicadores globales de bondad de ajuste e identificar la coincidencia de píxeles, lo que ayuda a develar la regla de transición que reporta el mejor ajuste entre la expansión observada de la ciudad y la generada por cada modelo (Jiménez et al., 2021).

Así mismo, Echavarría, Carrillo y Vlassona generaron escenarios predictivos del crecimiento urbano de la ciudad Buena Fe - Ecuador, con el software libre de AC SLEUTH de Nasa, la calibración utilizó las áreas urbanas extraídas de las imágenes satelitales Landsat-5 (1984, 2000), Landsat-8 (2013) y Sentinel (2019), usando el método de clasificación de máxima similitud (coeficiente Kappa 0.88), el resultado se valida el modelo generado con la imagen real del año 2019 (Sentinel-2) mostrando un buen ajuste (coeficiente Kappa 0.84). y demuestra que entre 1984 y 2019 el área urbana de Buena Fe creció más de cuatro veces y el escenario futuro para el 2040 en el caso de seguir la tendencia actual resulta en un 200% de la extensión urbana en las tierras agrícolas llegando aproximadamente a 20 kilómetros cuadrados (Echeverría et al., 2022).

También, Cubillos y Ramos (2025), simularon y predijeron el crecimiento urbano de Santiago de Cali en el periodo de 2021 y 2050 con el modelo SLEUTH que requiere capas rasterizadas que representan las condiciones físicas y espaciales como capas de entrada, en este caso: extensión urbana, áreas excluidas, red vial y el Modelo Digital de Terreno DEM para dos fechas diferentes. Para este análisis se realizó por medio de clasificación supervisada de uso del suelo (zonas urbanas, cuerpos de agua, áreas agrícolas y zonas boscosas), basadas en la metodología de clasificación Corine Land Cover (CLC) en Google Earth Engine de imágenes Landsat 5 desde el año 1984 hasta 2013 y Landsar 8 para el 2020. Una vez obtenido los datos se convirtieron en raster con un tamaño de 30 metros y a continuación, procedieron con la calibración del modelo SLEUTH que es una etapa fundamental para garantizar la fidelidad de las simulaciones que para el norte proyecta un crecimiento contenido, mientras en el sur experimenta una expansión acelerada hasta 2037. Finalmente, la validación con las imágenes satelitales de 2024 arrojó un coeficiente Kappa de 0.89 Norte y 0.78 Sur.

Frente a la herramienta seleccionada para el presente estudio, Principi (2022) utilizó Molusce en la ciudad de Luján para el año 2030 a partir de una clasificación digital y visual de

imágenes satelitales Landsat 5 para 2010 y Sentinel 2 para el 2020 para los mapas de cobertura de tierra urbana, incorporando en el modelos los factores impulsores o limitantes de cambio: distancia al área urbana actual, distancia a las área complementarias, distancia a las principales vías de comunicación, pendiente de terreno, distribución de las áreas protegidas y de recreación. A continuación, se realiza la identificación de cambios de coberturas de tierras por medio de la matriz de transición en la que se evidencia un crecimiento de 5.24 km² equivalente al 4.96% del área urbana. Finalmente, se aplicó el modelo de autómatas celulares para generar el mapa de uso de suelo urbano al año 2030 que indica que el crecimiento será de 6.72 km², es decir, un 20% mayor.

También, Ortiz (2024) analizo los patrones de crecimiento urbano futuro mediante el uso de modelos predictivos SIG en caso de cuenca -Ecuador con imágenes Landsat 5 para los años 1990 y 2000 Landsat 7 para 2010 y Landsat 8 para 2020 a las que se les realizaron correcciones radiométricas y clasificación supervisadas a cinco clases: suelo urbano, bosque, cobertura vegetal, suelos desnudo y cuerpos de agua. A continuación, se escogieron las variables que inciden en los cambios de crecimiento en este caso el modelo de elevación, la distancia de suelos protegidos, vías y áreas urbanizadas y la densidad poblacional a las que se les realizó un proceso de normalización. Para la predicción de cambio por el modelo CA-ANN se utilizó del software QGIS el complemento MOLUSCE, con el que se obtuvo el ráster pronosticado para 2020, el cual se validó con la cobertura real del año 2020, obteniendo una precisión general de 89.8% y una índice kappa general de 0.63. Luego se ingresaron los mapas del 2000 y 2020 y se predijo la cobertura para el año 2040, alcanzando un valor kappa de 0.64. Y finalmente, ingresaron los años 1990 y 2020 y se predijo el 2050 donde se obtuvo un kappa de validación de 0.65.

Y López y Muñoz (2025) aplicaron un modelo de análisis de expansión urbana de la región de los cerros orientales en la localidad de Usaquen utilizando imágenes satelitales de los años 1987, 2005, 2011 y 2017 con los que se elaboran las capas de clasificación de uso y cobertura del suelo, las cuales junto al Modelo Digital de Elevación y las capas de redes viales, caminos rurales y senderos se cargaron en el complemento MOLUSCE como variables explicativas y con el método de Red Neuronal Artificial (RNA) y la definición de los parámetros de entrenamiento, como la tasa de aprendizaje, el número de iteraciones y el tamaño de la vecindad. Las predicciones fueron validadas con una imagen de 2023 con un valor en el índice Kappa general de 0.93097 que corresponde a una concordancia casi perfecta entre el mapa real (validación) y el simulado. Y el Kappa histograma con un valor de 0.97015 que refleja una coincidencia muy alta en la cantidad de

píxeles por clase, independientemente de su ubicación, lo que significa que el modelo predice muy bien las proporciones globales de cada cobertura.

Esta parte de la revisión de antecedentes aporta metodológicamente al desarrollo de los objetivos específicos relacionados con la cuantificación de los cambios los cuales se desarrollaron con percepción remota y la simulación con la herramienta MOLUSCE de QGIS.

En conjunto, los antecedentes expuestos anteriormente, constituyen la línea base conceptual y metodológica del presente trabajo de grado. En la primera parte, los documentos revisados evidencian que el crecimiento urbano en Colombia y en el entorno Cali-Jamundí responde a procesos de metropolización, expansión y presión sobre los suelos rurales y áreas de protección ambiental, lo que confirma la necesidad de herramientas prospectivas que orienten la planificación territorial. Para la segunda parte, los estudios previos encontrados aportan evidencia sobre las dinámicas de expansión, los cambios en las coberturas, la influencia del sistema metropolitano de Cali y los efectos de la urbanización en Jamundí, proporcionando insumos cartográficos y datos históricos que permiten comprender el fenómeno en el área de estudio. Finalmente, la tercera parte, relacionada con las investigaciones metodológicas demuestran la pertinencia y viabilidad del uso integrado de sistemas de información geográfica, análisis multitemporal, autómatas celulares, redes neuronales artificiales para modelar y simular escenarios de crecimiento urbano. Por tanto, estos antecedentes no solo fundamentan el enfoque conceptual y metodológico adoptado, sino que también, evidencia la pertinencia de la investigación, al demostrar el vacío existente en la simulación prospectiva específica para el municipio de Jamundí.

2 Justificación

En la actualidad la expansión urbana es el principal componente del cambio de uso del suelo y la principal fuerza del cambio ambiental al alterar el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas, alterando las coberturas naturales e impermeabilizando el suelo con cubiertas artificiales, produciendo gases de efecto invernadero que modifican el clima por la alteración de los ciclos hidrológicos.

Esta situación es interesante debido al dinamismo y la complejidad de las áreas urbana, que, si bien solo equivalen al 2% de la superficie terrestre, se incrementan a una mayor velocidad y magnitud, además es importante tener en cuenta que en la mayoría de los casos estos se dan en localizaciones fruto de decisiones individuales, que desconocen todas la alternativas de ubicación,

así como de las ventajas y desventajas. Por lo tanto, el proceso de ubicación urbana no sigue un patrón óptimo, extendiéndose sobre áreas naturales o con valor productivo (J. Gutiérrez et al., 2010).

De ahí la importancia del estudiar este fenómeno y la relevancia que en la actualidad tiene los Sistemas de Información Geográfica que permiten evaluar e integrar las diferentes alternativas y limitaciones, logrando así optimizar la localización de los usos del suelo, hacia sitios con mejor aptitud y el menor impacto, sobre todo en la parte ambiental y de exposición a los riesgos naturales.

Para el caso del municipio de Jamundí es importante el estudio de este fenómeno ya que para el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del año 2002, identifiqué algunos impactos ambientales del modelo de desarrollo y el crecimiento urbano, así como la actividad industrial y la explotación minera (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

En consecuencia, es importante analizar el fenómeno del crecimiento urbano en el municipio como herramienta que nos permita proponer alternativas para la planificación urbana, en este caso se propone utilizar los modelos de simulación, los cuales han experimentado un importante crecimiento en las últimas dos décadas a nivel mundial.

En Colombia se han aplicado pocos modelos de predicción de crecimiento urbano; estos se han orientado a crear imágenes hipotéticas del futuro como herramienta de soporte a la planificación, lo nuevo que aportaría esta investigación va relacionado con el análisis de los instrumentos de planificación existentes en el municipio y las recomendaciones que los resultados de la predicción puedan llegar a aportar a ellos, de acuerdo con los alcances que tiene cada uno de ellos sobre el territorio. Esto teniendo en cuenta que el ordenamiento territorial en Colombia ya tiene bastantes leyes, políticas y planes formulados que en la práctica se convierten en intervenciones y prioridades desarticuladas, que terminan siendo demasiados esfuerzos, pero poca realidad en el territorio.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar, calibrar y validar un modelo de simulación del crecimiento urbano futuros para el municipio de Jamundí mediante Sistemas de Información Geográfica, Redes Neuronales Artificiales y Autómatas Celulares, con el fin de generar escenarios prospectivos para los años 2023 y 2036 que sirvan como insumo técnico para la toma de decisiones en la planificación territorial y la gestión del uso del suelo.

3.2 Objetivos específicos

- Cartografiar y cuantificar los cambios del suelo urbano y la red vial del municipio de Jamundí mediante la digitalización de imágenes satelitales de los años 2002, 2007, 2012, 2021.
- Implementar, calibrar y validar un modelo de Redes Neuronales Artificiales y Autómatas Celulares que prediga la expansión urbana en Jamundí para los años 2023 y 2036 incorporando las variables de ríos, pendientes, perímetros urbanos y vías.
- Evaluar espacialmente los escenarios de expansión urbana para los años 2023 y 2036 y su compatibilidad con los instrumentos de planificación (Plan Básico de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Jamundí 2002, Plan de Desarrollo Municipal 2024-2027 y Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Farallones de Cali) mediante análisis de superposición.

4 Hipótesis

La simulación de escenarios futuros contribuye a la planificación territorial del municipio de Jamundí debido a que permite orientar el crecimiento urbano para determinadas zonas y restringirlo en otras.

5 Marco teórico

Teniendo en cuenta la complejidad del comportamiento y las consecuencias ambientales, sociales y económicas del crecimiento urbano acelerado en las últimas décadas, el mismo determinado en Colombia básicamente por la dinámica demográfica y los movimientos migratorios, los cuales terminan traducéndose la incorporación de suelo rural y a los perímetros urbanos principales, es importante avanzar en su conocimiento, para ello se debe tener en cuenta los avances de las herramientas de análisis como los Sistemas de Información Geográfica – SIG y la Teledetección que proveen una serie de operaciones y funciones para el manejo de datos espaciales que permiten desarrollar diferentes análisis territoriales y que pueden incorporar diferentes modelos de simulación, en el caso de la presente investigación, los de escenarios futuros, entendidos como imágenes posibles del futuro, expuestas para mostrar situaciones posibles consecuencia de decisiones actuales, en nuestro caso nos interesan los realizados por medio de Autómatas Celulares que son una clase de modelos matemáticos espaciales, representados por medio de una malla de celdas, las cuales tienen unas reglas de transición que en función de su estado inicial y de su vecindad cambian de estado de cada celda, entrenados por medio de Redes Neuronales Artificiales.

Por lo anterior, la base teórica de la presente investigación tiene tres pilares: el crecimiento urbano, los sistemas de información geográfica, los modelos de simulación y su aplicación en fenómenos urbanos, los cuales se describirán a continuación:

El primer pilar teórico es el crecimiento urbano, el cual tiene explicaciones teóricas y descriptivas desde mediados de los años 50's, a más de medio siglo del desarrollo de esta área del conocimiento se han logrado grandes avances y cambios significativos en la teoría y en las metodologías, particularmente en la evolución de las tecnologías gráficas de sistemas de cómputo y la introducción de nuevos paradigmas (Brugués et al., 2012).

Dentro de los avances se resalta el de Wegener en 1994 que pudo identificar a 20 centros que, en la década de los 90s, estaban haciendo investigación sobre modelación urbana, gracias al progreso en la teoría, la información disponible y la tecnología. En esta última, los sistemas de información geográfica fueron un componente central de estos avances y hubo mucho esfuerzo en vincular estos sistemas a modelos tradicionales espaciales (Brugués et al., 2012).

En Colombia, la Universidad Externado de Colombia (2007) expone que el crecimiento urbano depende principalmente de tres dinámicas que se relacionan entre sí: la dinámica

demográfica, la migración y la incorporación de áreas rurales a los perímetros urbanos. Frente al crecimiento vegetativo la población sigue creciendo, aunque a un menor ritmo, en el último periodo intercensal uno de cada tres municipios presento crecimientos inferiores a -1%, y alrededor del crecimiento 0 un 36%, mientras que las tasas de crecimientos positivas y superiores al 1% solo se presentaron en un poco más de la tercera parte, un 35%. Estas dinámicas son muy diferentes entre lo urbano y lo rural en el periodo intercensal estudiado, en la urbana la tasa creció un promedio anual del 1,8, donde el 55% de las cabeceras municipales presentaron con tasas positivas superiores al

Por otra parte, las poblaciones urbanas y rurales tienen dinámicas muy diferentes. La primera creció rápidamente, a una tasa promedio anual del 1,8% en el último período intercensal, y más de la mitad (el 55%) de las cabeceras municipales crecieron a tasas positivas e incluso una buena parte de ellas (el 11%), a tasas superiores al 5% promedio anual. Este crecimiento contrasta fuertemente con la pérdida de dinamismo de la población rural (tasas cercanas a cero). La mayoría de los municipios (75%) pierden población o tienen crecimientos cercanos a cero en sus zonas rurales (Universidad Externado de Colombia, 2007).

En resumen, el crecimiento de la población está determinada en las zonas urbanas por la dinámica demográfica, mientras que las áreas rurales se están despoblando.

En cuanto a los movimientos migratorios, tenemos que, si bien en el pasado el crecimiento de muchas de las áreas urbanas colombianas se debió fundamentalmente a la migración rural-urbana, actualmente, por la disminución de los efectivos poblacionales rurales y el cambio en las estructuras demográficas, el efecto migratorio es menor y el crecimiento urbano se debe principalmente al crecimiento vegetativo (Universidad Externado de Colombia, 2007).

Una explicación al crecimiento vegetativo en las áreas urbanas es que los inmigrantes asentados generan una renovación de la población, debido a la concentración de población en edades reproductivas, lo que aumenta la natalidad. Mientras, para casi todas las áreas rurales, el crecimiento depende de la migración. El aumento vegetativo de la población rural es pequeño, debido a la sostenida experiencia de emigración que ha reducido su población en edades reproductivas (Universidad Externado de Colombia, 2007).

Para el año 2021, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) analizó los flujos migratorios entre grupos de municipios clasificados según el tamaño poblacional de sus cabeceras municipales. Los resultados evidenciaron que, tanto en 2019 como en 2020, la mayoría

de los habitantes de municipios con cabeceras menores a 20 mil habitantes migraron hacia municipios con cabeceras de 200 mil habitantes o más. Asimismo, los migrantes provenientes de ciudades intermedias —con poblaciones entre 50 mil y 200 mil habitantes en sus cabeceras— tendieron a desplazarse hacia ciudades de mayor tamaño o hacia municipios más pequeños, posiblemente motivados por oportunidades laborales o académicas. Finalmente, la población residente en ciudades grandes, con cabeceras de 500 mil habitantes o más, migró hacia destinos de diferentes tamaños poblacionales, aunque con una mayor inclinación hacia ciudades pequeñas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2021).

En lo que respecta a la segunda dinámica, la incorporación de suelo rural a urbano, muestra que la expedición de licencias de construcción requiere que los terrenos hagan parte del área urbana y por tanto, el municipio dota de servicios públicos, requisito sin el cual no es posible la expedición de licencias en suelo urbano. Por esta razón, los concejos municipales modifican los perímetros urbano. Sin embargo, no se dispone en el país de una base de datos con la evolución de las áreas de los perímetros urbanos ni un archivo histórico de la incorporación de áreas a los cascos urbanos municipales (Universidad Externado de Colombia, 2007).

De esta forma, por vía administrativa las poblaciones que se encontraban en suelo rural pasan a pertenecer a las áreas urbanas y las construcciones alrededor quedan incorporadas a los nuevos barrios o zonas industriales o comerciales. Esta incorporación de áreas da lugar a un proceso de densificación masiva de la ciudad sin que ello signifique mejores espacios públicos, mejores zonas de protección ambiental y sin que ello mejore el área disponible por habitante (Universidad Externado de Colombia, 2007).

Otro componente importante en el crecimiento urbano es la infraestructura vial, que es el elemento urbanismo básico que se enfoca en garantizar la movilidad urbana como practica social de desplazamiento cotidiano residencial y profesional, incluyendo el desplazamiento de personas físicas o jurídicas y bienes (Cubillos & Ramos, 2025). También Aguilera (2008), menciona que los cambios en la ocupación urbana son inducidos por el desarrollo de la red vial que permiten la articulación a través de las diferentes tramas viarias: 1) Urbana residencial compacta que presentan los tejidos más antiguos muy propios de la ciudad tradicional que se transforman en una trama geométrica en el caso de los crecimientos más recientes; 2) Urbana residencial dispersa con una estructura más regular y geométrica; 3) Urbana industrial caracterizada por la presencia de grandes zonas industriales de amplio tamaño, así como por una estructura muy funcional y geométrica; 4)

Metropolitana de alta capacidad se caracteriza por la generación de importantes accesos a las mismas y concentran a su alrededor usos terciarios, tecnológicos o industriales y 5) Metropolitana secundaria, constituida por vías de carácter metropolitano, y que sin embargo no son infraestructura de alta capacidad.

Finalmente, respecto al crecimiento urbano Aguilera (2008), identifico patrones de crecimiento y ocupación que constituyen una importante herramienta para el diagnóstico y la valoración del cambio. Los criterios se basan en la accesibilidad, contigüidad espacial, compacidad y temporalidad y dieron como resultados cuatro patrones espaciales de ocupación urbana: 1) crecimiento agregado se desarrolla continua a la ciudad consolidada, de tal forma que la contigüidad espacial es espacialmente determinante; 2) crecimiento lineal tiende a ocupar espacios adyacentes a las vías, en los que el criterio de la accesibilidad se convierte en el principal; 3) crecimiento en urbanización corresponde a viviendas de segunda residencia así como a áreas residenciales unifamiliares, que aparecen de forma aislada respecto a los núcleos históricos y/o consolidados, y por tanto, con una morfología dispersa y 4) crecimiento nodal surgidos en torno a las vías de comunicaciones atraídos por su fuerte accesibilidad y centralidad.

El segundo pilar teórico es el de los Sistemas de Información Geográfica –SIG y la teledetección, los cuales han tenido un desarrollo en el campo de la geografía, y un crecimiento en los campos como la planificación, gestión ambiental, transporte, etc. Gracias al empleo de los SIG, según Rodríguez (2002) ha sido posible desarrollar de manera efectiva el procesamiento, generación y análisis de información geográfica, así como la producción cartográfica y la modelación de dinámicas complejas, como las relacionadas con el entorno urbano.

Los SIG de acuerdo con Gutiérrez y Gould (1998) en Aguilera (2008) son una herramienta que nace en parte gracias a la revolución de los métodos cuantitativos en la geografía en los años 60. En este trabajo los SIG se utilizan en la obtención y generación de los datos geográficos, hasta la generación de la cartografía, pasando por el análisis y modelización.

En general, según Olaya (2014), los SIG ha de permitir la realización de las siguientes operaciones: lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales; análisis de dichos datos (Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos, la localización de cada valor o elemento, como sobre la componente temática, valor o elementos en sí); generación de resultados de tales como mapas, informes, gráficos, etc.

Una forma para entender los SIG es comprender los subsistemas que los conforman, en el que cada uno está encargado de una serie de funciones. Dentro de los cuales caben resaltar tres sistemas fundamentales: 1) subsistema de datos; 2) Subsistema de visualización y creación cartográfica y 3) subsistema de análisis.

En cuanto a la percepción remota o teledetección Chuvieco (1995) menciona que es una técnica utilizada para obtener imágenes de la superficie terrestre, marina y de la atmósfera mediante sensores ubicados en plataformas espaciales. Debido a que esta metodología no implica contacto directo con los objetos observados, requiere la transmisión de información entre el sensor y el objeto a través de radiación electromagnética. Esta radiación puede ser emitida por los propios cuerpos o provenir de una fuente externa y posteriormente reflejada por ellos. Todos los objetos y seres presentes en la naturaleza emiten radiación electromagnética en diferentes cantidades y características, dependiendo principalmente de su temperatura. En el sistema solar, el Sol constituye la principal fuente de esta energía, y la radiación reflejada por la Tierra y los elementos presentes en su superficie es la más utilizada en los procesos de teledetección. En algunos casos, los sensores también pueden generar su propia radiación, incorporando sistemas emisores que permiten captar información de manera activa.

A partir de las imágenes satelitales capturadas por la percepción remota se realiza la clasificación supervisada sobre la cual Chuvieco (1995) afirma que el método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. El conocimiento previo del área de estudio facilita que el intérprete identifique y delimite en la imagen zonas representativas de cada una de las categorías incluidas en la leyenda temática. Estas zonas, conocidas como áreas de entrenamiento, se utilizan para proporcionar al sistema informático ejemplos de referencia que permitan reconocer las diferentes clases presentes en la imagen. A partir de esta información, el ordenador calcula los niveles digitales característicos de cada categoría y posteriormente clasifica los demás píxeles de la imagen según su similitud con dichos valores.

Las imágenes clasificadas constituyen la base fundamental para el desarrollo de estudios multitemporales, considerados uno de los principales aportes de la percepción remota en el seguimiento de las dinámicas territoriales. Este tipo de análisis permite comparar información obtenida en diferentes periodos, con el fin de identificar la ubicación, magnitud y características de los cambios ocurridos a lo largo del tiempo. Por diferentes métodos dependiendo de si la imagen a

utilizar es continua o categorizada, en nuestro caso al ser imágenes categorizadas la técnica se da mediante las tablas de transición o matriz de tabulación cruzada en la que las filas representan las categorías del mapa en el tiempo 1 y las columnas las categorías del mapa en el tiempo 2, matriz que es el resultado de uno de los módulos del complemento de MOLUSCE de QGIS (Niño, 2020).

Finalmente, los Sistemas de Información Geográfica han tenido un gran aporte en los procesos generales de formación de modelos, según Rodríguez (2002) los SIG permiten integrar la información de manera más precisa y representar los fenómenos de una forma más aproximada a la realidad, favoreciendo así una mejor comprensión del objeto de estudio.

El modelo predictivo se fundamenta en la aplicación de funciones de geoestadística inferencial orientadas a simular fenómenos físicos, como el crecimiento urbano o la propagación de incendios, a partir del conocimiento previo del comportamiento de determinadas variables. Este tipo de modelos permite proyectar escenarios futuros y responder interrogantes relacionados con la evolución espacial de distintos fenómenos, por ejemplo, estimar cómo podría distribuirse la población si las tendencias actuales se mantienen. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen herramientas que facilitan la toma de decisiones, considerando y controlando las múltiples variables que intervienen en las dinámicas territoriales y sociales. La simulación de futuras situaciones con tecnología SIG nos acercan cada vez más a los procesos reales (Rodríguez, 2002).

El tercer pilar teórico se encuentra relacionado con los modelos de simulación y su aplicación en entornos urbanos y que ha cambiado el paradigma en el ámbito de la planificación urbana y regional, desde sus orígenes que de acuerdo con Briassoulis (2000) basan en teorías como la de los lugares centrales de Christaller (1933) y las modificaciones de Losch (1939) que influyeron de forma directa o indirecta en el estudio de los cambios en el uso del suelo y en la búsqueda de patrones y tendencia en los mismos (F. Aguilera, 2008).

Para posteriormente con la introducción de los computadores en la mitad de los años 50-60 generar una revolución en el desarrollo de los modelos, como por el de difusión de Hagerstrand (1967) que según Aguilera (2008) Uno de los enfoques buscaba explicar los procesos de difusión territorial de las innovaciones agrícolas dentro de un área específica, la cual se representaba mediante una cuadrícula uniforme compuesta por 25 celdas. A cada una de estas se le asignaban probabilidades de propagación del fenómeno de acuerdo con la distancia existente entre los puntos analizados. De igual forma, los modelos gravitacionales aplicados a la planificación del transporte

y al ordenamiento de los usos del suelo planteaban que la interacción entre dos centros de concentración —como población o actividad económica— dependía de manera inversa de factores asociados a la distancia, tales como tiempo, costo o separación espacial, y de forma directa de variables relacionadas con la demanda y la capacidad de atracción de cada centro, por ejemplo, el número de trabajadores residentes y la cantidad de empleos disponibles. Por otra parte, el modelo de Lowry se consolidó como una de las herramientas más representativas en la planificación urbana y de usos del suelo. A partir de información sobre el empleo básico y su localización dentro de una ciudad, este modelo permitía simular el crecimiento de áreas metropolitanas mediante la distribución espacial de zonas residenciales, así como la aparición de nuevas áreas comerciales y de servicios derivadas de las necesidades generadas por la población trabajadora.

Después de explosión de modelos experimentados en los años 60, y a pesar de los importantes avances que se produjeron en este campo, las expectativas no se cumplieron debido principalmente a que por el afán de incluir más y más elementos a los modelos para eliminar la incertidumbre, acabo generando el efecto contrario, además, habían problemas de escalas, así como modelos insaciables, excesivamente complicados y muy costoso, lo que produjo un abandono progresivo del interés por la modelización de los procesos urbanos y de la financiación que recibían por parte de los gobiernos y las instituciones (F. Aguilera, 2008).

Tras la fuerte crisis los avances tecnológicos en los softwares, la recopilación de datos a través de la teledetección, los inmensos desarrollos de la capacidad de los computadores y su bajo precio recobran importancia los modelos de simulación urbana. De acuerdo con Itami (1994) aún si tales esfuerzos de modelación no habían fallado en sus intentos de entender los sistemas del mundo real, aún hay una larga brecha entre la magnitud de los problemas sociales y ambientales y los resultados del uso de las teorías tradicionales y métodos para entender esos problemas. Por otra parte, Wegener (1994) argumenta que, si bien la mayoría de las aplicaciones contestan preguntas tradicionales tales como, la manera de regular el suelo o programas de vivienda que podrían afectar el desarrollo de los usos del suelo y el transporte, o como mejorar los sistemas de transporte o como los cambios en el costo de traslado podrían cambiar la distribución de actividades en un área urbana. Estas son y continuarán siendo importantes preguntas, pero otros temas tales como los problemas ambientales es muy probable que se conviertan en prominentes y será esencial que los modelos urbanos sean capaces de hacer una contribución significativa su discusión racional (Brugués et al., 2012).

En el marco del desarrollo sostenible, la comprensión geográfica de las transformaciones en el uso del suelo dentro de las áreas urbanas resulta fundamental para analizar la dinámica de las ciudades y los efectos que estas generan sobre los sistemas naturales. De acuerdo con Clarke (1997), la simulación de los patrones espaciales urbanos futuros puede proveer elementos en como nuestras ciudades pueden desarrollarse bajo variadas condiciones sociales, económicas y ambientales. Sin embargo, para Itami (1994) parte de los retos de modelar interacciones entre los procesos naturales y sociales es el hecho de que los procesos de estos sistemas resultan en complejos comportamientos espacio-temporales (Brugués et al., 2012).

Frente a la modelización de los cambios del uso de suelo, estos aparecen a partir de los años 90 cuando la comunidad científica incrementa la investigación en el campo, en este momento muchos grupos estaban trabajando en este campo, dentro de los que resaltan según Aguilera (2008) los estudios realizados por Tobler enfocados en la geografía celular, que dio lugar a nuevos modelos urbanos, que más tarde definirían como Geosimulación. En la que se emplean herramientas matemáticas que incluyen fundamentalmente: los autómatas celulares, diseñados por Von Neuman y Ulam, por allá en los años 40 y los multiagentes. Ambos pertenecen según Benenson y Torrens (2004) al concepto más amplio de autómata, entendido éste como un mecanismo de proceso cuyas características cambian en el tiempo en función de sus propias características, un conjunto de reglas de transición y un input externo. Los autómatas analizan la información recibida desde su entorno inmediato y modifican sus características conforme a las reglas establecidas para responder a esas entradas de información.

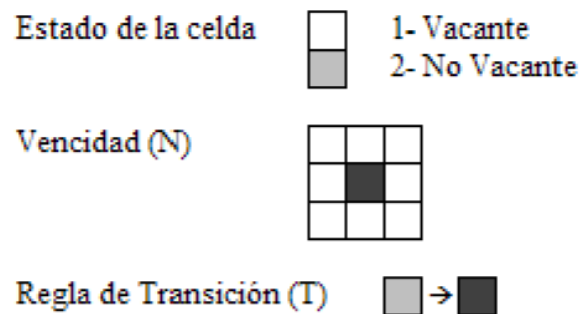
Cabe resaltar que, según Aguilera, Carrillo y Grageda (2001), uno de los principales aportes de los autómatas celulares radica en su aplicación para modelar la dinámica de los usos del suelo. Estos modelos consideran que la localización y concentración de las actividades socioeconómicas influyen directamente en su evolución espacial. Dicha influencia se ejerce dentro de una vecindad definida por un radio determinado. Así, la distribución de actividades en un momento específico puede favorecer el crecimiento futuro de ciertas dinámicas territoriales, al mismo tiempo que restringe el desarrollo de otras actividades en el espacio.

Por otra parte, Los autómatas celulares corresponden a sistemas dinámicos discretos cuyo funcionamiento se define a partir de relaciones locales entre sus componentes. En estos modelos, cada celda puede adoptar un único estado dentro de un conjunto de estados posibles que representan las características del sistema. El estado de una celda está determinado por la condición de las

células vecinas que conforman su entorno inmediato o vecindad, integrada por aquellas celdas próximas a ella. Asimismo, el cambio de estado en cada celda se produce mediante reglas de transición, las cuales responden a las condiciones y dinámicas presentes en su vecindad. Batty y Xie (1997) en Marquez (2008), normalmente, un autómata celular es igual a: $Q = (S, N, T)$ donde Q = el estado global; S = conjunto de todos los posibles estados del autómata celular; N = vecindad de todas las celdas que proporcionan valores de entrada para la función de transición T ; y T = función de transición que define el cambio del estado del autómata celular de su estado actual al estado en el próximo paso del tiempo

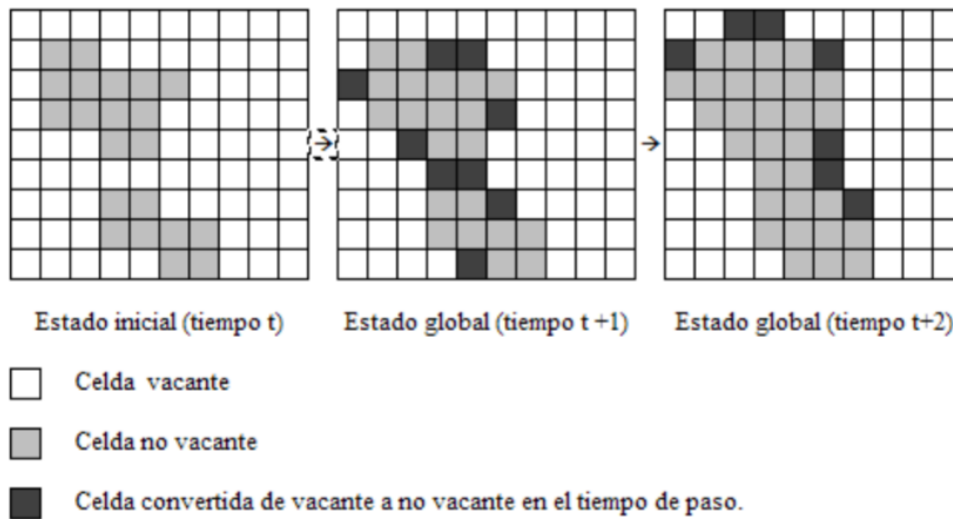
Figura 1

Componente de autómata celular genérico



Fuente: Simulating Urban Growth in Developing Nation's Region Using Automata-Based Model (Simeone Leao 2007 en Marquez, 2008)

La Figura 1 representa los principales componentes de un autómata celular genérico. En este caso, las celdas del espacio celular pueden presentar estados como ocupado o desocupado. La vecindad está conformada por ocho celdas adyacentes alrededor de una celda central, mientras que las reglas de transición establecen la manera en que los estados de las celdas evolucionan a lo largo del tiempo, tomando como referencia las condiciones presentes en las células vecinas.

Figura 2*Proceso de transición de autómatas celulares*

Fuente: Simulating Urban Growth in Developing Nation's Region Using Automata-Based Model (Simeone Leao 2007 en Marquez, 2008)

En la Figura 2 se ilustra el proceso de transición realizado por el autómata celular descrito en la Figura 1. Inicialmente, se define un estado de partida que corresponde a la distribución espacial de las celdas dentro del espacio celular en un instante determinado (tiempo t), donde cada una puede encontrarse libre u ocupada. Posteriormente, se representan los estados globales obtenidos en los siguientes pasos temporales, resultado de aplicar de manera simultánea las reglas de transición a todas las celdas de la cuadrícula. El autómata celular evalúa la vecindad de cada celda vacante y, según la regla establecida, cuando tres o más celdas de su entorno inmediato se encuentran ocupadas, la celda central cambia su estado de vacía a ocupada; en caso contrario, permanece sin modificaciones. Cada intervalo temporal concluye una vez se han analizado todas las celdas vacantes y realizado las transformaciones correspondientes. A continuación, este nuevo estado global se convierte en la base de otro plazo (Márquez, 2008).

Las reglas de transición, aplicadas de forma homogénea en todo el espacio de análisis, determinan el estado futuro de cada celda a partir de las condiciones presentadas por sus vecinos inmediatos en el instante de tiempo (t). Con base en esta información, se define el estado que adoptará la celda en el siguiente periodo temporal ($t + 1$). La actualización de los estados se realiza de manera simultánea para todas las celdas del sistema.

Durante el proceso de transición, cada celda funciona como un agente autónomo dentro del sistema, y su estado se define a partir de su condición actual y de la influencia ejercida por las

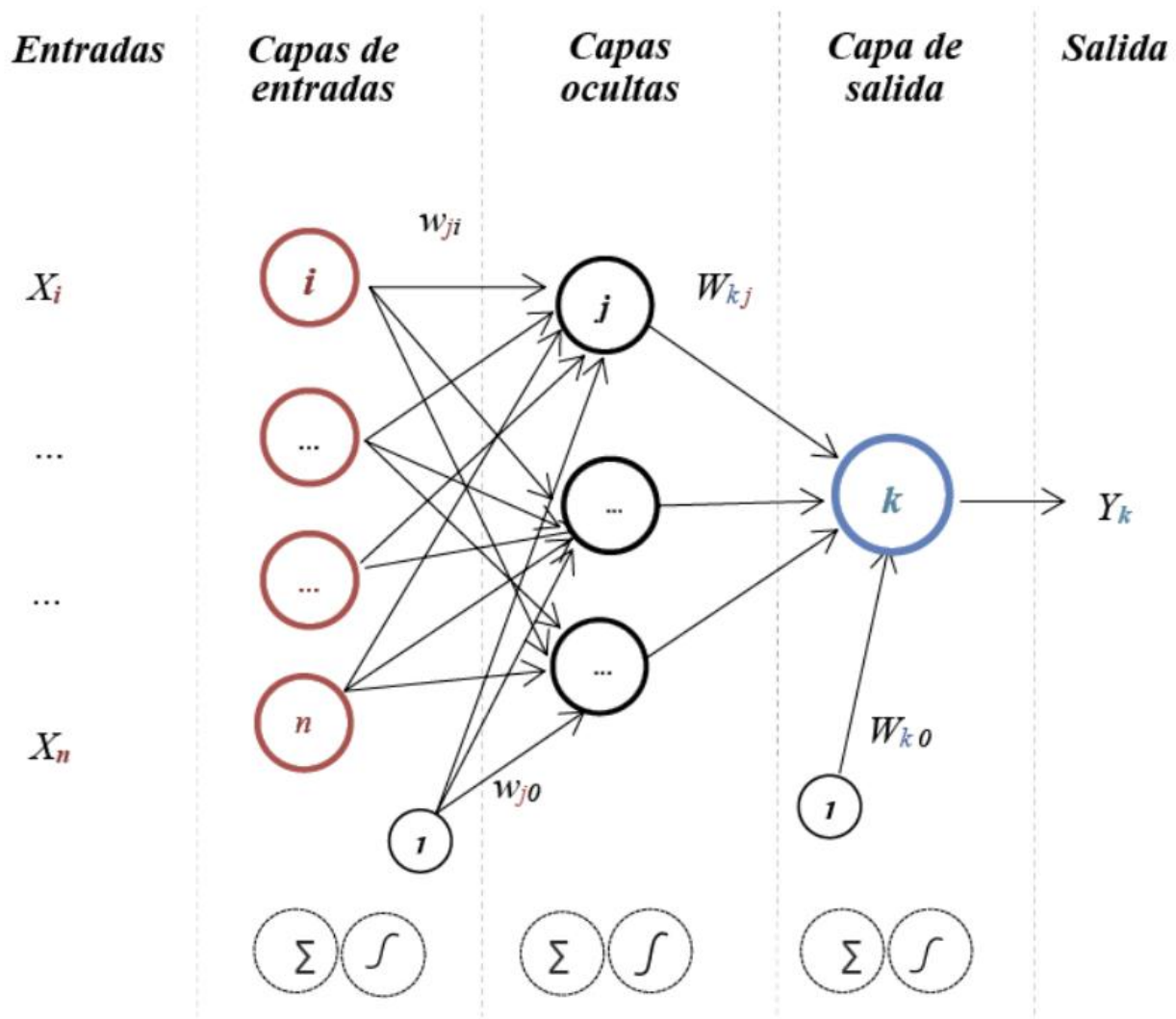
celdas vecinas, sin depender de factores externos al entorno inmediato. Además, puesto que todas las transiciones son marcadas en el espacio de juego, al mismo tiempo, el cambio es a la vez espacial y temporalmente correlacionados (Márquez, 2008).

Finalmente, se presenta el Modules for Land Use Change Simulations -MOLUSCE una extensión de QGIS que se usa para analizar y modelar cambios en el uso del suelo en diferentes periodos y el instrumento escogido para el presente estudio. Esta herramienta integra un conjunto de técnicas estadística, de inteligencia artificial y de modelado espacial que permite calcular el potencial de cambio de uso del suelo y simular su evolución futura. Su funcionamiento consiste en combinar mapas de distintas fechas con información sobre factores que influyen en el territorio, para detectar patrones de cambio. Con base en estos patrones, el programa calcula la probabilidad de transición entre tipos de uso del suelo (por ejemplo, de agrícola a urbano) y puede generar proyecciones de escenarios futuros mediante simulación con autómatas celulares (J. López & Muñoz, 2025).

MOLUSCE, incorpora más de un método para estimar el potencial de transición, algoritmos como redes neuronales artificiales (ANN), regresión logística (LR), ponderación de evidencias (WoE) y evaluación multicriterio (MCE) entre otros, para predecir la expansión urbana y otros cambios en la cobertura del suelo (NextGIS, 2026).

Para el presente estudio se utilizó la opción de Redes Neuronales Artificiales – RNA que se basa en un modelo de Perceptrón Multicapa entrenado mediante retropropagación, lo que permite identificar relaciones complejas y no lineales entre las variables explicativas y la probabilidad de transición de cada celda (NextGIS, 2026). El perceptrón multicapa, según Mas (2017) en Principi (2022) es un tipo de Red Neuronal Artificial, que utiliza capas de entradas, capas ocultas y capa de salida (Figura 3), compuestas por una serie de neuronas que se encargan de recibir, procesar y enviar datos hacia otras neuronas a partir de un flujo de información unidireccional que se activa al recibir información de la capa anterior, ponderarla, sumarla y luego a partir de una función de activación se producen las salidas de la neurona, es decir, la predicción.

Figura 3
Representación de un perceptrón multicapa



Fuente: Principi, 2022

En el esquema representativo de un perceptrón multicapa, las variables X corresponden a las capas de entrada y representan las variables explicativas del modelo. El término w_{ji} hace referencia al peso de conexión existente entre la neurona de entrada i y la neurona oculta j , mientras que w_{kj} representa el peso de conexión entre la neurona oculta j y la neurona de salida k . Por su parte, el peso w_{j0} se asocia a una neurona ficticia cuya salida tiene un valor constante igual a 1. Debajo aparecen representados el símbolo de sumatoria, que corresponde a la función de red, y el de la función sigmoidea, que corresponde al procedimiento de activación (Principi, 2022).

El complemento de MOLUSCE de acuerdo con Asia Air Survey y NextGIS (2014) utiliza una implementación clásica del perceptrón multicapa en el que los datos de entrada son una

colección de píxeles de estado inicial y los factores y los datos de salida es el mapa de cambios. Por lo tanto, las variables objetivo (las categorías del mapa de cambios) deben escalarse al intervalo (-1, 1) durante la codificación ficticia en lugar de (0, 1). El usuario puede configurar un número arbitrario de capas ocultas (una o más) y un número arbitrario (una o más) de neuronas en las capas.

La red creada tiene:

$(C-1)(2N+1)^2 + B(2N+1)^2$ neuronas de entrada

M neuronas de salida (depende del modo de muestreo);

Donde C es el recuento de categorías de uso del suelo, N es el tamaño del vecindario especificado por el usuario, B es el recuento de bandas de resumen de los rásteres de factores (por ejemplo, si dos factores son de una banda y tres bandas, entonces B=4). M suele ser un recuento de categorías únicas en el mapa de cambios (C^2). Pero el número de neuronas de salida puede ser menor que M, depende del modo de muestreo. Si se utiliza el modo "Aleatorio", algunas clases pequeñas podrían omitirse durante el procedimiento de muestreo.

El módulo utiliza el algoritmo clásico de retropropagación con momento para el procedimiento de aprendizaje. Las correcciones de pesos se realizan como:

$$w(n+1) = r * dw(n) + m * dw(n-1)$$

donde w es un vector de pesos de neuronas, dw es un vector de cambios de pesos, n es un número de iteración, r es la tasa de aprendizaje y m es el momento.

El conjunto de entrenamiento se divide en dos partes: conjunto de aprendizaje (80% de las muestras por defecto) y conjunto de validación (20% de las muestras).

El módulo utiliza aprendizaje en línea con un enfoque estocástico: Se toma una muestra aleatoria del conjunto de entrenamiento y, posteriormente, los pesos de la red son ajustados mediante los procesos de propagación hacia adelante y retropropagación.

El error de ajuste para una muestra se define como el error cuadrático medio obtenido a partir de las salidas parciales generadas por la red.

$$E = \frac{t_i - O_i}{d}$$

donde E es un error de muestra, t_i es el valor de salida real de la neurona, O_i es el valor de salida calculado, d es el número de neuronas de salida.

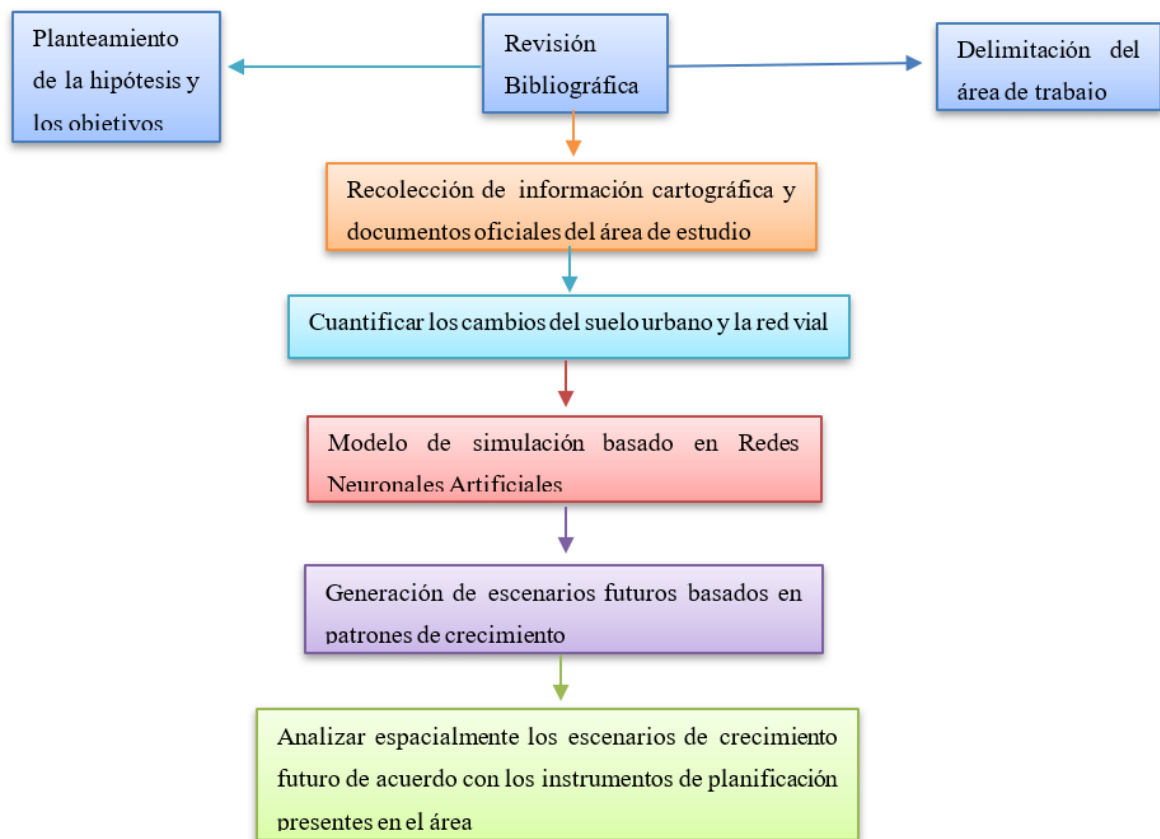
El módulo devuelve la siguiente información sobre el aprendizaje:

- Gráfico de los errores cuadráticos promedio. Los errores (media de todos los E en el conjunto de entrenamiento y el conjunto de validación) se calculan en los conjuntos de entrenamiento y validación después de cada época y se representan en el gráfico.
- Error mínimo general de validación. Este es el error cuadrático medio E obtenido en todo el conjunto de validación (media de todos los E en el conjunto de validación). Este es el mejor resultado alcanzado hasta el momento. Los pesos de la red se almacenan y, tras el entrenamiento, se devuelven los mejores pesos como la mejor red.
- Precisión general delta. Corresponde a la diferencia existente entre el valor mínimo del error de validación y el error de validación obtenido en el momento actual.
- Kappa de validación actual. Es el estadístico kappa obtenida en el conjunto de validación (Asia Air Survey & NextGIS, 2014).

6 Metodología

La metodología desarrollada en la presente investigación se apoyó en los trabajos realizados por los autores presentados en la revisión de los antecedentes, en los cuales se empieza con la revisión bibliografía que permitieron establecer los objetivos y la hipótesis, así como el área de estudio; el siguiente paso fue la recolección de información cartográfica, imágenes satelitales y documentos oficiales para identificar los cambios en las zonas urbanas y de la infraestructura vial del municipio y con ello aplicar el modelo de simulación con el complemento MOLUSCE de QGIS 3.42 y generar los escenarios futuros con los que finalmente se revisaron los instrumentos de ordenación, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4
Flujo metodológico



6.1 Recolección de información cartográfica y documentos oficiales del área de estudio

De acuerdo con los objetivos planteados la información cartográfica se descargó de diferentes fuentes: las imágenes Landsat de Earth Explorer del Departamento Geológico de los Estados Unidos; la información del municipio de la página de la Alcaldía; las capas de drenaje,

áreas protegidas y el modelo digital de terreno de los aplicativos geográficos de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC.

6.2 Cuantificación de cambios del suelo urbano y la red vial

En la primera fase se identificaron los cambios en las zonas urbanas y de infraestructura vial, para lo cual se realizó lo siguiente:

- Descarga de las imágenes: en Google Earth se ubicó el área de estudio, desactivando los elementos innecesarios como nombres y se guardaron las imágenes de los años 2002, 2007, 2012 y 2021 con la máxima resolución.
- Definición del sistema de coordenadas del proyecto: se definió el sistema de referencia a MAGNA-SIRGAS / Colombia West Zone, ya que el modelo digital de terreno, la red hídrica y las vías tienen este sistema de referencia y se proyectó la capa de perímetro urbano.
- Georreferenciación de las imágenes: se agregaron las capas bases del perímetro urbano, drenajes y vías y las imágenes descargadas de Google Earth, a continuación, se activó la barra georeferencing y se agregaron los puntos de control por toda el área y se guarda la imagen.
- Digitalización del perímetro urbano: se creó una copia del shape de perímetro urbano del PBOT del 2002 y se activó el modo editor, a continuación, se empezó a crear vértices o moverlos según se consideró teniendo en cuenta la imagen del año que se estaba digitalizando.
- Digitalización de la infraestructura vial: se creó una copia del shape de vías del Valle del Cauca elaborado por la Gobernación del Valle y se activó el modo editor, a continuación, se empezó a crear vértices o moverlos según se consideró teniendo en cuenta la imagen del año que se estaba digitalizando.
- Patrones de ocupación urbana: De acuerdo con la identificación de los cambios de las zonas urbanas y la red vial se identificaron los patrones espaciales del municipio de Jamundí: crecimiento agregado, lineal, en urbanizaciones y nodal.

6.3 Simulación de crecimiento urbano

Para la simulación de crecimiento urbano, se utilizó el complemento MOLUSCE de QGIS, de acuerdo con lo siguiente:

- **Recolección y preparación de datos:** Se realizó la identificación, selección y descarga de imágenes satelitales de libre acceso y disponibilidad gratuita de los años establecidos en la cuantificación de cambios del perímetro urbano y vías desde el servicio web Earth Explorer del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América -USGS, para la selección de las imágenes, se verificó que presentaran condiciones de nubosidad similares, con el fin de garantizar un comportamiento homogéneo de las firmas espectrales asociadas a las diferentes coberturas. Para las capas de los limitantes de cambio: ríos, pendientes, perímetro urbano y vías se convirtieron de polígono a raster y para las capas binarias se utilizó la herramienta de calculadora raster.
- **Preprocesamiento de las imágenes satelitales:** Teniendo en cuenta que las imágenes del periodo de estudio son de Landsat 7, y es típico en ellas ausencia de información con una ligera inclinación se realizó una corrección del bandeo con la herramienta Fix Landsat 7 Scanline Errors. Y se unificaron todas las bandas en un solo archivo, para esto se abrieron los archivos correspondientes a las bandas 1 a 7 con excepción de la 6 y utilizó la herramienta Raster Processing en ArcGIS, el resultado se guardó con la extensión TIF. Y se recortó el área de estudio con la herramienta de extracción por máscara.
- **Clasificación multiespectral supervisada:** Para la clasificación primero se realizaron las muestras de entrenamiento dibujando los polígonos para cada una de clases de coberturas definidas con la herramienta draw training sample, después de tener una muestra para cada clase se realizó la clasificación.

Con las capas de cobertura de los dos años de estudio y variables espaciales estandarizadas, se procede en MOLUSCE a realizar la simulación a través de los siguientes módulos:

- **Datos de entrada:** en este módulo se cargaron las capas con la clasificación de coberturas para los años de estudio y las capas auxiliares, como el DEM, los ríos, el perímetro urbano y las vías, que funcionan como variables explicativas empleadas en el modelo predictivo.
- **Evaluación de correlación:** en este módulo se evalúan la correlación de las capas cargadas en el módulo anterior, para nuestro caso se utilizó la técnica de Correlación de Pearson, la cual es útil cuando se desea conocer qué tan fuerte es la asociación entre una variable espacial y el cambio de clase en el uso del suelo. Y permite determinar que variables tienen mayor influencia en las transiciones del territorio, lo que permite seleccionar o descartar los insumos para la predicción.

- **Matriz de transición:** en este módulo se realiza el análisis cuantitativo de las transformaciones ocurridas en la cobertura del suelo en las fechas seleccionadas a través de una visión estadística de la magnitud y la orientación de las transformaciones registradas, antes de la modelación. Y se puede genera el mapa de cambios, el cual permite hacer análisis visuales o comparaciones espaciales, posteriormente.
- **Modelado del potencial de transición:** en esta parte se calcula qué tan probable es que un lugar cambie de uso o cobertura del suelo en el futuro, basándose en los cambios ocurridos en los años analizados, identificando donde es más probable que ocurran transformaciones, a través de cuatro métodos, en nuestro caso se utilizó el método de Redes Neuronales Artificiales (RNA) que usa los datos de los mapas anteriores como ejemplos de entrenamiento y buscan patrones entre las variables para estimar en qué lugares es más probable que el suelo cambie de categoría. Además, se escogieron los parámetros de entrenamiento, como la tasa de aprendizaje que define qué tan rápido aprende la red, el número de iteraciones que controla cuántas veces se repite el proceso de entrenamiento y el tamaño de la vecindad que determina cuántos píxeles alrededor del píxel central son considerados para el aprendizaje. Con esto el modelo se entrenó y una vez alcanza un nivel adecuado de precisión, genera el mapa de potencial transición.
- **Validación de resultados:** Finalmente, en este módulo se obtienen indicadores como estadísticas kappa (kappa estándar, histograma kappa y ubicación kappa) con los que se puede evaluar la precisión del modelo. Y se carga la capa de cobertura del año simulado para hacer la validación y se procede a simular un periodo mayor.

6.5 Escenarios de crecimiento futuro de acuerdo con los instrumentos de planificación

Después de tener la modelación se procedió a comparar los escenarios con los instrumentos de planificación que hay en el territorio como los son: el Plan de Desarrollo Municipal 2020 – 2023, el Plan Básico de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Jamundí 2002 y el Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Farallones de Cali a través de la herramienta clip en ArcGIS.

7 Resultados

7.1 Identificación de cambios

Los cambios experimentados por el municipio de Jamundí en los últimos años, principalmente entre los años 2000-2022, como periodo de estudio, responden en gran medida al proceso de metropolización del Distrito de Santiago de Cali, que, si bien jurídicamente no está constituida, las dinámicas existentes son lo suficientemente visibles y cuantificables. Así pues, en esta parte se identificaron los cambios asociados principalmente a tres variables: ocupación urbana, infraestructura vial y cobertura vegetal a través de un conjunto de periodos, que se delimitaron principalmente por las fechas de las fuentes cartográficas. Estos periodos son: 2002 a 2007, 2008 a 2012 y 2013 a 2022.

7.1.1 Cambios en la ocupación urbana

El 2002 es el año de partida del análisis de cambio de la ocupación urbana, ya que fue en este que mediante el Acuerdo 002 de 2002, empezó a regir el Plan Básico de Ordenamiento Territorial – PBOT, que todavía está vigente, en el Subtítulo 4. Clasificación del suelo, en los artículos del 34 al 38, de acuerdo con lo establecido en la Ley 388 de 1997, referente a las categorías de protección, suelo rural, suburbano, urbano y de expansión urbana, como se puede ver en la Figura 5.

Artículo 34: Suelo Urbano. De acuerdo con lo establecido en el artículo 31 de la Ley 388 de 1997, el suelo urbano comprende las áreas correspondientes a la cabecera municipal y a los distintos corregimientos del municipio de Jamundí que cuentan con usos urbanos y disponen de infraestructura vial, así como de redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado. En el marco del presente Plan Básico de Ordenamiento Territorial, el perímetro urbano de la cabecera municipal se ajusta para coincidir con el perímetro de prestación de los servicios públicos domiciliarios; por lo tanto se consideran suelo urbano, además del casco central, las parcelaciones de Las Mercedes, Ribera de Las Mercedes, Rincón de Las Mercedes, La Morada, Privilegio y el caserío El Gaitán y el predio La Argelia en el extremo sur, en ramal que se desprende desde la vía Panamericana, sobre la cual se ubica el área industrial (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

También se reconocen como suelo urbano las áreas ocupadas por las cabeceras municipales de los corregimientos de Ampudia, Bocas Del Palo, Chagres, Guachinte, La Liberia, La Ventura,

Paso de la Bolsa, Potrerito, Puente Vélez, Quinamayó, Robles, San Antonio, San Isidro, San Vicente, Timba, Villacolombia, Villa Paz y La Meseta (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

Artículo 35: Suelo de expansión urbana corresponde a las áreas contiguas al suelo urbano que presentan viabilidad para la prestación de servicios públicos. Su desarrollo está condicionado a la formulación y ejecución de planes parciales (Concejo Municipal de Jamundí, 2002). Para la cabecera municipal de Jamundí, se establecen distintas áreas de expansión ubicadas en su entorno:

1. Polígono de vivienda de interés social de la zona sur.
2. Loma de Piedra
3. Sachamate
4. Alfaguara
5. Los Sardi
6. El Lago
7. Los Pinos
8. San Isidro
9. Solares

El suelo de expansión urbana podrá integrarse al suelo urbano de la cabecera municipal una vez se haya ejecutado el respectivo Plan Parcial de Urbanización. Asimismo, debido a que las cabeceras de los corregimientos no presentan un nivel significativo de consolidación, para estas se define un perímetro de consolidación urbana (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

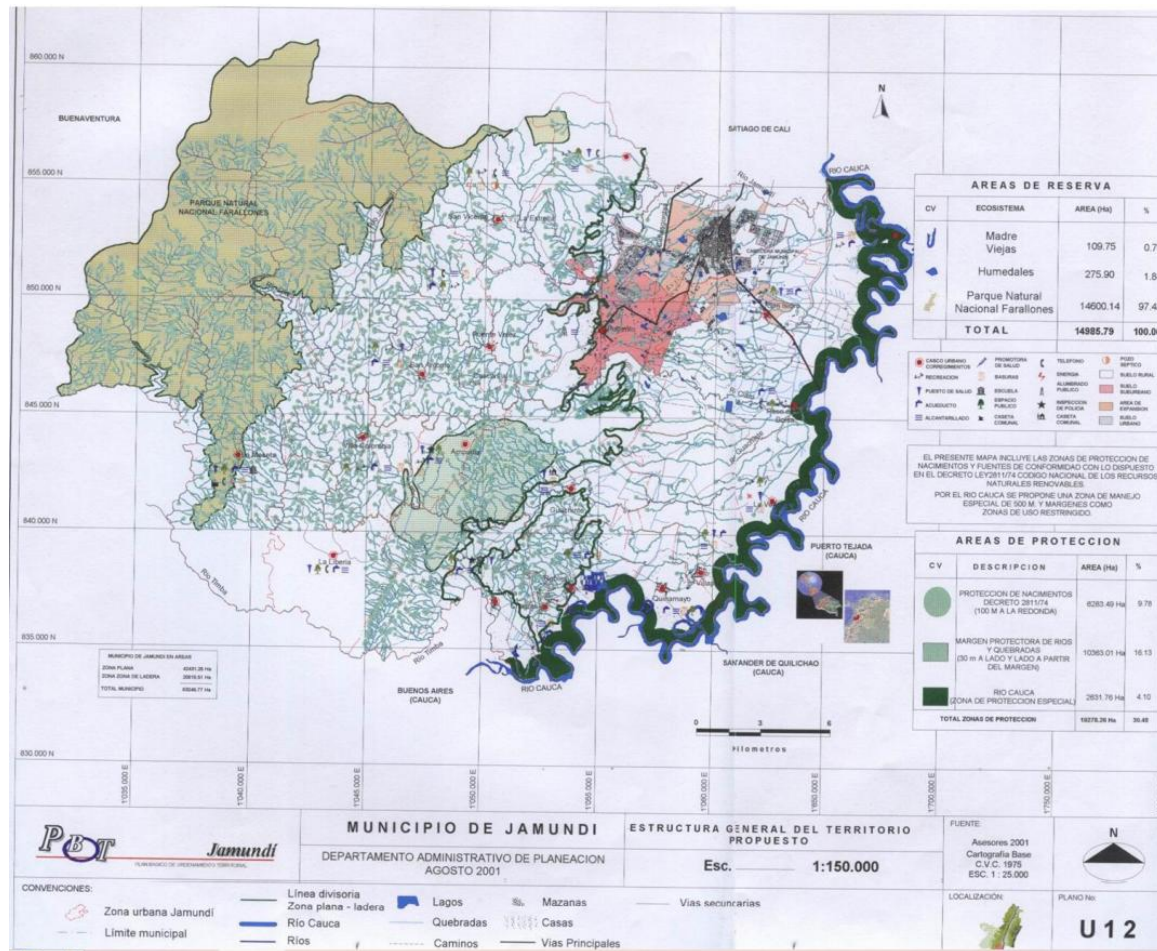
Considerando que las cabeceras de los corregimientos aún no presentan un grado importante de consolidación, se define para estas un perímetro destinado a la consolidación urbana (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

Artículo 36: Suelo Rural. El suelo rural está conformado por aquellas áreas que no son aptas para procesos de urbanización, así como por terrenos destinados principalmente a actividades agrícolas, pecuarias, forestales, de explotación de recursos naturales y usos similares. En el municipio de Jamundí, este suelo se distribuye en dos grandes zonas: la zona plana y la zona de ladera. La zona plana se ubica entre el piedemonte oriental de la cordillera Occidental y el río Cauca, delimitada al norte por el río Jamundí y al sur por el río Timba. En esta área se localizan los corregimientos de Bocas del Palo, Chagres, La Ventura, Paso de la Bolsa, Potrerito, Quinamayó, Robles, San Isidro, Timba, Villa Paz y sectores de Guachinte y Timba. Por otra parte, la zona de ladera se extiende desde el piedemonte hasta la parte alta de la cordillera Occidental, sobre la divisoria de aguas con la costa pacífica y dentro del territorio del Parque Nacional Natural Los Farallones. Esta zona limita al sur con el río Timba y al norte con el municipio de Cali, e

incluye los corregimientos de Ampudia, Guachinte, La Liberia, Puente Vélez, San Antonio, San Vicente, Villacolombia y sectores de Guachinte y Timba (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

Artículo 37: Suelo Suburbano. Conforme a lo establecido en el artículo 34 de la Ley 388 de 1997, el suelo suburbano corresponde a áreas localizadas en suelo rural donde convergen dinámicas y usos propios tanto del entorno urbano como del rural. Dentro de estas áreas se incluyen los corredores interregionales asociados a la Vía Panamericana y la avenida Cañasgordas, así como sectores con potencial para el desarrollo de parcelaciones campestres cercanas a la cabecera del corregimiento de Potrerito (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

Artículo 38: Suelo de Protección. Esta categoría comprende las zonas y áreas ubicadas dentro de cualquiera de las clasificaciones del suelo que, debido a sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, así como por estar destinadas a infraestructuras de servicios públicos domiciliarios o corresponder a áreas con amenazas y riesgos no mitigables para asentamientos humanos, presentan restricciones para su urbanización. Dentro de estas se incluyen, entre otras, las áreas de alta pendiente, los territorios con especial valor paisajístico como el Parque Nacional Natural Los Farallones y las zonas de interés ambiental asociadas a las cuencas de los ríos Cauca, Jamundí, Claro, Guachinte y Timba (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

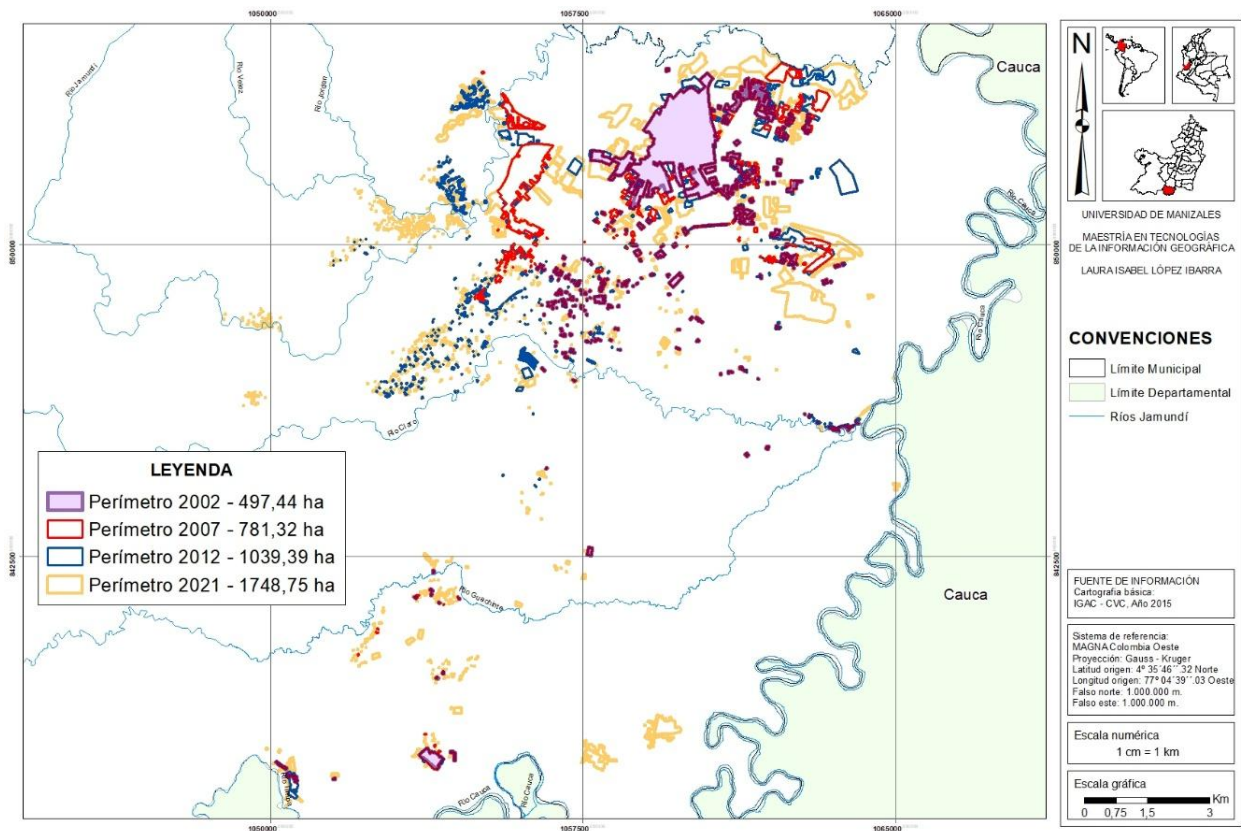
Figura 5*Modelo de ocupación urbana del Plan Básico de Ordenamiento Territorial*

De acuerdo, con el diagnóstico del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, la superficie total del municipio en el 2002 era de 577,0 km², en cuanto a la superficie del perímetro urbano era de 13,1 km², la superficie perímetro suburbano fue de 31.5 km² y la superficie zona rural era de 531.8 km².

Para la identificación de los cambios de ocupación urbana, como se mencionó en la metodología se digitalizaron las imágenes de las superficies construidas de los años 2002, 2007, 2012 y 2021 de Google Earth.

Cabe la pena resaltar que si bien el Plan Básico de Ordenamiento Territorial estableció un perímetro urbano de 1.310 ha, la digitalización de las áreas construidas del municipio de Jamundí en 2002 dio como resultado un área de 497,44 ha, esto se debe principalmente a que no todas las áreas definidas como suelo urbano estaban construidas para ese momento.

Figura 6
Cambios de los perímetros urbanos



Como se puede ver en la Figura 6, de los periodos estudiados el aumento más significativo se dio en el tercer periodo 2012-2021, con un incremento de 709,36 ha, lo que equivale a un incremento del 251%, respecto a la superficie identificado en el 2002 (Tabla 1).

Tabla 1
Superficie urbana e incremento en la ocupación para el período

Periodo	Superficie (ha)	Incremento (ha)	% Incremento respecto a 2002
1	781.32	283.88	57.063
2	1.039,39	264,04	108.94
3	1.748,75	709,36	251.54

Respecto a la parte normativa, se encontró que el Plan Básico de Ordenamiento Territorial ha tenido 15 modificaciones que permitieron el cambio de la clasificación de usos del suelo de 1.626,57 ha, de las cuales 1025.31 ha pasaron de suelo rural a urbano, 106,42 ha de suburbano a

urbano y 297.3 ha de expansión a urbano y 197.54 de rural a suelo de expansión como se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2

Modificaciones clasificación de usos del suelo

Periodo	Acuerdo	Superficie (ha)	Modificación
1	024 de 2002	20.77	Rural a urbano
	019 de 2004	13.55	Suburbano a urbano
	031 de 2004	174.69	Rural a urbano
		135.55	Expansión a urbano
	013 de 2005	53.77	Rural a urbano
	014 de 2005	10.41	Rural a urbano
	020 de 2005	21.55	Rural a urbano
	021 de 2005	12.9	Rural a urbano
	022 de 2005	66.91	Expansión a urbano
		52.23	Suburbano a urbano
	023 de 2005	30.71	Suburbano a urbano
		26.00	Expansión a urbano
	Total	619.04	
2	012 de 2010	40.00	Expansión a urbano
	022 de 2010	4.96	Suburbano a urbano
	025 de 2011	82.79	Rural a urbano
	Total	127.75	
3	018 de 2013	142.81	Rural a urbano
		28.84	Expansión a urbano
		4.97	Suburbano a urbano
	013 de 2017	505.62	Rural a urbano
	017 de 2019	197.54	Rural a expansión
	Total	879.78	

Cabe la pena resaltar que hay diferencias en área entre los polígonos incorporados mediante acuerdo al suelo urbano y las superficies construidas digitalizadas de las imágenes de Google Earth en los periodos de estudio y esto se debe principalmente a que no todas las áreas agregadas al suelo urbano fueron construidas inmediatamente, por lo cual, no están digitalización como superficies construidas en el mismo periodo en el que fueron incorporadas reglamentariamente.

De acuerdo con lo anterior, el municipio de Jamundí ha duplicado su superficie urbana, en el periodo comprendido de 20 años.

7.1.2 Cambios en la infraestructura vial

Al igual que los cambios de ocupación urbana, la infraestructura vial se analizó a partir del 2002 con la entrada en vigor del Plan Básico de Ordenamiento Territorial – PBOT, el cual estableció en el Subtítulo 8. Sistema vial como se muestra en las Figuras 7 y 8, lo siguiente:

Artículo 118: El sistema vial está conformado por el conjunto de vías existentes y las áreas destinadas como reserva para futuros proyectos de construcción o ampliación vial, cuyo propósito principal es facilitar la movilidad de personas y bienes mediante los distintos modos de transporte (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

Figura 7

Plano No U20 Sistema Vial Actual y propuesto POT

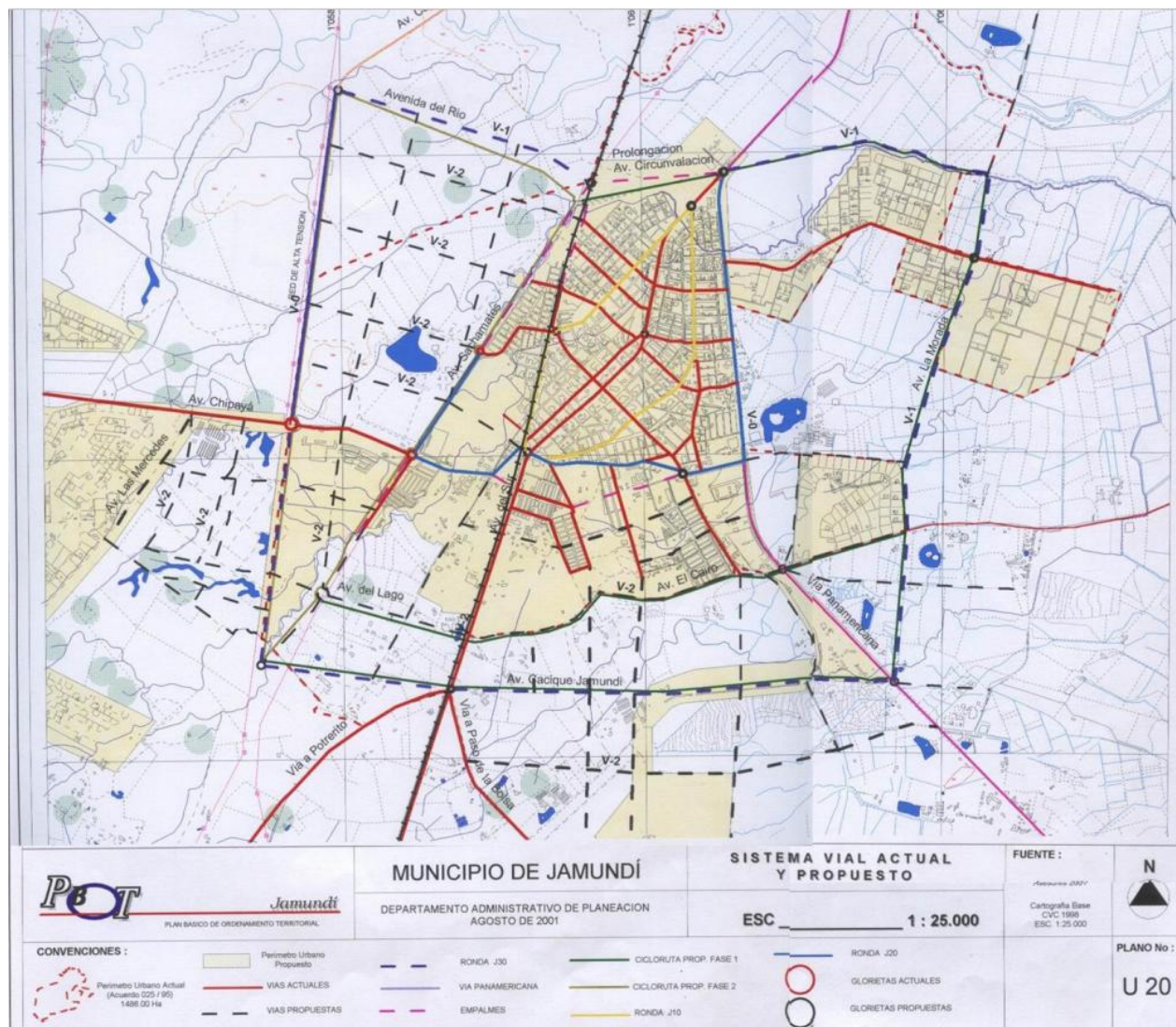


Figura 8

MUNICIPIO DE JAMUNDI

SISTEMA VIAL RURAL PROPUESTO

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACION
AGOSTO 2001

ESC 1 : 150.000

CONVENCIONES:

- Zona urbana Jamundí
- Límite municipal
- Lagos
- Quebradas
- Rio Cauca
- Rios
- Macizas
- Casas
- Vías Principales
- Camminos
- Vías secundarias
- Vía Interregional
- Vía Intermunicipal
- Vía Paisajística Pavimentada
- Empalmes propuestos
- Vía propuesta
- Fortalecer conectividad

LOCALIZACION:

PLANO No:

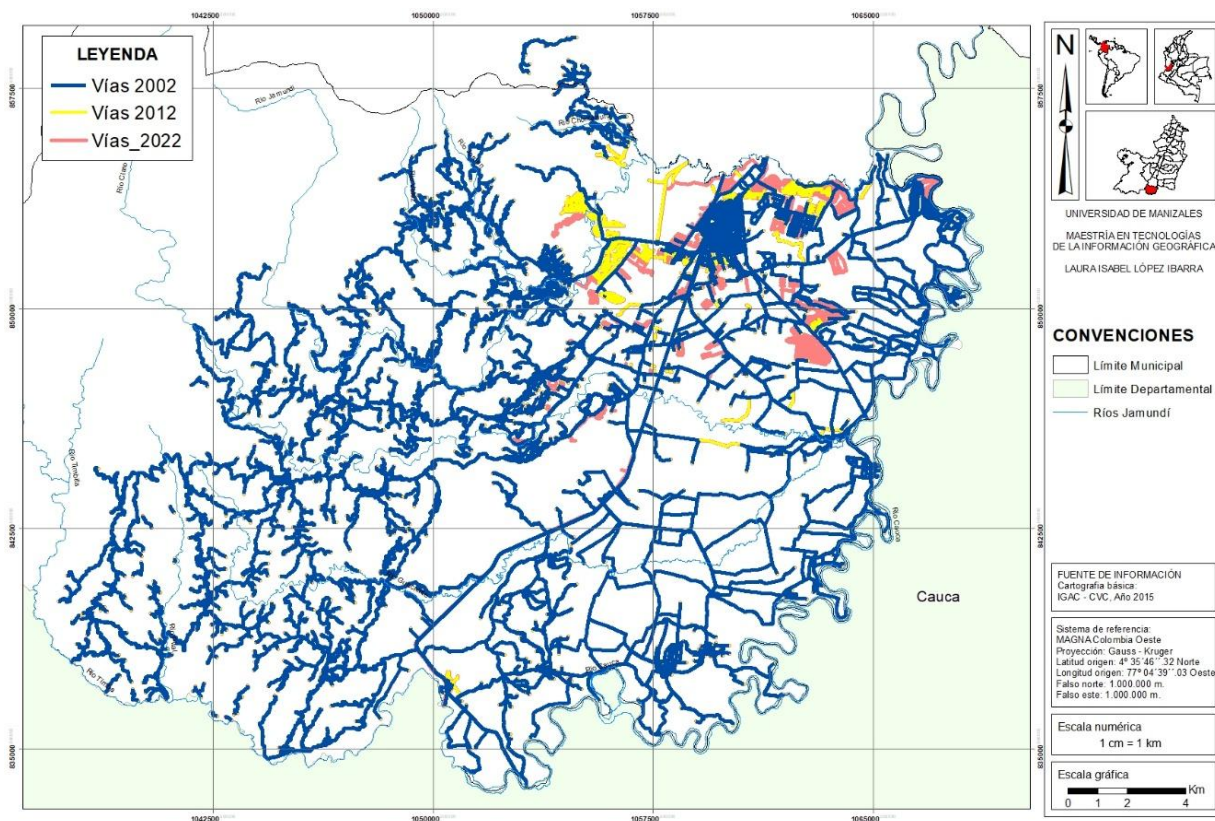
R21

Tabla 3

Periodo	Longitud (km)	Incremento (km)
1	1.236,50 - 1.318,05	81,55
2	1.318,05 – 1.484,64	166,59

A partir de la cartografía elaborada, presentada en la Figura 8, se calcularon las longitudes en kilómetros de las vías para cada uno de los periodos analizados. Los resultados evidencian que entre 2012 y 2022 se registró un incremento en la red vial urbana, asociado principalmente al crecimiento de las áreas residenciales desarrollado durante esos años. Asimismo, en este periodo se destaca la ampliación de la vía Panamericana, la cual aportó significativamente al fortalecimiento y expansión de la red metropolitana.

Figura 9
Vías digitalizadas



Por otra parte, se pudo identificar diferentes tres tipos de tejidos viales asociados a los crecimientos urbanos: el primero se relaciona con la trama urbana residencial compacta relacionados con los tejidos viarios más antiguos del centro poblado de Jamundí (en tonos más oscuros) que se transforma en una trama más geométrica para los crecimientos más recientes (tonos más claros) como se muestra en la Figura 10. Se trata en cualquier caso de una trama densa que refleja la estructura y morfología de una ciudad compacta.

Figura 10*Trama urbana residencial compacta*

La segunda se relaciona con el crecimiento de la trama urbana residencial dispersa, en la que se puede ver una estructura más regular y geométrica, relacionada principalmente con las nuevas urbanizaciones compuestas principalmente por viviendas unifamiliares, donde resulta complejo identificar una jerarquización vial definida, debido a que las vías presentan características similares en cuanto a capacidad y dimensiones, como se puede ver en la Figura 11, que corresponde a las urbanizaciones situadas al norte de municipio de Jamundí.

Figura 11
Trama urbana residencial dispersa



Finalmente, el tercer tipo que se pudo identificar es el del crecimiento de la trama metropolitana en el municipio relacionada principalmente con la construcción de la doble calzada de la vía Panamerica en los años, así como por la generación de importantes nodos de acceso a las nuevas urbanizaciones (Figura 12).

Figura 12
Trama metropolitana



7.1.3 Patrones de ocupación

El primer patrón, identificado es el agregado, que según Aguilera (2008) se da en las zonas adyacentes a las ya consolidadas o ciudad principal, cabecera municipal de Jamundí, como se puede ver en la Figura 13 en la que los nuevos crecimientos se encuentran en cuadrantes completamente rellenos, que representan crecimientos densos, o cuadrantes rellenos parcialmente que representan crecimientos de más baja densidad. Los crecimientos de este tipo se caracterizan por mantener la estructura diversa de la ciudad tradicional (Dematteis, 1998), en el que la mezcla de usos y actividades genera un rico intercambio a nivel social (Rueda, 1995).

Figura 13
Patrón agregado



El ejemplo más claro, se encuentra en el sur de la cabecera municipal, en el que a través de fotografías áreas de 2002-2023, se observa que el crecimiento urbano tiende a incorporarse al tejido urbano ya consolidado, el cual condiciona la configuración de las nuevas áreas de expansión características de este patrón. Gran parte de estos desarrollos se articulan a través de vías preexistentes que parten de las zonas urbanas previamente establecidas, permitiendo así su integración funcional y espacial con la ciudad.

El segundo patrón es el de crecimiento en urbanización que es en el que se agrupan los conjuntos residenciales independiente, caracterizados principalmente por usos residenciales de baja densidad y por su localización aislada respecto a las demás áreas urbanas, configurando implantaciones urbanas dispersas dentro del territorio. Generalmente corresponden a nuevos

proyectos de vivienda unifamiliar, destinados a primera o segunda residencia, donde las actividades comerciales y de servicios tienen escasa presencia. Esto da lugar a espacios predominantemente mono-funcionales, orientados al uso residencial temporal o de fin de semana, con esquemas de organización simplificados y un alto consumo de recursos, de acuerdo con Besussi y Chin, 2003; Frenkel y Ashkenazi, 2008 en Aguilera (2008).

Debido a su aislamiento frente a las zonas urbanas consolidadas, estas áreas presentan una alta dependencia del automóvil, asociada principalmente a la limitada disponibilidad de servicios y de sistemas de transporte público. Por esta razón, suelen localizarse cerca de corredores viales metropolitanos de alta capacidad, que facilitan la conexión y el desplazamiento hacia los núcleos urbanos consolidados donde se concentran los servicios y equipamientos requeridos.. Un ejemplo, son las urbanizaciones cercanas a los Farallones de Cali, ubicados en el occidente del municipio, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Patrón de crecimiento en urbanización



El último patrón de crecimiento identificado corresponde al crecimiento nodal, el cual se desarrolla alrededor de nodos de comunicación vial. Estos procesos de expansión urbana se originan debido a la importancia estratégica de dichos puntos en términos de accesibilidad, así como al incremento de la movilidad sustentada en el uso del vehículo particular según Rueda, 1998; Newman y Kenworthy, 1999, en Aguilera (2008). Dentro de este patrón de crecimiento suelen localizarse diversos usos en torno a los nodos viales, destacándose grandes superficies que integran

actividades comerciales y diferentes servicios asociados al ocio y la recreación. Un ejemplo de esto son los conjuntos residenciales a lo largo de la vía Panamericana, como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Patrón de crecimiento nodal



7.1.3 Cambio de cobertura

El análisis de cambio de coberturas se realizó a través de imágenes satelitales Landsat, descargadas del servicio web Earth Explorer del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América – USGS (Figura 16), con las características de la Tabla 4.

Figura 16
Imágenes Earth Explorer

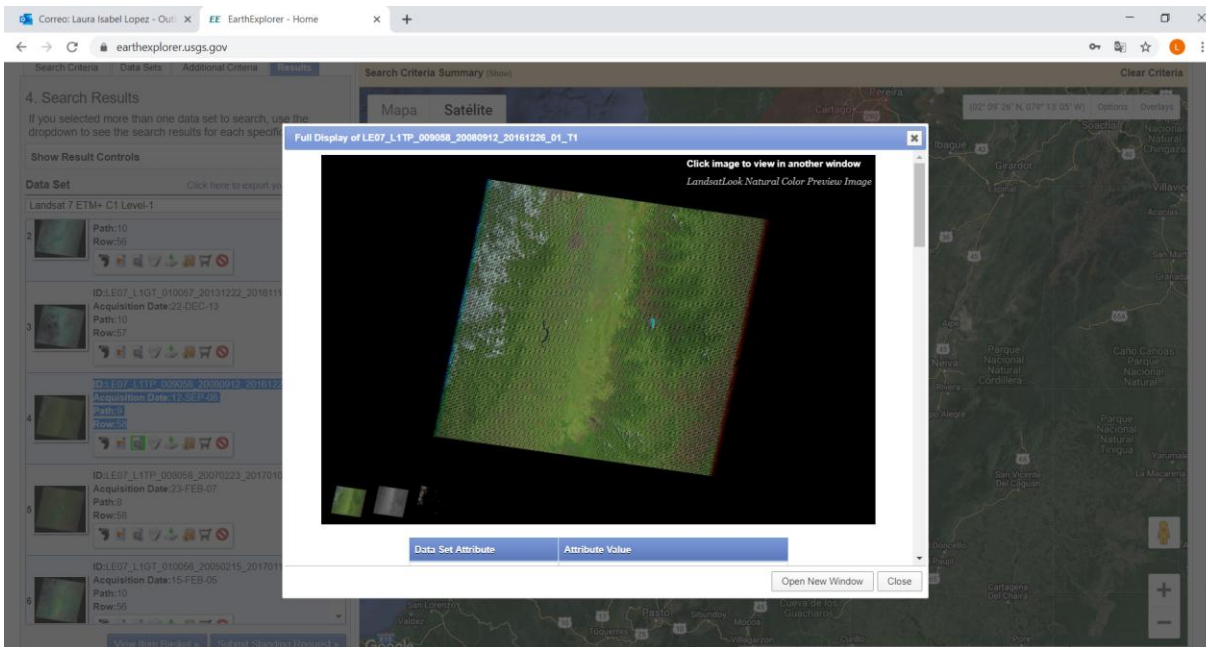
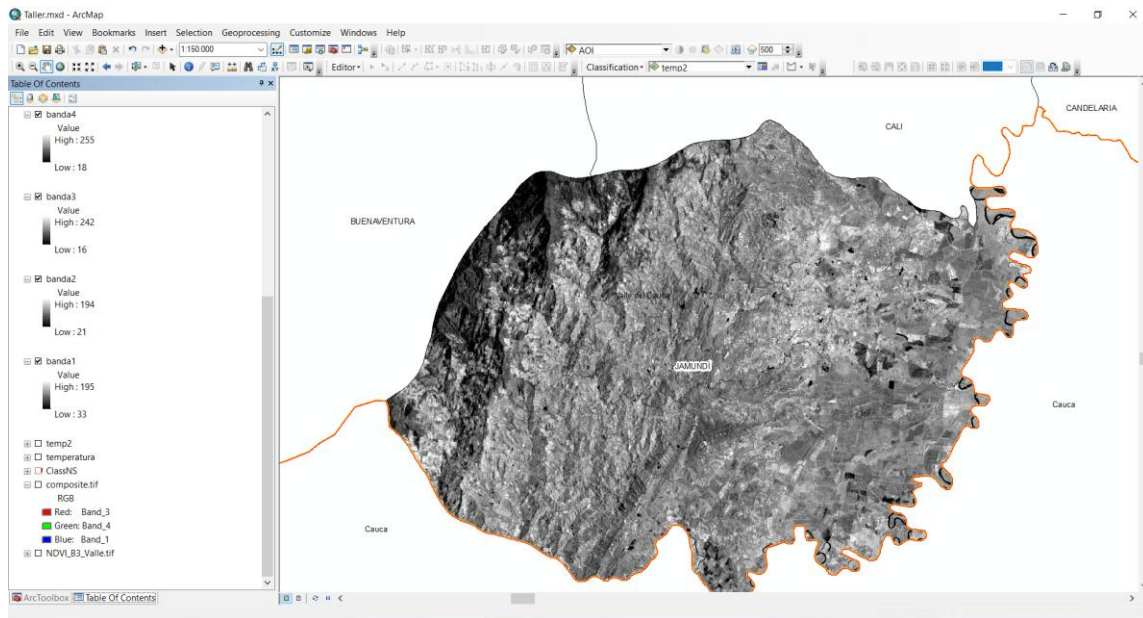


Tabla 4
Propiedades de las imágenes satelitales Landsat

Propiedades	Imagen 2000	Imagen 2012	Imagen 2023
ID de la imagen	LE07_L1TP_009058_200	LE07_L1TP_009058_201208	LC08_L2SP_009058_202305
	00704_20170211_01_T1	06_20161129_01_T1	09_20230517_02_T1
Formato	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF
Satélite	LANDSAT_7	LANDSAT_7	LANDSAT_8
Sensor	ETM	ETM	OLI_TIRS
Modo del sensor	SAM	BUMPER	
Fecha de adquisición	2000-07-04	2012-08-06	2023-05-09
Composición	4-5-3	4-5-3	4-5-3
Acimut del sol	52.83851235	62.74517946	58.40236737
Elevación del sol	54.95950134	58.26223249	60.83847802
Proyección	UTM	UTM	UTM
Datum	WGS84	WGS84	WGS84
Elipsoide	WGS84	WGS84	WGS84
Zona UTM	18	18	18
Tamaño de celda	30.00	30.00	30.00

Como se mencionó en la metodología se realizó la corrección de las franjas con ausencia de información que presentan una leve inclinación de las imágenes en ArcGIS con la herramienta: ArcToolbox < Landsat Toolbox < Fix Landsat 7 Scanline Errors.

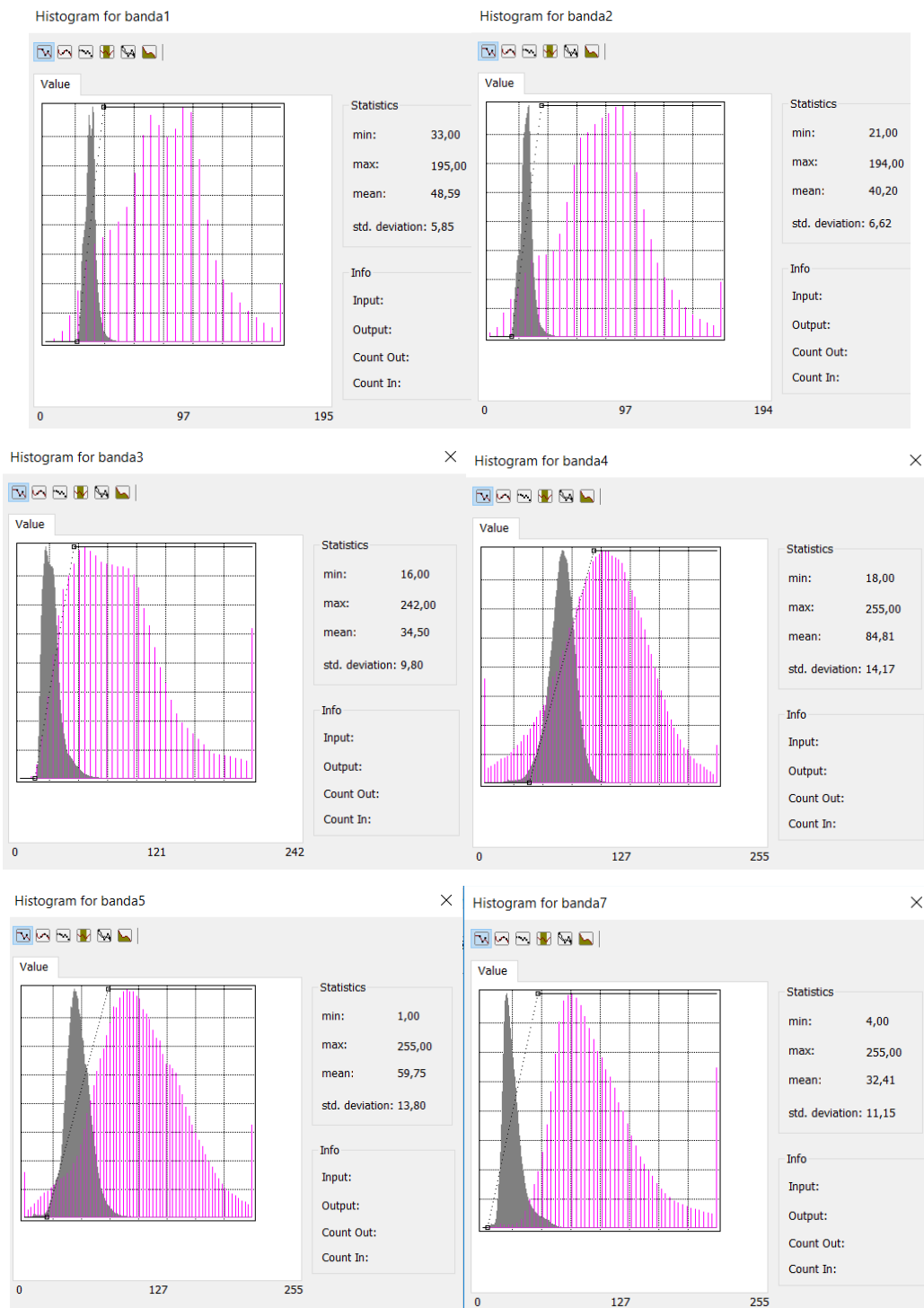
Figura 17
Imagen corregida

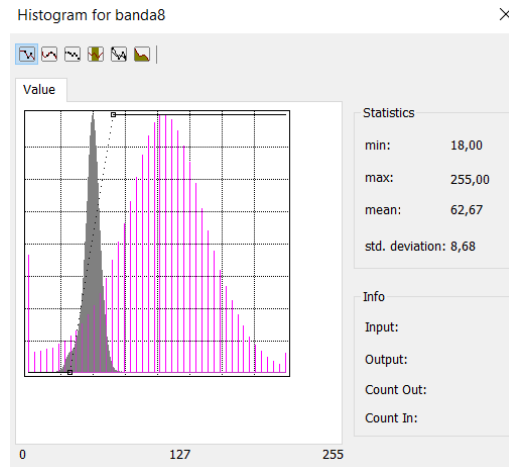


A continuación, se realizó un análisis estadístico de cada una de las bandas, encontrando que en general las bandas de la imagen tienen histogramas estrechos lo que quiere decir que hay un pobre contraste visual, ninguna de las bandas tiene todos los píxeles de los niveles digitales (0-255). Los medios más altos y los histogramas más anchos de la imagen se encuentran en las bandas 4 y 5, lo que quiere decir que están bastante saturadas y con más contraste ya que tienen valores mínimos y máximos muy próximos a (0-255) en estos casos a 18 y 255 y 1 y 255, respectivamente, aunque la banda 5 tiene mayor heterogeneidad (Figura 18).

Por otra parte, tenemos que en la banda 1 la mayoría de los píxeles de la imagen tienen valores entre 33 y 195, lo que quiere decir que es la banda en la que hay menos contraste. Seguida de la banda 2 que tiene los valores concentrados entre 21 y 194. Y las bandas 3 y 4 tienen sus valores concentrados entre 16 – 242 y 18 – 255, lo que quiere decir que hay más contraste. Sin embargo, las bandas con mayor contraste son las 5, 7 y 8 que tienen los píxeles entre 1 - 255, 4 - 255 y 18 – 255, respectivamente. Finalmente, ninguna de las bandas tiene histograma multimodal, es decir, no hay distintos tipos de cobertura predominantes identificados en la imagen.

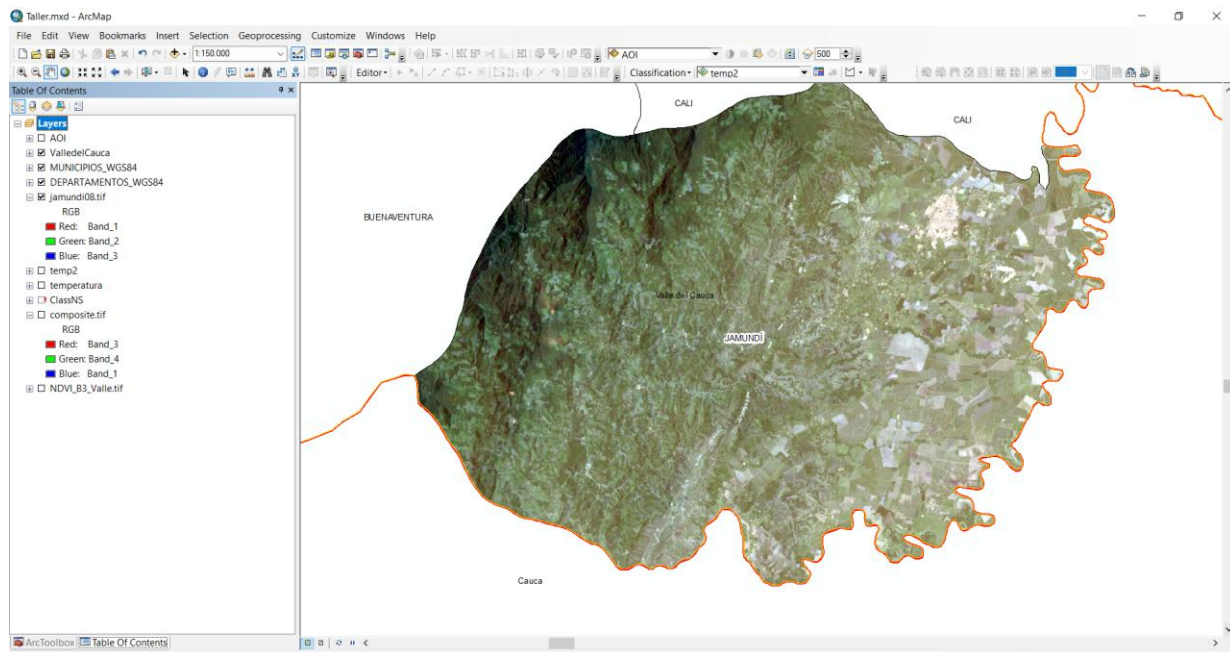
Figura 18
Histogramas de las bandas





Posteriormente, se realizó la combinación de las bandas en el software ArcGIS, así: ArcToolbox - Data Management Tool - Raster - Raster Processing - Composite Bands. Se seleccionaron las bandas 1 a 7 con excepción de la 6 ya que es una banda térmica con diferente resolución que generalmente no se usa en clasificaciones para uso y cobertura del suelo (Figura 19).

Figura 19
Composición de bandas



A las imágenes combinadas, se les realizó la estadística para el análisis multivariado de las bandas raster - Spatial analysis tools - multivariate - band collection spatial. Como resultado se obtuvieron las matrices de covarianza y correlación, junto con parámetros estadísticos básicos como los valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar:

Figura 20
Parámetros estadísticos

statistics08.txt: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
# STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS

# Layer      MIN      MAX      MEAN      STD
# -----
#      1      33,0000    195,0000    48,5897    5,8511
#      2      21,0000    194,0000    40,2001    6,6171
#      3      16,0000    242,0000    34,5015    9,8035
#      4      18,0000    255,0000    84,8142    14,1750
#      5       1,0000    255,0000    59,7460    13,8006
#      6       4,0000    255,0000    32,4130    11,1535
#      7      18,0000    255,0000    62,6685    8,6784
# =====

# COVARIANCE MATRIX

# Layer      1      2      3      4      5      6      7
# -----
#      1      22,64539    24,49122    35,19063    -4,19354    35,03129    33,15001    13,13306
#      2      24,49122    28,96268    40,41961     2,82240    44,68754    39,08350    19,40748
#      3      35,19063    40,41961    63,57238    -15,42372    64,42682    62,38254    18,86441
#      4      -4,19354     2,82240    -15,42372    132,90810    42,96509    -0,75415    64,75037
#      5      35,03129    44,68754    64,42682    42,96509    125,98145    92,01895    50,67517
#      6      33,15001    39,08350    62,38254    -0,75415    92,01895    82,28712    25,96423
#      7      13,13306    19,40748    18,86441    64,75037    50,67517    25,96423    49,81555
# =====

# CORRELATION MATRIX

# Layer      1      2      3      4      5      6      7
# -----
#      1      1,00000     0,95632     0,92748     -0,07644     0,65586     0,76794     0,39102
#      2      0,95632     1,00000     0,94197     0,04549     0,73980     0,80059     0,51094
#      3      0,92748     0,94197     1,00000     -0,16780     0,71991     0,86251     0,33522
#      4     -0,07644     0,04549     -0,16780     1,00000     0,33204     -0,00721     0,79576
#      5      0,65586     0,73980     0,71991     0,33204     1,00000     0,90377     0,63968
#      6      0,76794     0,80059     0,86251     -0,00721     0,90377     1,00000     0,40553
#      7      0,39102     0,51094     0,33522     0,79576     0,63968     0,40553     1,00000
# =====
```

En este caso las bandas tienen todos los píxeles ocupando todo el rango posible de niveles digitales con un máximo de 255 y mínimos que varían del 1 al 33, lo que significa que la imagen presenta mucha variación en cuanto a las tonalidades se refiere.

Por su parte, la matriz de correlación presenta coeficientes que oscilan entre -1 y +1, donde los valores negativos indican una correlación inversa y los positivos una correlación directa perfecta. Esto implica que, al representar los datos en un diagrama de dispersión, los puntos podrían alinearse sobre una línea recta. Asimismo, cuanto más próximos se encuentren los coeficientes a los valores extremos de +1 o -1, mayor será la intensidad de la relación lineal entre las variables.

Finalmente, se calculó el Factor de Índice Óptimo – OIF, que es un valor estadístico que se utiliza para escoger la mejor combinación de tres bandas en una imagen satelital. En este caso, la combinación óptima para la imagen del municipio de Jamundí es la 341, ya que tiene un OIF de 43.6590364, lo que quiere decir que es la combinación de bandas que presenta menor correlación entre sí y una mayor desviación estándar en cada banda ofrece una mayor capacidad para discriminar y diferenciar las distintas coberturas y la menor cantidad de redundancias.

Con las imágenes compuestas, se realizó la clasificación supervisada en ArcGIS Pro con las siguientes categorías de cobertura:

- **Construcciones:** Constituyen todas aquellas obras realizadas por el hombre
- **Plantaciones / parcelas:** en esta categoría se agrupan los distintos tipos de cultivos, como elementos inherentes a las actividades culturales que el hombre desempeña en el campo para la obtención de alimentos y abrigo. En Colombia, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, citado por el IGAC (2024), los cultivos pueden ser de carácter permanente, semipermanente, temporales y confinados.
- **Vegetación natural abierta:** esta categoría agrupa una serie de plantas gramíneas, leguminosas o hierbas no leñosas que son de rápido crecimiento e invades los cultivos o pastizales, como consecuencias del abandono de los terrenos por un periodo superior a un año.
- **Bosques:** corresponden a formaciones vegetales dominadas por especies arbóreas y arbustivas que superan los 8 metros de altura, conformando un dosel o estrato de copas continuo o semicontinuo. Según el IGAC (2024) estas formaciones vegetales pueden ser de tipo natural, natural con intervención y plantados.
- **Cuerpos de agua:** constituyen aquellas zonas sobre la superficie terrestre que se encuentran cubiertas por volúmenes de agua estática o en movimiento, sin presencia de vegetación.
- **Tierras eriales:** esta categoría comprende aquellas superficies de la tierra que no tienen capacidad para ser cultivadas y/o labradas.

Para la clasificación supervisada en ArcGIS se tomaron muestras por categoría, como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5*Muestra por categorías*

Clase	Puntos de entrenamiento	Imagen 2000		Imagen 2012		Imagen 2023	
		Polígonos	Píxeles	Polígonos	Píxeles	Polígono	Píxeles
1	Cuerpos de agua	50	196	42	239	47	312
2	Nubes	51	1927	60	684	46	1234
3	Sombras nubes	31	371	10	160	79	1003
4	Bosques	51	2599	87	6865	108	2570
5	Vegetación natural abierta	41	2087	72	3842	84	4442
6	Construcciones	38	190	83	1376	110	471
7	Plantaciones	75	2340	96	1549	148	2552
8	Tierras eriales	39	547	114	2095	83	1428

Los resultados de la clasificación supervisada de cobertura del suelo, se muestra en las Figuras 21, 22 y 23.

Figura 21
Cobertura del suelo 2000

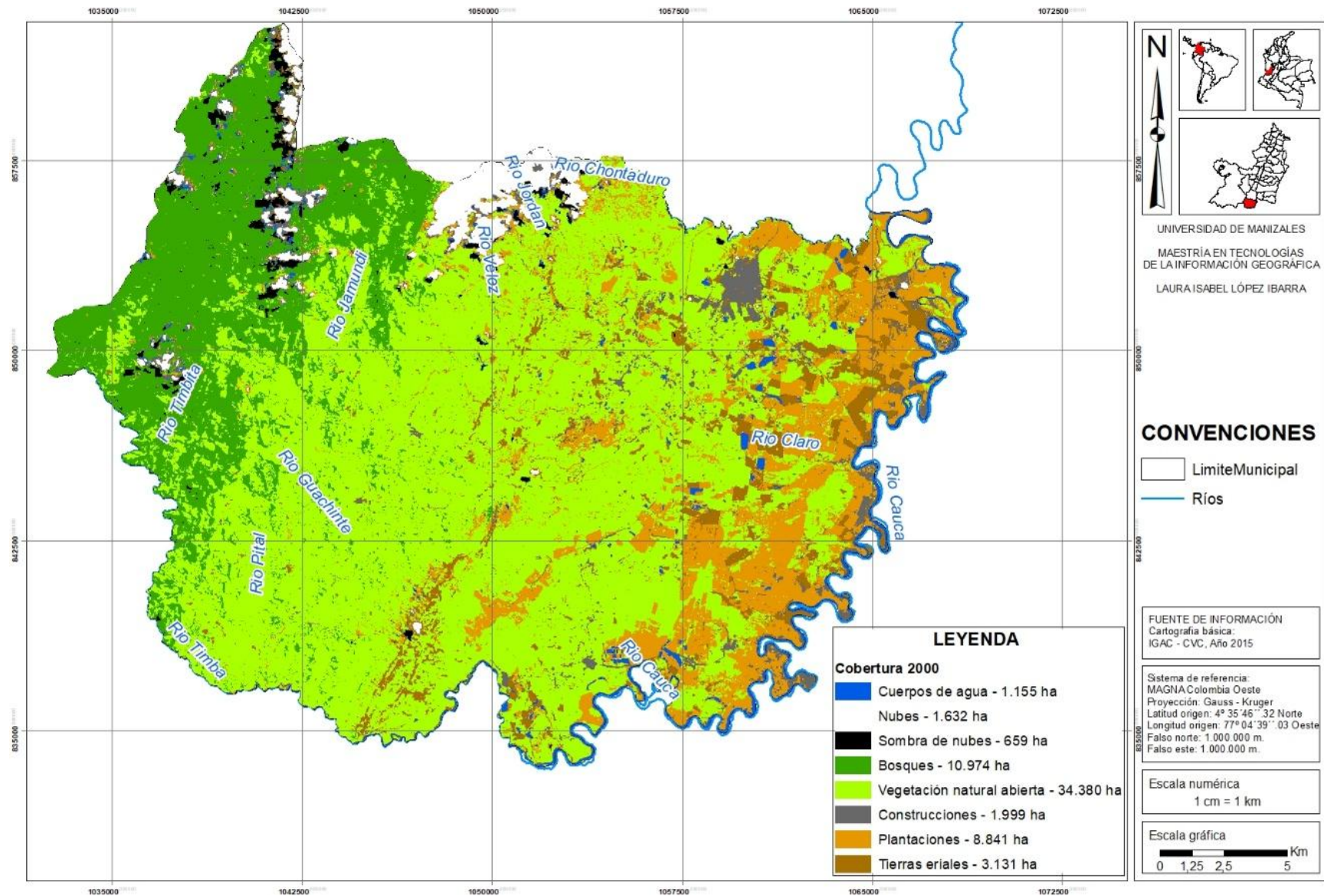


Figura 22
Cobertura del suelo 2012

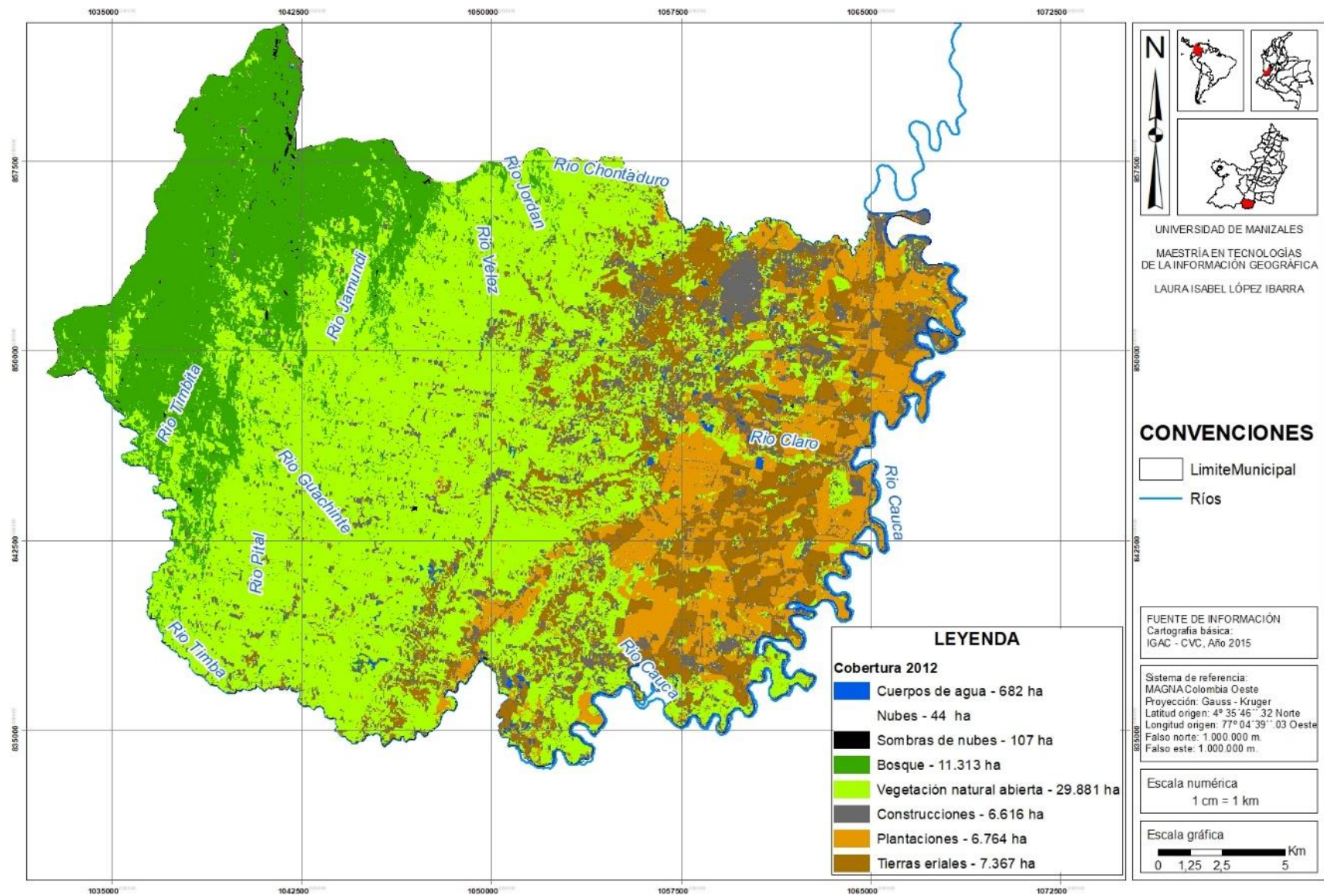
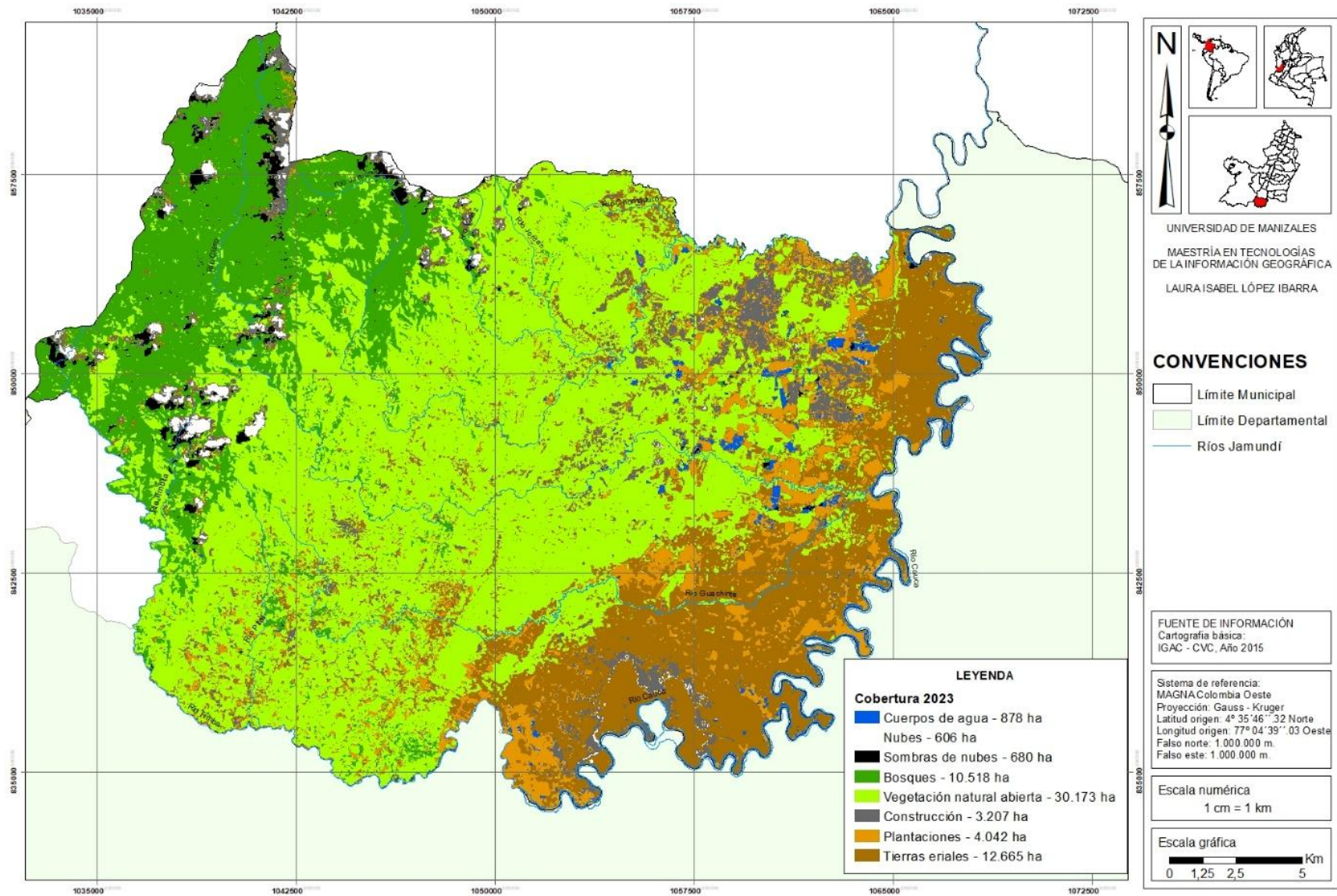


Figura 23
Cobertura 2023



Como se puede ver en las figuras en el primer periodo la vegetación natural abierta tuvo una disminución significativa de 4.499 ha, al igual que las plantaciones de 2.077 ha y las coberturas de aumentaron fueron la de construcción con 6.616 ha un crecimiento urbano muy significativo y las tierras eriales, la primera más de tres veces su superficie. Los cambios se localizaron en la zona oriental del municipio, especialmente hacia el Río Claro y el Río Cauca.

Para el segundo periodo comprendido entre el 2012 y 2023, las plantaciones siguieron disminuyendo su superficie y las tierras eriales continuaron aumentando, por lo que se puede decir que sigue el mismo patrón. En el apartado de la simulación se analiza el cambio con la matriz de transición.

7.2 Simulación de crecimiento urbano

Como se mencionó en la metodología la simulación de crecimiento urbano se realizó en el complemento de QGIS MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation), el cual permite realizar análisis espaciales para la predicción de cambios en el uso del suelo, a partir del cargue de las capas de cobertura del suelo para dos años y las variables espaciales:

7.2.1 Evaluación de correlación

En primera instancia, se evaluó la relación entre las variables espaciales auxiliares y los cambios identificados entre dos fechas mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Este método estadístico permite medir la relación lineal entre dos variables continuas y resulta útil para determinar el grado de asociación entre una variable espacial y los cambios en las clases de uso del suelo. El coeficiente toma valores entre -1 y 1, donde 1 representa una correlación positiva perfecta, -1 una correlación negativa perfecta y 0 indica ausencia de correlación, como se muestra en la Figura 24, para cada una de las variables:

Figura 24

Resultado de la evaluación de correlación

	Rios	Slope	Urbano	Vias
Rios	--	-0.09412075796723808	0.32555534143400794	0.260560793065845
Slope		--	0.6774847426030222	0.45886596503644106
Urbano			--	0.754281629274642
Vias				--

- Vías – Urbano (0.75): Correlación alta, lo que indica que el crecimiento urbano está fuertemente influenciado por la cercanía a las vías.
- Pendiente – Urbano (0.68): Correlación moderada alta, muestra buena correlación, aunque ligeramente menor, y sugiere que el crecimiento urbano ocurre más en zonas de menor pendiente.
- Ríos – Urbano (0.32): Correlación baja-positiva, que indica una influencia menor o directa, pero no necesariamente excluye su uso en la modelación.
- Ríos – Pendiente (-0.094): Correlación casi nula (ligeramente negativa). No afecta mucho la interpretación general.

De manera general, las variables tienen buena correlación, principalmente las variables de vías, los centros urbanos y las pendientes. La variable ríos tienen correlaciones bajas con las demás variables espaciales, pero se mantienen en el modelo debido a que tiene un sentido ambiental y regulatorio, aunque tenga menor impacto estadístico.

7.2.2 Área de cambio

A continuación, se realizó una cuantificación de las transiciones y cambios y transiciones entre usos que existen en el periodo de análisis, a través de la matriz que genera una visión estadística que ayuda entender la dirección y magnitud de los cambios espaciales, antes de modelar la predicción. De acuerdo con la misma, las coberturas que más perdieron área fueron vegetación natural abierta (4.445 ha), las plantaciones (2.208 ha) y los cuerpos de agua (486 ha), y las que ganaron área fueron bosque (285 ha), tierras eriales (4.113 ha) y construcciones, siendo esta la que más ganó con 4.867 ha, pasando de 2.082 ha a 6.949 ha (Figura 25).

Figura 25*Matriz de cambio de cobertura 2000 - 2012*

Class statistics						ha	
	Class color	2000	2012	Δ	2000 %	2012 %	Δ %
Cuerpo de agua		1175.04 ha	688.95 ha	-486.09 ha	1.87154890167	1.09732742358	-0.774221478088
Nubes		1627.47 ha	49.32 ha	-1578.15 ha	2.59215830184	0.0785545954438	-2.5136037064
Sombra de nubes		668.79 ha	121.77 ha	-547.02 ha	1.06521751595	0.193949575977	-0.871267939977
Bosques		11029.77 ha	11314.89 ha	285.12 ha	17.5677031668	18.0218290033	0.454125836434
Vegetación natural abierta		33962.94 ha	29517.30 ha	-4445.64 ha	54.0945866136	47.0137785907	-7.08080802289
Construcciones		2082.87 ha	6949.98 ha	4867.11 ha	3.31749817948	11.0696039587	7.75210577921
Plantaciones		8997.39 ha	6788.43 ha	-2208.96 ha	14.3306231042	10.8122946543	-3.51832844995
Tierras eriales		3240.09 ha	7353.72 ha	4113.63 ha	5.16066421637	11.712662198	6.55199798166

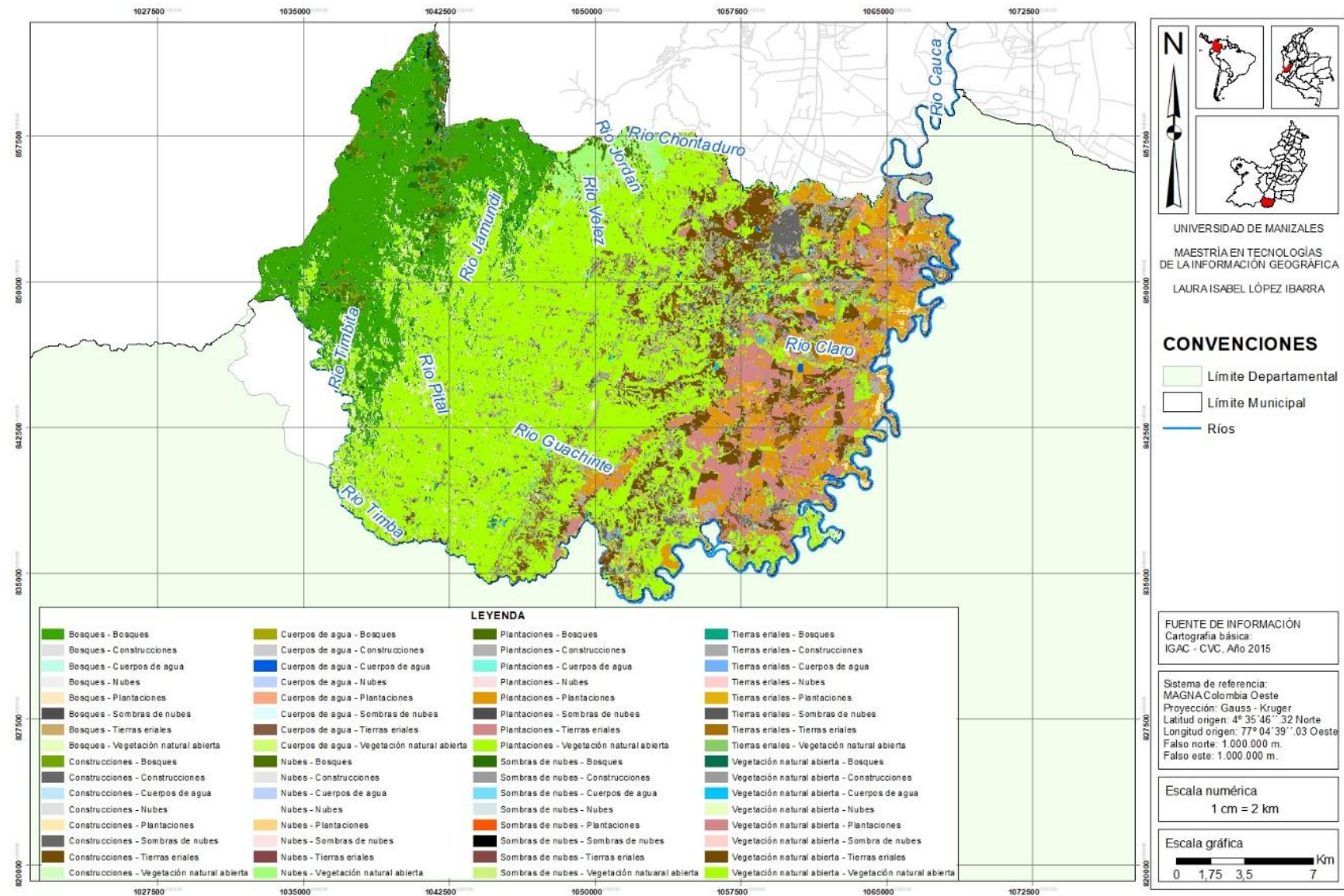
En la matriz de transición se puede evidenciar que la cobertura de bosque gano superficie de las coberturas tierras eriales (1.111 ha), vegetación natural (825 ha), construcciones (299 ha) y plantaciones (162 ha). Por su parte, la vegetación natural recibió de las plantaciones (2.210 ha), el bosque (2.171 ha), las tierras eriales (750 ha) y construcción (401 ha). La construcción gano área de la vegetación natural (3.796 ha), las plantaciones (1.306 ha) y las tierras eriales (714 ha). La cobertura de plantaciones gano áreas de la vegetación natural (2.476 ha), de las tierras eriales (621 ha) y finalmente de las construcciones (314 ha). La cobertura de tierras eriales gano áreas de vegetación natural (4.024 ha), de las plantaciones (2.001 ha) y de las construcciones (215 ha), como se puede observar en la Figura 26.

Figura 26*Matriz de transición de cobertura*

Transition matrix								
	Cuerpo de agua	Nubes	Sombra de nubes	Bosques	Vegetación natural abierta	Construcciones	Plantaciones	Tierras eriales
Cuerpo de agua	0.307675	0.001608	0.005974	0.151961	0.202819	0.103707	0.113894	0.112362
Nubes	0.000498	0.001714	0.005530	0.361610	0.578886	0.036388	0.003484	0.011890
Sombra de nubes	0.003230	0.000404	0.056924	0.689948	0.197551	0.019513	0.016418	0.016014
Bosques	0.000367	0.000277	0.003182	0.787651	0.196878	0.010444	0.000571	0.000628
Vegetación natural abierta	0.003861	0.000739	0.000363	0.024313	0.667514	0.111796	0.072924	0.118490
Construcciones	0.010284	0.001642	0.002117	0.143845	0.192888	0.394893	0.150974	0.103357
Plantaciones	0.009313	0.000860	0.000680	0.018035	0.245641	0.145222	0.357764	0.222485
Tierras eriales	0.025944	0.001556	0.003000	0.034305	0.231660	0.220549	0.191828	0.291159

A continuación, se muestra en Figura 27 la transición de coberturas para el periodo de análisis, para el municipio de Jamundí.

Figura 27
Transición de coberturas



7.2.3 Modelado del potencial de transición

Después, de la identificación de los cambios se procedió con el modelado del potencial de transición que calcula qué tan probable es que un lugar cambie de uso o cobertura del suelo en el futuro, basándose en los cambios que ya ocurrieron en los años analizados, para lo cual se utilizó el método de Redes Neuronales Artificiales (ANN) que funciona como algoritmo de aprendizaje supervisado con patrones espaciales de cambio de usos del suelo y los utiliza para predecir cambios futuros bajo una red neuronal multicapa simple entrenada con datos espaciales históricos, para este caso los raster de cobertura del suelo de los años 2000 y 2012, vías y drenajes.

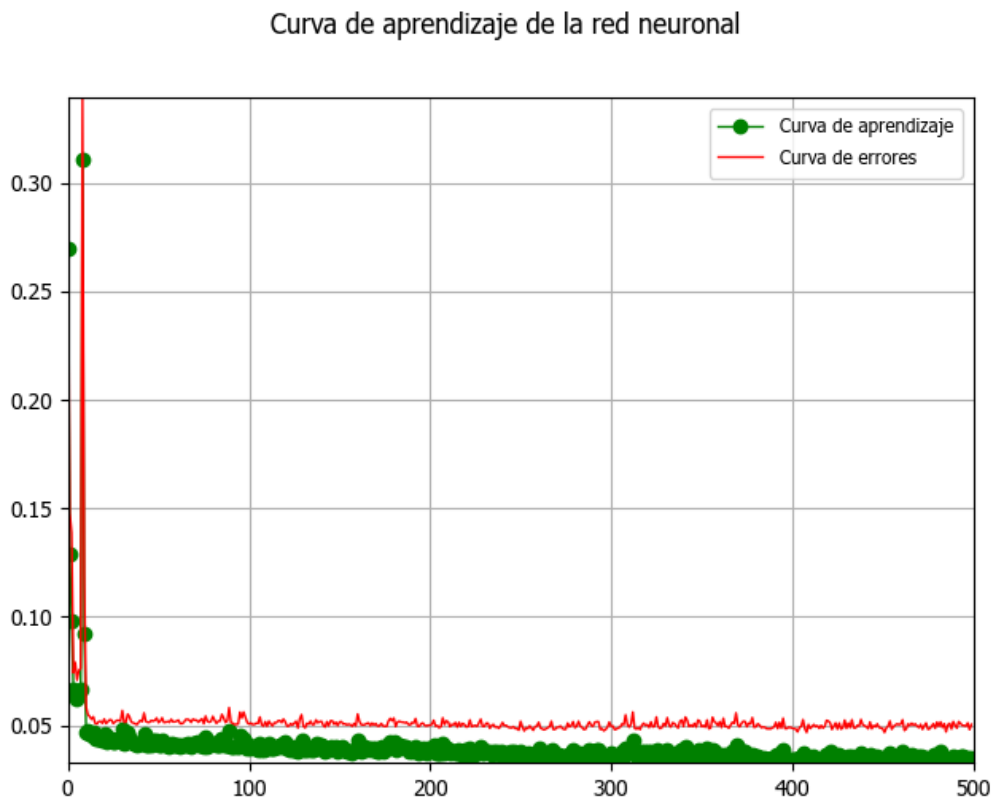
A continuación, se procedió a iniciar el entrenamiento, para el cual primero se definieron los siguientes parámetros que personalizan el comportamiento de la red neuronal, cabe la pena resaltar que esta etapa es fundamental, ya que el desempeño del modelo depende de la calidad del entrenamiento realizado.

- Muestras: 3000
- Capas ocultas: 15 de
- Tasa de aprendizaje: 0.01
- Impulso: 0.05
- Iteraciones: 500

Durante el entrenamiento, el modelo aprende a identificar donde es más probable que ocurran cambios en el uso del suelo a través de un método de ensayo y error, MOLUSCE muestra un gráfico de entrenamiento que ayuda a entender cómo está aprendiendo la red neuronal, como se puede ver en la Figura 28, la curva de aprendizaje (verde) comienza en 0.3 y baja rápidamente a <0.05 en menos de 20 iteraciones, luego se estabiliza sin grandes oscilaciones, lo que demuestra que la red neuronal aprendió rápidamente y con buena estabilidad.

La curva de errores (roja) fuertemente baja al inicio para mantenerse casi plana cerca de 0.05, lo que significa que no hay sobre entrenamiento ni picos inusuales, lo que es ideal.

El error total mínimo fue 0.04669 bajo. Y el Kappa actual: 0.43815 que indica buena calidad predictiva

Figura 28*Curva de aprendizaje de la red neuronal*

7.2.3 Simulación de Autómata Celulares

Como resultado se obtuvo la simulación para la cobertura de los años 2023 y 2036 para el municipio de Jamundí, como se muestra en la Figuras 29 y 30, las coberturas que como en los años anteriores continuaron perdiendo área para el año 2036 fueron los cuerpos de agua (28,89 ha), los bosques (236,79 ha) y las tierras eriales (469,26 ha) y las que ganaron fue la vegetación natural (162,63 ha), las construcciones (97, 11 ha) y las plantaciones (480,87 ha).

Figura 29
Simulación de cobertura 2023

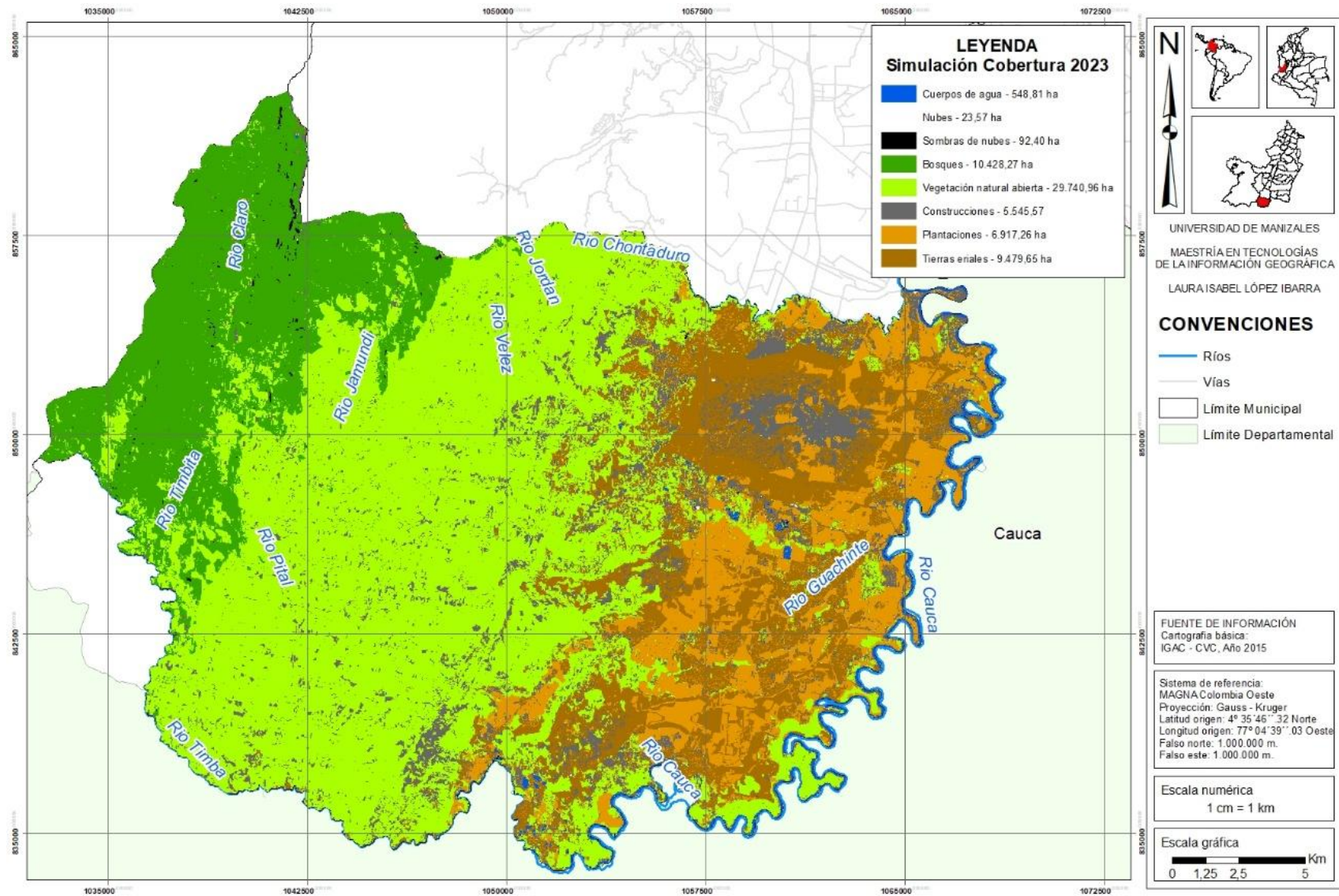
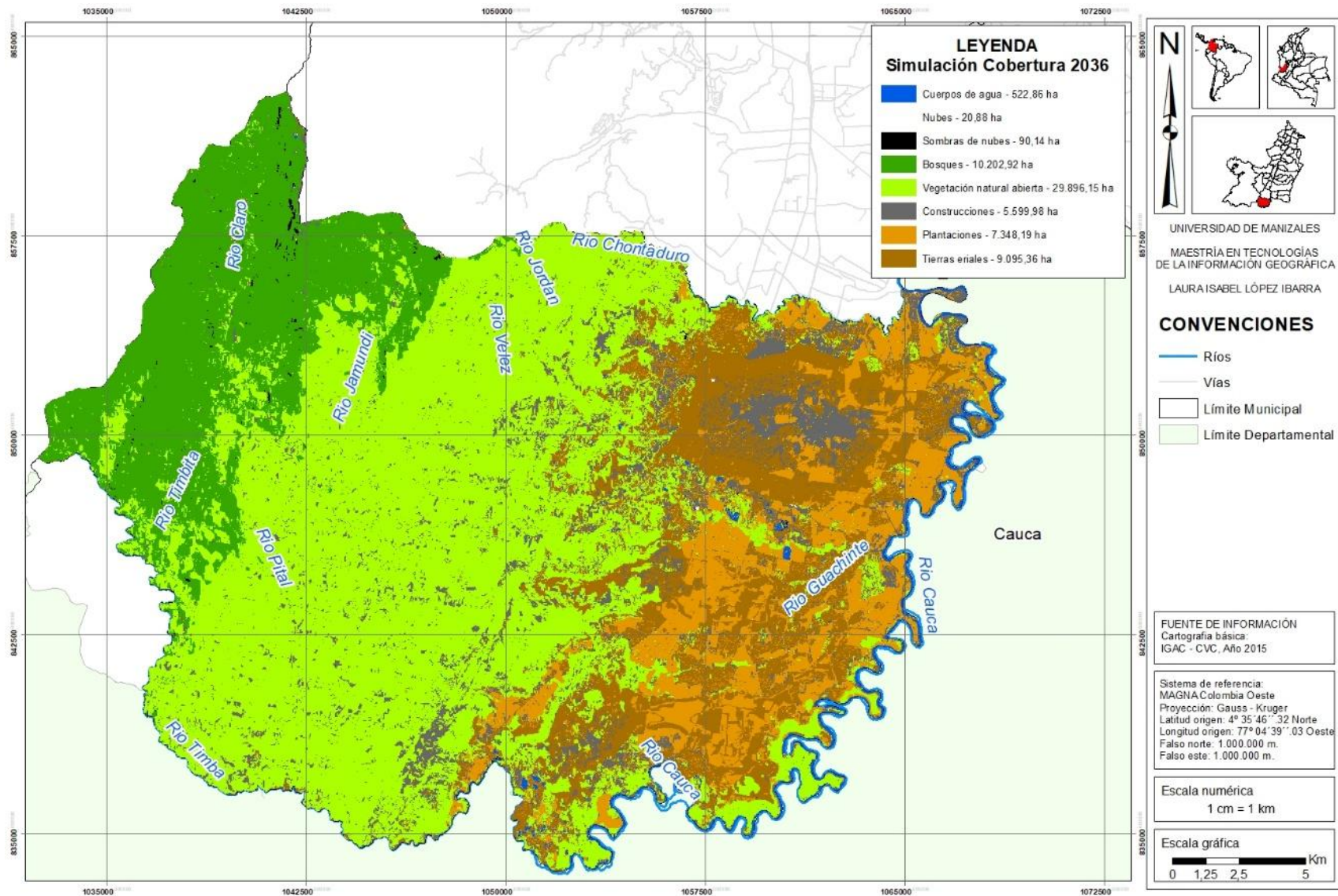


Figura 30
Simulación de cobertura 2023



7.2.4 Validación

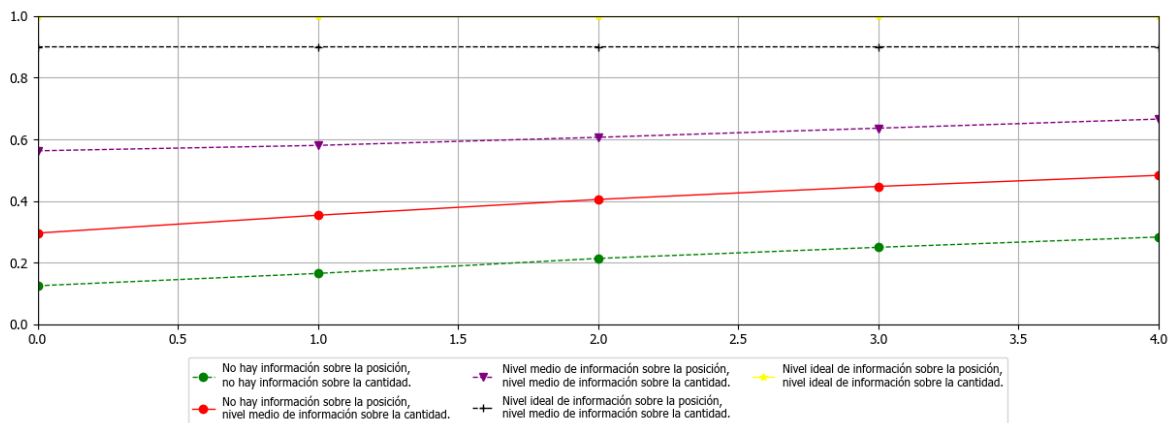
El último paso de la simulación fue la validación que se realizó con la cobertura del suelo del año 2023, que se realizó con imágenes Landsat utilizando la misma metodología que para las otras imágenes, arrojando lo siguiente: porcentaje de corrección del 56.30% que significa que más de la mitad de los píxeles predichos coinciden con el mapa real, un dato aceptable para modelos espaciales.

En cuanto al índice Kappa general mostro un valor de 0.37930, que es un nivel moderado de precisión teniendo en cuenta que a partir de 0.4 se considera buena. Frente, al Kappa (histograma) el valor fue de 0.85846 un valor excelente, lo que significa que el modelo predice bien la cantidad de cambio, aunque no siempre en la posición exacta. Finalmente, el Kappa (posición) dio un valor de 0.44183, bueno, lo que significa que el modelo predice bastante bien dónde ocurren los cambios.

Como se muestra en la Figura 31, el error vario a distintas escalas (ejes X). Cada punto representa el resultado de comparar la predicción con la realidad a diferente nivel de agregación espacial. De acuerdo, con lo siguiente:

- Rojo: nivel medio de información (posición y cantidad)
- Verde: modelo sin información ni posición ni de cantidad (peor caso)
- Morado: Modelo con buena cantidad, pero mala localización
- Negro: Modelo ideal (perfecto) en posición, pero media en cantidad
- Amarillo: modelo completamente ideal (referencia)

Figura 31
Magnitud de error a diferentes espaciales



En general la curva roja está cerca de la morada y lejos de la verde, lo que significa que el modelo mejora significativamente respecto al azar, aunque no es perfecto.

7.3 Escenarios de crecimiento urbano futuro – instrumentos de planificación

Después de tener la modelación se procedió a comparar las coberturas con los instrumentos de planificación que hay en el municipio de Jamundí, encontrando lo siguiente:

7.3.1 Plan de Desarrollo Municipal 2024 – 2027 Jamundí se transforma

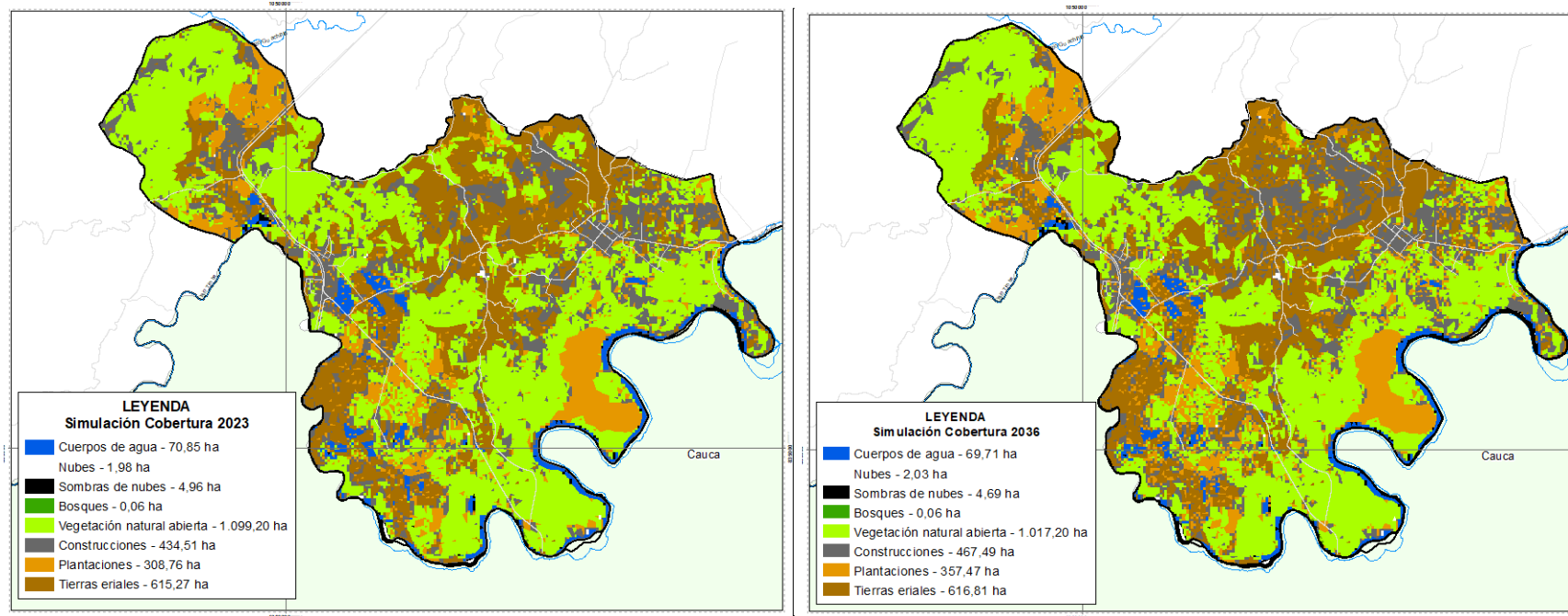
En la revisión del Plan de Desarrollo Municipal se encontraron los siguientes proyectos con menciones espaciales, las cuales se compararon con los mapas de simulación de los años 2023 y 2036, como se muestra en la Figura 32.

Jamundí se transforma con apoyo a la comunidad minera o ancestral: En este programa se integran ofertas de reforestación de la cuenca baja del río de Timba, como afluente de alta importancia y la inclusión de construcción conjunta con la comunidad, de acciones de manejo y control de la extracción minera y manejo de sus impactos (Concejo Municipal de Jamundí, 2024).

Este programa se considera importante, teniendo en cuenta que la cobertura de bosques en la cuenca baja del río Timba, equivale al 0.002% del área total y en la simulación es estable, mientras la cobertura de vegetación natural abierta pierde 82 ha, por lo que se debe poner especial interés en proteger esta cobertura. Y prestar atención a las coberturas que aumentaron sus áreas de construcciones y plantaciones.

Figura 32

Comparación de coberturas simuladas de la cuenca baja del río Timba



Jamundí se transforma protegiendo su biodiversidad y ecosistemas: Este programa contempla la implementación, promoción y gestión de estrategias relacionadas con el Sistema de Áreas Protegidas. Asimismo, incluye la priorización de puntos en ecosistemas acuáticos del municipio para la realización de análisis de calidad del agua, apoyados en información suministrada por la autoridad ambiental. De igual manera, se desarrollarán jornadas de siembra de árboles nativos de fruto comestible en las riberas de las cuencas hídricas y en zonas verdes, junto con actividades orientadas a sensibilizar a la comunidad sobre la importancia de proteger los recursos hídricos, fomentar buenas prácticas ambientales y promover el uso adecuado y eficiente del agua. Además, se incentivará la participación comunitaria en acciones de cuidado ambiental mediante una metodología de aprendizaje práctico basada en el “aprender haciendo” (Concejo Municipal de Jamundí, 2024).

Jamundí se transforma con movilidad inteligente: Adicionalmente, se contempla adelantar gestiones orientadas a la implementación de esquemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) en la zona rural plana del municipio, así como la recuperación de áreas de protección de ríos y quebradas mediante la aplicación del acuerdo municipal de zonas protegidas en el territorio. De igual forma, se trabajará conjuntamente con asociaciones de recuperadores y recicladores en el manejo de residuos sólidos bajo un enfoque productivo y saludable, promoviendo la inclusión social, la dignificación de su labor y el mejoramiento de su calidad de vida. Ante el incremento progresivo de la demanda de agua en el área urbana, se impulsarán acciones dirigidas a la protección de las cuencas abastecedoras y a la gestión de áreas estratégicas reguladoras. Estas acciones estarán encaminadas a fortalecer y ampliar las áreas que integran el SIMAP, así como a gestionar de manera concertada con la comunidad la adquisición de predios de interés ambiental. De manera complementaria, se promoverá la articulación con la zona rural para generar escenarios que favorezcan la consolidación de corredores ecológicos destinados a la conservación de ecosistemas y especies, junto con el fortalecimiento transversal de iniciativas de negocios verdes. (Concejo Municipal de Jamundí, 2024).

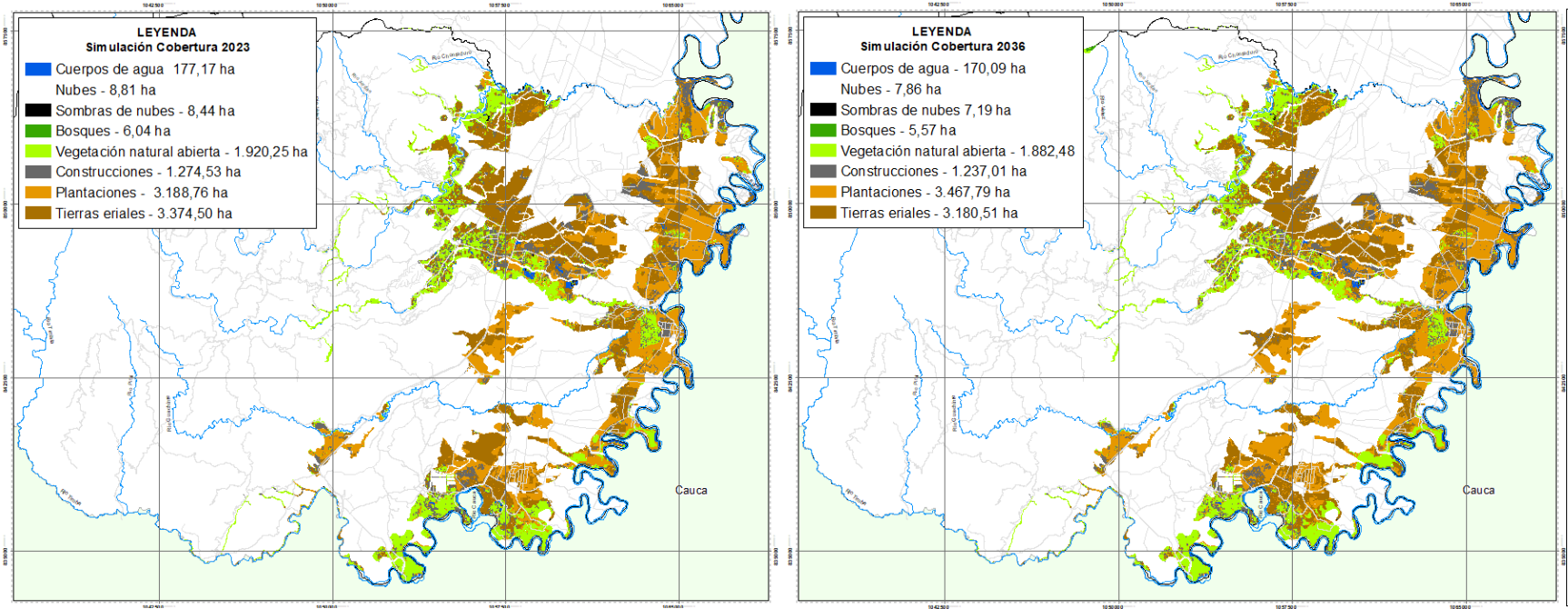
Los dos anteriores programas se compararon con el área del Parque Nacional Natural Farallones de Cali, el cual se analizará con el instrumento de planificación del parque.

Jamundí se transforma con productividad y sostenibilidad agropecuaria: El desarrollo del programa se fundamentará tanto en el reconocimiento y fortalecimiento de la riqueza campesina presente en el territorio como en la implementación de planes y obras orientadas a reducir la carga

contaminante sobre las fuentes hídricas del municipio. Asimismo, se promoverá la articulación de acciones relacionadas con la conservación de cuencas, la reforestación, los sistemas agrosilvopastoriles, el manejo de herramientas del paisaje y la integración de iniciativas encaminadas a consolidar un campo más sostenible. Las estrategias planteadas considerarán la clasificación de los suelos según sus usos potenciales en el territorio, en concordancia con el estudio de suelos elaborado en 2023 por la CVC y el IGAC a escala 1:25.000. En este sentido, los suelos clasificados en categorías 2 y 3 deberán preservarse prioritariamente para actividades agrícolas y pecuarias, evitando procesos de sellamiento o degradación. De igual manera, el uso general de los suelos deberá orientarse a la conservación de sus propiedades físicas y ambientales, previniendo su contaminación, deterioro o alteración significativa (Concejo Municipal de Jamundí, 2024).

Este programa se debe orientar a los suelos clase 2 y 3 que como se muestra en las imágenes no tiene cambios relevantes en la cobertura de bosques, pero si en las otras en las que se deben enfocar los esfuerzos para cumplir con lo establecido en los estudios de suelos (Figura 33).

Figura 33
Comparación de coberturas simuladas en los suelos clase 2 y 3

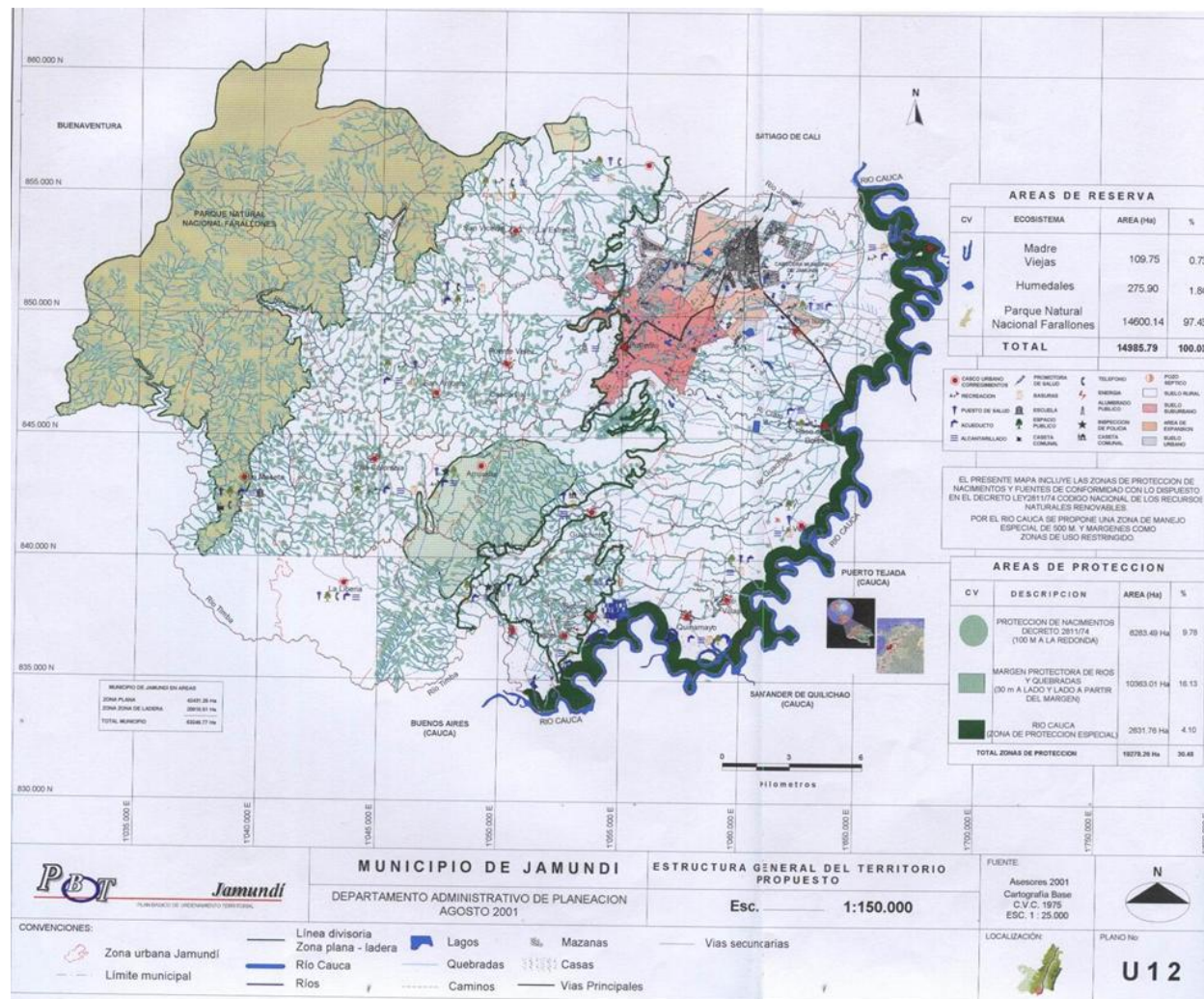


7.3.2 Plan Básico de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Jamundí 2002

Según lo establecido en el artículo 28 de la Ley 388 de 1997, modificado por el artículo 120 del Decreto Ley 2106 de 2019, el contenido estructural de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) cuenta con una vigencia de largo plazo equivalente a tres períodos constitucionales de las administraciones municipales y distritales. Por su parte, los componentes urbano y rural del POT tienen una vigencia de mediano plazo correspondiente a dos períodos constitucionales. Finalmente, los contenidos urbanos y rurales de corto plazo, así como los programas de ejecución del POT, tendrán una duración equivalente a un período constitucional completo de las administraciones municipales y distritales (Concejo Municipal de Jamundí, 2002). En consecuencia, el PBOT del municipio de Jamundí, sobrepasa todas las vigencias establecidas por la Ley, no obstante, en caso de que al finalizar el período de vigencia establecido no se haya adoptado un nuevo Plan de Ordenamiento Territorial, continuará vigente el plan previamente aprobado.

Por lo anterior, se realizó la revisión de la cartografía del PBOT, principalmente la relacionada con la estructura general del territorio propuesto, en la cual se establecen como áreas de reserva las madre viejas (109,75 ha), humedales (275,90 ha) y el Parque Natural Nacional Farallones (14.600,14 ha) y las áreas de protección de nacimientos 100m a la redonda (6.283,49 ha), margen protectora de ríos y quebradas 30 m a lado y lado a partir del margen (10.363,01 ha), río Cauca (2.831,76 ha), así como, el suelo urbano, rural y suburbano y el área de expansión, como se muestra en la Figura 34.

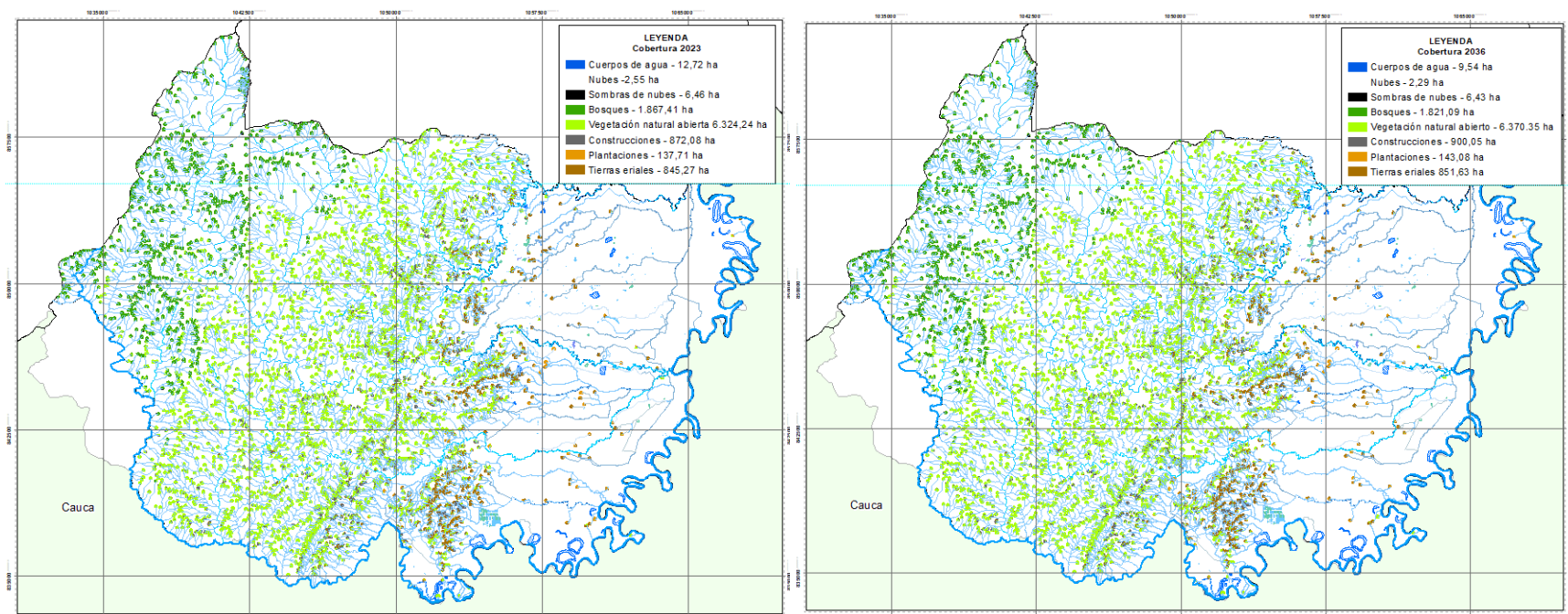
Figura 34
Plano U12 Áreas de protección POT



La comparación se hizo con la modelación de las áreas de protección de los nacimientos y las márgenes protectoras de los ríos y quebradas 30 metros al lado y lado a partir de la margen y el río Cauca (Figura 35). No se analizó el área del PNN Farallones ya que este se realizará en el Plan de Manejo. Frente a las coberturas de los nacimientos, primero se aclara que con la cartografía actual el área de los nacimientos es superior a la establecida en su momento por el POT y que según la simulación se muestra que la cobertura de bosque perdiera área y las demás ganaran sobresaliendo las coberturas de vegetación natural y las construcciones.

Figura 35

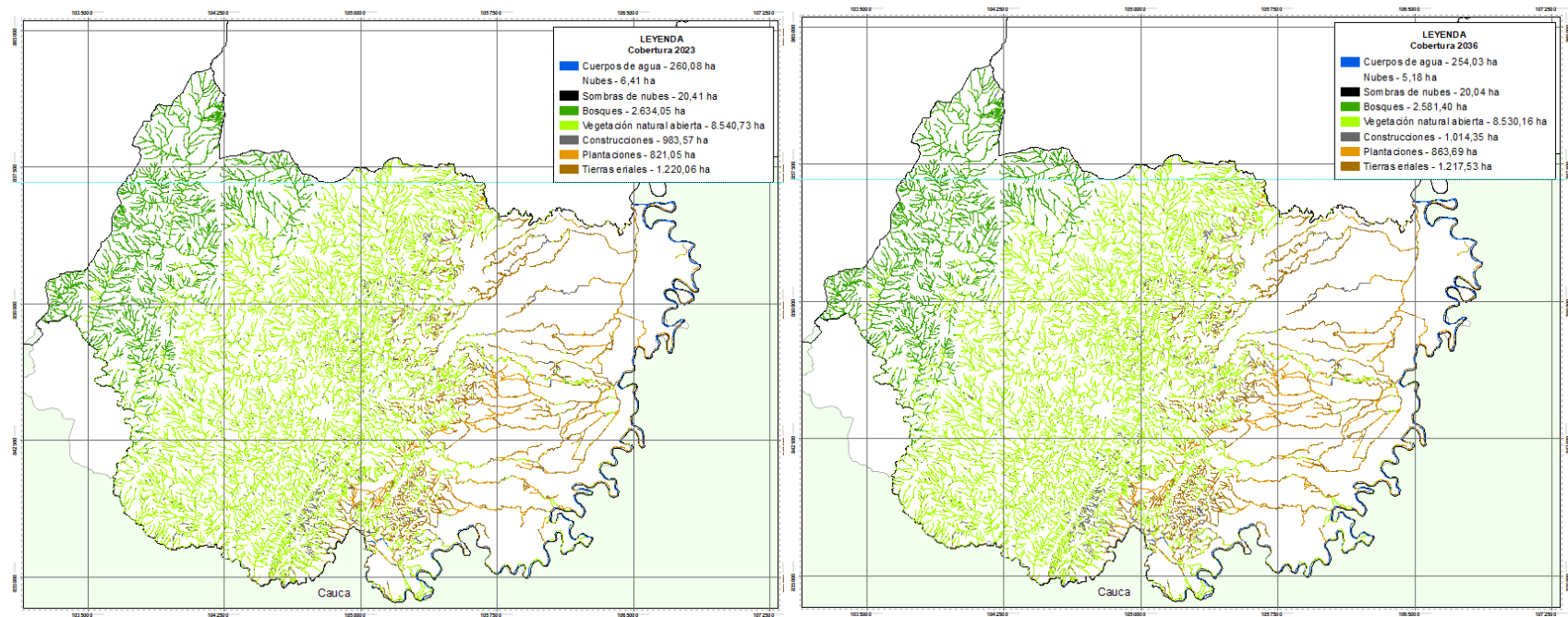
Comparación de coberturas simuladas en las áreas de protección de los nacimientos



En las áreas de protección de los drenajes tampoco se pudo igual las áreas establecidas en el POT y se repite el patrón de pérdida en las coberturas de cuerpos de agua, bosques y vegetación natural abiertos, y la ganancia en las construcciones, plantaciones y tierras eriales (Figura 36).

Figura 36

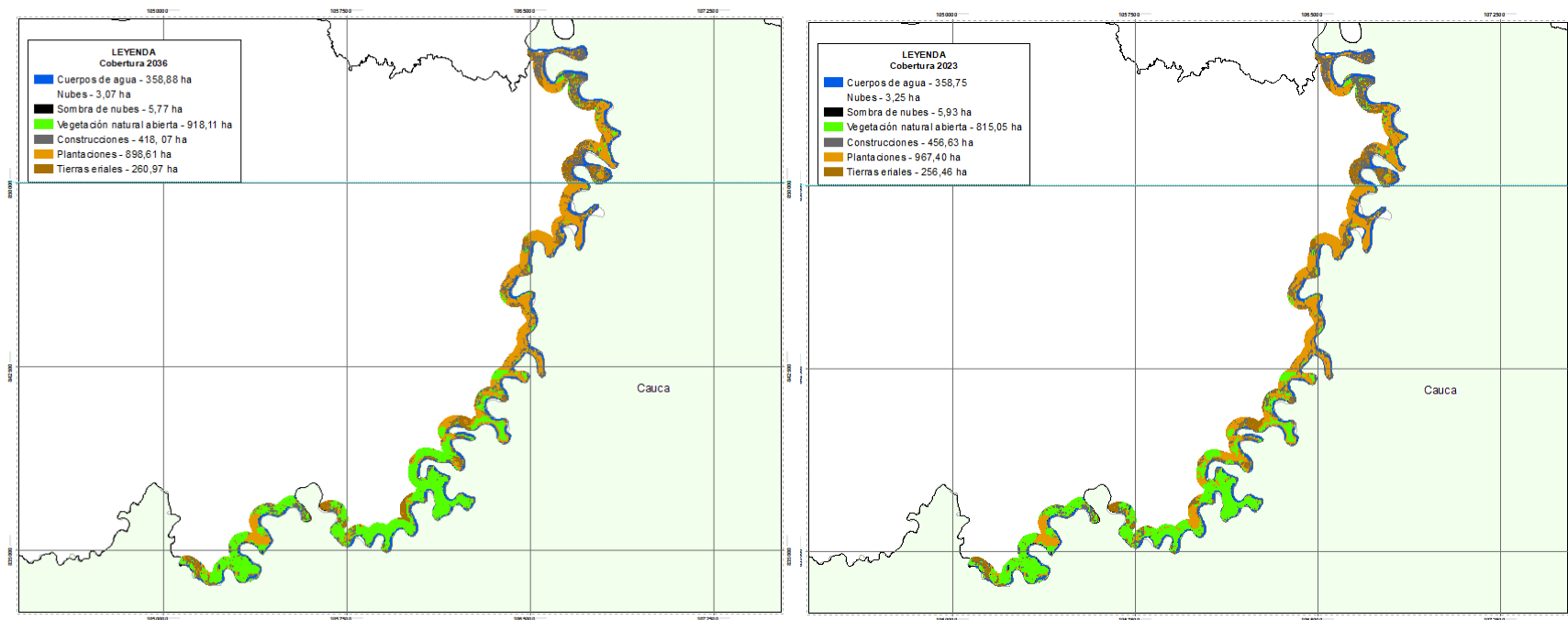
Comparación de coberturas simuladas en las áreas de protección de los drenajes



Finalmente, la zona de protección del río Cauca, demuestra la pérdida de coberturas de vegetación natural abierta y tierras eriales y ganancias en las construcciones y plantaciones.

Figura 37

Comparación de cobertura simuladas en las áreas de protección del río Cauca

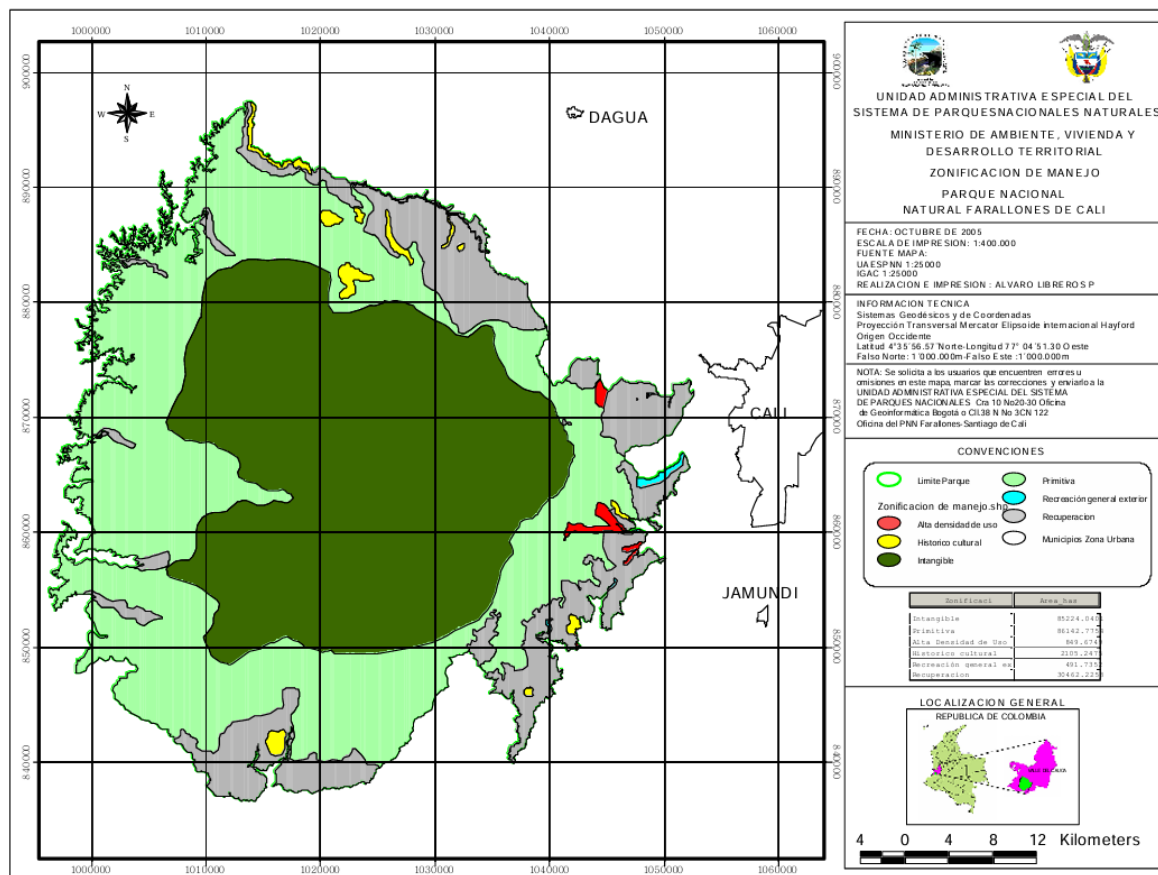


7.3.4 Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Farallones de Cali.

Dentro del territorio del municipio de Jamundí se localizan aproximadamente 12.100 hectáreas del Parque Nacional Natural Farallones de Cali, destinadas a la conservación de especies nativas de flora y fauna. No obstante, en la zona amortiguadora del parque, correspondiente al área colindante con el municipio y definida por una franja paralela ubicada a tres kilómetros por debajo del PNN Farallones, se ha evidenciado un incremento de las afectaciones sobre la base natural derivadas de las actividades humanas (Concejo Municipal de Jamundí, 2002).

El plan define la zonificación de manejo se entiende como el proceso mediante el cual un área protegida se subdivide en diferentes zonas, con el fin de orientar un manejo adecuado que contribuya al cumplimiento de los objetivos de conservación, en las categorías que muestra la Figura 38:

Figura 38
Zonificación del Plan de Manejo PNN



La zona primitiva definida para el parque abarca una extensión de 86.142,78 ha y se distribuye a lo largo de los ríos Jamundí, Claro y Timba, hasta colindar con áreas clasificadas como Zona de Recuperación Natural (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005).

Por su parte, la zona histórico-cultural comprende 2.103,85 ha y está conformada por once áreas asociadas a vestigios arqueológicos. Dentro del municipio de Jamundí se localizan las zonas denominadas El Destierro, con una extensión de 53,55 ha en la vereda El Destierro, y Los Cristales, con 151,41 ha ubicadas en la vereda del mismo nombre (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005).

La zona de recuperación natural cuenta con una extensión de 30.462,23 ha e incluye los nacimientos de los ríos Jordán y Vélez, así como las cabeceras de las quebradas El Silencio, Guerrero, Las Hebras y Ortigal, además de la parte media del río Jamundí. Esta zona limita hacia el sur con áreas de recreación general exterior asociadas a los ríos Jamundí y Claro, así como con las zonas histórico-culturales y de alta densidad de uso, atravesando sectores como las veredas La Cristalina y La Despensa hasta interceptar la quebrada Las Pilas y el nacimiento del río Pital (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005).

En cuanto a la zona de recreación general exterior, el parque dispone de siete áreas que en conjunto suman 485,19 ha. En el municipio de Jamundí se encuentra una de estas zonas, localizada sobre el río Jamundí entre las cotas 2.000 y 2.150 m s. n. m., con una extensión aproximada de 25,8 ha (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005).

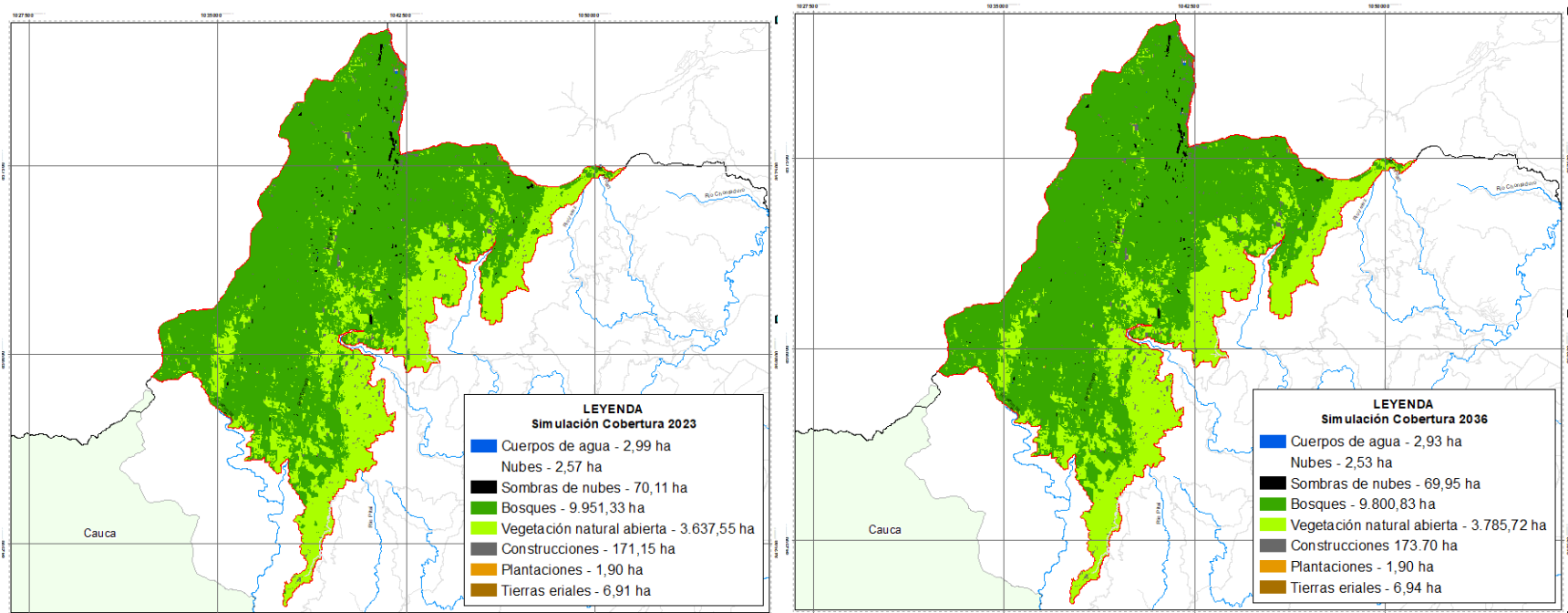
La zona de alta densidad de uso posee una extensión total de 849,67 ha distribuidas en cinco sectores. En Jamundí se encuentra el Centro de Visitantes y Educación Ambiental La Ponderosa, ubicado en el corregimiento de San Antonio, vereda El Cedro, sector Buena Vista. Este espacio cuenta con infraestructura ecoturística y de apoyo, incluyendo cabaña, zona de camping, pileta y mirador, además de acceso cercano a servicios de salud, hospedaje y restaurantes (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005).

Finalmente, la zona amortiguadora corresponde a una franja periférica de tres kilómetros alrededor del Parque Nacional Natural Farallones (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2005).

La cobertura de bosque fue la que más presentó pérdidas con un área de 150,5 ha y la que más presentó ganancias fue la de vegetación natural abierta con 148,17 ha, lo que significa que los

bosques pasarían en su mayoría a vegetación natural abierta que comparada con las construcciones, plantaciones o tierras eriales tiene menor impacto y orientando bien las acciones es más fácil y rápido la reconversión a la cobertura de bosque. Por otra parte, las otras coberturas presentaron pérdidas y ganancias de menos de 3 ha, lo que demuestra que el área protegida no tiene cambios significativos, comparado con el resto del municipio.

Figura 39
Comparación de coberturas simuladas del PNN Farallones



8 Discusión

La simulación de crecimiento es el aporte principal del estudio, adicionalmente, la estabilidad del aprendizaje del modelo y la coherencia de las coberturas respaldan la utilidad de la modelación espacial como herramienta de análisis territorial. No obstante, el nivel moderado de concordancia espacial obtenido en la validación indica que, si bien el modelo captura patrones generales de transformación, existen factores no incorporados que influyen en la dinámica real del territorio, por lo que es necesario analizar otros posibles factores que configuran el espacio urbano del municipio de Jamundí, para esto sería importante poder acceder a personas con más conocimiento sobre las dinámicas de este.

Por otra parte, la comparación entre los escenarios simulados y los instrumentos de planificación vigentes en el municipio demuestran que la regulación normativa y la dinámica territorial es poco efectiva. El incremento de cambios de coberturas naturales a construidas, especialmente, en áreas destinadas a protección ambiental refuerza la necesidad de incorporar herramientas de simulación de escenarios futuros en la toma de decisiones espaciales de los diferentes actores, como la Alcaldía, Parques Nacionales Naturales -PNN y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, que son los encargados de la ejecución y cumplimiento de lo establecido en los instrumentos de planificación, así como de la demás normativa ambiental.

También, es importante reconocer las limitaciones del estudio que condicionan el alcance del estudio, como la resolución espacial de los datos, la disponibilidad de las variables explicativas y el nivel de precisión de la clasificación de las coberturas. Así mismo, es importante revisar la incorporación de variables socioeconómicas, ya que limita la comprensión completa de los factores que impulsan la expansión urbana. Estas limitaciones no invalidan los resultados, pero si orientan las investigaciones futuras hacia enfoque más integrales de análisis territorial.

9 Conclusiones

Con la digitalización de imágenes de Google Earth para los años 2002, 2007, 2012 y 2021 se logró identificar que el perímetro urbano del municipio paso de 497,44 ha en 2002 a 1.748,75 ha en 2021, lo que equivale a más del doble, cabe resaltar que el periodo con aumento más significativo se dio en el tercer periodo 2012-2021, con un incremento de 709,36 ha, lo que equivale a un incremento del 251%, respecto a la superficie identificado en el 2002, lo que demuestra la incorporación de nuevas áreas a los perímetros urbanos, una de las tres dinámicas identificadas por la Universidad Externado de Colombia en 2007, incorporación que como menciona la universidad se hace por vía administrativa, en el municipio de Jamundí a través de 15 modificaciones por acuerdos del Consejo Municipal que permitieron el cambio de clasificación de usos del suelo de 1.626,57 ha, de las cuales 1025.31 ha pasaron de suelo rural a urbano, 106,42 ha de suburbano a urbano y 297.3 ha de expansión a urbano y 197.54 de rural a suelo de expansión.

En cuanto al cambio en la red vial, la digitalización de las imágenes de Google Earth de 2002, 2012 y 2022 permitió calcular el crecimiento de la trama vial en 248,14 km en el periodo estudiado, resaltando que en el periodo comprendido entre el 2012 – 2022 se duplico en comparación con el primer periodo. Por otra parte, se pudo identificar que este crecimiento estuvo relacionado con tres de las cinco tramas viarias identificadas por Aguilera (2008), la primero relacionada con la trama urbana residencial compacta de los tejidos viarios más antiguos del centro poblado antiguo de Jamundí, que se trasforma en una trama más geométrica en los crecimientos recientes; la segunda, la urbana residencial dispersa, en la que se puede ver una estructura más regular y geométrica, relacionada principalmente con las nuevas urbanizaciones formadas por viviendas unifamiliares, en las que es difícil establecer una jerarquía clara, puesto que todas las vías parecen encontrarse al mismo nivel de capacidad y tamaño; y la tercera la metropolitana relacionada principalmente con la construcción de la doble calzada de la vía Panamerica, así como por la generación de importantes nodos de acceso a las nuevas urbanizaciones.

Además de las tramas viales también se identificaron los siguientes patrones de ocupación: el agregado que se da en zonas adyacentes a las ya consolidadas de la cabecera de Jamundí, en la que los nuevos crecimientos se encuentran en cuadrantes totalmente ocupados o parcialmente ocupados, los cuales representan procesos de crecimiento urbano de menor densidad. El crecimiento en urbanización en el que se agrupan los conjuntos residenciales independientes con

respecto a otras zonas urbanas consolidadas, pero generalmente ubicadas en cercanías de vías de transporte metropolitano, este patrón se encontró en los condominios cercanos a los Farallones de Cali. Finalmente, se encontró el patrón nodal, que surgen en torno de comunicaciones viarias, para el caso de Jamundí las de los proyectos de vivienda a los costados de la vía Panamericana.

Frente a las coberturas identificadas a través de clasificación supervisada de imágenes Landsat de los años 2000, 2012 y 2023 se encontró que las coberturas con mayor pérdida fueron las de vegetación natural abierta y plantaciones y la que más ganó fue la construcción con más de tres veces su superficie, localizados principalmente en la zona oriental del municipio, especialmente hacia el Río Claro y el Río Cauca.

En MOLUSCE primero se evaluó la correlación de las variables sobre los factores que influyen en el territorio, a través del método de coeficiente de correlación de Pearson que mostró que el crecimiento urbano está fuertemente influenciado por la cercanía a las vías al presentar una correlación alta. Seguido de la pendiente con una correlación moderada alta y muestra que se da en zonas con menor pendiente, mientras los ríos presentan una influencia menor.

A continuación, se cuantificó el área de los cambios, de acuerdo con la matriz de transición se encontró que las coberturas que más perdieron área fueron vegetación natural abierta y las plantaciones y las que más ganaron fueron bosques tierras eriales y construcciones, siendo esta la que más ganó con 4.867 ha, pasando de 2.082 ha a 6.949 ha.

Respecto al módulo de la modelación del potencial de transición la curva de aprendizaje de la red neuronal comenzó en 0.3, y bajo rápidamente a <0.05 en menos de 20 iteraciones y empezó a estabilizarse sin grandes oscilaciones, lo que demuestra que la red neuronal aprendió rápidamente y con buena estabilidad. Además, la curva de errores es fuertemente baja al inicio y se mantiene casi plana cerca 0.05, lo que significa que no hay sobreentrenamiento ni picos inusuales, lo que es ideal.

El resultado de la simulación de cobertura para los años 2023 y 2036 mostro que las coberturas de los cuerpos de agua, los bosques y las tierras eriales continuaron perdiendo área como en los anteriores periodos analizados, al igual que las coberturas que ganaron áreas fueron la vegetación natural, las construcciones y las plantaciones.

La validación se realizó con una imagen Landsat del año 2023 y dio como resultado un porcentaje de correlación del 56.30% lo que significa que más de la mitad de los píxeles coinciden

con el mapa real, un dato aceptable para los modelos espaciales. Y un índice Kappa general de 0.37 un nivel moderado de precisión que a partir de 0.4 que se considera que es buena.

De acuerdo con lo anterior, como menciono Brugués en 2012, los modelos de simulación urbanos son capaces de hacer una contribución a los problemas ambientales, por lo que la simulación del escenario al 2036 presentada en este trabajo, debería ser una instrumento de apoyo a las decisiones espaciales, en el sentido de que contar la información permitirá que los actores que toman decisiones tengan una mirada prospectiva sobre la tendencia de crecimiento urbano si no se realiza ninguna intervención y de esta forma incluir en los instrumentos de planificación las medidas necesarias para impulsar o desalentar la expansión urbana en áreas que presenten características o usos de suelos favorables para el desarrollo del crecimiento urbano.

En cuanto a la comparación de la simulación de las coberturas para el año 2036 con los instrumentos de planificación mostro que no están siendo efectivos y que se debe prestar mayor cuidado a las zonas establecidas en los instrumentos, sobre todo en las de protección ambiental.

Finalmente, es importante revisar a la luz de la actualización del POT del municipio de Jamundí la incorporación de nuevos criterios limitantes de acuerdo con el diagnostico o incluso plantear escenarios alternativos en función de las propuestas de intervención planteadas en los planes de desarrollos o los demás instrumentos de planificación y evaluar la mejor alternativa.

10 Recomendaciones

Los resultados evidencian la complejidad del crecimiento urbano y la necesidad de incorporar la modelación prospectiva en la planificación territorial, por lo que sería importante desarrollar investigaciones que incorporen escenarios simulados de crecimiento urbano en las diferentes fases de los instrumentos de planificación, desde el diagnóstico hasta la formulación y el seguimiento de los planes y programas a corto, mediano y largo plazo, lo que permitiría evaluar la eficacia de estos en el control de la expansión urbana.

Por otra parte, teniendo en cuenta que el modelo aplicado solo utilizó variables biofísicas como las pendientes y los ríos y de accesibilidad como las vías, las próximas investigaciones deberían incorporar variables socioeconómicas, que permitiría comprender el papel de los procesos económicos en la expansión urbana.

Aunque la validación del modelo mostró niveles aceptables, se recomiendan incorporar datos con mayor resolución espacial y temporal y evaluar métodos alternativos de validación. Finalmente, se recomienda desarrollar investigaciones interdisciplinarias que articulen modelación territorial, evaluación ambiental y planificación urbana que permitan construir políticas más eficientes.

Referencias

- Aguilera, A., Carrillo, C., & Grageda, G. (2001). Autómatas celulares para modelar usos de suelo urbano. Una revisión del modelo de White. *Vetas*, 9, 85–103.
- Aguilera, F. (2008). *Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la aglomeración urbana de Granada*. Universidad de Granada.
- Aguirre, A. J. (2022). *Estudio multitemporal del crecimiento urbano de uso y cobertura en la ciudad de Neiva-Huila, mediante imágenes satelitales de Landsat 5, 7 y Sentinel 1*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Alarcón, D. A. (2015). *La conurbación como escenario de ordenamiento en la región metropolitana de Santiago de Cali*. Universidad Nacional de Colombia.
- Amuzurrutia, D., Aguirre, C., & Sánchez, G. (2015). ¿Hacia dónde crecerá la ciudad de San Luis Potosí (México) después de 2009? *EURE*, 41, 113–137.
- Angarita, T. (2015). *Procesos de expansión urbana en la ciudad colombiana. Efectos de la transformación del municipio de Chía (2000-2012)*. Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.
- Arroyave, J. C. (2021). *De la estructura espacial dispersa a la ciudad región: Lineamientos para la Ocupación Metropolitana y supralocal efecto de la metropolización. Caso Cali - Jamundí* [Universidad de La Salle]. <https://ciencia.lasalle.edu.co/urbanismo>
<https://ciencia.lasalle.edu.co/urbanismo/42>
- Arteaga, G., Escobar, D. A., & Galindo, J. A. (2020). Transformaciones urbanas. Crecimiento poblacional y migración en Cali (Colombia). *Revista Espacios*, 41, 212–223. <https://www.revistaespacios.com>
- Asia Air Survey, & NextGIS. (2014). *Análisis de cambios en el paisaje con MOLUSCE: métodos y algoritmos*.
- Benenson, Itzhak., & Torrens, P. M. . (2004). *Geosimulation : automata-based modelling of urban phenomena*. John Wiley & Sons.
- Betancourt, D. (2015). *Cambios en la cobertura del suelo en el corredor Metropolitano Cali – Jamundí (Valle del Cauca, Colombia) entre 1984 y 2013*. University of Salzburg.
- Brugués, A., Fuentes, C., & Cervera, L. (2012). *La Simulación del Crecimiento Urbano de la Ciudad de Chihuahua Mediante la Aplicación de Autómatas Celulares*.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (2nd ed.).

- Concejo Municipal de Jamundí. (2002). *Acuerdo No. 002 de 2002. Por el cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial para el municipio de Jamundí.*
- Concejo Municipal de Jamundí. (2024). *Plan de Desarrollo 2024 - 2027 "Jamundí se transforma."*
- Cubillos, J. S., & Ramos, C. D. (2025). *Modelación y simulación del crecimiento urbano de Santiago de Cali mediante el modelos SLEUTH: Análisis cuantitativo para soporte a la planificación territorial.* Universidad del Valle.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021). *Patrones y tendencias de la transición urbana en Colombia.*
- Echeverría, C. J., Carrillo, L. E., & Vlassona, L. (2022). Simulación del crecimiento urbano en la ciudad Buena Fe, Ecuador aplicando el Autómata Celular SLEUTH. *Social Science Journal*, 1–23.
- Falla, Marcela., Cruz, E., Galeano, J., Martínez, P. M., Torres, P., & Velosa, B. (2009). *Un modelo físico de ordenamiento territorial para el Valle del Cauca a partir de su sistema de ciudades* (Universidad de San Buenaventura Cali & Gobernación del Valle del Cauca, Eds.). Gobernación del Valle del Cauca : Editorial Bonaventuriana.
- Galarza, J. N., Rodríguez, J. F., Montaña, V. M., & Salazar, M. M. (2017). *Expansión urbana ordenada Kit de Ordenamiento Territorial.*
- González, L. F. (2021). *Monitoreo del crecimiento urbano mediante imágenes satelitales Landsat, caso de estudio Rionegro Antioquia.* Universidad EIA.
- Gutiérrez, J., Gómez, M., & Bosque, J. (2010). Simulación de crecimiento urbano mediante evaluación multicriterio y TIG en el Gran San Miguel de Tucuman (Argentina). In J. Ojeda, M. Pita, & I. Vallejo (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (1st ed., pp. 873–888).
- Gutiérrez, R. I. (2017). *Modelación espacio temporal del crecimiento urbano y cambio de uso de suelo a través de Autómatas Celulares.* Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2024). *Procedimiento Elaboración del Mapa de Cobertura de la Tierra.*
- Jiménez, E., Garrocho, C., & Chávez, T. (2021). Autómatas Celulares en cascada para modelar la expansión urbana con áreas restringidas. *Estudios Demograficos y Urbanos*, 36(3), 779–823. <https://doi.org/10.24201/edu.v36i3.1997>

- Linares, S., & Picone, N. (2018). Modelización de la expansión urbana y su impacto en el paisaje natural mediante Sistemas de Información Geográfica y Autómatas Celulares. Caso de estudio: Tandil, Argentina. *Revista Estudios Ambientales*, 6, 5–25.
- Londoño, N. N. (2012). *Transformaciones territoriales en el entorno metropolitano de Cali 1980 - 2010*. Universidad Nacional de Colombia.
- López, D. (2021). *Expansión urbana en el municipio de Jamundí, camino al modelo de ciudad difusa y fragmentada*. Universidad del Valle.
- López, J., & Muñoz, L. (2025). *Modelo de análisis de expansión urbana con software libre: caso de estudio con la extensión MOLUSCE de QGIS e Imágenes satelitales de la región de los cerros orientales de la Localidad de Usaquén*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Márquez, B. Y. (2008). *Análisis y simulación del crecimiento urbano utilizando sistemas de información geográficos: ciudad Juárez, Chihuahua*. El Colegio de la Frontera Norte.
- NextGIS. (2026, March 21). *Molusce 5.0*.
- Niño, Y. M. (2020). *Análisis multitemporal mediante imágenes de sensores remotos para la determinación de los cambios de usos de suelo en el municipio de San Francisco de Sales, Cundinamarca (Colombia) entre los años 90's y 2018*. Universidad Nacional de La Plata.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Ortiz, J. M. (2024). *Análisis de patrones de crecimiento urbano futuro mediante uso de modelos predictivos SIG. El caso de cuenca-Ecuador*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2005). *Plan de Manejo Parque Nacional Natural Farallones de Cali*.
- Patiño, Z. L., & Martínez, P. M. (2018). *Área metropolitana del sur del Valle y Norte del Cauca – AMVACA– definición, caracterización y propuesta de conformación* (Universidad del Valle, Ed.).
- Peraza, Á. (2020). *Diseño de un modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano integrando autómatas celulares y agentes cognitivos*. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Polo, I. M. (2013). *Proyección del crecimiento urbano del área metropolitana de Barranquilla a 20 años, mediante el uso de los SIG*. Universidad del Norte.

- Principi, N. (2022). Modelado de expansión urbana mediante autómatas celulares y redes neuronales artificiales. *Revista Universitaria de Geografía*, 31(31), 95–113. <https://doi.org/10.52292/j.rug.2022.31.1.0036>
- Ramírez, Y. A., Loaiza, W., Buitrago, O., & Martínez, P. M. (2008). Visión regional metropolitana en los planes de ordenamiento territorial de los municipios del área de influencia inmediata de Cali. *Entorno Geográfico*, 6, 149–175.
- Rodríguez, M. J. (2002). *Modelos socio-demograficos. Atlas social de la ciudad de Alicante*. Universidad de Alicante.
- Saavedra, V., Carriazo, F., Junca, J. F., Puyana, R., Reyes, C. F., & Salazar, M. M. (2022). *Fedesarrollo: Diagnóstico y recomendaciones sobre el ordenamiento territorial en Colombia* (Primera Edición).
- Sevillano, M. E., & Bravo, L. C. (2018). Análisis multitemporal de la expansión física en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. *DECUMANUS*, 3, 28–43. <https://orcid.org/0000-0003-4640-9314>
- Suárez, O. J. (2020). *Análisis multitemporal de la expansión urbana de acuerdo con el aumento de la densidad poblacional del municipio de Chía para los años 1991, 2003 y 2018*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, & Cámara Colombiana de la Construcción. (2021). *Documento Técnico Municipal, Jamundí, Valle del Cauca*.
- Tovar, L. C. (2013). *Simulación del desarrollo urbano de la ciudad de Cartagena, como estrategia para el apoyo de políticas públicas*. Universidad de Cartagena.
- Tróchez, O. A. (2019). *Evaluación de la amenaza de expansión urbana sobre el corredor Cali - Jamundí considerando como una zona de recarga del acuífero del Valle del Cauca*. Universidad del Valle.
- Universidad Externado de Colombia. (2007). *Ciudad, espacio y población: el proceso de urbanización en Colombia*. Fondo de Población de las Naciones Unidas.
- Valdivia, M., & Linares, N. E. (2013). Un modelo de simulación computacional integrado a SIG para explorar la dinámica de crecimiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1998-2008). *Estudios Demográficos y Urbanos*, 28(84), 593–644.