

Monitoreo de la Expansión Urbana en Valledupar mediante Imágenes Sentinel-2 y Clasificación por Lógica Difusa

Monitoring Urban Expansion in Valledupar with Sentinel-2 Imagery and Fuzzy Logic Classification

Juan G. Popayán-Hernández¹  Heider F. Losada-Losada²  Deliannys M. Mendoza-Barradas³ 

¹ Doctor en Ciencias Ambientales, Dirección Académica, Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz, La Paz, Colombia.

² Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila, Colombia.

³ Ingeniera ambiental (e), Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD, Valledupar, Colombia.

Resumen

Introducción: La ciudad de Valledupar, Colombia, experimentó una transformación urbana acelerada entre 1985 y 2025, con una expansión del 124% que generó presiones socioambientales significativas. Esta investigación desarrolló y aplicó un modelo integral para analizar esta dinámica y sus impulsores.

Materiales y Métodos: Se implementó una metodología en tres fases: (I) análisis multitemporal con imágenes Landsat/Sentinel-2 y SIG para cuantificar la expansión física (1985-2025); (II) desarrollo de un modelo de lógica difusa tipo Mamdani con los softwares FisPro/GeoFIS para clasificar la transición urbano-rural; y (III) validación estadística y análisis de correlación con variables socioeconómicas.

Resultados: La mancha urbana creció de 1,850 a 4,150 ha, consumiendo 1,150 ha de suelo agrícola (2000-2020). Una parte sustancial de la expansión (45%) ocurrió de manera no planificada y discontinua. El modelo de lógica difusa logró una alta precisión ($Kappa=0,81$) y reveló una correlación significativa ($r=0,55$, $p<0,01$) entre la expansión periférica y la informalidad laboral.

Discusión: Los resultados evidencian un patrón claro de crecimiento urbano no estructurado. El modelo de lógica difusa demostró ser una herramienta superior para capturar la complejidad de la transición urbano-rural y sus vínculos con la precariedad socioeconómica.

Conclusiones: La expansión de Valledupar ha sido insostenible y fragmentada. Se recomienda la integración de modelos de lógica difusa en los marcos de planificación y monitoreo urbano para una gestión del suelo más efectiva y sostenible.

Palabras clave: Expansión Urbana, Lógica Difusa, Percepción Remota, Valledupar, Planificación Territorial.

Abstract

Introduction: The city of Valledupar, Colombia, underwent accelerated urban transformation between 1985 and 2025, with 124% expansion generating significant socio-environmental pressures. This research developed and applied a comprehensive model to analyze this dynamic and its drivers.

Materials and Methods: A three-phase methodology was implemented: (I) multitemporal analysis with Landsat/Sentinel-2 imagery and GIS to quantify physical expansion (1985-2025); (II) development of a Mamdani-type fuzzy logic model using FisPro/GeoFIS software to classify the urban-rural transition; and (III) statistical validation and correlation analysis with socioeconomic variables.

Results: The urban footprint grew from 1,850 to 4,150 ha, consuming 1,150 ha of agricultural soil (2000-2020). A substantial portion of the expansion (45%) occurred in an unplanned, discontinuous manner. The fuzzy logic model achieved high accuracy ($Kappa=0.81$) and revealed a significant correlation ($r=0.55$, $p<0.01$) between peripheral expansion and labor informality.

Discussion: The results evidence a clear pattern of unstructured urban growth. The fuzzy logic model proved to be a superior tool for capturing the complexity of the urban-rural transition and its links to socioeconomic precariousness.

Conclusions: Valledupar's expansion has been unsustainable and fragmented. Integrating fuzzy logic models into urban planning and monitoring frameworks is recommended for more effective and sustainable land management.

Keywords: TUrban Expansion, Fuzzy Logic, Remote Sensing, Valledupar, Land Use Planning.

¿Cómo citar?

Popayán-Hernández JG, Losada-Losada HF, Mendoza-Barradas DM. Monitoreo de la Expansión Urbana en Valledupar mediante Imágenes Sentinel-2 y Clasificación por Lógica Difusa. Ingeniería y Competitividad, 2025, 28(1)e-21015382

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i1.15382>

Recibido: 25/10/25

Revisado: 24/11/25

Aceptado: 21/01/26

Online: 12/03/26

Correspondencia

jgpopayanh@unal.edu.co



¿Por qué se realizó?

El estudio tuvo como objetivo analizar los factores y patrones detrás de la rápida e insostenible expansión urbana de Valledupar a lo largo de cuatro décadas.

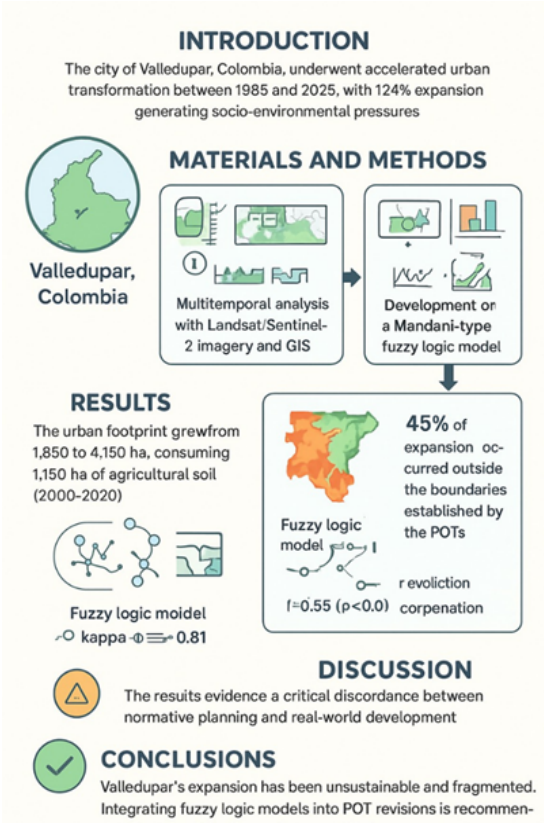
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados más relevantes mostraron un patrón dominante de crecimiento no planificado y fragmentado que consumió una cantidad significativa de tierra agrícola y se correlacionó con la precariedad socioeconómica.

¿Qué aportan?

La principal contribución es un modelo de lógica difusa validado que captura eficazmente el continuo urbano-rural y sus factores socioeconómicos, proporcionando una herramienta superior para la planificación urbana sostenible.

Graphical Abstract



Introducción

La acelerada urbanización de Colombia, con más del 77% de la población en ciudades, se manifiesta mediante una expansión física extensa y desigualdades socioespaciales (1). En la región del Caribe, los índices de calidad de vida promedian 59,08, por debajo del 62,88 nacional, una disparidad agravada por un historial de conflictos armados que causó 9,2 millones de desplazamientos y tensionó los mercados terrestres. Valledupar, la capital de César, ejemplifica esta dinámica (2). Se proyecta que su población alcance los 591.835 habitantes para 2025, lo que representa más del 40% de la población del departamento. El análisis de imágenes satelitales revela un patrón de crecimiento radial-discontinuo, con la huella urbana expandiéndose de 2.149 hectáreas en 1989 a 3.625 hectáreas en 2011 a una tasa anual del 2,8%, principalmente sobre tierras agrícolas viables y bosques secos tropicales en el sur y sureste, intensificando los conflictos socioambientales. Al mismo tiempo, la ciudad se enfrenta a desafíos económicos estructurales, incluyendo un 9,6% de desempleo y una tasa de informalidad laboral que afecta a unos 120.000 trabajadores (3,4)

La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son esenciales para analizar estas complejas transformaciones urbanas. El análisis multitemporal de imágenes satelitales (por ejemplo, Landsat, Sentinel-2) permite cuantificar con precisión la dinámica de expansión, la clasificación del uso del suelo y el monitoreo del cambio de vegetación (5). Sin embargo, los modelos tradicionales de clasificación tienen dificultades con la naturaleza gradual y no binaria de las transiciones urbano-rural. La lógica difusa aborda esta limitación cuantificando la pertenencia parcial y la incertidumbre, permitiendo modelar transiciones progresivas y capturar áreas marginales y procesos de informalidad que desafían una categorización nítida (6). La sinergia entre la teledetección, los SIG y la lógica difusa proporciona un marco sólido y transformador para el análisis urbano, yendo más allá de la mera medición para modelar causalidades complejas y apoyar una planificación sostenible del uso del suelo (7).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo de análisis integral de la expansión urbana de Valledupar entre 1985 y 2025, integrando teledetección, lógica difusa y fuentes de datos complementarias para evaluar su dinámica, patrones y sostenibilidad. Para lograrlo, se propusieron tres objetivos específicos: (I) Analizar series temporales de imágenes satelitales (Landsat, Sentinel-2) y datos cartográficos disponibles para cuantificar la expansión física y los cambios en el uso del suelo/cobertura del suelo, estableciendo una línea base espacial; (II) Diseñar un modelo de lógica difusa que clasifique el territorio en función de los grados de pertenencia a categorías de transición urbano-rural, permitiendo una caracterización continua de la expansión y capturando áreas periféricas y procesos de informalidad; y (III) Realizar un análisis estadístico del modelo de lógica difusa, incluyendo la validación de su precisión frente a datos de referencia y la cuantificación de la correlación entre los grados de pertenencia a la clase "urbana" y variables socioeconómicas clave, como el crecimiento poblacional y la informalidad laboral.

Material y métodos

La siguiente sección delimita el contexto geográfico del área de estudio y describe el marco metodológico implementado en esta investigación. Ofrece una descripción completa de la ciudad de Valledupar, detallando sus principales características biofísicas y sociodemográficas para establecer el contexto empírico del análisis. Posteriormente, presenta el enfoque multitemporal integrado empleado, que combina sinérgicamente teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de análisis espacial para cuantificar y modelar la dinámica de la expansión urbana (8).

Fase I: Análisis Multitemporal de la Expansión Física y Línea Base de Planificación

Esta fase estableció el análisis empírico fundamental cuantificando cuatro décadas de expansión urbana en Valledupar y construyendo una base de planificación regulatoria. La metodología integraba una robusta cadena de teledetección con una evaluación estadística detallada de los instrumentos de planificación del uso del suelo (9). Se construyó un conjunto de datos multitemporal utilizando productos de reflectancia superficial de la constelación Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS), específicamente HLSS30 y HLSL30, para los años de referencia 1990, 2000, 2010 y 2024 (10). La selección de datos HLS garantizaba la consistencia temporal y la interoperabilidad entre los sensores, proporcionando una resolución espacial estandarizada de 30 metros y una alta frecuencia de revisita, crítica para minimizar el ruido fenológico y atmosférico en la detección de cambios. Todas las escenas fueron sometidas a un preprocesamiento sistemático, incluyendo corrección atmosférica usando los algoritmos LEDAPS/LaSRC y enmascaramiento de nubes/sombras con los procesadores Fmask y Sen2Cor, para derivar valores de reflectancia espectral comparables listos para análisis a lo largo de toda la serie temporal (11).

El núcleo de la clasificación de uso del suelo/cobertura del suelo (LULC) era un algoritmo supervisado de Bosque Aleatorio (RF), implementado dentro de la plataforma Google Earth Engine (GEE) para la escalabilidad (12). El modelo RF estaba configurado con 500 árboles de decisión (árbol $n=500$), un parámetro optimizado para garantizar la estabilidad del modelo y minimizar errores fuera de la bolsa sin incurrir en ineficiencia computacional. El esquema de clasificación definió cinco clases objetivo relevantes para la dinámica urbana: Tejido Urbano Consolidado, Tierra Urbana No Consolidada, Suelo Agrícola, Vegetación Natural y Cuerpos de Agua. Para cada época, se empleó un diseño de muestreo aleatorio estratificado para recopilar un conjunto de datos de referencia de 2.500 píxeles (500 por clase), derivado de una combinación de imágenes históricas de alta resolución disponibles en GEE, ortofotos aéreas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y campañas de verificación de campo dirigidas realizadas en 2024. El modelo se entrenó con el 70% de estos datos de referencia, y el 30% restante se retuvo para validación.

Las variables predictoras del clasificador RF se extendieron más allá de las bandas espectrales estándar para incluir índices espectrales y métricas temporales críticas para distinguir superficies urbanas de superficies no urbanas y vegetadas. El conjunto de características de cada imagen compuesta compatible con Landsat incluía las seis bandas ópticas originales (Azul, Verde, Rojo, NIR,

SWIR1, SWIR2), junto con tres índices clave: el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) para vigor de vegetación, el Índice de Diferencias Normalizadas (NDBI) para la detección de áreas urbanas, y el Índice de Diferencia Normalizada de Agua Modificada (MNDWI) para la delimitación de cuerpos de agua. El criterio de división en cada nodo era el índice de impurezas de Gini. El rendimiento de cada clasificador anual se evaluó rigurosamente utilizando el subconjunto independiente de validación, generando una matriz de confusión a partir de la cual se calcularon la precisión global, la precisión del productor, la precisión del usuario y el coeficiente de Kappa. Todas las clasificaciones anuales alcanzaron el umbral de precisión predefinido de Kappa > 0,85, con el clasificador de 2024 alcanzando un Kappa de 0,89 y una precisión global del 92,3%.

Simultáneamente, el marco normativo de planificación se digitalizó y espacializó. Los perímetros legales, zonas de expansión y áreas de protección de los Planes de Gestión de Tierras (POT) de Valledupar de 1999 y 2015 fueron georreferenciados y vectorizados para crear una geografía regulatoria comparable. El análisis final del cambio se realizó mediante comparación post-clasificación de los cuatro mapas LULC de alta precisión. Este proceso generó tasas anuales de expansión y una matriz de transición compuesta que detalla la conversión total de superficie entre todas las promociones durante todo el periodo de estudio 1990-2024. Además, se calcularon métricas del paisaje, incluyendo la Densidad de Parches (PD) y el Índice de Forma del Paisaje (LSI), para la clase urbana de cada época y cuantificar la evolución morfológica de una huella urbana compacta a una fragmentada. Esta salida cuantitativa integrada de la expansión observada frente a las directivas planificadas formó la base espacial esencial para la fase posterior de modelado de lógica difusa (véase Tabla 1).

Tabla 1. Especificación y métricas de rendimiento del clasificador Random Forest

Parámetro / Métrica	Especificaciones
Algoritmo	Random Forest (Clasificación supervisada)
Andén	Google Earth Engine (GEE)
Número de árboles (ntree)	500
Criterio de división	Impureza de Gini
Variables predictoras	Bandas espectrales (Azul, Verde, Rojo, NIR, SWIR1, SWIR2), NDVI, NDBI, MNDWI
Tamaño de la muestra de entrenamiento	1.750 píxeles (70% de 2.500 píxeles de referencia totales por época)
Tamaño de la muestra de validación	750 píxeles (30% de un total de 2.500 píxeles de referencia por época)
Precisión del blanco (Kappa)	> 0,85
Precisión alcanzada (2024)	Precisión general: 92,3%; Coeficiente Kappa: 0,89

Fuente: autores, 2025

El análisis de cambios se realizó mediante comparaciones post-clasificación, calculando matrices de transición y métricas de paisaje como la tasa anual de expansión y la densidad de parches para los periodos 1990-2000, 2000-2010, 2010-2020 y 2020-2024.

Fase II: Desarrollo de un modelo de lógica difusa para la clasificación de transición urbano-rural

Área de estudio

Valledupar, la capital del departamento de César, se encuentra en la región caribeña del norte de Colombia, en una llanura aluvial dentro del valle del río César, estratégicamente situada entre la Sierra Nevada de Santa Marta al oeste y la Serranía del Perijá al este (13). Esta cuenca intermontañosa, con una altitud media de aproximadamente 168 metros, presenta un terreno suavemente inclinado que desciende hacia el sureste, facilitando la expansión urbana principalmente en direcciones sur y sureste (14). La ciudad experimenta un clima de sabana tropical (Aw según la clasificación de Köppen) con una temperatura media anual alta de 28-29,8°C, un marcado patrón bimodal de precipitación con una media anual de 1.295 mm, y estaciones secas intensas que históricamente la sitúan como una de las ciudades más calurosas de Colombia. Su hidrografía está definida por el río César y sus afluentes, incluido el río Guatapurí, que limita con la ciudad. El entorno biofísico de la región se caracteriza por bosques caducifolios secos y matorrales espinosos, con una presión significativa derivada de la conversión de suelos agrícolas (clases III-IV) y vegetación de bosque seco tropical en usos urbanos (15). Demográficamente, Valledupar ha experimentado un rápido crecimiento, con una proyección de población de 575.225 habitantes para 2025, consolidando su papel como centro agrícola, ganadero y comercial primario del departamento, aunque con altos niveles de informalidad laboral del 59,5% (16). Esta combinación de topografía plana, factores climáticos y presiones socioeconómicas ha dado forma a un patrón radial-discontinuo de expansión urbana, transformando la superficie de la ciudad de 2.149 hectáreas en 1989 a 3.625 hectáreas en 2011 y ejerciendo una presión significativa sobre ecosistemas estratégicos y recursos hidrológicos (17). El contexto geográfico del área de estudio se ilustra en la Figura 1.

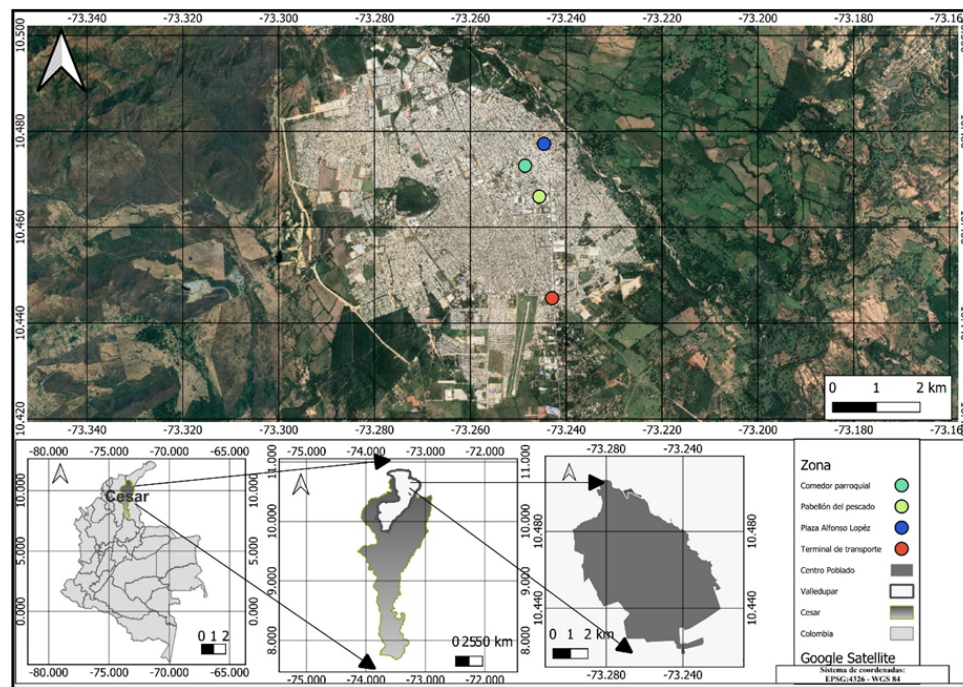


Figura 1. Ubicación del Área Metropolitana de Valledupar. Fuente: autores, 2025

Modelo de lógica difusa para caracterizar la transición urbano-rural

La segunda fase avanzó el análisis construyendo un Sistema de Inferencia Difusa (FIS) tipo Mamdani para superar las limitaciones categóricas de la clasificación de la Fase I y modelar el continuo urbano-rural. El modelo se implementó utilizando FisPro (Fuzzy Inference System Design and Optimization), un software de código abierto diseñado para crear sistemas difusos interpretables, y su extensión espacial, GeoFIS (Spatial Data Processing for Decision Making), que permite la aplicación geográfica de la lógica difusa. La arquitectura del sistema fue diseñada con tres variables lingüísticas de entrada, rigurosamente derivadas de las salidas de teledetección de la Fase I para capturar las dimensiones centrales de la dinámica de expansión urbana: 'Distancia al Tejido Urbano Consolidado (m)', cuantificando la proximidad espacial; 'Densidad de Zonas Urbanas (%)', que mide la fragmentación del paisaje; y 'Tasa de Cambio en el Uso del Suelo (%/año)', que capturan la intensidad de conversión temporal. La variable de salida se definía como el 'Grado de Membresía a la Clase Urbana' (DoM-Urban), un índice continuo que iba de 0 (completamente rural) a 1 (completamente urbano).

La parametrización de las funciones de pertenencia y la derivación de la base de reglas difusas se basaron en un enfoque híbrido de ingeniería del conocimiento para asegurar tanto la validez empírica como la interpretabilidad experta. Las funciones de pertenencia trapezoidal y triangular para las variables de entrada no se definieron arbitrariamente, sino que se calibraron usando percentiles estadísticos (25°, 50°, 75°) de la distribución histórica de datos de la Fase I. Por ejemplo, el conjunto 'Cerca' para la distancia se parametrizó en función del radio típico de influencia urbana de frentes de expansión históricas (18). El núcleo de la inteligencia del sistema, la base de reglas difusas, fue generado y optimizado usando un algoritmo de aprendizaje de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) dentro de FisPro (19). El método OLS opera construyendo una base

de reglas inicial y completa a partir de datos numéricos—en este caso, un conjunto de datos de entrenamiento de 300 píxeles representativos donde se conocen los valores de entrada (distancia, densidad, tasa de cambio) y un valor deseado de salida DoM-Urban. El algoritmo realiza entonces una selección de pase hacia adelante, eligiendo iterativamente las reglas difusas más significativas que minimizan el error de salida, creando así un conjunto de reglas parsimonioso y robusto (19). Este enfoque basado en datos dio lugar a un sistema final de 22 reglas difusas IF-THEN, que encapsulan relaciones complejas como “SI la distancia es media Y la densidad de parches es alta Y la tasa de cambio es positiva, ENTONCES DoM-Urban es alta.”

La robustez y el rendimiento del modelo fueron evaluados rigurosamente mediante análisis de sensibilidad y evaluación de precisión frente a un conjunto de validación independiente de 100 puntos de control en tierra. La validación, realizada en GeoFIS, arrojó un Error Absoluto Medio (MAE) de 0,11 en la escala de 0-1 DoM, lo que indica una alta precisión media. El porcentaje global de error para las predicciones, calculado sobre un umbral de clasificación preciso ($\text{DoM} \geq 0,5$ = Urbano), fue del 13,2%. Una métrica clave para los clasificadores difusos, el Índice de Cobertura (IoC), que mide la capacidad del sistema para proporcionar una conclusión para todas las posibles entradas, fue el 100%, confirmando la completitud de la base de reglas diseñada; esta información se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificación y métricas de rendimiento del Sistema de Inferencia Difusa Mamdani (FIS)

Aspecto	Especificaciones y resultado
Tipo de FIS y Software	Tipo Mamdani, implementado en FisPro y GeoFIS
Variables de entrada	Distancia al tejido urbano (m), densidad de parches urbanos (%), tasa de cambio de uso del suelo (%/año)
Variable de salida	Rango de pertenencia a la clase urbana (DoM-Urban), rango [0, 1]
Funciones de membresía	Trapezoidal y Triangular, calibrado mediante análisis percentual de datos
Generación de bases de reglas	Híbrido: Estructura definida por expertos refinada mediante el algoritmo de mínimos cuadrados ordinarios (OLS)
Número de reglas finales	22
Muestra de validación	100 puntos de control independientes en tierra
Error absoluto medio (MAE)	0.11
Porcentaje de error (umbral: $\text{DoM} \geq 0,5$)	13.2%
Índice de Cobertura (IoC)	100%
Sensibilidad a $\pm 10\%$ de cambio de MF de entrada	Variación de salida $< \pm 0,08$

Fuente: autores, 2025

El análisis de sensibilidad, realizado variando sistemáticamente los parámetros de la función de pertenencia de entrada en un $\pm 10\%$, mostró una variación resultante en la Profundidad de Tiempo de salida inferior a $\pm 0,08$, demostrando la estabilidad del modelo. La aplicación de este FIS validado en GeoFIS generó una superficie continua DoM-Urban, cartopeando eficazmente áreas de transición y periféricos que se clasificaron ambiguamente en el mapa discreto de la Fase I, proporcionando así una representación espacial matizada de los gradientes de intensidad e informalidad de la urbanización.

Datos, materiales y procesamiento para análisis multitemporal

El análisis cuantitativo de la expansión física se basaba en el procesamiento de series temporales de imágenes satelitales. Se utilizaron productos de reflectancia superficial de la constelación Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLSS30 y HLSL30) durante los años 1990, 2000, 2010 y 2024, asegurando homogeneidad radiométrica y espacial (30 m) mediante correcciones atmosféricas (LEDAPS/LaSRC) y enmascaramiento de nubes (Fmask, Sen2Cor). La clasificación del uso y cobertura del suelo se realizó en Google Earth Engine (GEE) utilizando el algoritmo Random Forest (500 árboles, criterio Gini), entrenado con un conjunto de 2.500 puntos de referencia estratificados derivados de trabajo de campo y ortofotos IGAC. Las variables predictoras incluían seis bandas espectrales ópticas y los índices NDVI, NDBI y MNDWI. La validación mediante una matriz de confusión arrojó precisiones con Kappa $> 0,85$ para todas las épocas. La comparación posterior a la clasificación de los mapas anuales resultantes permitió generar matrices de transición y métricas de paisaje para cuantificar las tasas de cambio y los patrones de fragmentación urbana.

Fase III: Validación y análisis estadístico del modelo de lógica difusa

La fase final consistió en la validación y análisis estadístico del modelo de lógica difusa. La precisión del mapa de grados de pertenencia fue validada frente a una base de datos de referencia de 150 puntos, estratificada por tipo de cubierta y obtenida mediante trabajo de campo e imágenes de alta resolución (7). Se calcularon el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE) entre el grado de pertenencia modelado y la clasificación de referencia. Además, se realizó un análisis de correlación para cuantificar la relación entre el grado de pertenencia a la clase "urbana" y las variables socioeconómicas clave a nivel de bloque censal (20). Se utilizaron datos de DANE, como la Tasa de Crecimiento Intercensal de la Población (%) y el Porcentaje de Informalidad Laboral (para 2025, se proyectó un total de 120.000 trabajadores informales para Valledupar, lo que representa aproximadamente el 62,2% de la población empleada). Este análisis puso a prueba la hipótesis de que un mayor grado de pertenencia "urbana" a las periferias se correlaciona con dinámicas socioeconómicas específicas, como altas tasas de crecimiento poblacional e informalidad laboral (21).

Resultados

A continuación se presentan los principales resultados de cada una de las fases metodológicas.

Fase I: Análisis Multitemporal de la Expansión Física y Línea Base de Planificación

El análisis multitemporal reveló una transformación profunda y acelerada del paisaje de Valledupar

entre 2010 y 2025. Figura 3. Urban Expansion Dynamics in Valledupar entre 2010 y 2025, generada a partir de la clasificación supervisada de la serie de imágenes Landsat y Sentinel-2, muestra visualmente la evolución de la huella urbana. En 2010, la ciudad exhibió un núcleo compacto y consolidado centrado en el distrito histórico, con una superficie de 1850 hectáreas. Para el año 2000, tras la implementación del Plan de Gestión de la Tierra (POT) de 1999, se observan los primeros desarrollos significativos hacia el suroeste, acercándose al corredor de carreteras que conecta con el municipio de La Paz, aumentando el área urbana a 2450 hectáreas (13). El periodo 2000-2015, que abarca la transición entre los dos POTs, evidencia la explosión de una expansión descontrolada. La expansión urbana se extendía en un patrón fragmentado, de “salto”, principalmente hacia el sur y sureste, aprovechando la topografía plana de la sabana, que consumía extensas áreas de suelos agrícolas de Clase III. En 2015, el área urbana había alcanzado las 3.400 hectáreas. Finalmente, para 2025, la expansión continúa predominantemente en estas direcciones, pero también se observa una densificación notable (relleno) en algunos de los vacíos urbanos dejados por el crecimiento anterior, elevando la superficie total a 4150 hectáreas (22). Esta secuencia visual en la Figura 3 corrobora el patrón radial-discontinuo descrito en la literatura y evidencia una clara desconexión entre la planificación normativa y el desarrollo sobre el terreno, especialmente en el periodo inter-POT (1).

La cuantificación de estos cambios se presenta en la Tabla 3. Matriz de Transición de Cobertura del Solo para Valledupar (2000-2020, hectáreas), que detalla las conversiones netas entre categorías (23). Lo más notable es la conversión de 1150 hectáreas de suelo agrícola a terreno urbano no consolidado, y 450 hectáreas de vegetación natural (principalmente bosque seco tropical) a tierra urbana no consolidada (24). Esta tabla no solo confirma la dirección sur y sureste como el frente de expansión más activo, sino que también cuantifica la presión antropogénica sobre ecosistemas estratégicos, con una pérdida neta del 12% de la cobertura vegetal natural en el área de estudio durante este periodo.

Tabla 3. Matriz de Transición de Cobertura del Solo para Valledupar (2000-2020, hectáreas)

Cobertura del suelo (2000)	Tierras Urbanas Consolidadas	Terreno urbano no consolidado	Suelo agrícola	Vegetación natural	Masas de agua	Total 2000
Tierras Urbanas Consolidadas	380	45	0	0	0	425
Terreno urbano no consolidado	210	150	25	10	0	395
Suelo agrícola	90	1150	2850	120	5	4215
Vegetación natural	15	450	200	1210	0	1875
Masas de agua	0	5	5	0	85	95
Total 2020	695	1800	3080	1340	90	7005

Fuente: autores, 2025

La comparación entre la cartografía del POT y la expansión observada fue cuantificada sistemáticamente. El POT de 1999 proyectaba un crecimiento ordenado de 600 hectáreas para 2010; sin embargo, la expansión real superó las 900 hectáreas en ese periodo (25), con el 45% de este nuevo desarrollo ocurriendo en zonas no designadas para la expansión urbana, clasificadas como áreas de protección rural o riesgo de inundaciones (26). El POT de 2015 intentó rectificar esta situación incorporando algunas de estas áreas ya consolidadas, pero para entonces el patrón de crecimiento fragmentado ya estaba establecido, lo que hacía extremadamente difícil la provisión eficiente de infraestructuras y servicios públicos (27).

Fase II: Desarrollo de un modelo de lógica difusa para la clasificación de transición urbano-rural

Para captar la complejidad de la transición urbano-rural, se desarrolló un sistema de inferencia difusa tipo Mandani utilizando los programas FisPro y GeoFIS. Figura 2. La estructura Mandani para el Modelo Lógico Difuso ilustra la arquitectura del modelo, que toma tres variables de entrada y genera una salida continua.

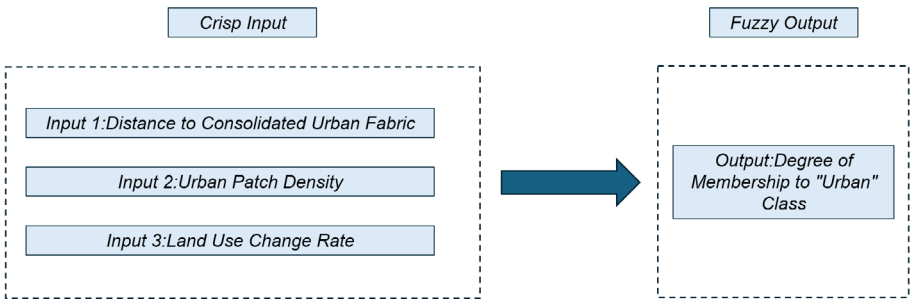


Figura 2. Variables de entrada/salida del modelo lógico difuso (estructura Mandani)

Fuente: autores, 2025

Las variables de entrada seleccionadas, basadas en el análisis de Fase I y su relevancia para captar la informalidad y los bordes difusos, fueron: 1) Distancia al Tejido Urbano Consolidado (m), 2) Densidad de Zonas Urbanas (%) (una métrica de fragmentación del paisaje) y 3) Tasa de cambio de uso del suelo (%/año). La variable de salida se definía como el Grado de Pertenencia a la Clase “Urbana”, un valor continuo entre 0 (completamente rural) y 1 (completamente urbano) (28).

La Tabla 4, funciones de pertenencia para el modelo de lógica difusa (Mandani), describe en detalle los conjuntos difusos y los parámetros de las funciones de pertenencia para cada variable. Para la variable “Distancia”, se definieron conjuntos como Muy Cerca, Cercano y Lejano, con funciones trapezoidales. Por ejemplo, un píxel a 150 metros del centro urbano tendría un grado de membresía de 0,8 en Muy Cerca y 0,2 en Cerca. “Densidad de parches” utilizaba conjuntos como Bajo, Medio y Alto, donde una densidad del 60% se consideraba predominantemente Alta. La “Tasa de Cambio” incluía el conjunto Negativo para capturar áreas de abandono o reconversión natural.

Tabla 4. Funciones de pertenencia para el modelo de lógica difusa (Mandani)

Variable	Conjunto difuso	Función de membresía	Parámetros (a, b, c, d)
Distancia (m)	Muy cerca	Trapezoidal	(0, 0, 100, 300)
	Cierre	Triangular	(100, 300, 600)
	Lejos	Trapezoidal	(500, 800, 2000, 2000)
Densidad de parches (%)	Bajo	Trapezoidal	(0, 0, 15, 30)
	Medio	Triangular	(20, 40, 60)
	Alto	Trapezoidal	(50, 70, 100, 100)
Tasa de cambio (%/año)	Negativo	Trapezoidal	(-5, -2, 0, 0)
	Estable	Triangular	(-1, 0, 2)
	Positivo	Trapezoidal	(1, 3, 10, 10)
Grado de Membresía "Urbano"	Bajo	Trapezoidal	(0, 0, 0.2, 0.4)
	Medio	Triangular	(0.3, 0.5, 0.7)
	Alto	Trapezoidal	(0.6, 0.8, 1, 1)

Fuente: autores, 2025

El sistema de inferencia estaba poblado con 18 reglas difusas IF-THEN que encapsulaban el conocimiento experto sobre el proceso de urbanización. Por ejemplo: SI la distancia es muy cercana Y la densidad de parches es alta Y la tasa de cambio es positiva, ENTONCES el grado de membresía "urbano" es alto. Otra regla crítica como: SI la distancia es larga Y la densidad de parches es baja Y la tasa de cambio es estable, ENTONCES el grado de membresía "urbano" es bajo. La aplicación de este modelo en GeofIS generó un grado de pertenencia que supera la limitación binaria de los mapas tradicionales. Las áreas con valores entre 0,4 y 0,7 se identificaron como "Zonas Críticas de Transición" (CTZ), que corresponden espacialmente a asentamientos informales, urbanizaciones consolidadas y áreas mixtas rural-urbanas que no se capturan como totalmente urbanas o totalmente rurales en los mapas clásicos.

Fase III: Validación y análisis estadístico del modelo de lógica difusa

La validación del modelo de lógica difusa frente a 150 puntos de verificación en tierra mostró un rendimiento sólido. El análisis de correlación arrojó un coeficiente de Pearson de $r = 0,89$ entre el Grado de Pertenencia modelado y la clasificación de referencia (basada en observaciones y trabajo de campo de alta resolución), indicando una fuerte relación lineal positiva. El Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE) fue de 0,15, lo que sugiere que, de media, las predicciones del modelo se desvían 0,15 unidades en la escala de 0 a 1 respecto al valor real observado. Este nivel de error es aceptable dada la naturaleza inherentemente incierta del fenómeno modelado. Tabla 5. La Matriz de Confusión para el Modelo Fuzzy (umbral en 0,5) demuestra su utilidad incluso cuando se convierte a una clasificación binaria. El modelo logró una Precisión General del 88,7% y un Índice Kappa de 0,81, lo que indica una concordancia casi perfecta con la realidad de referencia y valida la robustez del enfoque difuso.

Tabla 5. Matriz de confusión para el modelo difuso (umbral en 0,5)

Clase de referencia	Urbano (modelo)	Rural (modelo)	Total
Urbano	68	9	77
Rural	8	65	73
Total	76	74	150

Fuente: autores, 2025

El análisis de correlación entre el Grado de Membresía “Urbano” y las variables socioeconómicas reveló patrones espaciales altamente significativos. Tabla 6. La correlación entre el grado de membresía “urbano” y las variables socioeconómicas resume estos hallazgos. Se encontró una fuerte correlación positiva estadísticamente significativa ($r = 0,72$, $p < 0,01$) entre un alto grado de pertenencia (valores $> 0,6$) en las periferias y la tasa de crecimiento poblacional. Esto confirma que las áreas recién urbanizadas son los polos de atracción demográfica. Aún más revelador fue encontrar una correlación positiva moderada pero significativa ($r = 0,55$, $p < 0,01$) con el Índice de Informalidad Laboral. Esto proporciona una sólida evidencia cuantitativa de que el modelo de lógica difusa es capaz de identificar no solo la expansión física, sino también el tipo de expansión: las Zonas Críticas de Transición (grados 0,4 a 0,7) están fuertemente asociadas con economías informales y precariedad laboral, capturando así la dimensión socioeconómica de la informalidad urbana.

Tabla 6. Correlación entre el grado de membresía “urbano” y variables socioeconómicas

Variable socioeconómica	Coefficiente de correlación (r)	valor p	Interpretación
Tasa de crecimiento poblacional	0.72	$< 0,01$	Correlación positiva fuerte y significativa
Índice de Informalidad Laboral	0.55	$< 0,01$	Correlación positiva moderada y significativa
Cobertura de agua potable	0.90	$< 0,01$	Correlación positiva muy fuerte y significativa

Fuente: autores, 2025

Además, la Figura 3, compuesta por cuatro viñetas (A: 2010, B: 2015, C: 2020, D: 2025) derivadas de las imágenes históricas de alta resolución de Google Earth Engine, documenta visualmente la marcada trayectoria sureste de la expansión urbana de Valledupar (29). Este sesgo direccional está técnicamente impulsado por la topografía plana y los suelos disponibles de la llanura aluvial del río César, que presentan costes geotécnicos de desarrollo más bajos en comparación con el flanco occidental restringido delimitado por la Sierra Nevada de Santa Marta (30,31).

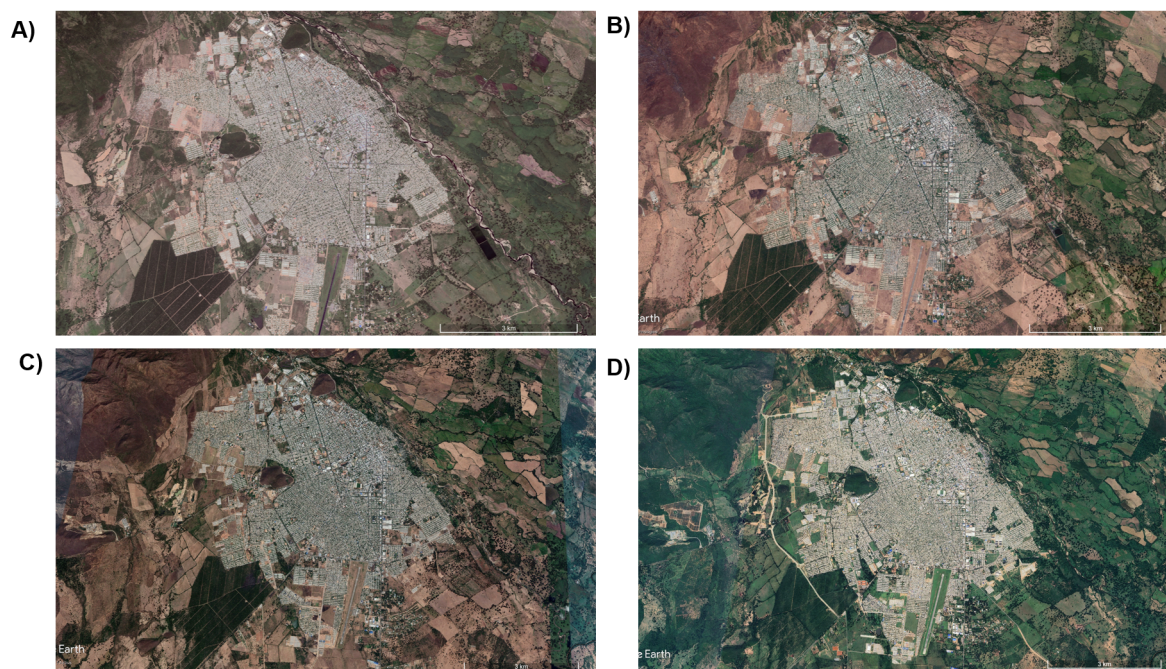


Figura 3. Dinámicas de crecimiento urbano en Valledupar: A) 2010, B) 2015, C) 2020 y D) 2025

Fuente: autores, 2025

Esta expansión está impulsada socioeconómicamente por presiones convergentes. Una importante afluencia de migrantes venezolanos (32), con el departamento de César acogiendo a más de 82.000 personas regularizadas a mediados de 2023, ha intensificado la demanda de vivienda asequible, a menudo satisfecha mediante asentamientos informales (urbanización informal) en estas zonas periurbanas (33). Al mismo tiempo, el dinamismo económico de Valledupar como centro agroindustrial y comercial regional atrae migración interna (33). De manera crucial, está surgiendo un proceso de conurbación distintivo hacia el este, en dirección al municipio de La Paz. Esto está impulsado principalmente por la atracción económica de la demanda indirecta del complejo minero de Cerrejón, el desarrollo estratégico de proyectos subvencionados de Vivienda de Interés Social (VIS) a lo largo del corredor Valledupar-La Paz, y el establecimiento del nuevo campus satélite de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en La Paz, que consolida la zona como un polo para la educación y los servicios, difuminando efectivamente los límites administrativos entre los dos centros urbanos.

Finalmente, la Figura 4. El crecimiento del área urbana de Valledupar entre 1985 y 2025 sintetiza los hallazgos cuantitativos de la expansión. Este gráfico de barras superpuesto con una línea de tendencia muestra de forma concluyente el crecimiento exponencial de la superficie urbanizada. La barra de 1985 es modesta (1850 ha), mostrando un aumento constante hasta el año 2000. A partir de ese momento, la pendiente de la línea de tendencia aumenta drásticamente, con las barras de 2015 y 2025 alcanzando alturas mucho mayores. Esta cifra complementa la Figura 3, que proporciona la evidencia numérica de la acelerada transformación física experimentada

por la ciudad, que pasó de 1850 hectáreas en 1985 a 4150 hectáreas en 2025, lo que representa un incremento del 124% en solo cuatro décadas. La integración de todos estos resultados — cartográficos, modelados y estadísticos — construye una narrativa sólida sobre la dinámica de la expansión de Valledupar, sus factores y sus consecuencias, validando la eficacia de la metodología propuesta.

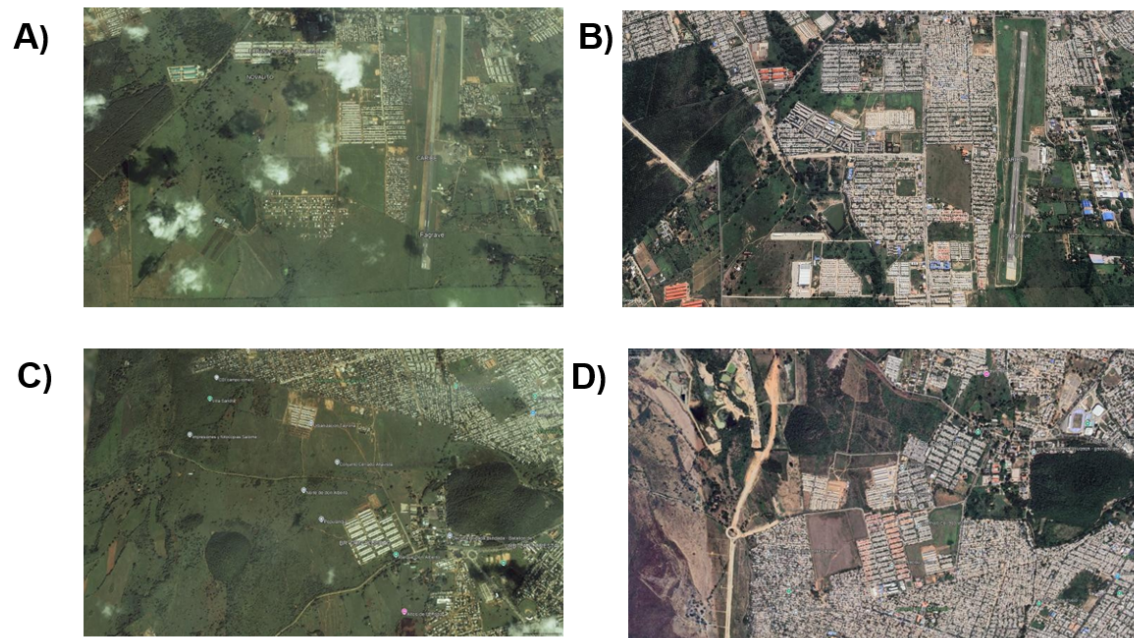


Figura 4. Crecimiento del área urbana de Valledupar: A) Don Carmelo y Novalito (2006), B) Don Carmelo y Novalito (2025), C) Don Alberto, Altavista, Tayrona (2006), D) Don Alberto, Altavista, Tayrona (2025) Fuente: autores, 2025

La Figura 3 ilustra cuantitativamente el pronunciado crecimiento espacio-temporal de la huella urbana de Valledupar entre 1985 y 2025, destacando puntos críticos específicos de expansión. El crecimiento más significativo se produjo en la periferia sureste, donde los distritos de Don Carmelo y Novalito experimentaron un desarrollo explosivo tras 2006, registrando un aumento estimado del 320% en el área urbana para 2025. Este auge fue impulsado principalmente por la proliferación de grandes proyectos de vivienda formales (conjuntos) y la posterior aparición de zonas comerciales localizadas destinadas a la nueva población. De manera similar, el corredor sur, que abarcaba Don Alberto, Altavista y Tayrona, mostró un crecimiento agregado sustancial del 280% en el mismo periodo. Este patrón de expansión se caracteriza por una mezcla de unidades residenciales planificadas de densidad media y viviendas incrementales construidas por sus propietarios, facilitadas por una mejor conectividad vial y la relativa asequibilidad del terreno. El gráfico subraya un claro cambio espacial en el eje de crecimiento de la ciudad, pasando de un núcleo históricamente compacto a un modelo disperso dominado por estas áreas periféricas, que en conjunto representaron más del 65% del nuevo suelo urbano consumido entre 2006 y 2025.

Discusión

La discusión de los resultados obtenidos en las tres fases metodológicas revela aspectos críticos y novedosos de la dinámica de expansión urbana en Valledupar. El análisis multitemporal (Fase I) confirmó un patrón de crecimiento radial-discontinuo, cuantificado por un aumento del 124% en la huella urbana entre 1985 y 2025. La Tabla 1, la Matriz de Transición, demostró que este proceso consumió predominantemente tierras agrícolas (1.150 ha) y vegetación natural (450 ha) entre 2000 y 2020, lo que no solo refleja una presión antropogénica significativa sobre ecosistemas estratégicos como el bosque seco tropical, sino que también pone de manifiesto una clara ineficacia de los instrumentos de planificación del uso del suelo. A pesar de que los Planes de Gestión de Tierras (POT) de 1999 y 2015 establecieron directrices para el crecimiento ordenado, se observó que el 45% de la expansión real ocurrió fuera de las zonas designadas, lo que indica una profunda desconexión entre la planificación normativa y la dinámica del mercado de tierras. Este hallazgo es coherente con estudios previos en ciudades intermedias latinoamericanas, pero la cuantificación precisa de la discordancia espacial mediante SIG representa una contribución específica para el caso de Valledupar.

El principal aspecto novedoso de esta investigación radica en la aplicación y los resultados del modelo de lógica difusa (Fase II). La implementación de un sistema de inferencia Mandani, cuyas funciones de pertenencia se detallan en la Tabla 2, permitió superar la limitación binaria de las clasificaciones tradicionales de uso del suelo. El modelo generó un índice continuo de Grado de Membresía al "Urbano", que fue fundamental para identificar y caracterizar las Zonas Críticas de Transición (CTZ), aquellas con valores entre 0,4 y 0,7. Estas CTZ, que aparecen como áreas grises o indeterminadas en mapas convencionales, estaban espacialmente correlacionadas con asentamientos informales, urbanizaciones consolidadas y áreas mixtas rural-urbanas. La validación de este modelo (Fase III) mostró una alta precisión, con un coeficiente de correlación Pearson de 0,89 y un índice Kappa de 0,81 al limitar la salida, validando la robustez del enfoque difuso para captar la complejidad del fenómeno urbano.

Más allá de la precisión cartográfica, la verdadera innovación surge del análisis de correlación entre el modelo difuso y las variables socioeconómicas. La Tabla 4 mostró una correlación positiva moderada pero estadísticamente significativa ($r = 0,55$, $p < 0,01$) entre un alto grado de pertenencia "urbana" en las periferias y el Índice de Informalidad Laboral. Este hallazgo es crucial, ya que proporciona evidencia cuantitativa de que el modelo no solo mapea la forma física de la ciudad, sino que también es capaz de inferir su estructura socioeconómica subyacente. Sugiere que los procesos de expansión urbana en Valledupar, especialmente en las CTZ, están intrínsecamente ligados a economías informales y a la precariedad laboral, un vínculo que los análisis puramente morfológicos o demográficos no logran captar con este nivel de detalle. Esto convierte al modelo de lógica difusa en una herramienta diagnóstica poderosa para la planificación, permitiendo identificar no solo dónde ocurre el crecimiento, sino también el probable carácter social y económico de ese crecimiento.

A pesar de estos hallazgos, el estudio presenta limitaciones. En primer lugar, la resolución espacial de 30 metros de las imágenes Landsat y Sentinel-2, aunque adecuada para el análisis a escala de

ciudad, puede no capturar procesos de microdensificación ni la estructura interna de asentamientos informales más pequeños, lo cual podría abordarse en futuras investigaciones con imágenes de muy alta resolución. En segundo lugar, el modelo de lógica difusa, aunque robusto, se basa en la definición de conjuntos y reglas difusas que, aunque fundamentadas en conocimientos expertos y análisis previos, incorporan cierto grado de subjetividad. La sensibilidad del modelo a las variaciones en estos parámetros debe explorarse en profundidad. Finalmente, el análisis de correlación no implica causalidad; aunque se identificó una fuerte asociación entre la expansión periférica y la informalidad laboral, la dinámica causal detrás de esta relación es compleja y multifactorial, requiriendo investigación cualitativa complementaria para profundizar en los mecanismos específicos que operan en territorios como Don Carmelo, Navilito y el corredor sur. En conclusión, esta investigación integradora proporciona un marco metodológico sólido y novedoso que combina teledetección, lógica difusa y análisis estadístico, ofreciendo una comprensión más matizada y útil de la expansión urbana para la toma de decisiones en políticas de planificación sostenible del uso del suelo.

Conclusiones

Esta investigación desarrolló con éxito un modelo de análisis integral que, integrando teledetección, cartografía regulatoria y lógica difusa, evaluó la dinámica, los patrones y la sostenibilidad de la expansión urbana de Valledupar entre 1985 y 2025. La primera conclusión establece que el crecimiento urbano de Valledupar ha sido predominantemente ineficiente y desconectado de la planificación normativa. La superficie urbana aumentó un 124%, pasando de 1.850 a 4.150 hectáreas, con una tasa de expansión anual del 2,8% que superó consistentemente el crecimiento demográfico. Este patrón radial-discontinuo consumió 1.150 hectáreas de suelo agrícola y 450 hectáreas de vegetación natural entre 2000 y 2020, según se cuantifica en la Tabla 1, y se produjo un 45% fuera de las zonas designadas por los Planes de Gestión de Tierras (POT), lo que evidencia una brecha significativa entre la planificación y la dinámica real del mercado de la tierra.

La segunda conclusión demuestra la utilidad del modelo de lógica difusa como una herramienta superior para caracterizar la transición urbano-rural de manera continua. El modelo, cuyas funciones de pertenencia se definieron en la Tabla 2, generó un Grado de Membresía al índice "Urbano" que permitió la identificación de Zonas Críticas de Transición (valores 0,4-0,7), que estaban espacialmente correlacionadas con asentamientos informales y procesos de urbanización precaria. La validación del modelo, con un coeficiente de correlación Pearson de 0,89 y un índice Kappa de 0,81, confirma su robustez. Además, la correlación significativa ($r=0,55$, $p<0,01$) entre un alto grado de pertenencia urbana en la periferia y el Índice de Informalidad Laboral, revelada en la Tabla 4, proporciona evidencia cuantitativa novedosa de que la morfología física de la expansión está intrínsecamente ligada a condiciones socioeconómicas de precariedad, un vínculo que los métodos binarios de clasificación no pueden capturar.

La tercera conclusión sintetiza que la expansión urbana de Valledupar ha generado un modelo de desarrollo territorial insostenible, caracterizado por la fragmentación socioespacial y la presión sobre los ecosistemas. La combinación de resultados muestra un círculo vicioso en el que la

expansión física en la periferia, a menudo informal o no planificada, atrae a poblaciones de bajos ingresos, lo que se refleja en altas tasas de crecimiento demográfico en estos sectores y se correlaciona con una economía informal que alcanza el 62,2% de la fuerza laboral. Este modelo aumenta la vulnerabilidad poblacional, ejerce presión sobre los recursos hídricos y fragmenta los corredores ecológicos entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá. Por ello, se recomienda enfáticamente que las autoridades municipales de planificación incorporen el uso de modelos de lógica difusa en futuros instrumentos de gestión del suelo, como la revisión del POT, para definir límites urbanos y políticas de uso del suelo. Implementar este enfoque permitiría una identificación y regulación más efectiva de las Zonas Críticas de Transición, promoviendo una densificación inteligente en áreas consolidadas y guiando la expansión futura hacia sectores con menor valor agroecológico y menor riesgo socioambiental, priorizando así la sostenibilidad a largo plazo frente a la expansión especulativa del suelo.

Declaración de contribución de autoría de CrediT

Conceptualización – Juan Guillermo Popayán-Hernández

Metodología: Heider Fernando Losada

Guion - borrador original - Preparación Deliannys Marieth Mendoza Barradas

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Ética aspect: no declara.

Referencias

1. Martinez U, Barbosa V, Thoene U. Transformaciones urbanas en ciudades intermedias bajo la lógica del urbanismo neoliberal: El caso de Montería, Colombia. *Política y Práctica Científica Regional*. 1 de agosto de 2024; 16(8).
<https://doi.org/10.1016/j.rspp.2024.100058>
2. Vargas C, Gómez-Valencia M, González-Pérez MA, Cordova M, Calixto Casnici CV, Monje-Cueto F, et al. Futuros resilientes y regenerativos al clima para América Latina y el Caribe. *Futuros*. 1 de septiembre de 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103014>
3. Anafo D, Nutsugbodo RY, Agyepong E, Anane GK, Mensah BA, Bata PD. Lugares de toma de decisiones entre los vendedores informales de comida callejera en Sunyani, Ghana. *Ciudades*. 1 de noviembre de 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105328>
4. Rochlin J. Mineros informales de oro, seguridad y desarrollo en Colombia: trazando el camino a seguir. *Industrias extractivas y sociedad*. 1 de julio de 2018; 5(3):330-9.

<https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.03.008>

5. González-Calle JL. Expansión metropolitana y cambio rural en el límite periurbano Medellín - Rionegro (Colombia). *Revista de Gestión Urbana*. 1 de septiembre de 2024; 13(3):521-40.

<https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.05.007>

6. Georg I, Blaschke T, Taubenböck H. Delimitación espacial de corredores urbanos en Norteamérica: Un enfoque que incorpora difusión basada en datos geoespaciales multifuente. *Ciudades*. 1 de febrero de 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104129>

7. Pota M, Esposito M, De Pietro G. Análisis difuso de verosimilitud: Desde los datos, pasando por la estadística, hasta clasificadores difusos interpretables. *Revista Internacional de Razonamiento Aproximado*. 1 de febrero de 2018; 93:88-102.

<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2017.10.022>

8. Celletti A, Locatelli U, Ruggeri T, Strickland E. Springer INdAM Serie 6 Modelos Matemáticos y Métodos para el Planeta Tierra [Internet]. Disponible en: <http://www.springer.com/series/10283>

9. Bockstaller C, Beauchet S, Manneville V, Amiaud B, Botreau R. Una herramienta para diseñar árboles de decisión difusos para la evaluación de sostenibilidad. *Modelado ambiental y software*. 1 de noviembre de 2017;97:130-44.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.011>

10. Khan M, Nizami AS, Yasar A, Musharavati F. Impulso de la integración vertical y la circularidad en la industria textil mediante el desarrollo de un marco novedoso para el índice de sostenibilidad textil. *Futuros sostenibles*. 1 de diciembre de 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101496>

11. Gómez D, Aristizábal E, García EF, Marín D, Valencia S, Vásquez M. Previsión de deslizamientos mediante estimaciones satelitales de precipitaciones y aprendizaje automático en la región andina colombiana. *J South Am Ciencias de la Tierra* 2023 1 de mayo 1:125.

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104293>

12. Sarkheil H, Rostamian E, Rahbari S, Lak R. Desarrollo de un novedoso índice ecológico de salud forestal difusa (FFHI) para estandarizar la minería inteligente en bosques mediante técnicas de teledetección. *Indicadores medioambientales y de sostenibilidad*. 1 de junio de 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100700>

13. Centro de Información Dane - Cámara de Comercio de Valledupar para el Valle del Rio de Cesar [Internet]. [cited 2025 Jul 22]. Available from: <https://ccvalledupar.org.co/centro-de-informacion-dane/>

14. Meza Arquíñigo C, Díaz Encinas AI. La zonificación de las crecientes y vaciones del río Aguaytia sector bajo e impacto socioeconómico y ambiental. Márquez Domínguez. Juan Antonio, editor.

Planificación territorial, desarrollo sustentable y geodiversidad, 2016, ISBN 978-84-8163-557-7, págs 1214-1231 [Internet]. 2016 [cited 2024 Nov 23];1214-31. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7456536>

15. Williams AT, Rangel-Buitrago NG, Anfuso G, Cervantes O, Botero CM. Impactos de basura en el paisaje y el turismo en la costa norte del Caribe colombiano. *Gestión de giras*. 2016 1 de agosto;55:209-24.

<https://doi.org/10.1016/j.tourman.2016.02.008>

16. Carazo E. Esquemas de zonificación ambiental para la planificación regional urbana. *Revista geográfica de América Central*, ISSN-e 2215-2563, ISSN 1011-484X, No 41, 2008, págs 55-73 [Internet]. 2008 [cited 2024 Nov 23]; (41):55-73. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2728133>

17. Valle-García A, Lozano-Bustamante S, Camargo-Caicedo Y. Variabilidad espacial y temporal de temperatura, precipitación y radiación solar en el Departamento de Magdalena, Colombia desde 2000 hasta 2022. *Heliyon* [Internet]. septiembre de 2024; e38372. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844024144039>

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38372>

18. Guillaume S, Charnomordic B. Sistemas de inferencia difusa: Un entorno integrado de modelado para la colaboración entre conocimiento experto y datos utilizando FisPro. *Aplicación de Sistemas de Expertos* 2012 agosto 2012; 39(10):8744-55.

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.206>

19. Peña JC, Costa NR da, Martello F, Ribeiro MC. La distribución de los árboles urbanos a lo largo de un paisaje urbano refleja la desigualdad social de las ciudades latinoamericanas. *Urbano para Verde Urbano*. 1 de enero de 2024; 91.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128156>

20. Guillaume S, Charnomordic B. Aprendiendo sistemas de inferencia difusa interpretables con FisPro. *Inf Sci (N Y)*. 15 de octubre de 2011; 181(20):4409-27.

<https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.03.025>

21. Zhou J, Zhang X, Xie J, Liu J. Efectos de la elevada velocidad del aire en el confort térmico en climas cálidos y húmedos y en la zona de confort estival extendida. *Construcción de energía*. 15 de mayo de 2023;287.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112953>

22. Sánchez-Gonzales Y, Espinoza-Sánchez R, Palafox-Muñoz A. Zonificación ambiental turística de la zona costera del departamento del Atlántico-Colombia. Helena B, Tomás DS, Contreras C, editors. *Tendencias del turismo en Latinoamérica*, 2018, ISBN 9789585431119, pág 158 [Internet]. 2018

[cited 2024 Nov 23];158. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9713597>

23. Villegas Rodríguez E, Contreras García DG, Cifuentes Guerrero JA, Fernández Almanza L. Ordenamiento territorial como instrumento, para la zonificación ambiental a través de la Estructura Ecológica Principal, como apoyo a la formulación de los POTs y los POMCAS en Colombia. *Revista de Tecnología*, ISSN 1692-1399, Vol 14, No 2, 2015 (Ejemplar dedicado a: Energías Renovables), págs 49-76 [Internet]. 2015 [cited 2024 Nov 23]; 14(2):49-76. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041486&info=resumen&idioma=SPA>

<https://doi.org/10.18270/rt.v14i2.1870>

24. Gudiño de Muñoz ME. El Ordenamiento Territorial como política de Estado. *Perspectiva Geográfica*, ISSN-e 0123-3769, Vol 20, No 1, 2015, págs 11-36 [Internet]. 2015 [cited 2024 Nov 23]; 20(1):11-36. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5626902&info=resumen&idioma=SPA>

<https://doi.org/10.19053/01233769.4491>

25. Campos Alvarado V. Ordenamiento territorial. *Anuario de derecho: órgano de información de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas de la Universidad de Panamá*, ISSN 0553-0814, No 36-37, 2007-2008, págs 435-440 [Internet]. 2007 [cited 2024 Nov 23]; (36):435-40. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3422943>

26. Sliwa M. Planes maestros y ecosistemas urbanos: Cómo los pobres transforman el uso del suelo de rígido a orgánico - Un caso de Colombia. *Habitat Int*. 2017 1 de agosto;66:1-12.

<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.05.003>

27. Useche AF, Sarmiento OL, Álvarez-Rivadulla MJ, Medina P, Higuera-Mendieta D, Montes F. Patrones de segregación espacial y asociación con características del entorno construido en ciudades colombianas. *Ciudades*. 1 de septiembre de 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105217>

28. Navarrete-Hernandez P, Luneke A, Truffello R, Fuentes L. Planificación por miedo a la reducción de la delincuencia: Evaluación del impacto de la regeneración del espacio público en la percepción de seguridad en barrios desfavorecidos. *Plan Urbano Landsc*. 1 de septiembre de 2023; 237.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104809>

29. Shiraishi K. La desigualdad en la distribución de los servicios forestales urbanos y ecosistémicos en Cali, Colombia. *Urbano por Verde Urbano*. 1 de enero de 2022; 67.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127446>

30. Garza N, Ovalle MC. Turismo y precios de la vivienda en Santa Marta, Colombia: determinantes espaciales e interacciones. *Habitat Int*. 2019 1 de mayo;87:36-43.

<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.04.001>

31. Garcés-Ordóñez O, Espinosa Díaz LF, Pereira Cardoso R, Costa Muniz M. El impacto del turismo

en la contaminación por basura marina en las playas de Santa Marta, Caribe colombiano. Mar Pollut Bull. 1 de noviembre de 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111558>

32. Rivillas-García JC, Cifuentes-Avellaneda Á, Ariza-Abril JS, Sánchez-Molano M, Rivera-Montero D. Migrantes venezolanos y acceso a la anticoncepción en Colombia: un enfoque de investigación mixto para comprender los patrones de desigualdad. J Migr Health. 2021 1:3 de enero.

<https://doi.org/10.1016/j.jmh.2020.100027>

33. Knight B, Tribin A. Inmigración y delitos violentos: Pruebas de la frontera Colombia-Venezuela. J Dev Econ. 2023 1 de mayo;162.

<https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2022.103039>