



Productos cartográficos con fotogrametría UAV y su empleabilidad en el ordenamiento territorial en el municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo.

Mariana Cardona Pérez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesor: Rogelio Pineda Murillo, Doctor (PhD) en Geografía

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2026

Cita	(Cardona Pérez, 2026)
Referencia	Cardona Pérez, M. (2026). <i>Productos cartográficos con fotogrametría UAV y su empleabilidad en el ordenamiento territorial en el municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXXII

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [Turnitin, 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.

Dedicatoria

A mis padres, por ser los pilares fundamentales de mi vida,
guías más sabias y la luz que ilumina mi camino.
Su constante apoyo, sabiduría y amor incondicional
han sido la fuerza detrás de cada logro y desafío superado.
Gracias por ser mis mejores maestros
y por inspirarme a ser la mejor versión de mí misma.
A mi abuelita, mi segunda madre, por cada bendición y oración
que ha sido manto de protección a lo largo de mi vida,
por ser el claro ejemplo de la fuerza y la valentía,
por ser mi tesoro máspreciado
y la razón por la que nunca dejaré de esforzarme
por alcanzar mis sueños.
Con todo mi amor y gratitud, les dedico este logro.
Sin ustedes nada sería posible.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme llegar hasta este punto y brindarme la fortaleza necesaria para culminar este proceso académico. De igual manera, expreso mi profundo agradecimiento a mi familia, por creer en mí, acompañarme de manera incondicional y apoyarme en cada una de las etapas de mi formación personal y profesional.

A mi director de trabajo de grado, Rogelio Pineda, manifiesto mi sincero agradecimiento por la orientación, la paciencia y el compromiso demostrados durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco al equipo de trabajo consultor por compartir generosamente sus conocimientos, por su apoyo constante y por guiar cada etapa de mi crecimiento profesional. Valoro profundamente su disposición, comprensión y confianza depositada en mis capacidades desde el inicio de este proceso.

Finalmente, agradezco a la Universidad de Manizales y a sus docentes por brindarme la oportunidad de continuar mi formación académica, no solo como profesional, sino también como persona, y por hacer posible la obtención de este título universitario.

Tabla de contenido

Resumen	12
Abstract	13
Introducción	14
1 Planteamiento del problema	17
2 Justificación.....	20
3 Objetivos	23
3.1 Objetivo general	23
3.2 Objetivos específicos.....	23
4 Marco teórico	24
4.1 Antecedentes	24
4.2 Referente Teórico	29
4.2.1 Fotogrametría digital: fundamentos, alcances y transición hacia UAV	29
4.2.2 Reconstrucción SfM-MVS y ajuste fotogramétrico	30
4.2.3 Planificación de vuelos UAV y su influencia en la calidad de los productos.....	31
4.2.4 Control terrestre, georreferenciación y evaluación de la exactitud.....	32
4.2.5 Productos fotogramétricos clave: ortofoto verdadera, DTM/DEM en gestión del riesgo por inundación	33
4.2.6 Fotogrametría UAV, catastro y ordenamiento territorial.....	35
4.2.7 Visualización 3D, interoperabilidad y apropiación institucional.....	36
4.3 Referente Normativo	36
4.3.1 Ordenamiento Territorial	37
4.3.2 Gestión del riesgo de desastres y su integración obligatoria al PBOT	37
4.3.3 Cartografía oficial, referencia geodésica y especificaciones técnicas IGAC	38
4.3.4 Normativa colombiana para la operación de aeronaves no tripuladas (UAV)	39

4.3.5 Marco aeronáutico internacional: Convenio de Chicago y OACI	40
5 Metodología	42
5.1 Enfoque metodológico y orientación del estudio	42
5.2 Área de estudio y criterios de delimitación	42
5.3 Procedimiento Metodológico	43
5.3.1 Fase 1. Preparación normativa, técnica y operativa del levantamiento UAV	43
5.3.2 Fase 2. Planeación geométrica del vuelo y diseño de cobertura	44
5.3.3 Fase 3. Control terrestre (GCP): diseño, medición GNSS-RTK y referencia espacial..	46
5.3.4 Fase 4. Adquisición de imágenes UAV y control básico de calidad en campo	55
5.3.5 Fase 5. Procesamiento fotogramétrico en ArcGIS Drone2Map (ajuste, productos y QA/QC).....	57
5.3.6 Fase 6. Integración SIG y análisis de empleabilidad para PBOT	62
5.4 Gestión del dato, ética, seguridad y control de divulgación.....	63
6 Resultados	64
6.1 Planificar y ejecutar la adquisición de datos fotogramétricos mediante vuelos UAV y levantamiento de control terrestre, garantizando cobertura, resolución y precisión requeridas.	64
6.1.1 Cobertura territorial consolidada	64
6.1.2 Parámetros operacionales de adquisición	65
6.1.3 Restricciones operacionales del espacio aéreo y condiciones ambientales (casco urbano)	66
6.1.4 Control terrestre (GCP).....	68
6.1.5 Ejecución del plan de vuelo con control terrestre previo (casco urbano)	71
6.2 Procesar y generar productos cartográficos de alta precisión, validando su calidad mediante control geométrico y reporte técnico.....	72
6.2.1 Control GNSS consolidado para posprocesamiento (descarga y depuración).....	73
6.2.2 Control GNSS normalizado temporalmente (cambio de época a 2018.0).....	73
6.2.3 Normalización vertical del control GNSS (GEOCOL2004)	76

6.2.4 Conjunto de imágenes UAV consolidado y verificado (Mavic 3 Enterprise)	76
6.2.5 Ajuste del bloque en Drone2Map: métricas del procesamiento y consistencia del bloque.....	77
6.2.6 Generación de productos derivados: malla 3D, DEM/DTM y ortofoto verdadera.....	78
6.2.7 Validación de calidad geométrica: desempeño del control (GCP) e indicadores del ajuste	86
6.2.8 Evaluación de exactitud posicional y aseguramiento de calidad en SIG	87
6.3 Analizar la utilidad y aplicabilidad de los productos cartográficos en escenarios de ordenamiento territorial, incluyendo planificación de infraestructura, gestión del riesgo y actualización catastral	89
6.3.1 Aplicabilidad en escenarios de planificación de infraestructura y equipamientos	90
6.3.2 Gestión del riesgo (inundación): lectura topográfica y susceptibilidad a partir del DTM	99
6.3.3 Soporte a decisiones gubernamentales.....	114
6.4 Proponer estrategias para la apropiación y uso efectivo de los productos cartográficos por parte de autoridades municipales y entidades de planeación, fomentando su incorporación en la toma de decisiones.	114
6.4.1 Estrategia 1: Expediente técnico estandarizado (QA/QC + trazabilidad) como mecanismo de confianza institucional	115
6.4.2 Estrategia 2: Publicación y acceso libre mediante Scene Viewer 3D (consulta, medición y comunicación interinstitucional).....	116
6.4.3 Estrategia 3: Evidencia inmersiva con fotografías 360° para verificación visual y soporte a decisiones	118
6.4.4 Estrategia 4: Capacitación orientada a roles y “casos de uso”.....	119
6.4.5 Estrategia 5: Gobernanza, custodia y actualización (versionamiento, acceso, seguridad y sostenibilidad).....	120
7 Discusión.....	122
8 Conclusiones	128
9 Recomendaciones	130
Referencias	132

Lista de tablas

Tabla 1	Parámetros operacionales del levantamiento fotogramétrico UAV.....	66
Tabla 2	Cálculo de velocidades a la época 2018.0.....	74
Tabla 3	Productos generados y configuración efectiva de procesamiento (ArcGIS Drone2Map).....	85
Tabla 4	Validación geométrica mediante control terrestre (GCP) e indicadores del Reporte de Procesamiento	88
Tabla 5	Estrategias de apropiación y uso efectivo de productos cartográficos.....	121

Lista de figuras

Figura 1 DJI MAVIC 3 Enterprise utilizado en el levantamiento fotogramétrico.....	45
Figura 2 Antena GNSS CHC I90Pro utilizada para la toma de los puntos de control en campo.	49
Figura 3 Marcación física y levantamiento GNSS de un punto de control terrestre (GCP).	51
Figura 4 <i>Cálculo cambio de época archivo de puntos mediante el modelo de velocidades oficial del IGAC, empleando el software Magna Sirgas Pro 5.1.</i>	54
Figura 5 Ruta de vuelo en ejecución en el municipio de Puerto Leguízamo.	55
Figura 6 <i>Revisión de cada una de las carpetas con fotografías y eliminación de las que no corresponden al levantamiento fotogramétrico.</i>	57
Figura 7 <i>Revisión y cargue de carpetas al nuevo proyecto Drone2Map.</i>	59
Figura 8 <i>Cargue de cada una de las respectivas fotografías obtenidas al software Drone2Map.</i>	59
Figura 9 <i>Carga de los puntos de control en terreno (GCP).</i>	60
Figura 10 <i>Proceso de medición de cada punto sobre el software para las fotografías del casco urbano de Puerto Leguízamo.</i>	61
Figura 11 <i>Proceso de medición de cada punto sobre el software para las fotografías del casco urbano de Puerto Leguízamo.</i>	61
Figura 12 Mapa plan de vuelo casco urbano Puerto Leguízamo.	65
Figura 13 Zonas de restricción operacional del espacio aéreo en el casco urbano de Puerto Leguízamo.	68
Figura 14 Distribución de puntos de control terrestre ideales definidos para la planificación del levantamiento GNSS.	69
Figura 15 Registro fotográfico complementario en punto de control terrestre (GCP).	70
Figura 16 Malla de puntos de control terrestre (GCP) materializados alrededor del casco urbano.	71
Figura 17 Inicio del plan de vuelo con el dron en el casco urbano del municipio de Puerto Leguízamo.	72
Figura 18 Conjunto de imágenes UAV consolidado y verificado.	77

Figura 19 Procesamiento realizado en Drone2Map para el caso del casco urbano de Puerto Leguízamo.	79
Figura 20 Registro final del procesamiento realizado en Drone2Map para el caso del casco urbano de Puerto Leguízamo.....	80
Figura 21 Información raster de la ortofoto generada para el casco urbano de Puerto Leguízamo.	81
Figura 22 Producto cartográfico 2D: Ortofoto casco urbano Puerto Leguízamo.	81
Figura 23 Información raster del modelo digital del terreno generado para el casco urbano de Puerto Leguízamo.	82
Figura 24 Producto cartográfico 2D: modelo digital del terreno generado para el casco urbano de Puerto Leguízamo.....	83
Figura 25 Producto cartográfico 3D: malla texturizada 3D visualizada en Scene Viewer, Esri.	84
Figura 26 Producto cartográfico 3D: Escenas 360 grados del casco urbano de Puerto Leguízamo, visualizadas en Panoraven.....	84
Figura 27 Producto cartográfico 3D: Escenas 360 grados del casco urbano de Puerto Leguízamo, visualizadas en Panoraven.....	85
Figura 28 Detalles obtenidos en el informe de procesamiento donde se evidencia los valores obtenidos para cada uno de los puntos de control del terreno y el valor RMS final.....	89
Figura 29 Conflictos de uso del suelo y cruces con rondas hídricas/humedales urbanos en el casco urbano Puerto Leguízamo.	92
Figura 30 Desarrollo urbano: crecimiento 2004–2018–2025 y zonas de expansión en el casco urbano de Puerto Leguízamo.....	94
Figura 31 Delimitación de elementos de interés patrimonial en el casco urbano de Puerto Leguízamo.	95
Figura 32 Delimitación de espacio público y equipamientos recreativos con red vial, malla predial y perímetro urbano Puerto Leguízamo.....	97
Figura 33 Estructura urbana 2025: barrios y manzanas con nomenclatura actualizada zona urbana Puerto Leguízamo.....	98
Figura 34 Sombreado del relieve (hillshade) derivado del DTM del casco urbano Puerto Leguízamo.	100
Figura 35 Pendiente del casco urbano Puerto Leguízamo derivada del DTM.....	102

Figura 36 Elementos geomorfológicos del entorno urbano y su relación con el relieve local casco urbano Puerto Leguízamo.	104
Figura 37 Mapa de Zonas Históricamente Inundadas en el Casco Urbano de Puerto Leguízamo.	105
Figura 38 Delimitación de cuencas y subcuencas asociadas al casco urbano Puerto Leguízamo.	106
Figura 39 Modelo Digital del Terreno (DTM) de 15 centímetros de resolución espacial elaborado a partir del levantamiento fotogramétrico con DRON.	108
Figura 40 Calado de lámina de agua (m) obtenido mediante modelación hidráulica 2D en Iber para la cuenca del casco urbano.	109
Figura 41 Zonificación de amenaza por inundación a escala 1:5.000 para el suelo urbano del municipio de Puerto Leguízamo.	110
Figura 42 Viviendas expuestas a amenaza por inundación fluvial y pluvial en el casco urbano de Puerto Leguízamo.	111
Figura 43 Áreas en Condición de Riesgo por Inundación Fluvial y Pluvial en el Suelo Urbano del Municipio de Puerto Leguízamo.	113
Figura 44 Medición de distancias (horizontales y verticales) en Scene Viewer, útil como estrategia para decisiones gubernamentales.	117
Figura 45 Medición de áreas en Scene Viewer, útil como estrategia para decisiones gubernamentales.	117
Figura 46 Fotografía 360° casco urbano de Puerto Leguízamo, visualizada en Panoraven	118

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección).
DTM	Digital Terrain Model (Modelo Digital del Terreno).
GCP	Ground Control Point (Punto de Control Terrestre).
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite).
GSD	Ground Sampling Distance (Distancia de Muestreo del Terreno).
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional.
PBOT	Plan Básico de Ordenamiento Territorial.
RMSE	Root Mean Square Error (Error Cuadrático Medio).
SIG	Sistema de Información Geográfica.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado).

Resumen

Esta investigación abordó la capacidad de la fotogrametría UAV para generar productos cartográficos de alta precisión y asegurar su empleabilidad en el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo por inundación en el suelo urbano de Puerto Leguísimo (Putumayo). Se aplicó una metodología integrada que incorporó puntos de control terrestre (GCP), ajuste fotogramétrico y generación de productos en ArcGIS Drone2Map, complementada con análisis SIG para la producción de cartografía temática dirigida al PBOT y al componente de inundación.

El expediente técnico del procesamiento documentó la producción de ortofoto verdadera, DTM y malla 3D texturizada, con GSD = 0,029 m y referencia espacial MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional / VCS EGM96, garantizando coherencia geodésica para integración en entornos SIG institucionales. La calidad geométrica se respaldó mediante métricas del control, con RMSE en GCP de 0,016 m (X), 0,018 m (Y) y 0,016 m (Z) y residuales por punto, aportando trazabilidad cuantitativa del anclaje posicional del bloque fotogramétrico.

Con base en estos insumos se elaboraron productos para diagnóstico urbano y para inundación, incluyendo derivados del DTM, resultados hidráulicos y síntesis de amenaza, exposición y condición de riesgo. Se concluye que la empleabilidad se incrementa cuando los productos se entregan con expediente verificable y se complementan con estrategias de apropiación orientadas a usuarios institucionales, como escenas 3D consultables en Scene Viewer y evidencia visual 360° para socialización y verificación contextual.

Palabras clave: Fotogrametría UAV, Modelo Digital del Terreno (DTM), Plan Básico de Ordenamiento territorial (PBOT), Ortofoto verdadera, Puntos de control terrestre (GCP).

Abstract

This research assessed the capability of UAV photogrammetry to generate high-precision cartographic products and to ensure their applicability for land-use planning and flood risk management in the urban area of Puerto Leguízamo (Putumayo). An integrated methodology was implemented, incorporating ground control points (GCPs), photogrammetric adjustment, and product generation using ArcGIS Drone2Map, complemented by GIS-based analyses for the development of thematic cartography supporting the Basic Plan of Territorial Planning (PBOT) and the flood risk component.

The technical processing report documented the production of a true orthophoto, a Digital Terrain Model (DTM), and a textured 3D mesh, with a ground sampling distance (GSD) of 0.029 m and a MAGNA-SIRGAS 2018 National Origin / VCS EGM96 spatial reference system, ensuring geodetic consistency for integration into institutional GIS environments. Geometric quality was supported by control metrics, with GCP RMSE values of 0.016 m (X), 0.018 m (Y), and 0.016 m (Z), along with point-wise residuals, providing quantitative traceability of the photogrammetric block's positional accuracy.

Based on these inputs, products were developed for urban diagnostics and flood assessment, including DTM-derived products, hydraulic modeling results, and integrated analyses of hazard, exposure, and risk conditions. It is concluded that usability increases when products are delivered with verifiable technical documentation and complemented by adoption strategies tailored to institutional users, such as 3D scenes accessible through Scene Viewer and 360° visual evidence for dissemination and contextual validation.

Keywords: UAV photogrammetry; Digital Terrain Model (DTM); Land-use planning (PBOT); True orthophoto; Ground control points (GCPs).

Introducción

El ordenamiento territorial en Colombia requiere insumos técnicos y cartográficos que permitan sustentar con precisión, decisiones asociadas a usos del suelo, localización de infraestructuras, delimitación de áreas de expansión y definición de áreas con restricciones por amenazas y riesgos. En este marco, los instrumentos de planificación municipal —como los Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (PBOT)— dependen de información espacial que sea consistente, verificable e interoperable, de modo que pueda integrarse en las fases de diagnóstico, la formulación y el seguimiento. En el caso del municipio de Puerto Leguízamo ubicado en el departamento del Putumayo, este requerimiento adquiere mayor relevancia por tratarse de un municipio fronterizo con condiciones de acceso complejas, alta influencia hidrológica y extensas coberturas naturales, lo que históricamente ha dificultado la recolección de información precisa y su uso sistemático en la toma de decisiones públicas.

El municipio presenta desafíos que convergen en la necesidad de fortalecer su base geoespacial: amenaza recurrente por inundaciones, conectividad vial inexistente o muy limitada, dispersión poblacional, demandas de planificación de infraestructura, requerimientos de actualización catastral y, en general, la necesidad de orientar un uso del suelo compatible con la sostenibilidad territorial. No obstante, la cartografía disponible ha presentado vacíos y limitaciones, asociados a baja actualización, deficiencias en resolución y precisión, y ausencia de estructuración en formatos digitales que faciliten su integración y análisis en Sistemas de Información Geográfica (SIG). En consecuencia, se restringe la capacidad institucional para elaborar diagnósticos detallados y para sustentar técnicamente decisiones del PBOT en proceso de actualización, especialmente en áreas urbanas y en centros poblados con dinámicas propias de ocupación y exposición a amenazas.

Ante este escenario, la fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV) constituye una alternativa eficiente para generar productos cartográficos de muy alta resolución, particularmente cuando se complementa con puntos de control terrestre (GCP) medidos con técnicas GNSS. Este enfoque permite producir ortofotos y modelos digitales con detalle suficiente para apoyar múltiples análisis: desde la identificación de elementos urbanos, trazados viales y patrones de ocupación, hasta la caracterización del terreno para evaluar condiciones asociadas a amenaza por inundación. Adicionalmente, la incorporación de modelos tridimensionales y escenas

360 grados amplía la capacidad de visualización, medición y comunicación técnica, lo cual resulta pertinente para fortalecer la articulación entre los equipos técnicos y los tomadores de decisión.

En este contexto, el presente trabajo se orienta a aportar una base técnica para la actualización del PBOT de Puerto Leguízamo, mediante la generación y análisis de productos cartográficos derivados de fotogrametría UAV de alta resolución, con soporte en control terrestre. Se destaca que la intervención no se limita al casco urbano: además, el levantamiento se extendió a ocho centros poblados del municipio —Piñuña Negro, Nueva Paya, Puerto Ospina, Puerto Nariño, Sensella, Yurilla, Mecaya y La Tagua— aplicando el mismo protocolo de planeación, adquisición, control y procesamiento, con el fin de asegurar consistencia metodológica y comparabilidad de productos en las diferentes unidades territoriales evaluadas durante el presente estudio. De este modo, la contribución del estudio se plantea tanto en términos técnicos evaluando parámetros como la calidad y disponibilidad de productos, así como institucionales planteando mecanismos para su incorporación efectiva en procesos de planeación.

De acuerdo con lo anterior, el problema de investigación se centra en la brecha existente entre la necesidad de información geoespacial precisa para la planificación territorial y la limitada disponibilidad de cartografía con calidad métrica en el municipio. En consecuencia, la pregunta de investigación es: ¿cómo generar productos cartográficos de alta precisión a partir de fotogrametría con dron y garantizar su empleabilidad en los procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo en el municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo?

En coherencia con esta pregunta, el objetivo general consiste en generar productos cartográficos de alta resolución mediante fotogrametría con dron, para analizar y fortalecer su potencial en el ordenamiento territorial en el municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo. Para ello, se plantea: planificar y ejecutar la adquisición de datos fotogramétricos y el levantamiento de control terrestre; procesar y generar productos cartográficos y tridimensionales, verificando su calidad mediante procedimientos de control de precisión; analizar su utilidad en escenarios concretos del ordenamiento territorial; y proponer estrategias de apropiación institucional que favorezcan su uso sostenido por las dependencias municipales.

La justificación del estudio se fundamenta en que la disponibilidad de cartografía de alta precisión incide directamente en la calidad de los diagnósticos territoriales y, por ende, en la consistencia técnica de las decisiones incorporadas en el PBOT. En particular, contar con ortofotos y modelos digitales actualizados fortalece la identificación de áreas expuestas a amenazas y riesgos,

apoya la priorización de intervenciones y contribuye a mejorar la planificación de obras e infraestructura. Asimismo, la generación de productos y su integración en plataformas de consulta como visores y escenas 3D favorece el uso institucional, al reducir barreras técnicas para el análisis y la comunicación entre actores. En síntesis, el trabajo se justifica por su aporte a la toma de decisiones basada en evidencia, al sustituir la dependencia de insumos desactualizados por productos con mayor resolución y trazabilidad técnica, orientados a necesidades reales de la administración municipal.

En consecuencia, se generaron como entregables principales la ortofoto verdadera (ortomosaico) y el modelo digital del terreno (MDT/DTM), complementados con una malla 3D texturizada y la construcción de escenas 3D y visores 360 grados orientadas a la visualización y medición del entorno, para consulta y análisis por parte de dependencias municipales. A partir de estos insumos, el análisis de empleabilidad se estructura en tres líneas de aplicación: gestión del riesgo, con énfasis en inundación; expansión urbana y ocupación, como soporte al diagnóstico y delimitación de áreas de crecimiento; y apoyo a decisiones gubernamentales, mediante herramientas de visualización y medición que faciliten la incorporación de evidencia espacial en procesos de planeación y priorización de intervenciones.

1 Planteamiento del problema

El municipio de Puerto Leguísimo, ubicado en el extremo sur del departamento del Putumayo y en zona de frontera con Perú y Ecuador, presenta una relevancia estratégica desde el punto de vista geopolítico y ambiental. Con una extensión aproximada de 10.900 km², siendo el municipio más extenso del departamento y una configuración marcada por extensas áreas de cobertura boscosa, presencia de grandes cuerpos de agua y asentamientos humanos dispersos, el municipio enfrenta condiciones que dificultan notoriamente la planificación, el ordenamiento y la gestión integral de su territorio. Estas particularidades inciden directamente en la necesidad de contar con información cartográfica precisa y actualizada que permita sustentar decisiones públicas en materia de uso del suelo, localización de infraestructuras y gestión del riesgo.

En este contexto, uno de los principales desafíos del municipio está asociado a la amenaza recurrente por inundación, derivada de su estrecha relación con los ríos Putumayo y Caquetá, así como de la dinámica hidrológica propia de la región amazónica. A ello se suman problemáticas relacionadas con la conectividad vial limitada, la expansión urbana no planificada, la necesidad de orientar proyectos de infraestructura y los requerimientos de actualización catastral. Estas condiciones demandan insumos espaciales de alta resolución que permitan caracterizar el territorio con suficiente nivel de detalle, particularmente en el casco urbano y en los centros poblados, donde se concentran procesos de ocupación y exposición a amenazas.

No obstante, la información cartográfica disponible para Puerto Leguísimo ha presentado históricamente vacíos significativos. En muchos casos, los productos existentes se encuentran desactualizados, con resoluciones insuficientes y deficiencias en precisión posicional, o no se encuentran estructurados en formatos digitales interoperables que faciliten su integración en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Adicionalmente, parte de la cartografía oficial no se encuentra disponible en capas vectoriales o ráster adecuadamente organizadas, lo que limita su uso para análisis espaciales detallados y para la formulación de escenarios de planificación. Como resultado, las entidades municipales enfrentan restricciones para sustentar técnicamente decisiones del ordenamiento territorial, apoyándose en insumos que no siempre reflejan la realidad actual del territorio.

Esta situación adquiere especial relevancia en el marco de la actualización del PBOT del municipio, proceso que exige información confiable para integrar de manera coherente los

diferentes componentes del ordenamiento, tales como la gestión del riesgo de desastres, la delimitación de áreas de expansión urbana, la planificación de infraestructuras y el soporte a procesos catastrales. La ausencia de productos cartográficos de alta resolución y calidad métrica dificulta la elaboración de diagnósticos precisos, la delimitación de zonas con restricciones de uso y la evaluación de alternativas de intervención territorial, afectando la consistencia técnica del instrumento de planificación.

Frente a estas limitaciones, el uso de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados, complementada con puntos de control terrestre medidos mediante técnicas GNSS, surge como una alternativa viable para suplir los vacíos existentes. Este enfoque permite generar ortofotos verdaderas, modelos digitales del terreno y productos tridimensionales con un nivel de detalle superior al de la cartografía convencional, facilitando análisis espaciales a escala local y urbana. Asimismo, la integración de estos productos en escenas 3D amplía su potencial de uso, al permitir mediciones, visualización y comunicación técnica accesible para diferentes dependencias municipales.

Sin embargo, el problema no se limita únicamente a la generación técnica de productos cartográficos. En el ámbito institucional, persiste una brecha entre la producción de información geoespacial y su empleabilidad efectiva en los procesos de toma de decisiones. En muchos casos, los insumos generados mediante tecnologías innovadoras no se incorporan de manera sistemática en los instrumentos de planificación, o su uso se restringe a consultas puntuales, sin consolidarse como una base técnica permanente para el ordenamiento territorial. Esta falta de apropiación limita el impacto de las inversiones realizadas en levantamiento y procesamiento de datos y reduce el potencial de la cartografía de alta resolución como herramienta estratégica de gestión pública.

En consecuencia, el problema de investigación se centra en la necesidad de articular la generación de productos cartográficos de alta precisión con su uso efectivo en los procesos de ordenamiento territorial del municipio de Puerto Leguízamo, particularmente en el contexto de actualización del PBOT. De manera específica, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo generar productos cartográficos de alta precisión a partir de fotogrametría con dron y garantizar su empleabilidad en los procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo en el municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo?

Este planteamiento orienta el desarrollo del presente trabajo hacia una propuesta que no solo aborda los aspectos técnicos de adquisición, procesamiento y control de calidad de la información fotogramétrica, sino que también analiza su aplicabilidad práctica en distintos componentes del ordenamiento territorial, tales como la gestión del riesgo por inundación, la expansión urbana y el soporte a decisiones gubernamentales. De esta manera, se busca contribuir a la consolidación de una base cartográfica confiable que fortalezca la toma de decisiones y la planificación territorial a escala municipal.

2 Justificación

La planificación y gestión del territorio requieren información cartográfica precisa, actualizada y técnicamente confiable que permita sustentar decisiones públicas en contextos cada vez más complejos. En municipios con características ambientales, sociales y geográficas particulares, como Puerto Leguízamo, esta necesidad se intensifica debido a la presencia de amenazas naturales recurrentes, dinámicas de ocupación heterogéneas y limitaciones históricas en el acceso y actualización de información espacial. En este escenario, resulta pertinente profundizar en metodologías que permitan fortalecer la base cartográfica municipal y evaluar su aplicabilidad real en los instrumentos de ordenamiento territorial.

La selección del presente tema se justifica, en primer lugar, por la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Puerto Leguízamo, proceso que demanda insumos espaciales de alta resolución para integrar de manera coherente sus diferentes componentes. La formulación de diagnósticos territoriales, la delimitación de áreas con restricciones de uso, la identificación de zonas de expansión urbana y la incorporación del componente de gestión del riesgo dependen, en gran medida, de la calidad y actualidad de la cartografía disponible. Sin embargo, en el municipio persisten vacíos asociados a productos cartográficos desactualizados, de baja resolución o con limitaciones de precisión, lo cual restringe la capacidad institucional para tomar decisiones fundamentadas en evidencia espacial.

Desde una perspectiva técnica, la fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV), complementada con puntos de control terrestre medidos mediante técnicas GNSS, se consolida como una alternativa eficiente y flexible frente a los métodos tradicionales de levantamiento cartográfico. Esta tecnología permite generar ortofotos verdaderas, modelos digitales del terreno y productos tridimensionales con un nivel de detalle acorde a las escalas requeridas en la planificación urbana y local. En contextos como el de Puerto Leguízamo, caracterizado por extensiones amplias, cobertura vegetal predominante y restricciones de acceso, el uso de UAV reduce costos operativos, optimiza tiempos de adquisición y facilita la actualización periódica de la información territorial. Por tanto, resulta relevante analizar y documentar su aplicación práctica en un municipio amazónico y de frontera.

No obstante, la justificación del estudio trasciende la generación de productos cartográficos como resultado técnico aislado. Un aspecto central que motiva el desarrollo del trabajo es la

empleabilidad efectiva de los insumos generados en los procesos de ordenamiento territorial. En múltiples experiencias institucionales, la información geoespacial producida mediante tecnologías avanzadas no se incorpora de forma sistemática en los instrumentos de planificación, ya sea por barreras técnicas, ausencia de mecanismos de acceso, o limitada apropiación por parte de las dependencias municipales. En este sentido, el presente trabajo busca aportar no solo cartografía de alta resolución, sino también herramientas de visualización y consulta, como escenas 3D y visores 360 grados, que faciliten el análisis, la medición y la comunicación técnica, promoviendo su uso transversal en diferentes ámbitos de la gestión pública.

La pertinencia del estudio se refuerza al considerar que los productos generados pueden apoyar diversos casos de uso estratégicos del PBOT en actualización. En particular, los modelos digitales del terreno y las ortofotos de alta resolución constituyen insumos clave para la gestión del riesgo por inundación, al permitir una mejor caracterización de la topografía y de las áreas potencialmente expuestas. Asimismo, estos productos facilitan el análisis de la expansión urbana y de los patrones de ocupación del suelo, aportando evidencia para la delimitación de áreas de crecimiento y la evaluación de su compatibilidad con restricciones ambientales y de riesgo. De manera complementaria, las escenas tridimensionales y los visores fortalecen los procesos de toma de decisiones gubernamentales, al ofrecer herramientas accesibles para la visualización del territorio y el soporte técnico a la priorización de intervenciones.

Desde el punto de vista académico y científico, el trabajo aporta al campo de los sistemas de información geográfica y las geociencias aplicadas al documentar una experiencia de generación y uso de cartografía de alta resolución en un contexto amazónico, el cual presenta condiciones ambientales y operativas poco abordadas en la literatura nacional. La sistematización del proceso de adquisición, procesamiento y control de calidad de los productos fotogramétricos constituye un aporte metodológico que puede servir como referencia para investigaciones futuras y para proyectos institucionales en territorios con características similares, contribuyendo a la consolidación de conocimiento aplicado en el uso de UAV para el ordenamiento territorial.

Finalmente, la investigación se justifica por su aporte institucional y social, en la medida en que los productos generados se orientan a fortalecer la capacidad técnica de la administración municipal y de sus dependencias. Al disponer de información cartográfica actualizada, interoperable y de fácil consulta, se favorece una toma de decisiones basada en evidencia espacial, se reduce la dependencia de insumos obsoletos y se promueve una gestión territorial más

transparente y eficiente. En síntesis, el estudio se justifica por su contribución integral: técnica, al generar productos cartográficos de alta precisión; científica, al documentar una metodología aplicada en un contexto complejo; e institucional, al impulsar el uso efectivo de la información geoespacial como herramienta estratégica para el ordenamiento territorial de Puerto Leguízamo.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Generar productos cartográficos de alta resolución mediante fotogrametría con dron, apoyados en puntos de control terrestre, para analizar y fortalecer su potencial en el ordenamiento territorial en el municipio de Puerto Leguízamo, Putumayo.

3.2 Objetivos específicos

- Planificar y ejecutar la adquisición de datos fotogramétricos mediante vuelos de dron y levantamiento de puntos de control terrestre, garantizando la cobertura, resolución y precisión requeridas para la producción cartográfica.
- Procesar y generar productos cartográficos de alta precisión, como ortomosaicos, modelos digitales del terreno, curvas de nivel, tomas 360° y escenas 3D, validando su calidad mediante control de precisión y estándares técnicos.
- Analizar la utilidad y aplicabilidad de los productos cartográficos en escenarios de ordenamiento territorial, incluyendo planificación de infraestructura, gestión del riesgo y actualización catastral.
- Proponer estrategias para la apropiación y uso efectivo de los productos cartográficos por parte de autoridades municipales y entidades de planeación, fomentando su incorporación en la toma de decisiones.

4 Marco teórico

El presente marco teórico integra de manera articulada los fundamentos conceptuales, metodológicos y normativos que sustentan la generación de productos cartográficos de alta resolución mediante fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV) y su posterior empleabilidad en procesos de ordenamiento territorial. En este apartado se recopilan y analizan los principales aportes teóricos relacionados con la fotogrametría digital, los sistemas UAV, el control geométrico y la evaluación de la calidad de los datos geoespaciales, así como los enfoques contemporáneos sobre el uso de esta información en la planificación y gestión del territorio. De forma complementaria, se incorporan referentes normativos y técnicos de alcance internacional y nacional que orientan la producción, documentación, validación y uso de información cartográfica, garantizando su consistencia espacial, trazabilidad y aptitud para la toma de decisiones públicas. La integración de estos elementos permite establecer el sustento teórico del enfoque metodológico adoptado, contextualizar los resultados obtenidos y delimitar el alcance de la investigación en el marco de la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, con especial énfasis en la gestión del riesgo, la ocupación del suelo y el soporte técnico a decisiones institucionales.

En conjunto, la literatura revisada evidencia que la fotogrametría UAV, apoyada en control terrestre GNSS y estándares internacionales de calidad, constituye una herramienta sólida para la generación de cartografía de alta resolución aplicada al ordenamiento territorial. La integración de ortomosaicos, DTM y productos tridimensionales permite abordar de manera articulada la gestión del riesgo por inundación, la expansión urbana y el soporte a decisiones gubernamentales. Este marco teórico sustenta las decisiones metodológicas del presente estudio y justifica la pertinencia de evaluar la empleabilidad de los productos generados en el contexto del municipio de Puerto Leguízamo.

4.1 Antecedentes

En los últimos años, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se han consolidado como una herramienta clave para la generación de productos cartográficos de alta precisión, especialmente en la elaboración de ortomosaicos y modelos digitales de elevación que apoyan la planificación territorial y la gestión del riesgo. Diversas investigaciones han demostrado que la

combinación de vuelos UAV con técnicas de procesamiento avanzadas y la incorporación de puntos de control terrestre (GCP) permite alcanzar niveles de exactitud comparables a los métodos fotogramétricos tradicionales, pero con menor costo y mayor flexibilidad operativa.

Escalante, Cáceres y Porras (2016) en su trabajo enuncian como objetivo de su estudio el realizar una revisión metodológica sobre las características de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) aplicados a la fotogrametría aérea y sobre las estrategias de procesamiento que permiten derivar ortomosaicos y modelos digitales de elevación (DEM) a partir de imágenes de muy alta resolución. Los autores desarrollan un análisis comparativo entre la fotogrametría tradicional y los enfoques más recientes basados en algoritmos de visión por computador, destacando la reconstrucción de nubes de puntos densas y la generación de modelos tridimensionales mediante técnicas Structure from Motion (SfM). La contribución central consiste en presentar un flujo completo de producción cartográfica, que inicia con la captura de datos (donde se abordan aspectos como la elección de plataformas y sensores, la planificación del vuelo y la adquisición de imágenes), continúa con la calibración geométrica de las cámaras, la reconstrucción de nubes de puntos mediante algoritmos de visión por computador y su conversión en superficies continuas por triangulación y rasterización, y culmina con la ortorrectificación y el mosaico de las imágenes. La investigación evidencia que la integración de sensores ligeros de bajo costo en UAV, junto con el avance de software especializado, permite obtener ortomosaicos y modelos digitales con niveles de precisión confiables, comparables a los logrados en vuelos fotogramétricos convencionales de mayor escala y costo. Asimismo, los autores subrayan que las técnicas contemporáneas de visión por computador se ajustan mejor a las condiciones propias de los datos UAV, caracterizados por variaciones de altura, geometría convergente y texturas heterogéneas, superando así limitaciones del procesamiento fotogramétrico tradicional. Se concluye que el progreso paralelo de las plataformas UAV (en estabilidad, control y calidad de sensores) y de los algoritmos para grandes volúmenes de datos (emparejamiento robusto, reconstrucción densa e integración para ortofotos verdaderas) continuará mejorando la calidad métrica de los productos cartográficos, siempre que se acompañe de protocolos rigurosos de captura, control y distribución adecuada de puntos de control terrestre (GCP) que garanticen la exactitud geométrica.

Complementariamente Robayo, et al. (2015) mediante su estudio demostraron la viabilidad de generar cartografía a escalas grandes en Ecuador mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), referida al marco geodésico SIRGAS, integrando técnicas fotogramétricas y

control terrestre de alta precisión. La metodología se estructuró en cuatro fases: planificación del levantamiento, ejecución del vuelo, procesamiento fotogramétrico y validación de los resultados. En la etapa de planificación se definieron parámetros de vuelo como la resolución espacial, la altura y el traslape de las imágenes; posteriormente, se empleó un UAV de ala fija (Trimble UX5) para la adquisición de datos. El procesamiento incluyó las orientaciones interna, relativa y absoluta, primero mediante un ajuste automático y luego con la incorporación de puntos de control terrestre (GCP) obtenidos con GNSS y nivelación de precisión, lo que permitió refinar la georreferenciación de los productos. La validación se realizó con puntos de chequeo independientes, evaluando la exactitud posicional en coordenadas horizontales y verticales, así como la fidelidad geométrica de los objetos representados en ortomosaicos y modelos digitales de superficie (MDS). Los resultados mostraron que, con una adecuada densidad y distribución de GCP, es posible alcanzar precisiones submétricas, e incluso centimétricas, compatibles con los estándares cartográficos requeridos para escalas grandes, asegurando además la consistencia con el marco SIRGAS. Los autores concluyen que los UAV representan una alternativa eficiente y precisa para la elaboración de cartografía oficial, siempre que se implementen protocolos rigurosos de captura y control de calidad.

Para hablar de un caso puntual con aplicaciones se destaca el estudio de Romero-Rodríguez y Mejía Fals (2017). El objetivo de esta investigación fue elaborar la cartografía de uso actual del suelo urbano en el municipio de Cota, Cundinamarca, empleando un vehículo aéreo no tripulado (UAV) como herramienta principal para la captura de información territorial, en el marco del proceso de actualización del Plan de Ordenamiento Territorial. La metodología incluyó la planificación del vuelo con un dron de ala multirrotor, la captura de imágenes de alta resolución y el posterior procesamiento para la generación de ortomosaicos georreferenciados, complementados con trabajo de campo y validación. Los autores resaltan que, en comparación con métodos tradicionales de levantamiento cartográfico, el uso de UAV permite obtener productos actualizados con mayor rapidez, reducción de costos y una precisión suficiente para los requerimientos del ordenamiento territorial municipal. Los resultados evidenciaron que los ortomosaicos derivados del dron facilitaron la delimitación detallada de las diferentes coberturas de uso urbano, constituyéndose en un insumo confiable para la planeación y gestión territorial. La conclusión principal es que la tecnología UAV se consolida como una alternativa eficiente y práctica para la cartografía municipal, siempre que los vuelos se planifiquen adecuadamente y se integren en procesos oficiales de planeación.

En el departamento del Putumayo, la evidencia académica indexada y revisada se concentra principalmente en Mocoa y en el evento extremo de 2017, lo cual ofrece un marco regional robusto para contrastar el papel de insumos de alta resolución en análisis de amenazas hidro-geomorfológicas. Por ejemplo, Cheng et al. (2018) caracterizan el evento como un desastre compuesto por deslizamientos, flujos de detritos y avenidas torrenciales, apoyándose en interpretación detallada con imágenes de alta resolución y análisis de precipitación y condiciones antecedente (incluyendo el efecto de sequías previas asociadas a El Niño), subrayando la importancia de considerar factores hidroclimáticos e interacciones cuenca-evento en análisis de amenaza. A su vez, García-Delgado, Machuca y Medina (2019) integran imágenes de dron y satélite de alta resolución, inventarios de deslizamientos e índices geomorfológicos para describir la dinámica y los controles geomorfológicos del flujo de detritos, evidenciando cómo la información de muy alta resolución mejora la comprensión espacial del fenómeno en el piedemonte andino-amazónico. En la misma línea, Prada-Sarmiento et al. (2019) profundizan en el análisis de la secuencia de movimientos en masa y comparan sus características con los mapas de amenaza existentes, señalando brechas de representación y reforzando la necesidad de insumos espaciales consistentes para gestión del riesgo y planificación territorial. Complementariamente, Martín Calvo et al. (2020) analizan el desastre de Mocoa desde datos de precipitación y características generales del territorio, aportando evidencia sobre condiciones detonantes y recomendaciones para mitigación y preparación ante emergencias. Desde una perspectiva institucional y de gestión del riesgo, Vásquez Santamaría, Gómez Vélez y Martínez Hincapié (2018) discuten la avenida torrencial de Mocoa como un caso que reposiciona la gestión del riesgo en la agenda pública, lo cual resulta pertinente para fundamentar el componente de “empleabilidad” y la necesidad de traducir evidencia técnica en decisiones municipales.

Además de estos antecedentes centrados en amenaza y desastre, el Putumayo cuenta con estudios académicos aplicados que, aunque no necesariamente se enfocan en fotogrametría, ayudan a contextualizar variables territoriales e hídricas relevantes. Por ejemplo, Palacios Bucheli y Bokelmann (2017) estudian sistemas agroforestales en el Valle de Sibundoy (Putumayo) y su relación con servicios ecosistémicos y medios de vida, aportando un marco sobre transformaciones de uso del suelo y sostenibilidad territorial en el departamento. En el componente hídrico, Agudelo et al. (2023) reportan análisis fisicoquímicos del río Mulato en Mocoa (Putumayo) y calculan un índice de calidad del agua, evidenciando presiones por vertimientos y la necesidad de información

actualizada para gestión ambiental; este tipo de estudios refuerza la relevancia de productos cartográficos y de monitoreo en cuencas con alta sensibilidad socioambiental.

Para Puerto Leguízamo, la literatura indexada con DOI es escasa, y los antecedentes más directos se encuentran principalmente en repositorios académicos institucionales, lo cual sugiere un vacío regional en la producción de cartografía UAV de alta precisión orientada a PBOT y gestión del riesgo a escala urbana. En particular, se identifican estudios en repositorio UNAD que desarrollan análisis del riesgo por inundación en Puerto Leguízamo mediante integración de variables y herramientas SIG, produciendo categorías cualitativas de riesgo como insumo de diagnóstico territorial; estos antecedentes permiten contrastar que, en el municipio, los enfoques disponibles han dependido mayormente de información secundaria y modelación geográfica, más que de insumos propios de muy alta resolución derivados de fotogrametría UAV (Ariza Vides et al., 2025; Vásquez Durango, 2025). De manera similar, aparecen ejercicios institucionales en otros municipios del Putumayo: por ejemplo, trabajos en repositorio UNAD que identifican zonas de riesgo por inundación en Sibundoy con metodologías SIG y criterios multicriterio, además de estudios académicos sobre susceptibilidad/zonificación por inundación en el Valle de Sibundoy, lo que evidencia una tendencia regional hacia metodologías basadas en DEM e insumos disponibles, con limitada incorporación de productos UAV de precisión como insumo base (Tuquerres Imbachi et al., 2024). Asimismo, se identifican antecedentes aplicados en Puerto Asís orientados a identificación preventiva de amenaza por inundación mediante análisis multitemporal de imágenes satelitales y técnicas vectoriales SIG, ampliando el contraste regional y evidenciando que el abordaje de amenaza en el Putumayo ha priorizado insumos de mediana resolución y análisis multitemporales (Córdoba Nomelin, 2020).

En conjunto, los antecedentes revisados permiten sustentar la pertinencia del presente estudio en Puerto Leguízamo: por un lado, consolidan el soporte técnico de la fotogrametría UAV y la producción de ortofotos y modelos del terreno con flujos reproducibles y control de calidad; por otro, muestran que en Putumayo la literatura científica se concentra en Mocoa (por su evento catastrófico) y que en Puerto Leguízamo predominan estudios SIG con información secundaria, lo cual deja un margen de mejora para la generación de cartografía de alta precisión y su transferencia a instrumentos de ordenamiento.

De esta manera se permite comprender la importancia del presente estudio, ya que estos antecedentes, aportan una base sólida para la presente investigación en Puerto Leguízamo, ya que

muestran tanto los fundamentos técnicos como la viabilidad práctica de la fotogrametría con dron en la producción de insumos cartográficos. En conjunto, permiten sustentar que la integración de UAV, GCP y software especializado puede generar productos de alta resolución (ortofotos, DEM, DTM, curvas de nivel y escenas 3D) que fortalecen los procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo en contextos locales, así como muestra un caso aplicado en el contexto colombiano donde los UAV se convierten en una herramienta clave para la actualización de información espacial, fortaleciendo la toma de decisiones en ordenamiento territorial.

4.2 Referente Teórico

4.2.1 Fotogrametría digital: fundamentos, alcances y transición hacia UAV

La fotogrametría digital constituye uno de los pilares metodológicos de la cartografía moderna, al permitir la obtención de información geométrica y temática del territorio a partir de imágenes. Tradicionalmente, esta disciplina se desarrolló a partir de plataformas aéreas tripuladas y configuraciones fotogramétricas rígidas; sin embargo, la evolución de sensores digitales, sistemas de navegación y algoritmos de procesamiento ha ampliado significativamente su campo de aplicación. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) han emergido como una tecnología que ha redefinido los esquemas de adquisición de datos geoespaciales, particularmente a escalas locales y urbanas, esta transición se sustenta en la convergencia entre hardware asequible (plataformas y sensores) y desarrollos en visión por computador y geomática, lo que ha permitido generar productos de alta resolución y exactitud en escenarios operativos que antes requerían aeronaves tripuladas y presupuestos mayores (Colomina & Molina, 2014).

La principal contribución de los UAV a la fotogrametría radica en la posibilidad de capturar imágenes de muy alta resolución espacial con costos reducidos y alta flexibilidad operativa. Esta característica resulta especialmente relevante en territorios donde las condiciones de acceso, la extensión del área o las restricciones presupuestales limitan el uso de técnicas tradicionales. En el ámbito aplicado, revisiones recientes enfatizan que el valor de la fotogrametría UAV no reside únicamente en “tener imágenes”, sino en su capacidad para integrarse a flujos de cartografía, SIG y toma de decisiones, especialmente en contextos donde se requiere información actualizada para planificación y gestión del riesgo.

Investigaciones posteriores han consolidado estos hallazgos, demostrando que la fotogrametría UAV es técnicamente viable para aplicaciones de cartografía, topografía y análisis territorial, siempre que se adopten criterios rigurosos de planificación y procesamiento (Deliry & Avdan, 2021; Rabiú & Ahmad, 2023). Deliry y Avdan (2021) resaltan que, aunque la tecnología se ha expandido rápidamente, persiste una preocupación recurrente: la variabilidad en exactitud reportada entre estudios, lo cual obliga a evaluar sistemáticamente factores que condicionan la precisión antes de usar productos en problemas reales. En concordancia, Rabiú y Ahmad (2023) sintetizan que la calidad de productos (especialmente DEM/DTM) depende de múltiples parámetros de adquisición y procesamiento, y subrayan que la evaluación de precisión debe ser un paso explícito y no asumido. En este sentido, la literatura enfatiza que el uso de UAV no debe entenderse como una simplificación metodológica, sino como una técnica que exige un control cuidadoso de parámetros como altura de vuelo, traslape, geometría de adquisición y calidad de imagen.

4.2.2 Reconstrucción SfM-MVS y ajuste fotogramétrico

Un componente central del procesamiento fotogramétrico moderno es el uso de algoritmos *Structure from Motion (SfM)* y *Multi-View Stereo (MVS)*, que permiten reconstruir modelos tridimensionales y productos ortorrectificados a partir de múltiples imágenes con solape. Westoby et al. (2012) evidencian que la fotogrametría basada en Structure from Motion (SfM) permite reconstruir modelos tridimensionales densos a partir de imágenes superpuestas, incluso cuando estas no fueron adquiridas bajo configuraciones fotogramétricas clásicas, lo que habilita la generación de DEMs de alta resolución con costos relativamente bajos, incluso en escenarios complejos.

No obstante, la literatura especializada advierte que los resultados SfM pueden presentar variabilidad si no se controlan adecuadamente decisiones críticas del ajuste, como la auto-calibración, la ponderación entre observaciones y control, y la forma en que se minimizan errores de reproyección. James et al. (2017) muestran que la calidad del DEM puede ser sensible a parámetros de procesamiento poco discutidos en muchos estudios, y que decisiones inadecuadas pueden introducir artefactos sistemáticos y variabilidad espacial del error. Por ello, en estudios

aplicados, se vuelve indispensable documentar el flujo de ajuste y reportar métricas de calidad del bloque, evitando presentar los productos como “salidas automáticas” sin trazabilidad.

En la práctica, el ajuste de bloque es un punto crítico porque su estabilidad está condicionada por geometría del bloque, textura de la escena y control. Estudios recientes muestran que estrategias de georreferenciación y calidad de control influyen directamente en la reducción de RMSE y en la estabilidad de parámetros de cámara (Atik & Arkali, 2025; Wang et al., 2025). Esto fundamenta la inclusión explícita de control y validación en el diseño metodológico de tu proyecto.

En software orientado a flujos SIG, como Drone2Map utilizado durante el presente estudio, el ajuste de bloque se conceptualiza como la estimación de una transformación basada en relaciones internas entre imágenes superpuestas, modelo de cámara, control terrestre y DEM, y se enfatiza que tras el ajuste deben revisarse *tie points*, *GCP* y *checkpoints* para evaluar calidad. Esta perspectiva es relevante para trabajos de ordenamiento territorial porque sitúa la calidad como un atributo verificable del proceso, no como una presunción asociada al software.

4.2.3 Planificación de vuelos UAV y su influencia en la calidad de los productos

La calidad de los productos fotogramétricos derivados de UAV está estrechamente ligada a la planificación del vuelo. Parámetros como la altura de adquisición, el traslape longitudinal y transversal, la velocidad del dron y el patrón de vuelo influyen directamente en la densidad de puntos, la estabilidad del ajuste fotogramétrico y la calidad radiométrica del ortomosaico. Rabiou y Ahmad (2023) identifican el porcentaje de solape y la altura (que determina el GSD) como variables recurrentes que afectan la exactitud de DEM/DTM fotogramétricos, junto con la estrategia de georreferenciación y los parámetros de visión por computador empleados durante el procesamiento.

En entornos urbanos, donde existen estructuras verticales, sombras y variabilidad en la textura superficial, la planificación adquiere una relevancia adicional. Lemus-Romani et al. (2025) evaluaron múltiples configuraciones urbanas y evidenciaron que reducir altura incrementa detalle visual pero afecta eficiencia operativa (mayor número de imágenes y mayor tiempo de procesamiento), y que aumentar solapes de forma indiscriminada no garantiza mejoras proporcionales en el ortomosaico final. Desde el punto de vista aplicado, esto respalda que los parámetros de vuelo deben justificarse como un equilibrio entre: calidad geométrica, calidad visual

para interpretación urbana y restricciones operativas (batería, seguridad y tiempo). Quamar et al. (2023) señalan que una planificación inadecuada puede generar vacíos de información o errores sistemáticos que afectan la precisión final del producto. En consecuencia, la literatura recomienda diseñar vuelos que aseguren redundancia geométrica suficiente y minimicen los efectos de oclusión, especialmente cuando los productos están destinados a aplicaciones de planificación territorial.

Estos aspectos resultan directamente pertinentes para el presente estudio, en tanto la generación de cartografía de alta resolución en el casco urbano y centros poblados de Puerto Leguísimo requiere garantizar continuidad espacial y coherencia geométrica en áreas con dinámicas urbanas y ambientales complejas.

4.2.4 Control terrestre, georreferenciación y evaluación de la exactitud

La georreferenciación es el punto de transición entre una reconstrucción “relativa” (coherente internamente) y un producto “absoluto” (integrable en sistemas oficiales). En fotogrametría UAV, esto se logra mediante estrategias indirectas (GCP) o directas (GNSS/IMU a bordo). La documentación técnica de Drone2Map enfatiza que, aunque el ajuste puede producir una escena con fuerte precisión relativa, la exactitud absoluta depende de la precisión de las imágenes georreferenciadas; por ello, cuando se requiere mayor exactitud, la incorporación de control terrestre añade restricciones al ajuste y mejora la exactitud absoluta.

La incorporación de puntos de control terrestre (GCP) constituye uno de los factores más determinantes en la precisión de los productos fotogramétricos UAV ya que la literatura ilustra que los GCP no deben evaluarse solo por número, sino por distribución y calidad. James et al. (2017) demostraron que tanto la cantidad como la distribución de los GCP influyen directamente en el ajuste del bloque fotogramétrico, particularmente en la componente vertical de los modelos digitales del terreno.

Estudios posteriores han profundizado en esta relación. En un enfoque experimental Shylesh et al. (2023) y Zhong et al. (2025) evidencian que pocos GCP, pero con una distribución espacial adecuada —que combine puntos perimetrales e internos— mejora significativamente la exactitud horizontal y vertical de los productos, alcanzando RMSE similares a redes densas, reduciendo la propagación de errores sistemáticos. Atik y Arkali (2025) complementan estos

hallazgos al comparar distintos modelos de distribución de GCP, concluyendo que no solo el número de puntos es relevante, sino también su confiabilidad y localización estratégica.

La integración de técnicas GNSS-RTK ha permitido mejorar la precisión de los GCP y, en algunos casos, explorar esquemas de georreferenciación directa. Niu et al. (2024) señalan que los sistemas UAV con RTK integrado pueden alcanzar precisiones centimétricas, incluso sin GCP; no obstante, advierten que estos resultados dependen de condiciones operativas controladas y de una adecuada validación de los errores residuales. Sin embargo, la evidencia también indica que los mejores resultados se obtienen cuando se combinan estrategias: el RTK mejora la base de georreferenciación, pero el control terrestre y su distribución continúan siendo determinantes para estabilidad y reducción de sesgos.

En este marco, los estándares de la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2015, 2023) y la ISO 19157-1 (ISO, 2023) establecen lineamientos para describir y reportar la calidad de datos geoespaciales (exactitud posicional, completitud y consistencia), lo que facilita la evaluación de su aptitud de uso en contextos institucionales, catastrales y de planificación.

4.2.5 Productos fotogramétricos clave: ortofoto verdadera, DTM/DEM en gestión del riesgo por inundación

En la práctica del ordenamiento territorial, dos productos adquieren relevancia transversal: Ortofoto verdadera (para interpretación urbana, infraestructura, ocupación del suelo) y DTM/DEM (para análisis del relieve y sus derivados).

El software Drone2Map documenta que el reporte de procesamiento permite revisar el ajuste, la calibración de imágenes, el GSD medio y la calidad del control terrestre, ofreciendo trazabilidad de cómo se obtuvo la ortofoto y los modelos derivados. Además, el software explica que el DTM se deriva de la nube de puntos densa (producto DSM/point cloud) y que la densidad de la nube y la resolución del proyecto influyen en el nivel de detalle y el tiempo de procesamiento.

La literatura metodológica sobre DTM fotogramétrico con UAV destaca que la exactitud suele expresarse en función del GSD y que variables como planificación de vuelo, generación de nube densa y filtrado de terreno explican variaciones importantes. Jiménez-Jiménez et al. (2021) presentan rangos típicos de RMSE (en múltiplos del GSD) y enfatizan que el DTM puede alcanzar

alta precisión si se optimizan variables del proceso. Asimismo, estudios orientados a ingeniería con UAV de bajo costo evidencian que la elección de estrategia de georreferenciación puede modificar drásticamente el RMSE y que la incorporación de control es determinante cuando la georreferenciación directa no alcanza requerimientos.

La resolución espacial del DTM juega un papel crítico en la representación de la microtopografía, especialmente en entornos urbanos. Adesina et al. (2025) comparan DEM de 1 m (UAV) con DEM de 10 m y 30 m y reportan que el DEM UAV produce menores errores (RMSE) en predicción de niveles, mientras que DEM de baja resolución tienden a suavizar el terreno y sobreestimar zonas de riesgo, evidenciando que los modelos de alta resolución permiten identificar variaciones topográficas sutiles que influyen directamente en la delimitación de áreas inundables. Complementariamente, Annis et al. (2020) comparan un DEM UAV con un DEM LiDAR de referencia en una cadena hidrológico-hidráulica y concluyen que el DEM UAV puede desempeñarse consistentemente para simulaciones de extensión y profundidad a escala pequeña, con ventajas de costo/tiempo.

En estudios aplicados con drones de consumo, se ha demostrado que integrar GCP/estrategias indirectas mejora sustancialmente la exactitud respecto a georreferenciación directa sin correcciones diferenciales, y que el control es crítico para DEM/DTM en aplicaciones técnicas (Sohl & Mahmood, 2024). Esto es pertinente para garantizar que los productos sean defensables en ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

Estudios como los de Woo et al. (2024) proponen una metodología basada en imágenes UAV y SIG para calcular área y volumen inundado en zonas urbanas pequeñas, destacando que los productos 3D derivados de UAV aportan datos accionables para decisión y recuperación, más precisos que aproximaciones generalistas. En conjunto, esta evidencia sustenta el uso del DTM UAV como insumo para el PBOT en su componente de GRD, especialmente en etapas de diagnóstico territorial y delimitaciones preliminares, dejando claro que no sustituye modelaciones hidráulicas especializadas cuando estas sean requeridas por norma o por diseño de obra. Por otra parte, muestran cambios escalonados en simulaciones al variar resolución desde centímetros hasta metros, y destacan la importancia de capturar rasgos topográficos relevantes para extensión y profundidad de inundación. Ambos autores refuerzan esta afirmación, al demostrar que la precisión y resolución del DTM inciden significativamente en los resultados de la modelación de inundaciones a escala local.

Bassanelli et al. (2026) destacan, además, el potencial de estos modelos para fortalecer procesos locales de gestión del riesgo cuando se integran en enfoques participativos y de bajo costo.

Estos aportes sustentan el uso del DTM generado en el presente estudio como un insumo técnico clave para el componente de gestión del riesgo por inundación del PBOT, sin que ello implique la ejecución de modelaciones hidráulicas complejas que exceden el alcance del trabajo.

4.2.6 Fotogrametría UAV, catastro y ordenamiento territorial

La aplicación de la fotogrametría UAV en procesos de catastro y ordenamiento territorial ha sido ampliamente documentada en la literatura reciente. Ajayi y Oruma (2022) destacan la capacidad de los productos UAV para apoyar la cartografía catastral, facilitando la identificación física de predios y la actualización de información espacial.

Desde una perspectiva de política y visión sectorial, compilaciones sobre “Land Administration 2.0” sintetizan demandas crecientes por datos 3D, alta exactitud, menores costos e interoperabilidad, justificando la adopción de metodologías UAV cuando se articulan con estándares y repositorios institucionales (Koeva et al., 2022). Esto fundamenta el enlace entre productos UAV y gestión territorial sostenible.

En el contexto latinoamericano, Benavides Ramírez et al. (2024) resaltan el papel de los drones como herramientas estratégicas para el catastro multipropósito y la transparencia en la gestión territorial. Estudios aplicados en Colombia, como los de Romero-Rodríguez y Mejía Fals (2017) y Cortés Millán et al. (2023), muestran que los ortomosaicos UAV permiten una interpretación detallada del uso actual del suelo urbano, fortaleciendo los procesos de planificación municipal.

Desde una perspectiva conceptual, el ordenamiento territorial se entiende como un proceso integral que articula dimensiones sociales, económicas, ambientales y políticas para regular la ocupación del espacio (Massiris-Cabeza, 2002). En este sentido, la cartografía de alta resolución generada mediante UAV se convierte en un insumo transversal para la formulación de diagnósticos, la delimitación de áreas de expansión y la definición de restricciones por riesgo o protección ambiental.

4.2.7 Visualización 3D, interoperabilidad y apropiación institucional

La empleabilidad de los productos cartográficos no depende únicamente de su precisión métrica, sino también de su accesibilidad y capacidad de integración en entornos SIG. Quamar et al. (2023) señalan que la integración de UAV, SIG y tecnologías de visualización 3D mejora la comprensión del territorio y facilita la comunicación de información compleja a tomadores de decisión. La integración UAV-SIG puede fortalecer el proceso de decisión, pero también implica desafíos técnicos y regulatorios, por lo que la tecnología no debe entenderse de forma aislada sino como parte de un sistema socio-técnico de producción y uso de información.

Los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC), en particular 3D Tiles, proporcionan un marco abierto para la transmisión y representación eficiente de contenido geoespacial tridimensional a gran escala (mallas fotogramétricas, edificios 3D y nubes de puntos) mediante una estructura jerárquica de teselas, lo que favorece la interoperabilidad entre visores web y plataformas SIG sin depender de una solución propietaria específica (OGC, 2023). De forma complementaria, las normas ISO 19115-1 e ISO 19115-3 establecen, respectivamente, el modelo conceptual de metadatos para describir información y servicios geográficos, y su implementación en esquemas XML para validación e intercambio, lo cual facilita la identificación del recurso, su documentación, evaluación de aptitud de uso, acceso y reutilización en contextos institucionales (ISO, 2014, 2023). En este sentido, el uso de escenas 3D y geovisores constituye una estrategia clave para fortalecer la apropiación institucional de la información cartográfica, facilitando su incorporación sostenida en los procesos de ordenamiento territorial y toma de decisiones gubernamentales.

4.3 Referente Normativo

El marco normativo cumple dos funciones: (1) delimitar la legalidad y viabilidad de la operación UAV (adquisición de datos) y (2) asegurar la validez técnica e institucional de los productos cartográficos generados para su incorporación en procesos de planificación y gestión pública, particularmente el PBOT.

4.3.1 Ordenamiento Territorial

El ordenamiento territorial en Colombia se rige fundamentalmente por la Ley 388 de 1997, la cual define el ordenamiento del territorio como una función pública y establece que los municipios deben regular el uso, ocupación y transformación del suelo con base en criterios técnicos, ambientales y de prevención del riesgo. Esta ley señala como objetivo explícito la prevención de desastres en asentamientos humanos, así como la preservación del patrimonio ecológico y cultural, lo que implica que los instrumentos de ordenamiento territorial deben sustentarse en información cartográfica confiable, suficiente y actualizada.

En el caso de los Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (PBOT), la ley exige que las decisiones sobre clasificación del suelo, delimitación de áreas de protección y definición de sistemas estructurantes no sean producto de apreciaciones subjetivas, sino que estén respaldadas por insumos técnicos verificables. En este sentido, la cartografía de alta resolución, obtenida mediante tecnologías como la fotogrametría con UAV, se constituye en un soporte clave para el cumplimiento de los fines del ordenamiento territorial establecidos por la Ley 388 (Congreso de la República de Colombia, 1997).

Este marco legal se desarrolla y reglamenta a través del Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, el cual consolida las disposiciones relacionadas con la formulación, revisión y actualización de los instrumentos de ordenamiento territorial. El decreto refuerza la obligación de incorporar determinantes ambientales, análisis de riesgo y soporte cartográfico como parte integral de los componentes general, urbano y rural del PBOT (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

4.3.2 Gestión del riesgo de desastres y su integración obligatoria al PBOT

La Ley 1523 de 2012 adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y establece que la gestión del riesgo es un proceso social orientado al conocimiento y reducción del riesgo, así como al manejo de desastres, y que debe integrarse de manera transversal a la planificación del desarrollo territorial.

Esta norma es particularmente relevante para el presente estudio, ya que determina que los instrumentos de ordenamiento territorial deben incorporar análisis de amenaza y riesgo basados en

información técnica suficiente. Si bien la ley no obliga a que todos los municipios desarrollen modelaciones hidráulicas complejas en cada revisión del PBOT, sí exige que las decisiones territoriales se apoyen en insumos espaciales confiables, capaces de mejorar el conocimiento del territorio y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones (Congreso de la República de Colombia, 2012).

En este contexto, los modelos digitales del terreno (DTM) generados mediante fotogrametría UAV se alinean plenamente con el espíritu de la Ley 1523, al constituirse en insumos técnicos que permiten caracterizar la topografía local, identificar zonas bajas y apoyar diagnósticos preliminares de susceptibilidad frente a fenómenos como la inundación, sin sustituir los estudios hidrológicos e hidráulicos especializados que puedan requerirse en fases posteriores del proceso de planificación.

4.3.3 Cartografía oficial, referencia geodésica y especificaciones técnicas IGAC

La producción y uso de cartografía oficial en Colombia se encuentra bajo la rectoría del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), como autoridad cartográfica nacional. La Resolución 471 de 2020 establece las especificaciones técnicas mínimas que deben cumplir los productos de cartografía básica oficial, incluyendo ortoimágenes, modelos digitales de terreno y bases cartográficas, definiendo criterios de exactitud, escala, sistema de referencia y documentación técnica (IGAC, 2020).

Esta resolución ratifica al sistema MAGNA-SIRGAS como el marco de referencia geodésico oficial de Colombia y adopta el esquema de proyección con origen nacional, con el objetivo de garantizar continuidad cartográfica, interoperabilidad y compatibilidad entre productos generados por distintas entidades (IGAC, 2020).

De particular importancia para este estudio es que el IGAC reconoce explícitamente que las especificaciones técnicas no restringen el uso de una tecnología específica, sino que se orientan a asegurar que el producto final cumpla con criterios de calidad y trazabilidad, permitiendo la validación y eventual oficialización de productos generados por terceros, como aquellos obtenidos mediante fotogrametría UAV, siempre que cumplan los estándares establecidos. Este marco técnico se complementa con la Resolución 1468 de 2021 y la Resolución 1440 de 2022, que establecen disposiciones para la materialización, medición y procesamiento de la red geodésica

nacional, lineamientos fundamentales para el diseño de la red de puntos de control terrestre (GCP) en proyectos fotogramétricos con UAV (IGAC, 2021,2022).

En cuanto al catastro multipropósito, el CONPES 3958 de 2019 establece la política pública para su implementación, enfatizando estándares de calidad, cobertura y oportunidad de la información catastral, así como su integración con los instrumentos de planificación y gestión territorial (CONPES, 2019). La Ley 1955 de 2019 (Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022) consolida este enfoque, habilitando a las entidades territoriales como gestores catastrales. En este contexto, la producción de ortomosaicos y modelos digitales mediante UAV se convierte en una herramienta clave para apoyar avalúos, análisis de ocupación del suelo, gestión predial y ordenamiento territorial (Congreso de la República de Colombia, 2019).

4.3.4 Normativa colombiana para la operación de aeronaves no tripuladas (UAV)

La operación de aeronaves no tripuladas en Colombia está regulada por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) a través de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC). Mediante la Resolución 1983 de 2023 (27 de septiembre), Aerocivil incorporó formalmente el RAC 100 – Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) a los RAC y derogó el Apéndice 13 del RAC 91, estableciendo un marco normativo actualizado para la operación de drones en el país (Aerocivil, 2023a).

El RAC 100 estructura la operación UAS por categorías, incluyendo categoría abierta, categoría específica y disposiciones asociadas a operaciones de mayor complejidad, además de desarrollar capítulos específicos para registro, reglas generales de operación, reglas por categoría, certificación de explotador UAS, certificación de idoneidad para pilotos UAS, gestión de seguridad operacional (SMS) y autorización de vuelo (Aerocivil, 2023b). En consecuencia, las operaciones con fines comerciales o aquellas que exceden las condiciones de la categoría abierta deben ajustarse a los requisitos técnicos y administrativos definidos para la categoría específica, incluyendo controles documentales y de seguridad operacional previstos en el propio RAC 100 (Aerocivil, 2023b).

El fundamento jurídico de esta regulación se apoya en las competencias de Aerocivil como autoridad aeronáutica nacional, reconocidas en el Decreto 1294 de 2021, que le atribuye funciones para regular, certificar, vigilar y controlar materias aeronáuticas y el uso del espacio aéreo

(Presidencia de la República de Colombia, 2021). Además, la Resolución 1983 de 2023 cita expresamente el Código de Comercio como soporte normativo y articula su aplicación con el Decreto 1294 de 2021 para justificar la incorporación del RAC 100 y la derogatoria del Apéndice 13 del RAC 91 (Aerocivil, 2023a). En ese sentido, el propio RAC 100 establece que el componente que vuela en un sistema UAS se considera aeronave y, por tanto, su utilización y operación quedan sujetas al marco legal y reglamentario aeronáutico; en consecuencia, no se trata de una actividad de libre ejercicio, sino regulada por la autoridad competente (Aerocivil, 2023b).

4.3.5 Marco aeronáutico internacional: Convenio de Chicago y OACI

Colombia es Estado miembro de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) tras la aprobación del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Convenio de Chicago, 1944) mediante la Ley 12 de 1947 (Congreso de la República de Colombia, 1947). Este convenio reconoce la soberanía plena y exclusiva de cada Estado sobre el espacio aéreo situado sobre su territorio y, para el caso de aeronaves capaces de volar sin piloto, establece que su operación requiere permiso especial del Estado y debe regularse de forma que evite peligro para la aviación civil (OACI, 1944, arts. 1 y 8).

En desarrollo de este marco, la OACI ha producido documentos de referencia como la Circular 328 (UAS) y las ICAO Model UAS Regulations (Parts 101, 102 y 149), orientadas a facilitar marcos regulatorios armonizados para la operación de sistemas no tripulados, en particular en operaciones fuera del entorno IFR internacional y con énfasis en condiciones estándar, autorizaciones/certificación y esquemas de organizaciones aprobadas (OACI, 2011; OACI, 2020a, 2020b). En el caso colombiano, estos lineamientos se reflejan en el enfoque del RAC 100, el cual adopta una estructura basada en categorías y controles progresivos (registro, reglas generales, certificaciones y autorizaciones), coherente con la lógica de gestión del riesgo operacional y con la integración de UAS como componente del sistema aeronáutico (Aerocivil, 2023b).

La evaluación de la calidad de los productos cartográficos derivados de fotogrametría UAV se apoya en estándares técnicos internacionalmente reconocidos. En particular, los ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data establecen criterios para evaluar y reportar exactitud posicional mediante métricas estadísticas (incluida la familia de medidas RMSE) y distinguen entre control del ajuste y validación independiente a través de puntos de verificación,

con un marco diseñado para productos geoespaciales digitales y su reporte reproducible (ASPRS, 2015, 2023).

De manera complementaria, ISO 19157-1:2023 define principios, componentes y procedimientos para describir, evaluar y reportar la calidad de datos geográficos, mientras que ISO 19115-1:2014 establece el esquema de metadatos requerido para describir datasets y servicios geográficos (identificación, extensión, referencia espacial, calidad, distribución y otras propiedades), fortaleciendo la trazabilidad y la reutilización institucional de los productos generados (ISO, 2023; ISO, 2014).

5 Metodología

5.1 Enfoque metodológico y orientación del estudio

La investigación se desarrolla bajo un enfoque aplicado con orientación cuantitativa, dado que se fundamenta en la captura de datos espaciales medibles, su procesamiento fotogramétrico y la evaluación de su calidad geométrica mediante métricas objetivas. Este enfoque aplicado responde a una necesidad institucional concreta: fortalecer la base cartográfica para la actualización del PBOT de Puerto Leguízamo, articulando productos de alta resolución con usos específicos en ordenamiento territorial (gestión del riesgo por inundación, expansión urbana y soporte a decisiones). La investigación se enmarca en el campo de las geociencias aplicadas al ordenamiento territorial, ya que busca producir información técnica con validez métrica que pueda ser empleada por las entidades municipales en la toma de decisiones.

El presente estudio se clasifica como aplicado, ya que busca responder a una necesidad concreta del municipio de Puerto Leguízamo: la generación de insumos cartográficos de alta precisión y actualidad que fortalezcan los procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo. Asimismo, corresponde a un diseño no experimental y transversal, dado que la información se recolecta en un único momento mediante el levantamiento fotogramétrico y el procesamiento de imágenes, sin manipulación deliberada de variables (Hernández Sampieri et al., 2014). Finalmente, se enmarca dentro de un enfoque cartográfico-analítico, en tanto combina procedimientos técnicos de adquisición y procesamiento espacial con análisis orientados a la planificación territorial.

De acuerdo con Hernández Sampieri et al. (2014), se trata de un estudio de tipo descriptivo-explicativo: descriptivo, porque caracteriza y presenta los productos cartográficos obtenidos mediante UAV en el municipio de Puerto Leguízamo; explicativo, porque analiza cómo estos insumos pueden contribuir a mejorar los procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

5.2 Área de estudio y criterios de delimitación

La unidad principal de análisis corresponde al casco urbano de Puerto Leguízamo, abarcando un área aproximada de 993 hectáreas, dado que concentra dinámicas de ocupación del suelo, infraestructura y exposición a amenazas, y constituye el núcleo prioritario de decisiones de

PBOT. De manera complementaria, se obtienen los productos cartográficos de ocho centros poblados (Piñuña Negro, Nueva Paya, Puerto Ospina, Puerto Nariño, Sensella, Yurilla, Mecaya y La Tagua), aplicando el mismo protocolo de adquisición, control terrestre y procesamiento, con el fin de mantener consistencia técnica y comparabilidad de productos.

La delimitación operativa de las áreas intervenidas se define por el polígono de cobertura efectiva de cada misión UAV (área realmente fotografiada) y por el alcance real de operación según restricciones aeronáuticas, condiciones ambientales y posibilidades logísticas. Esta delimitación se considera esencial para evitar inferencias sobre áreas no cubiertas y para garantizar consistencia entre la cobertura reportada y los productos generados.

5.3 Procedimiento Metodológico

El procedimiento se organiza en seis fases articuladas, diseñadas para asegurar trazabilidad desde la planeación operativa hasta la integración SIG y la evaluación de empleabilidad:

- Fase 1. Preparación normativa, técnica y operativa del levantamiento UAV.
- Fase 2. Planeación geométrica del vuelo y diseño de cobertura.
- Fase 3. Control terrestre (GCP): diseño, medición GNSS-RTK y gestión de referencia espacial.
- Fase 4. Adquisición de imágenes UAV y control básico de calidad en campo.
- Fase 5. Procesamiento fotogramétrico en Drone2Map: ajuste del bloque, generación de productos y control de calidad.
- Fase 6. Integración SIG y análisis de empleabilidad para PBOT (GRD, expansión urbana y soporte a decisiones).

Cada fase se describe en los apartados siguientes, especificando criterios de decisión, actividades, productos intermedios y mecanismos de control.

5.3.1 Fase 1. Preparación normativa, técnica y operativa del levantamiento UAV

Verificación normativa aeronáutica y restricciones de operación

Antes de la adquisición se realiza una verificación de cumplimiento con el marco aeronáutico nacional aplicable a operaciones con UAS, en particular el RAC 100, adoptado por la Aeronáutica Civil mediante Resolución 01983 de 2023, que incorpora reglas y condiciones para la

operación de sistemas de aeronaves no tripuladas en Colombia. La verificación incluye la identificación de categorías operacionales aplicables al tipo de misión (fotogrametría), la determinación de limitaciones generales (zonas restringidas, entorno aeroportuario, condiciones de seguridad) y la definición de medidas operativas para evitar interferencias con aviación tripulada y para minimizar riesgo a terceros (Aerocivil, 2023).

5.3.2 Fase 2. Planeación geométrica del vuelo y diseño de cobertura

a) Requerimientos técnicos de resolución y redundancia

La planeación del vuelo se fundamenta en la necesidad de producir insumos aptos para PBOT (interpretación urbana y lectura de relieve). Para ello, se definen parámetros que permitan un GSD objetivo coherente con análisis a escala local y se asegure redundancia mediante solapes adecuados. La altura nominal de vuelo se fija en función del GSD esperado, la cámara/sensor disponible y las condiciones del área, manteniendo un equilibrio entre detalle y viabilidad operativa.

La ejecución del vuelo para levantamiento fotogramétrico se lleva a cabo siguiendo un enfoque sistemático para garantizar la calidad y la precisión de los datos. Este proceso se realiza con apoyo del UAS DJI Mavic 3 Enterprise ilustrado en la figura 1 y el software de planeamiento MapPilot de DJI, los pasos llevados a cabo son los siguientes:

- Verificación del equipo: carga de baterías, memorias disponibles.
- Configuración del software: Se configura el vuelo según planeamiento definido.
- Se escogen los sitios de despegue y aterrizaje que garanticen la mejor comunicación UAS-Control, de tal forma que no se pierda señal y se cumpla con los parámetros de seguridad.
- Se procede con la ejecución de vuelos sobre la programación.
- Se realizan vuelos hasta completar la totalidad de la zona, realizando los aterrizajes, cambios de baterías y despegues requeridos.
- Se descargan datos en PC y se verifica la calidad y cubrimiento de las fotografías.

Figura 1

DJI MAVIC 3 Enterprise utilizado en el levantamiento fotogramétrico.



Fuente: Elaboración propia.

b) Configuración de solapes, patrón de vuelo y segmentación por misiones

Se definen porcentajes de solape longitudinal y transversal para asegurar superposición efectiva entre imágenes, condición esencial para la generación de puntos de enlace y el ajuste del bloque. En escenarios urbanos y semiurbanos se prioriza un patrón de vuelo regular (tipo grilla) que facilite continuidad geométrica, y se segmenta la cobertura por misiones de acuerdo con autonomía de baterías, seguridad de despegue/aterrizaje y presencia de zonas restringidas. Se debe tener en cuenta:

- Resolución y detalle: la altura nominal se definió para garantizar un nivel de detalle compatible con productos de alta resolución, condición que posteriormente se verifica con el GSD reportado por el software de procesamiento.
- Redundancia: el traslape configurado permite construir un bloque fotogramétrico con suficiente superposición para extraer tie points y sostener el ajuste; esta redundancia se refleja luego en el alto número de tie points y solution points reportados.

c) Gestión de áreas restringidas y ventanas de adquisición

En caso de existir restricciones por entorno aeroportuario u otras limitaciones, se ajustan rutas y se define un perímetro operacional seguro que evite incumplimiento normativo y reduzca riesgo. En paralelo, se seleccionan ventanas de adquisición considerando nubosidad, lluvias intermitentes y estabilidad de iluminación, dado que la variabilidad radiométrica afecta la detección de características y la robustez de la red de tie points durante el procesamiento.

Las restricciones operacionales se documentaron durante la planificación y ejecución del vuelo mediante el reconocimiento de zonas delimitadas por el sistema de geocercas (geofencing) integrado en el UAV. Estas zonas fueron interpretadas en términos operativos como áreas de advertencia y advertencia reforzada, y se representaron cartográficamente mediante polígonos para evaluar su intersección con el área urbana y ajustar el diseño de misiones (puntos de despegue, segmentación de recorridos y exclusión de sectores no habilitables).

Paralelamente, se registraron condiciones ambientales durante las jornadas de adquisición (nubosidad, bruma y lluvias intermitentes) con el propósito de contextualizar la calidad radiométrica esperada en las imágenes. Este registro permite, en la etapa de procesamiento, interpretar variaciones de iluminación y posibles efectos sobre el emparejamiento de imágenes y la estabilidad del ajuste, que se evalúan con indicadores del bloque (por ejemplo, densidad de puntos de enlace y consistencia del modelo) reportados en el OE2.

5.3.3 Fase 3. Control terrestre (GCP): diseño, medición GNSS-RTK y referencia espacial

El control terrestre se define como el mecanismo central para garantizar consistencia espacial y validez métrica de los productos. En fotogrametría UAV, los GCP cumplen dos propósitos: (i) anclar el bloque al sistema oficial y (ii) controlar deformaciones internas del ajuste (especialmente en elevación). Este enfoque es coherente con literatura metodológica que reconoce a los GCP como determinantes de la precisión final en ortomosaicos y modelos digitales.

a) Finalidad del control terrestre en el flujo fotogramétrico

Se incorpora control terrestre para garantizar que la reconstrucción fotogramétrica no solo sea coherente internamente, sino que adquiera exactitud absoluta compatible con el sistema oficial y con capas institucionales. En fotogrametría, los GCP se integran al ajuste como restricciones

posicionales que fortalecen el mejor ajuste global (bundle adjustment) y reducen deformaciones del bloque.

b) Diseño de la red de GCP

La red de GCP se diseña buscando una distribución geométrica estable: puntos en perímetro y puntos interiores, evitando concentraciones y procurando que el bloque quede “amarrado” en distintas zonas. Se seleccionan ubicaciones con visibilidad aérea adecuada, bajo riesgo de obstáculo (vegetación o estructuras), y sobre superficies estables.

Se establecieron puntos de control en campo para asegurar la precisión posicional, según la normatividad IGAC vigente, (Resolución No. 1421 de 2021 y Resolución No. 197 de 2022).

Selección de puntos considerando los siguientes parámetros:

- Visibilidad: Accesibilidad visual y fácil rastreo GNSS.
- Distribución: Uniformidad cubriendo proporcionalmente todo el territorio.
- Características del Terreno: Diversidad de elevación y muestras de varias zonas.
- Superficie plana: Estabilidad para la instalación sin altas variaciones de altura.
- Accesibilidad: Facilidad de acceso del personal y equipos a la zona.
- Contraste: garantizar el mayor contraste posible para su correcta visibilidad en las fotografías.
- Evitar Áreas con cambios frecuentes: garantizando la estabilidad temporal, mínimo hasta realizar las operaciones de vuelo y previniendo una posible segunda toma.
- Consideraciones legales: Permisos y acceso factibles.

La planificación y levantamiento del control terrestre se estructuró como una etapa previa y complementaria a la adquisición fotogramétrica, orientada a disponer puntos de control del terreno (GCP) visibles en imagen y medidos con precisión GNSS para su incorporación posterior en el ajuste del bloque. Para asegurar una distribución geométrica adecuada del control, se definió inicialmente un conjunto de 37 puntos “ideales” en el entorno SIG. Estos puntos correspondieron a ubicaciones teóricas (no mediciones GNSS efectivas) y se seleccionaron con criterios geométricos, espaciales y operativos, procurando una cobertura homogénea del entorno urbano mediante puntos en el perímetro y en sectores internos. La selección consideró accesibilidad, estabilidad superficial, visibilidad aérea potencial y minimización de oclusiones esperables del

entorno construido, con el propósito de orientar la posterior materialización y medición en campo. Como soporte operativo, los 37 puntos ideales se integraron en un mapa base en ArcMap, el cual se exportó y se cargó en Avenza Maps para su navegación y visualización sin conexión durante el trabajo de campo. Esta integración permitió que el operador se desplazara hacia las ubicaciones predefinidas y ejecutara la materialización física de los GCP reales conservando la lógica espacial del diseño, con ajustes controlados cuando las condiciones del terreno lo exigieron.

c) Medición GNSS-RTK y registro documental

Los GCP se levantan mediante GNSS RTK con corrección vía NTRIP, priorizando mediciones en superficies estables y visibles desde el aire, con procedimientos de registro que permitan trazabilidad (identificador de punto, coordenadas, descripción, evidencia fotográfica y condiciones de observación). Esta estrategia reduce incertidumbres de georreferenciación y mejora la integridad del ajuste fotogramétrico.

Se realizó el rastreo GNSS con Equipos CHC I90Pro (figura 2) mediante la metodología nTirp, apoyados con bases de rastreo continuo del IGAC y la Empresa Proveedora de los equipos Galileo Instruments S.A, siguiendo estos pasos:

- Se realiza la demarcación del sitio (pintura, cinta o un sitio plenamente identificable).
- Luego de obtener posición fija estable en el GNSS con el método nTrip, se procede a capturar el GCP con medición de 10 segundos.
- Se almacena la información en el GNSS en coordenadas con proyección Origen Nacional, según norma IGAC.
- Se capturan 4 fotografías descriptivas del GCP.
- Se continua al punto siguiente y se repiten los pasos hasta capturar la totalidad de los GCP.

Figura 2

Antena GNSS CHC I90Pro utilizada para la toma de los puntos de control en campo.



Fuente: Elaboración propia.

En campo, la materialización se realizó mediante marcación visible en superficie, principalmente con aerosol de alta visibilidad, de modo que el punto quedara inequívocamente identificable desde el aire y en las imágenes capturadas. Esta marca cumple una función crítica de enlace entre el control terrestre y el control fotogramétrico: reduce ambigüedades durante el fotocontrol y asegura correspondencia directa entre el punto medido con GNSS y el punto identificado en imagen. Posteriormente, el levantamiento GNSS se efectuó con receptor GNSS RTK con corrección NTRIP, posicionando la antena directamente sobre la marca materializada.

El procedimiento de medición incluyó verificación de la instalación del receptor, procurando que el centro de observación coincidiera con la marca y que el bastón GNSS se encontrara completamente nivelado, dado que inclinaciones pequeñas pueden introducir sesgos sistemáticos, particularmente en el componente vertical. Antes de almacenar cada coordenada se verificó el estado de la solución GNSS y la estabilidad del enlace de corrección. Se adoptó como criterio operativo registrar únicamente observaciones bajo solución FIX estable y evitar el almacenamiento de puntos en estado FLOAT; cuando se presentaron soluciones inestables, errores

elevados o ausencia de fijación, se repitió o extendió el tiempo de observación hasta obtener una medición confiable.

Una vez confirmada la coherencia de los indicadores de calidad (estado FIX, estabilidad de la medición, nivelación), cada punto fue almacenado en la colectora con su identificador y metadatos mínimos (fecha, hora y método de corrección). De manera complementaria al levantamiento GNSS, se efectuó un registro fotográfico por punto (“fotocontroles”), capturando cuatro fotografías desde posiciones alrededor del GCP, con el fin de documentar la marca en el suelo, referencias cercanas y el contexto inmediato para facilitar su recuperación y reconocimiento durante el posprocesamiento. Este procedimiento reduce incertidumbre en la identificación del punto en la ortofoto y apoya el marcado manual durante el fotocontrol en software fotogramétrico, especialmente en entornos con texturas repetitivas o elementos similares.

Finalmente, para verificar la coherencia geométrica de la red levantada, la distribución de los puntos materializados se representó sobre el entorno urbano como una malla de puntos, con el propósito de confirmar visualmente que la red no quedara concentrada en un solo sector y que se extendiera de forma equilibrada sobre el perímetro y sectores internos. Este control documental de distribución se utilizó como soporte para la incorporación de los GCP al procesamiento fotogramétrico posterior.

La figura 3 ilustra el punto previamente inscrito con aerosol, el posicionamiento de la antena GNSS y el entorno inmediato documentado mediante fotocontroles.

Figura 3

Marcación física y levantamiento GNSS de un punto de control terrestre (GCP).



Fuente: Elaboración propia

d) Sistema de referencia y compatibilidad oficial

Para asegurar interoperabilidad con instrumentos de planificación y cartografía oficial, el proyecto se gestiona en MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional, con referencia vertical basada en EGM96. Esta consistencia entre sistema del proyecto y sistema de GCP es crítica para evitar desplazamientos verticales y problemas de integración con otras capas SIG. Este paso es coherente

con el marco de cartografía básica oficial que exige consistencia en referencia geodésica y documentación técnica (IGAC, 2020). En Drone2Map, el sistema de coordenadas del proyecto y de los puntos de control queda registrado explícitamente en el reporte de procesamiento.

De manera general este proceso pertenece a la etapa de posprocesamiento el cual es llevado a cabo en el proceso de oficina:

En una primera fase se realiza la descarga de los datos GNSS medidos en campo con receptor CHC i90Pro, cuyo método de posicionamiento corresponde a corrección diferenciada en tiempo real mediante protocolo NTRIP. En este escenario, la descarga prioriza los reportes tabulares exportados por el software de campo, dado que la solución RTK ya entrega coordenadas corregidas en el momento de la observación. La necesidad de realizar esta descarga y consolidación radica en que, para el posprocesamiento fotogramétrico, el control terrestre debe estar disponible en un formato consistente (tabla con identificadores y coordenadas) que permita su importación al software y su trazabilidad posterior. En términos generales, los flujos GNSS de buenas prácticas describen NTRIP como un mecanismo de distribución de correcciones vía internet que incrementa la precisión del rover, por lo cual el insumo que llega a oficina suele ser una coordenada ya corregida, acompañada de metadatos de medición. Como resultado de esta fase, se obtiene un inventario de puntos de control con coordenadas consolidadas y listas para ser normalizadas en referencia espacial (época y altura), garantizando que el control que se incorporará al ajuste fotogramétrico esté correctamente expresado en el marco oficial del proyecto.

e) Cambio de época: traslado temporal de coordenadas (2025 → 2018.0)

Posteriormente se realiza el cambio de época de las coordenadas, trasladándolas desde la fecha de levantamiento (por ejemplo, 2025-06-18) hacia la época de referencia oficial definida para el proyecto (2018.0). Este paso no es un trámite formal: es una condición geodésica necesaria cuando se trabaja con marcos de referencia que incluyen componente temporal (velocidades), dado que la superficie terrestre presenta deformaciones y desplazamientos acumulados que, aunque pequeños, resultan relevantes en productos de alta resolución.

El traslado de coordenadas entre épocas se fundamenta en el uso de velocidades (V_x , V_y , V_z) para proyectar coordenadas desde una época t_{0t_0t0} hacia otra ttt , tal como lo describe SIRGAS: el procesamiento GNSS preciso requiere que las coordenadas estén en la misma época

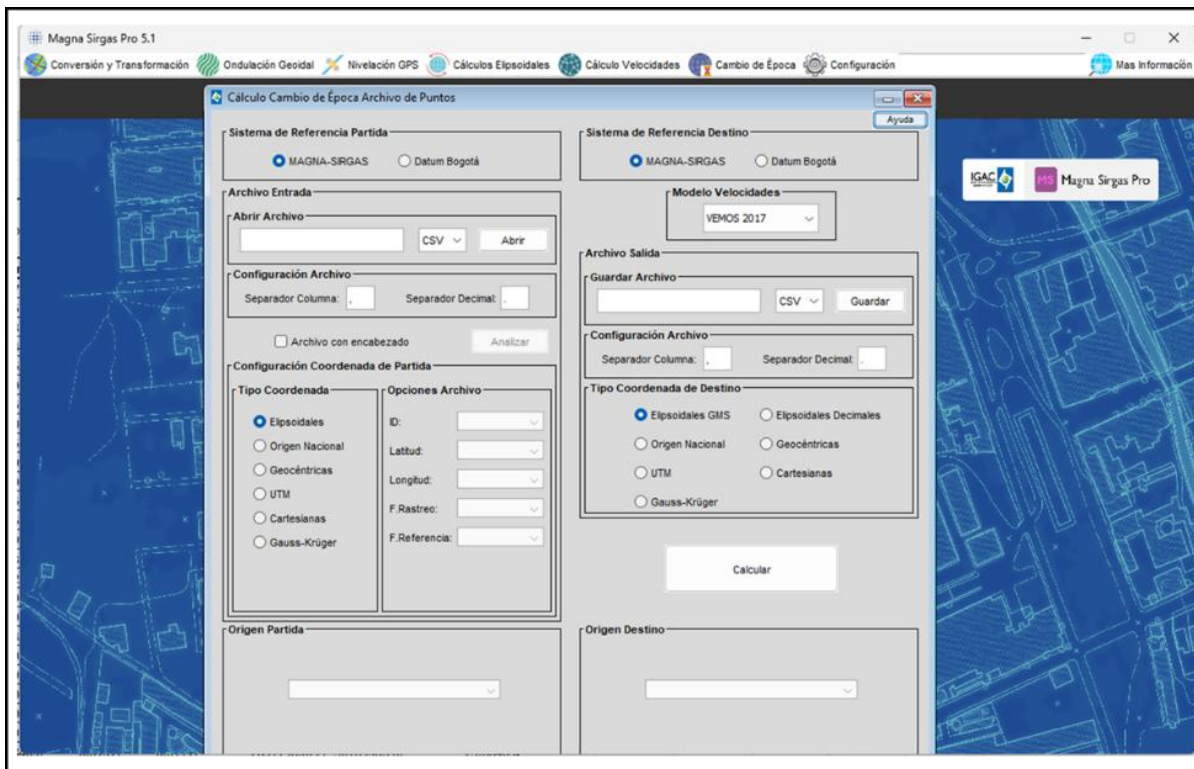
de observación o que se transformen con modelos de velocidad cuando se requiere comparar o almacenar coordenadas en una época de referencia. En particular, SIRGAS indica que, cuando las velocidades propias de un punto no están disponibles, pueden derivarse de un modelo regional como VEMOS, y que el traslado se realiza aplicando el intervalo temporal multiplicado por las velocidades.

Para operacionalizar esta normalización temporal se utiliza MAGNA-SIRGAS Pro (v5.x) (figura 4), herramienta del IGAC orientada a la gestión estandarizada de coordenadas y que incluye funciones de cálculo de velocidades y cambio de época, además de transformaciones asociadas al marco MAGNA-SIRGAS. El manual de instalación de Magna Sirgas Pro describe explícitamente que el aplicativo facilita el manejo estandarizado de coordenadas en Colombia, incluyendo el cálculo de velocidades y el cambio de época.

Como resultado, se obtiene un conjunto de coordenadas de control ya trasladadas a la época oficial del proyecto, eliminando inconsistencias temporales y asegurando compatibilidad con el marco de referencia utilizado en el procesamiento fotogramétrico.

Figura 4

Cálculo cambio de época archivo de puntos mediante el modelo de velocidades oficial del IGAC, empleando el software Magna Sirgas Pro 5.1.



Fuente: Elaboración propia

f) Normalización vertical y consistencia de alturas

En el componente vertical, la consistencia entre el control terrestre GNSS y los productos fotogramétricos requiere definir el tipo de altura de trabajo (elipsoidal u ortométrica) y el modelo geoidal asociado. En Colombia, la obtención de alturas físicas a partir de observaciones GNSS se apoya en modelos geoidales; el modelo GEOCOL2004 se encuentra documentado como geode gravimétrico para Colombia (resolución 2'×2') y puede emplearse para relacionar alturas elipsoidales y ortométricas.

Bajo este criterio, no se requiere una corrección vertical adicional en gabinete cuando el flujo de captura GNSS ya incorpora el modelo geoidal (o cuando las alturas entregadas por el receptor se encuentran expresadas en el sistema vertical definido). De lo contrario, mezclar alturas elipsoidales y ortométricas puede introducir discrepancias verticales sistemáticas al integrar el control en el ajuste y al generar superficies como el DTM.

5.3.4 Fase 4. Adquisición de imágenes UAV y control básico de calidad en campo

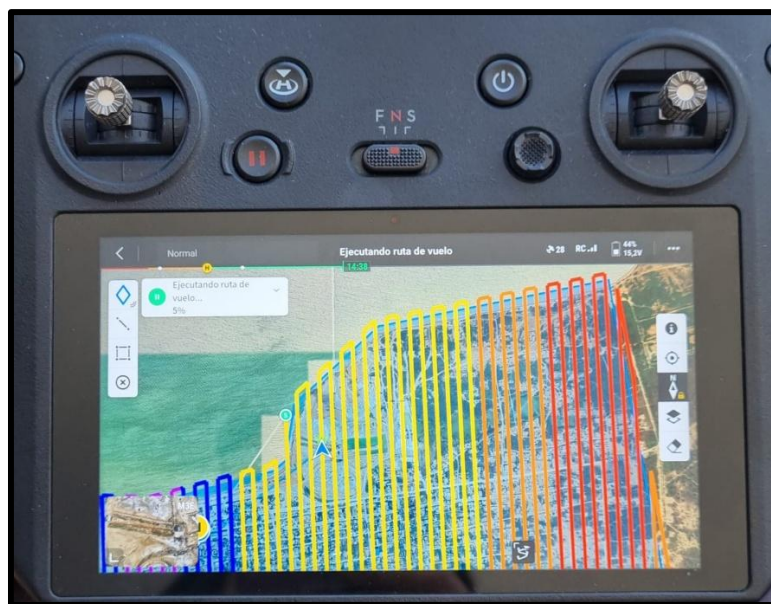
a) Ejecución de misiones y aseguramiento de continuidad

Se ejecutan las misiones conforme a los parámetros definidos en la planeación. Durante la operación se verifica la continuidad espacial del cubrimiento, la coherencia de solapes y la estabilidad de la plataforma en condiciones de viento o lluvia. Se registra cada salida como unidad operativa para mantener trazabilidad, incluyendo tiempos aproximados, sectores cubiertos y observaciones relevantes.

La ejecución del plan de vuelo se realizó posterior a la materialización y levantamiento GNSS RTK de los GCP, de manera que las marcas de control estuvieran presentes y visibles en el terreno antes de la captura. Esta secuencia permite que los objetivos de control queden registrados en múltiples imágenes, facilitando su identificación durante el fotocontrol y su incorporación como restricciones posicionales en el ajuste del bloque. La adquisición se ejecutó respetando los parámetros definidos de altura nominal, solapes, patrón de vuelo y segmentación por salidas, así como las restricciones operacionales identificadas para el área de estudio.

Figura 5

Ruta de vuelo en ejecución en el municipio de Puerto Leguízamo.



Fuente: Elaboración propia.

b) Control de calidad in situ

Durante la captura se realiza un control básico de calidad, orientado a prevenir fallas que comprometan el ajuste fotogramétrico posterior. Este control incluye revisión rápida de nitidez (evitar desenfoque por velocidad o vibración), exposición (evitar sobre/subexposición marcada), y detección de posibles huecos de cobertura. En caso de observarse fallas sistemáticas, se ajustan parámetros operativos dentro de los límites planificados (por ejemplo, velocidad de vuelo, repetición de pasadas, o reprogramación por condiciones atmosféricas).

c) Organización inicial del dato

Finalizada la captura, se organiza el material por unidad territorial y misión, preservando los archivos originales (sin ediciones) y asegurando una estructura de carpetas que soporte repetición de procesamiento, auditoría y anexos. Esta estructuración contempla separación de imágenes, control terrestre, proyectos de procesamiento y productos exportados.

d) Gestión del dato y preprocesamiento: control documental y organización

Antes del procesamiento se implementa una estructura de carpetas y convenciones de nombrado para garantizar trazabilidad:

- Imágenes originales (por salida/fecha/sector).
- Control terrestre (archivo maestro de GCP, metadatos, evidencias).
- Proyecto Drone2Map (configuración, reportes PDF/HTML).
- Productos finales (ortofoto, MDT/DTM, malla 3D, escenas 3D, geovisor).

Las imágenes capturadas serán descargadas y organizadas en repositorios estructurados, lo cual permitirá su procesamiento en software especializado como Drone2Map. Se aplicarán técnicas de Structure from Motion (SfM) y Multi-View Stereo (MVS) para la reconstrucción tridimensional de superficies. La georreferenciación de los bloques fotogramétricos se efectuará con base en los GCP levantados, garantizando consistencia espacial con MAGNA-SIRGAS. Como resultado, se obtendrán ortomosaicos de alta resolución, modelos digitales del terreno (DTM), curvas de nivel y escenas 3D interactivas. La evaluación de calidad se realizará conforme a la norma ISO 19157 (Data Quality), verificando exactitud posicional, completitud y consistencia lógica.

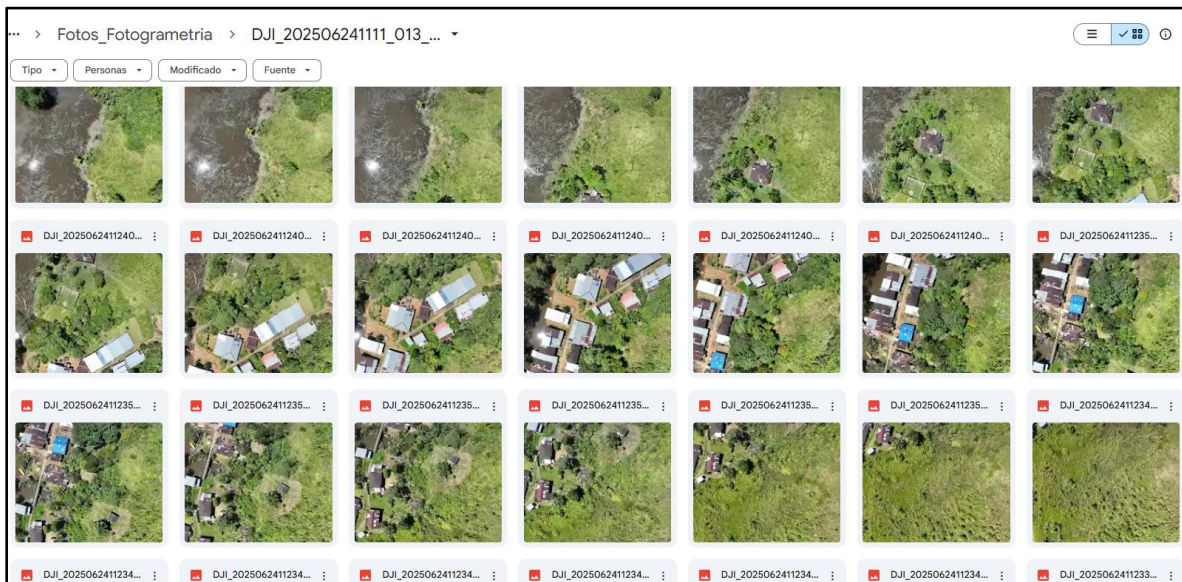
Descarga y verificación del conjunto de imágenes UAV (Mavic 3 Enterprise)

En una segunda fase se realiza la descarga de la información del UAS (DJI Mavic 3 Enterprise), con énfasis en el conjunto de fotografías capturadas. Esta descarga no se limita a copiar archivos, sino que incluye una revisión estructural: integridad de carpetas, continuidad de misiones, y preservación del conjunto original sin modificaciones, para mantener trazabilidad del proceso (figura 6).

La razón técnica de esta verificación es que el ajuste fotogramétrico depende de la relación interna entre imágenes superpuestas; si existen pérdidas, duplicados o inconsistencias de estructura, el software puede degradar la calibración de imágenes o disminuir la conectividad del bloque, lo cual impacta directamente la reconstrucción.

Figura 6

Revisión de cada una de las carpetas con fotografías y eliminación de las que no corresponden al levantamiento fotogramétrico.



Fuente: Elaboración propia

5.3.5 Fase 5. Procesamiento fotogramétrico en ArcGIS Drone2Map (ajuste, productos y QA/QC)

a) Configuración del proyecto y carga de insumos

Se construye un proyecto de procesamiento en ArcGIS Drone2Map Advanced, incorporando el conjunto de imágenes UAV y configurando el sistema de referencia del proyecto. Se cargan los GCP y se verifica su coincidencia de sistema de coordenadas con el proyecto, evitando inconsistencias por datum o unidades.

b) Ajuste del bloque (block adjustment) como núcleo del procesamiento

Se ejecuta el ajuste del bloque, entendido como el proceso de cálculo de un ajuste basado en la relación interna entre imágenes superpuestas, control terrestre, modelo de cámara y un DEM de soporte. La documentación oficial de Drone2Map indica que, finalizado el ajuste, es necesario revisar los resultados y evaluar la calidad de los puntos usados (GCP, tie points y checkpoints, cuando existan).

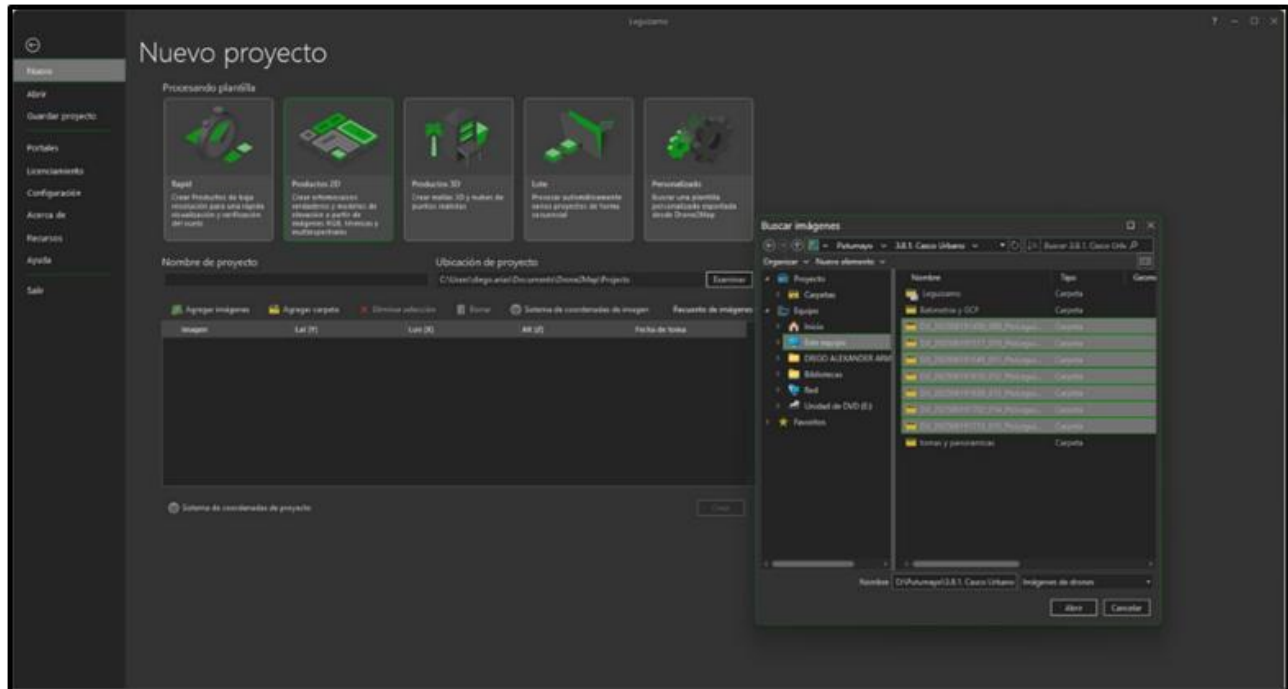
De forma complementaria, Drone2Map explica el fundamento fotogramétrico del proceso: durante el ajuste se detectan puntos clave y se generan puntos por emparejamiento automático; luego se triangulan coordenadas 3D y se aplica ajuste del paquete para minimizar el error de reproyección, optimizando la orientación de cámaras y la coherencia del bloque.

La finalidad de esta etapa es obtener una reconstrucción con alta precisión relativa que sirva de base para productos derivados (ortofoto y superficies), y preparar el escenario para introducir control terrestre, necesario cuando se requiere mejorar la exactitud absoluta por encima de la georreferenciación inicial de las imágenes.

Las figuras 7 y 8 ilustran el proceso realizado en Drone2Map.

Figura 7

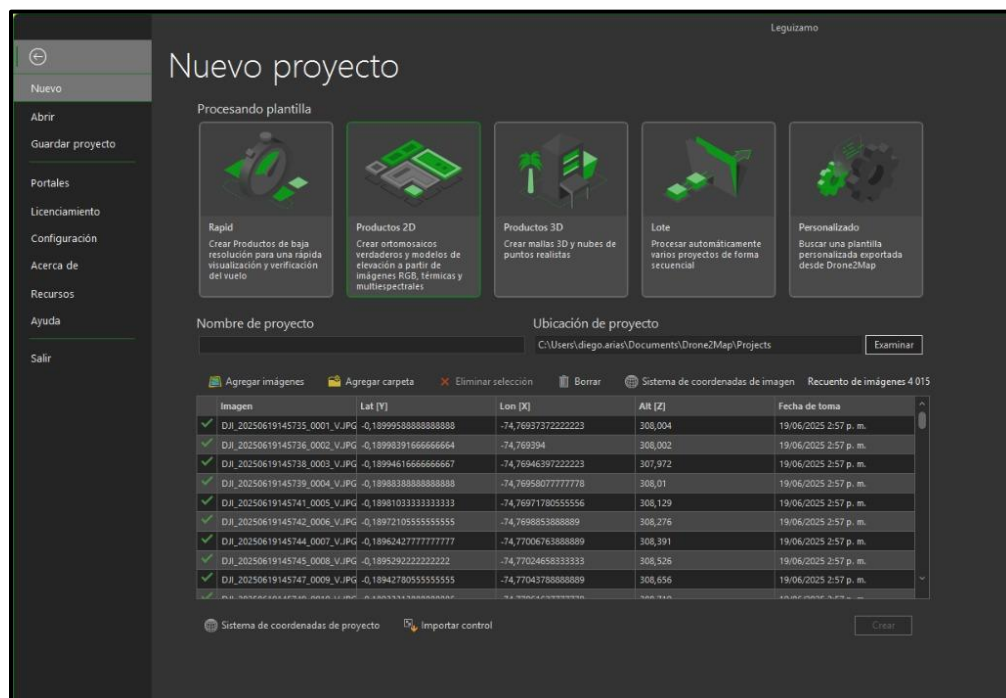
Revisión y cargue de carpetas al nuevo proyecto Drone2Map.



Fuente: Elaboración propia

Figura 8

Cargue de cada una de las respectivas fotografías obtenidas al software Drone2Map.



Fuente: Elaboración propia

Importación de GCP y vinculación en imágenes (fotocontrol)

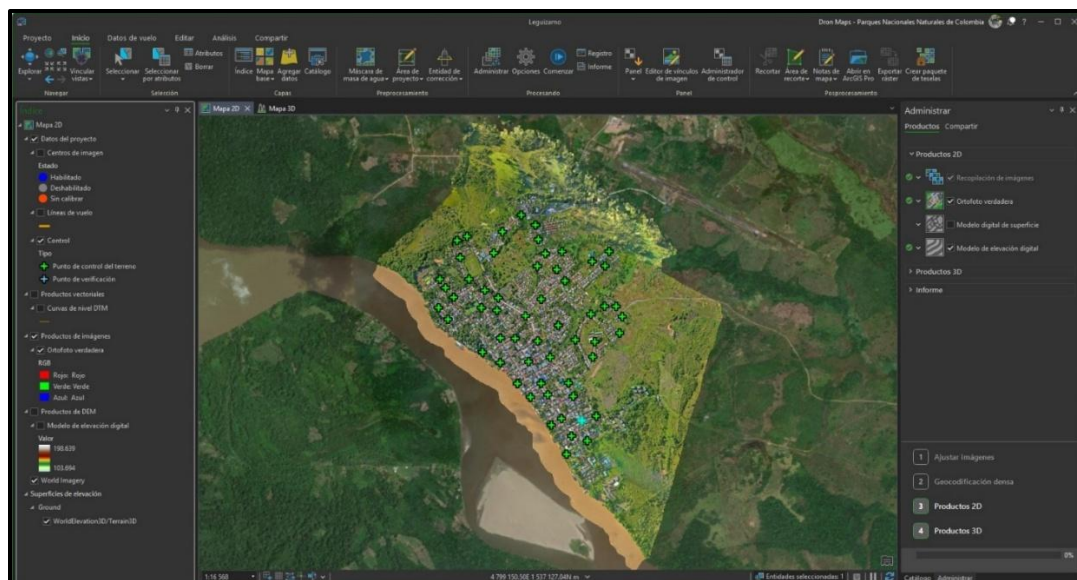
Una vez cargadas las imágenes, se incorporan los puntos de control (GCP) al proyecto (figura 9). Drone2Map precisa que el control se define como puntos con coordenadas X,Y,Z conocidas, usualmente obtenidas por levantamiento terrestre, y que su función es incrementar la exactitud absoluta al introducir restricciones posicionales al ajuste.

Sin embargo, la incorporación del control no concluye con la importación tabular: se requiere vincular cada GCP en las imágenes (lo que Drone2Map gestiona como enlaces de imagen). Este paso es crítico porque el software necesita asociar el punto “en tierra” con su evidencia “en imagen” para aplicar la restricción durante el ajuste (figura 10).

En este proyecto, el vínculo imagen-control se fortalece mediante la toma de fotocontroles en campo (registro fotográfico del punto y su entorno), lo cual reduce el riesgo de confusión durante el marcado en oficina, especialmente en superficies con textura similar o con elementos repetitivos. En términos de control de calidad, cada GCP tiene residuales calculados tras el ajuste, y que incluso un solo GCP mal ubicado o mal medido puede afectar significativamente el RMSE global; por ello, la identificación cuidadosa del centro del objetivo y su correcta vinculación en imágenes se considera un paso determinante.

Figura 9

Carga de los puntos de control en terreno (GCP).

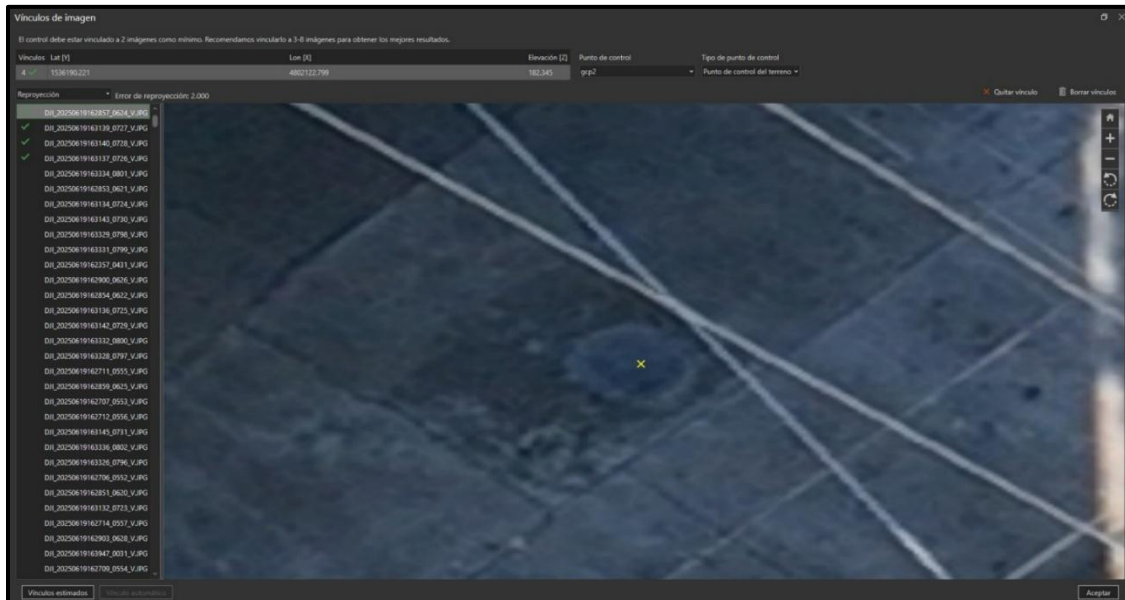


Fuente: Elaboración propia

Una vez cargados los puntos de control en terreno se procede con la medición de cada punto sobre el software como se presenta a continuación en las figuras 10 y 11.

Figura 10

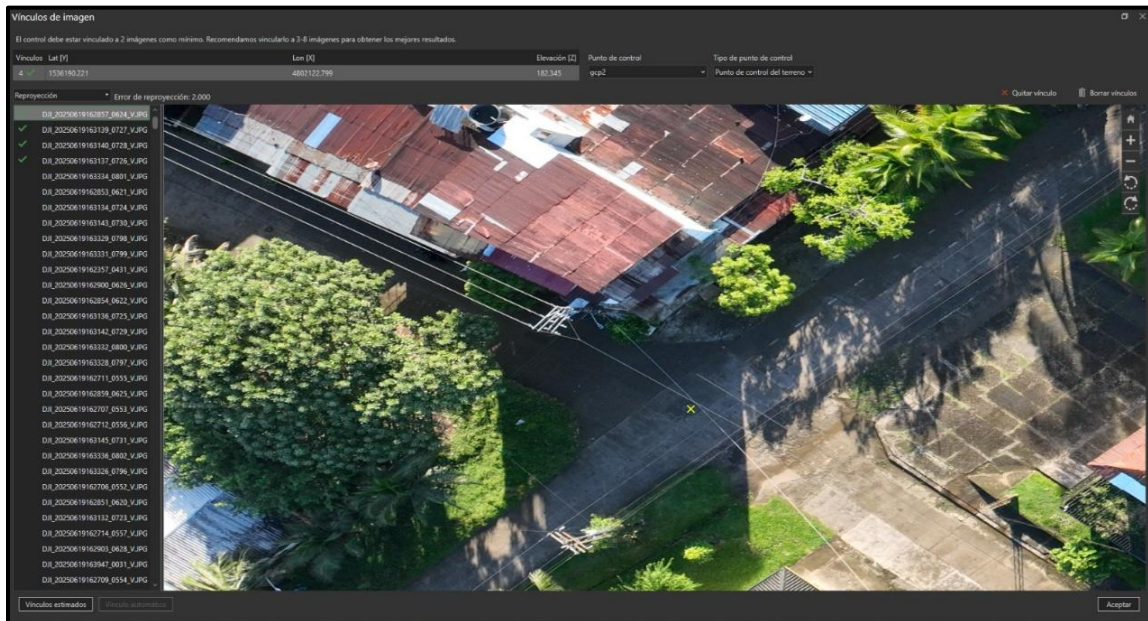
Proceso de medición de cada punto sobre el software para las fotografías del casco urbano de Puerto Leguizamo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 11

Proceso de medición de cada punto sobre el software para las fotografías del casco urbano de Puerto Leguizamo.



Fuente: Elaboración propia

c) Revisión del reporte de procesamiento como control formal de calidad

Se revisa el reporte de procesamiento en formato PDF/HTML para verificar indicadores de calidad del ajuste. Drone2Map documenta el reporte incluye, entre otros, el porcentaje de imágenes calibradas, la resolución promedio (GSD), el error medio de reproyección de tie points y el RMSE asociado a puntos de control/verificación, constituyendo el principal mecanismo de QA/QC del flujo.

d) Generación y exportación de productos 2D y 3D

Con el ajuste validado, se generan los productos definidos en el alcance metodológico, típicamente: Ortofoto, superficies de elevación (DTM/DSM según configuración), productos 3D (malla texturizada).

Se exportan en formatos compatibles con SIG, preservando la referencia espacial del proyecto y documentando propiedades mínimas (resolución, extensión, SR, fecha de procesamiento). La exportación se acompaña de nomenclatura y estructura de carpetas para trazabilidad y control de versiones.

5.3.6 Fase 6. Integración SIG y análisis de empleabilidad para PBOT**a) Integración de productos en entorno SIG**

Los productos (ortofoto, DTM, productos 3D y derivados) se incorporan en un entorno SIG para construir cartografía temática y realizar análisis espaciales. En este paso se verifica la superposición espacial con capas existentes (límites, hidrografía, redes, equipamientos), y se ajustan simbologías y escalas de visualización para facilitar lectura técnica.

b) Estructura del análisis de empleabilidad

La empleabilidad se analiza bajo tres ejes directamente alineados con el PBOT:

Gestión del riesgo por inundación: el DTM se usa como base para derivaciones morfométricas (pendiente, sombreado/hillshade, lectura de zonas bajas), mientras que la ortofoto apoya identificación de elementos expuestos y condiciones superficiales observables.

Expansión urbana y ocupación: la ortofoto se usa para interpretar patrones de ocupación, bordes y vacíos urbanos, sustentando mapas de apoyo al diagnóstico territorial.

Soporte a decisiones y comunicación técnica: los productos 3D y recursos de visualización se usan como herramientas de consulta, comunicación y verificación visual, particularmente útiles para actores institucionales no especializados.

5.4 Gestión del dato, ética, seguridad y control de divulgación

a) Gestión documental y reproducibilidad

Se conserva el proyecto de procesamiento, reportes y productos exportados como expediente técnico, asegurando que el procedimiento pueda reproducirse o auditarse. Este enfoque se alinea con prácticas de calidad de datos y con requerimientos institucionales de control de versiones.

b) Protección de información y acceso

Dado que los productos UAV pueden contener información sensible (alta resolución y registros visuales), se adoptan criterios de divulgación prudente. La Ley 1581 de 2012 establece disposiciones para protección de datos personales y el tratamiento de datos en bases susceptibles de uso por entidades públicas o privadas, lo cual respalda el manejo controlado de evidencias visuales cuando exista riesgo de exposición indebida (Congreso de la República de Colombia, 2012).

De manera complementaria, la Ley 1712 de 2014 regula el derecho de acceso a la información pública bajo el principio de máxima publicidad, pero reconoce la posibilidad de limitación por disposición legal y bajo criterios de proporcionalidad y razonabilidad; esto permite justificar que ciertos anexos de evidencias digitales se gestionen con acceso controlado en versiones públicas del documento, preservando verificabilidad académica (Congreso de la República de Colombia, 2014).

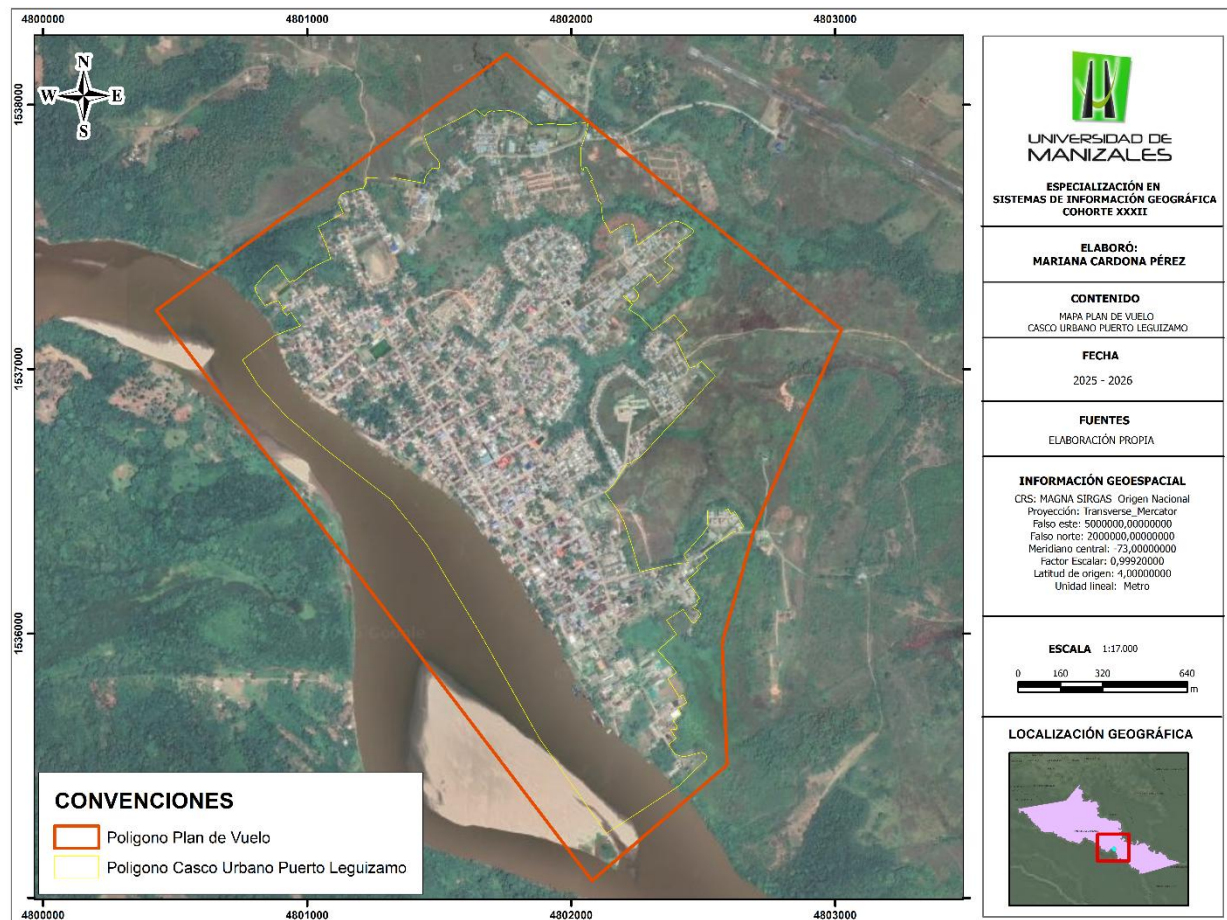
6 Resultados

6.1 Planificar y ejecutar la adquisición de datos fotogramétricos mediante vuelos UAV y levantamiento de control terrestre, garantizando cobertura, resolución y precisión requeridas.

6.1.1 Cobertura territorial consolidada

La adquisición fotogramétrica sobre el casco urbano de Puerto Leguízamo, tuvo como resultado la obtención de un polígono con un área aproximada de 993 hectáreas, establecida como unidad prioritaria para la presente investigación. Adicionalmente, esta cobertura se complementó con la ejecución del mismo protocolo metodológico en ocho centros poblados (Piñuña Negro, Nueva Paya, Puerto Ospina, Puerto Nariño, Sensella, Yurilla, Mecaya y La Tagua), lo que aseguró consistencia técnica, estandarización del flujo y comparabilidad de productos.

A continuación, en la figura 12 se ilustra la delimitación de la cobertura para la zona urbana, donde el polígono de vuelo (color rojo) se trazó con una extensión superior al polígono límite del casco urbano (color amarillo), incorporando además sectores contiguos al perímetro construido. En particular, la cobertura incluyó un tramo representativo del cauce del río Putumayo dentro del área de vuelo, como parte del entorno inmediato capturado en el levantamiento.

Figura 12*Mapa plan de vuelo casco urbano Puerto Leguizamo.**Fuente:* Elaboración propia

6.1.2 Parámetros operacionales de adquisición

La adquisición del casco urbano se ejecutó con una altura nominal de 110 metros, traslapes del orden de 60–70%, y un total de siete salidas operacionales (despegue–captura–aterrizaje) asociadas al recambio de baterías durante la jornada de levantamiento.

Los parámetros de altura y traslape fueron consistente entre las unidades territoriales levantadas; en contraste, el número de salidas operacionales varió según la extensión efectivamente cubierta, la autonomía de baterías y las restricciones operativas de cada sector. La verificación del GSD y los indicadores del ajuste fotogramétrico (puntos de enlace y solución) se presentan en los resultados del Objetivo Específico 2.

A continuación, la tabla 1, sintetiza los parámetros operacionales ejecutados para cada unidad territorial:

Tabla 1

Parámetros operacionales del levantamiento fotogramétrico UAV.

Unidad territorial	Altura de vuelo (m)	Traslape longitudinal (%)	Traslape transversal (%)	Nº de salidas operacionales	Periodo de adquisición	Restricciones operativas identificadas	Observaciones atmosféricas
Casco urbano de Puerto Leguízamo	110	60–70	60–70	7	20 de junio de 2025	Restricciones asociadas al entorno aeroportuario y a un polígono no habilitado para operación UAV.	Nubosidad variable y lluvias intermitentes durante parte del periodo de adquisición.
Centros poblados (Piñuña Negro, Nueva Paya, Puerto Ospina, Puerto Nariño, Sensella, Yurilla, Mecaya y La Tagua)	110	60–70	60–70	Variable (según la extensión del centro poblado)	Del 21 al 26 de junio de 2025	Limitaciones por accesibilidad de puntos de despegue/aterrizaje y configuración del entorno local.	Condiciones climáticas heterogéneas, con predominio de nubosidad y precipitaciones ocasionales.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Restricciones operacionales del espacio aéreo y condiciones ambientales (casco urbano)

Durante la adquisición fotogramétrica del casco urbano se identificaron restricciones operacionales asociadas al entorno aeroportuario y a áreas con limitación de operación, las cuales condicionaron el despliegue de misiones y el alcance espacial efectivo del levantamiento. Estas restricciones se representan cartográficamente en la Figura 13 mediante polígonos y corredores que intersectan el perímetro urbano, permitiendo visualizar de manera explícita las zonas donde el

sistema de control del UAV emite advertencias o impone limitaciones operativas al despegue y/o a la continuidad del vuelo.

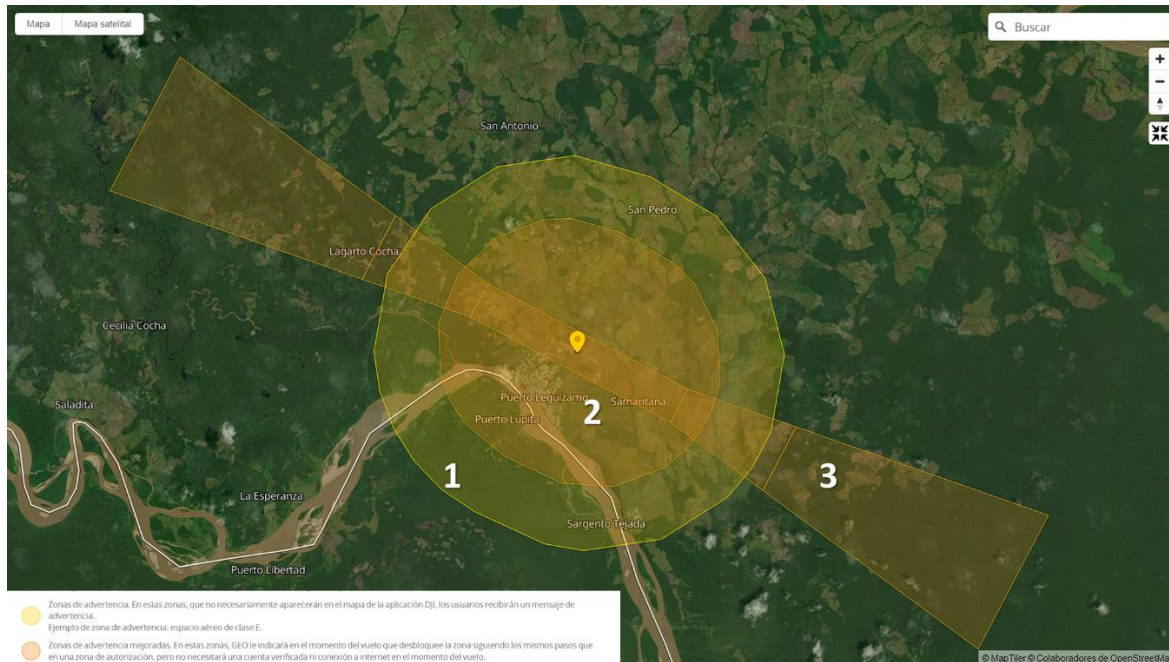
En la Figura 13 se distinguen tres polígonos principales (1, 2 y 3), correspondientes a niveles diferenciados de restricción. El polígono 1 corresponde a una zona de advertencia, donde la operación es técnicamente posible previa aceptación del mensaje por parte del operador. En términos operativos, este tipo de geocerca no bloquea el vuelo, pero introduce una condición de operación “informada”, en la cual el operador debe reconocer la cercanía a un área potencialmente sensible y ajustar la gestión del riesgo operacional (selección del punto de despegue, altura/recorridos y atención reforzada a contingencias).

El polígono 2 representa una zona de advertencia reforzada asociada a proximidad con infraestructura aeronáutica o sectores estratégicos. En esta zona, aunque la operación puede ser viable, suele existir un nivel adicional de control que puede exigir verificaciones digitales o mecanismos de habilitación del fabricante (dependientes del modelo, configuración regional y cuentas autorizadas). Desde el punto de vista del levantamiento, estas áreas implican una restricción operacional que puede traducirse en ajustes de ruta, reubicación de puntos de despegue o segmentación de misiones para evitar interrupciones durante la ejecución.

El polígono 3, igualmente clasificado como advertencia reforzada, correspondió al nivel de restricción más severo dentro del casco urbano: para Puerto Leguísimo no fue posible habilitar el desbloqueo operativo, lo que impidió la ejecución de vuelos dentro de ese sector, aun cuando existiera planeación previa de la misión. Como consecuencia directa, el cubrimiento fotogramétrico quedó condicionado por la superposición de estas zonas, lo cual se reflejó en la delimitación de misiones y en la continuidad espacial del levantamiento en el entorno urbano.

Figura 13

Zonas de restricción operacional del espacio aéreo en el casco urbano de Puerto Leguísimo.



Fuente: Mapa de zonas geográficas, DJI, 2025.

6.1.4 Control terrestre (GCP)

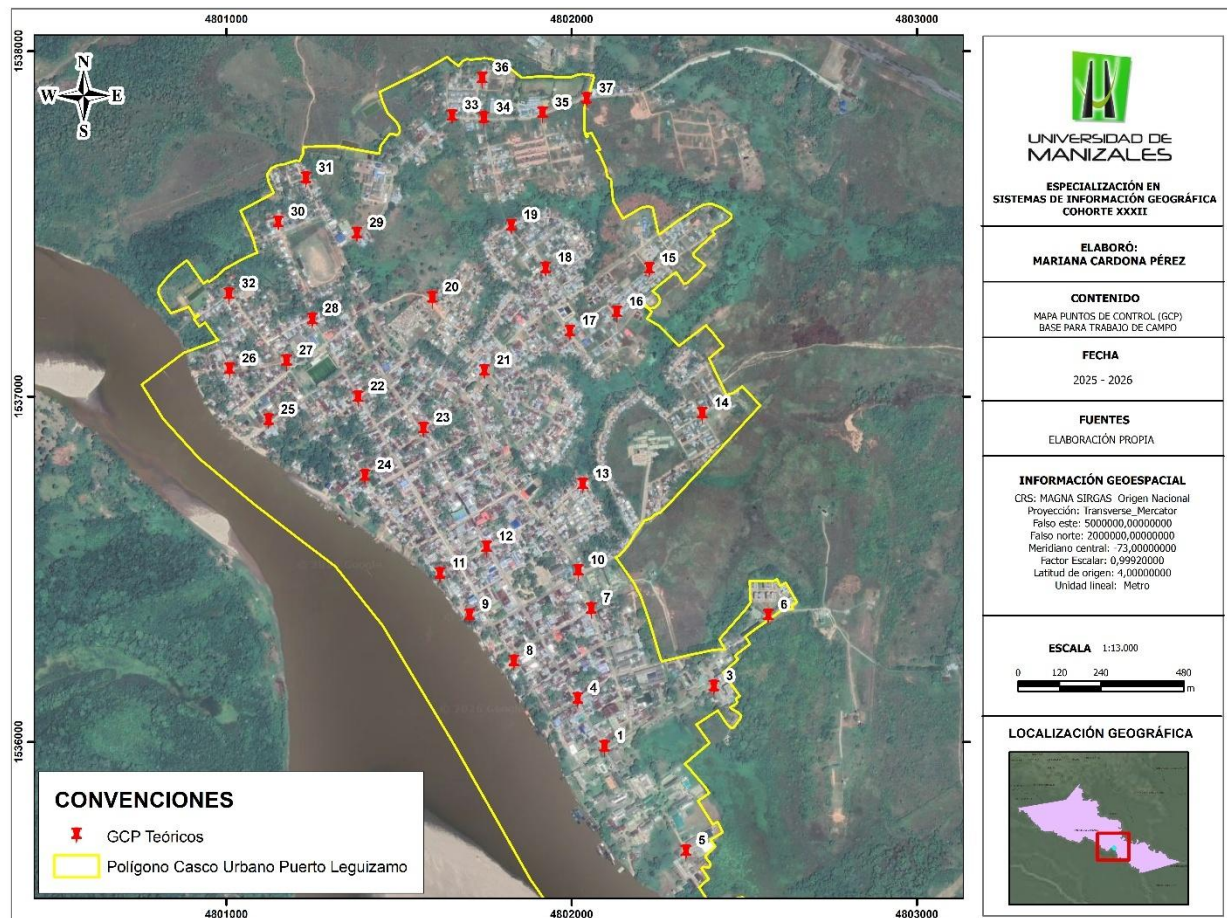
Como resultado del trabajo de campo se consolidó una red de control terrestre para el casco urbano de Puerto Leguísimo mediante puntos de control en tierra (GCP), materializados sobre superficies estables y reconocibles, con el fin de asegurar su identificación en imagen y su uso en el fotocontrol y ajuste del bloque fotogramétrico. En el marco de esta etapa se registraron físicamente 57 puntos de control terrestre (GCP) para el casco urbano, los cuales se incorporan como soporte geométrico del proyecto y se articulan con los indicadores de ajuste reportados posteriormente en el Objetivo Específico 2.

La consolidación del control terrestre se apoyó en un diseño preliminar de 37 puntos base ideales, definido en SIG como referencia para orientar la distribución espacial del control. La Figura 14 presenta el esquema de puntos ideales utilizado como guía conceptual y operativa para el levantamiento. Durante la ejecución en campo, los puntos materializados conservaron la lógica espacial del diseño (cobertura perimetral e interior) y, cuando fue necesario, se efectuaron ajustes

de ubicación por condiciones reales del terreno, manteniendo la intención geométrica del esquema y priorizando la viabilidad operativa y la calidad del control.

Figura 14

Distribución de puntos de control terrestre ideales definidos para la planificación del levantamiento GNSS.



Fuente: Elaboración propia.

Registro fotográfico complementario (“fotocontroles”)

Cada GCP quedó asociado a una marca visible en superficie, lo cual permitió establecer correspondencia directa entre la coordenada GNSS levantada y el punto posteriormente identificado en las imágenes UAV. De manera complementaria, se obtuvo un registro de evidencia mediante fotocontroles, consistente en cuatro fotografías por punto, tomadas desde posiciones alrededor del GCP para documentar la marca, el entorno inmediato y referencias cercanas. Este

material constituye soporte de trazabilidad del control terrestre y reduce ambigüedades durante la identificación del punto en oficina.

La figura 15 ilustra la adquisición de registro fotográfico complementario para un punto de control terrestre.

Figura 15

Registro fotográfico complementario en punto de control terrestre (GCP).



Fuente: Elaboración propia

La red final de control terrestre se distribuyó procurando cubrir tanto el perímetro como sectores internos del casco urbano, evitando concentraciones locales de puntos y favoreciendo una

cobertura espacial equilibrada. Con el fin de documentar la coherencia geométrica de la red y su relación con la extensión urbana, la distribución final de los GCP materializados se representó sobre el entorno urbano como malla o red de puntos. La figura 16 presenta la distribución espacial de los 57 GCP levantados y su relación con el área urbana, como evidencia de cobertura perimetral e interior para el ajuste fotogramétrico y el fotocontrol posterior. Los resultados cuantitativos asociados al comportamiento del control en el ajuste (por ejemplo, residuales y métricas de error en GCP/consistencia del proyecto-control) se reportan en el apartado correspondiente al Objetivo Específico 2.

Figura 16

Malla de puntos de control terrestre (GCP) materializados alrededor del casco urbano.



Fuente: Elaboración propia

6.1.5 Ejecución del plan de vuelo con control terrestre previo (casco urbano)

La ejecución de las misiones se realizó bajo los parámetros operacionales consolidados en el apartado 6.1.2 (altura nominal, solapes y segmentación por salidas), y considerando las restricciones operacionales del entorno descritas en el apartado 6.1.3. En términos de trazabilidad, la adquisición se ejecutó con un esquema de control ya documentado (coordenadas GNSS,

identificadores y registro fotográfico por punto), lo cual aseguró la disponibilidad de información de soporte para el fotocontrol posterior en gabinete.

Como resultado, la fase de adquisición quedó asociada a un conjunto consistente de insumos de control (GCP materializados, fotocontroles y distribución espacial documentada) que facilitan el enlace entre observaciones de campo y el ajuste fotogramétrico.

Figura 17

Inicio del plan de vuelo con el dron en el casco urbano del municipio de Puerto Leguízamo.



Fuente: Elaboración propia

6.2 Procesar y generar productos cartográficos de alta precisión, validando su calidad mediante control geométrico y reporte técnico

Posterior a la fase de campo, se generaron productos cartográficos de alta resolución a partir del procesamiento fotogramétrico de imágenes UAV integradas con control terrestre GNSS. Los entregables principales corresponden a ortofotografías y un modelo digital del terreno (DTM), orientados a su uso como insumos base para análisis territoriales y aproximaciones iniciales de amenaza por inundación a escala 1:5.000.

La calidad geométrica del proyecto se documentó mediante el reporte de procesamiento generado por ArcGIS Drone2Map, el cual presenta los resultados del ajuste del bloque y resume métricas clave del vínculo imagen–control. De acuerdo con la documentación del software, este reporte permite revisar el desempeño del ajuste y evaluar la calidad de los puntos involucrados en el proceso, incluyendo GCP (control en tierra), tie points (puntos de enlace) y, cuando existen, checkpoints. En este estudio no se implementó un conjunto independiente de checkpoints; por tanto, la evaluación de exactitud se reporta en términos de consistencia del ajuste y comportamiento del control incorporado.

6.2.1 Control GNSS consolidado para posprocesamiento (descarga y depuración)

Como resultado de la preparación del control GNSS se consolidó un inventario único de puntos de control en formato tabular, integrado por identificadores y coordenadas asociadas a los GCP levantados en campo. Este inventario se estructuró para su importación directa al entorno de procesamiento fotogramétrico y para asegurar trazabilidad durante el ajuste (vinculación punto–coordenada–metadatos de captura).

Dado que la medición se realizó bajo corrección diferencial en tiempo real mediante NTRIP, el insumo principal en oficina corresponde a coordenadas ya corregidas, acompañadas de metadatos de observación (por ejemplo, fecha/hora y modo de solución), lo cual permite una depuración orientada a consistencia de campos, completitud y control de duplicidades.

El resultado de esta fase fue un conjunto de coordenadas consolidadas listas para su normalización geodésica posterior (ajuste de época y manejo de alturas según el marco definido para el proyecto), garantizando que el control incorporado al ajuste fotogramétrico estuviera expresado de forma coherente y compatible con la referencia oficial del proyecto.

6.2.2 Control GNSS normalizado temporalmente (cambio de época a 2018.0)

Como resultado de la normalización geodésica, el conjunto de coordenadas de control fue trasladado desde la época de levantamiento hacia la época oficial del proyecto (2018.0), obteniendo un control temporalmente consistente para su integración al procesamiento fotogramétrico. Esta normalización reduce discrepancias asociadas al carácter cinemático de los marcos de referencia

modernos, en los cuales las coordenadas pueden variar con el tiempo y requieren ser expresadas en una época común para asegurar comparabilidad y almacenamiento coherente.

El producto final de esta fase corresponde a un archivo de control con coordenadas ya expresadas en la época 2018.0, como se ilustra en la tabla 2.

Tabla 2

Cálculo de velocidades a la época 2018.0.

Coordenadas Epoca 2024.822222 (2024-09-26)				Geocol 2004	Velocidades VEMOS 2017		Coordenadas Epoca 2018.0 Res IGAC 715 del 8 de Junio de 2018		
ID	Código	Norte	Este	Elevación	V(S- N)	V(W- E)	Norte	Este	Cota_Geocol_2004
gcp1	Leguizamo	1536379,86	4802055,58	189,6676	0,0101	0,0058	1536379,79	4802055,62	189,6676
gcp2	Leguizamo	1536190,3	4802122,76	182,3449	0,0101	0,0058	1536190,22	4802122,8	182,3449
gcp3	Leguizamo	1536031,79	4802166,12	177,9608	0,0101	0,0058	1536031,71	4802166,16	177,9608
gcp4	Leguizamo	1535926,21	4802003,36	179,8544	0,0101	0,0058	1535926,13	4802003,4	179,8544
gcp5	Leguizamo	1536069,11	4802042,86	176,2094	0,0101	0,0058	1536069,04	4802042,9	176,2094
gcp6	Leguizamo	1536206,25	4801963,66	179,5775	0,0101	0,0058	1536206,18	4801963,7	179,5775
gcp7	Leguizamo	1536392,89	4801856,48	181,4874	0,0101	0,0058	1536392,81	4801856,52	181,4874
gcp8	Leguizamo	1536482,09	4801803,31	182,3151	0,0101	0,0058	1536482,01	4801803,36	182,3151
gcp9	Leguizamo	1536652,16	4801706,26	183,9139	0,0101	0,0058	1536652,09	4801706,3	183,9139
gcp10	Leguizamo	1536834,45	4801600,05	178,0564	0,0101	0,0058	1536834,37	4801600,09	178,0564
gcp11	Leguizamo	1537055,01	4801457,41	180,6483	0,0101	0,0058	1537054,94	4801457,45	180,6483
gcp12	Leguizamo	1537211,85	4801361,77	185,2517	0,0101	0,0058	1537211,77	4801361,82	185,2517
gcp13	Leguizamo	1537633,65	4801222,53	178,7253	0,0101	0,0058	1537633,57	4801222,57	178,7253
gcp14	Leguizamo	1537602,77	4801144,88	173,9147	0,0101	0,0058	1537602,69	4801144,92	173,9147
gcp15	Leguizamo	1537467,37	4801167,96	177,9753	0,0101	0,0058	1537467,29	4801168	177,9753
gcp16	Leguizamo	1537299,2	4801238,4	177,8827	0,0101	0,0058	1537299,13	4801238,45	177,8827
gcp17	Leguizamo	1537231,17	4801053,38	179,4864	0,0101	0,0058	1537231,1	4801053,42	179,4864
gcp18	Leguizamo	1537298,49	4801009,38	176,3632	0,0101	0,0058	1537298,42	4801009,42	176,3632
gcp19	Leguizamo	1537156,15	4801117,61	185,1871	0,0101	0,0058	1537156,08	4801117,65	185,1871

gcp20	Leguizamo	1537075,46	4800998,81	176,9846	0,0101	-	1537075,38	4800998,85	176,9846
gcp21	Leguizamo	1536984,94	4801072,9	178,2699	0,0101	-	1536984,86	4801072,94	178,2699
gcp22	Leguizamo	1537074,62	4801334,99	180,0155	0,0101	-	1537074,55	4801335,03	180,0155
gcp23	Leguizamo	1536837,22	4801483,81	177,0846	0,0101	-	1536837,15	4801483,85	177,0846
gcp24	Leguizamo	1536727,22	4801343,75	175,1288	0,0101	-	1536727,14	4801343,79	175,1288
gcp25	Leguizamo	1536644,35	4801482,57	175,1967	0,0101	-	1536644,28	4801482,62	175,1967
gcp26	Leguizamo	1536480,11	4801617,99	178,7801	0,0101	-	1536480,03	4801618,04	178,7801
gcp27	Leguizamo	1536373,84	4801720,77	175,8568	0,0101	-	1536373,76	4801720,81	175,8568
gcp28	Leguizamo	1536154,98	4801884,36	176,9427	0,0101	-	1536154,9	4801884,41	176,9427
gcp29	Leguizamo	1536224,74	4802236,59	183,1813	0,0101	-	1536224,66	4802236,63	183,1813
gcp30	Leguizamo	1536485,25	4802018,36	191,6592	0,0101	-	1536485,17	4802018,4	191,6592
gcp31	Leguizamo	1536688,91	4802209,1	187,6562	0,0101	-	1536688,84	4802209,15	187,6562
gcp32	Leguizamo	1536808,04	4802224,84	190,1443	0,0101	-	1536807,97	4802224,88	190,1443
gcp33	Leguizamo	1536876,79	4802419,63	189,5584	0,0101	-	1536876,71	4802419,68	189,5584
gcp34	Leguizamo	1537005,02	4802440,13	191,3981	0,0101	-	1537004,94	4802440,17	191,3981
gcp35	Leguizamo	1537085,32	4802392,2	187,2734	0,0101	-	1537085,25	4802392,25	187,2734
gcp36	Leguizamo	1537086,59	4802301,85	181,8564	0,0101	-	1537086,51	4802301,89	181,8564
gcp37	Leguizamo	1537024,04	4802194,36	180,4497	0,0101	-	1537023,97	4802194,4	180,4497
gcp38	Leguizamo	1536823,65	4802072,35	182,3537	0,0101	-	1536823,57	4802072,39	182,3537
gcp39	Leguizamo	1536686,29	4801874,65	182,4444	0,0101	-	1536686,22	4801874,69	182,4444
gcp40	Leguizamo	1536813,95	4801776,66	185,9095	0,0101	-	1536813,87	4801776,7	185,9095
gcp41	Leguizamo	1536937,23	4801937,86	188,9344	0,0101	-	1536937,15	4801937,9	188,9344
gcp42	Leguizamo	1537142,07	4801804,06	189,0982	0,0101	-	1537141,99	4801804,1	189,0982
gcp43	Leguizamo	1537286,34	4801990,85	186,7114	0,0101	-	1537286,26	4801990,89	186,7114
gcp44	Leguizamo	1537437,7	4802204,89	188,236	0,0101	-	1537437,63	4802204,94	188,236
gcp45	Leguizamo	1537516,66	4802337,25	183,6929	0,0101	-	1537516,58	4802337,29	183,6929
gcp46	Leguizamo	1537403,13	4802305,09	189,0277	0,0101	-	1537403,05	4802305,14	189,0277
gcp47	Leguizamo	1537375,16	4801927,48	190,047	0,0101	-	1537375,09	4801927,52	190,047
gcp48	Leguizamo	1537401	4801775,14	182,7154	0,0101	-	1537400,93	4801775,18	182,7154

gcp49	Leguízamo	1537499,8	4801836,66	181,8656	0,0101	0,0058	1537499,72	4801836,7	181,8656
gcp50	Leguízamo	1537514,88	4801967,67	180,9764	0,0101	0,0058	1537514,8	4801967,71	180,9764
gcp51	Leguízamo	1537010,66	4801681,24	187,4889	0,0101	0,0058	1537010,58	4801681,28	187,4889
gcp52	Leguízamo	1537152,95	4801467,16	189,364	0,0101	0,0058	1537152,88	4801467,2	189,364
gcp53	Leguízamo	1537504,48	4801432,01	189,0604	0,0101	0,0058	1537504,4	4801432,06	189,0604
gcp54	Leguízamo	1537670,77	4801499,76	190,309	0,0101	0,0058	1537670,69	4801499,8	190,309
gcp55	Leguízamo	1537801,81	4801648,78	191,0472	0,0101	0,0058	1537801,73	4801648,83	191,0472
gcp56	Leguízamo	1537723,73	4801759,7	189,9044	0,0101	0,0058	1537723,65	4801759,74	189,9044
gcp57	Leguízamo	1537611,61	4801781,45	184,4284	0,0101	0,0058	1537611,54	4801781,49	184,4284

Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Normalización vertical del control GNSS (GEOCOL2004)

Como parte de la estandarización geodésica del control terrestre incorporado al procesamiento fotogramétrico, se aseguró la coherencia de la componente vertical mediante el uso del modelo geoidal GEOCOL2004. Este modelo, documentado como un geoide gravimétrico para Colombia con resolución espacial de $2' \times 2'$, constituye una referencia técnica para vincular alturas GNSS y alturas físicas en el territorio nacional.

En el proyecto, el control GNSS se consolidó bajo el sistema vertical adoptado (alturas ortométricas), verificando que las alturas asociadas a los GCP fueran consistentes con el modelo geoidal empleado; en consecuencia, no fue necesario aplicar un ajuste vertical adicional en oficina más allá de la normalización y verificación de consistencia del control previo a su importación en el software fotogramétrico. Este aseguramiento de coherencia vertical se considera un resultado operativo de la estandarización del control, dado que permite integrar sin ambigüedades el control terrestre con los productos derivados, en particular el DTM.

6.2.4 Conjunto de imágenes UAV consolidado y verificado (Mavic 3 Enterprise)

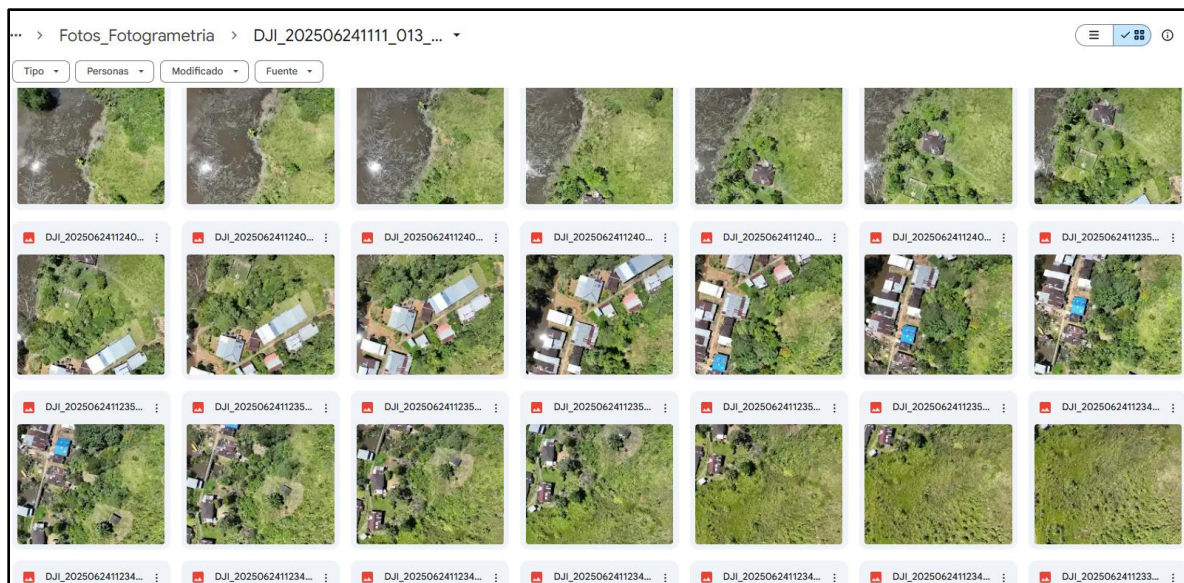
Como resultado de la fase de preparación de insumos, se consolidó el conjunto original de imágenes UAV capturadas con el DJI Mavic 3 Enterprise, preservando su estructura y organización por misiones para garantizar trazabilidad del procesamiento. La verificación incluyó la integridad

del repositorio (existencia y legibilidad de archivos), la continuidad de las misiones registradas y la conservación del dataset en su forma original, evitando modificaciones que alteraran metadatos o la estructura de carpetas (Figura 18).

Este resultado es relevante en el contexto del ajuste fotogramétrico, ya que el procesamiento depende de la conectividad interna entre imágenes solapadas a partir del emparejamiento automático de características (tie points) y del proceso de ajuste (bundle/block adjustment). En consecuencia, un conjunto íntegro y consistente favorece la calibración y reconstrucción; por el contrario, pérdidas o inconsistencias de estructura pueden traducirse en menor conectividad, presencia de imágenes no calibradas y necesidad de re-procesamiento, aspectos reconocidos en la documentación técnica del entorno Drone2Map. Con el conjunto verificado, las imágenes quedaron disponibles como insumo consistente para la fase de ajuste y generación de productos.

Figura 18

Conjunto de imágenes UAV consolidado y verificado.



Fuente: Elaboración propia

6.2.5 Ajuste del bloque en Drone2Map: métricas del procesamiento y consistencia del bloque

El proyecto de procesamiento “Puerto Leguizamo” se desarrolló en ArcGIS Drone2Map Advanced (v2024.1.0). El reporte de procesamiento del proyecto documenta los resultados del

ajuste del bloque y resume indicadores de desempeño del ajuste y del conjunto de imágenes, incluyendo métricas de calibración, resolución promedio y extensión del área procesada.

En la fase de ajuste se registró un total de 4015 imágenes, de las cuales 3990 fueron calibradas, lo que evidencia una alta incorporación del conjunto de imágenes en la solución del bloque y una convergencia adecuada de la calibración para la mayoría del dataset. En Drone2Map, el campo “Calibrated Images” es un control clave para evaluar cuántas imágenes participaron exitosamente en el ajuste.

La resolución media del proyecto reportada (GSD) fue de 0,029 m, con un área de proyecto de 992,901 ha y un tiempo total de procesamiento de 17:57:55, parámetros que quedan consignados en el resumen del reporte como parte del alcance y rendimiento del procesamiento.

En el apartado Adjust Images el reporte registró 16.443.924 tie points y 5.387.025 solution points, lo cual constituye evidencia cuantitativa de la densidad de correspondencias generadas por emparejamiento automático y del soporte geométrico disponible para alinear y estabilizar el bloque. Drone2Map describe que el ajuste se sustenta en la detección de keypoints y su emparejamiento entre imágenes superpuestas para formar tie points; estos, al triangularse y ajustarse, aportan la conectividad necesaria para la orientación de cámaras y la consistencia interna del bloque.

6.2.6 Generación de productos derivados: malla 3D, DEM/DTM y ortofoto verdadera

Con el ajuste del bloque finalizado, el proyecto permitió la generación de productos cartográficos y de representación 3D en ArcGIS Drone2Map. De acuerdo con la documentación del software, Drone2Map soporta la creación de productos 2D y 3D a partir de colecciones de imágenes superpuestas, incluyendo ortoproductos, superficies de elevación y representaciones 3D como mallas texturizadas.

En este estudio se obtuvieron los siguientes productos derivados para el casco urbano:

- Ortofoto verdadera (True Ortho): generada como ortoimagen completamente corregida a visualización nadiral, eliminando la presencia de fachadas o inclinación de objetos hacia los bordes, mediante el uso de un DSM detallado construido a partir de emparejamiento denso de imágenes; este tipo de producto se recomienda para extracción de elementos y comparación multitemporal por su consistencia de vista vertical.

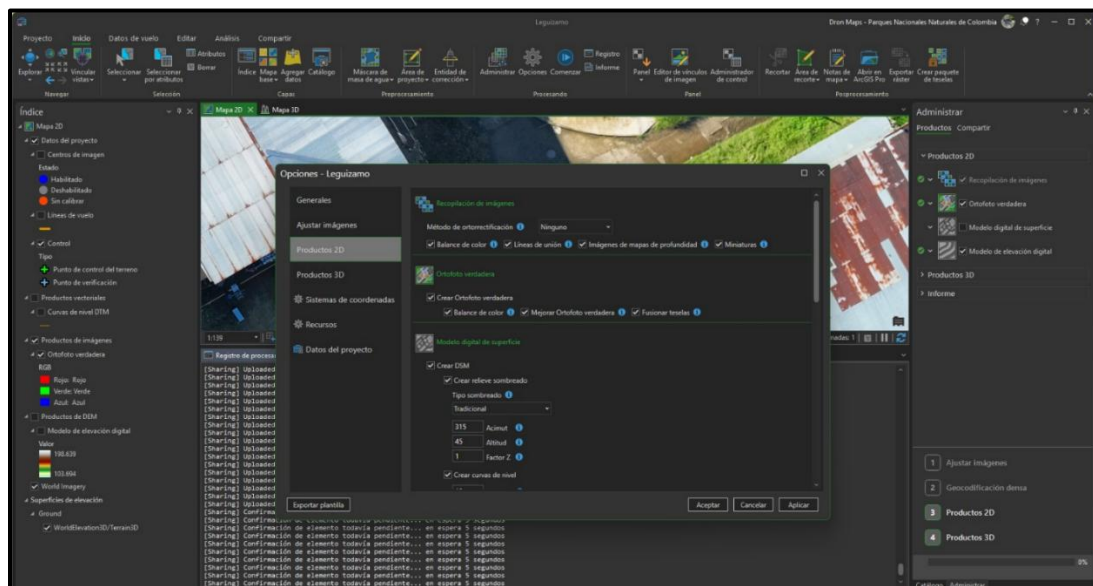
- Modelo Digital del Terreno (DTM): obtenido como superficie de terreno desnudo derivada del proceso de reconstrucción; en Drone2Map, los productos DTM se basan en la nube/estructura generada para el DSM y se producen con resolución interna dependiente del DSM (en la documentación se indica que el DTM se genera a cinco veces la resolución del DSM).
- Malla 3D texturizada: generada como producto 3D para visualización y análisis, disponible en formatos comunes (OBJ/SLPK/3D Tiles) cuando se trabaja con licencia Advanced, lo que permite su integración en entornos SIG y visores 3D.

La Figura 19 documenta la configuración empleada para la generación de productos dentro de Drone2Map y actúa como evidencia del flujo ejecutado. De manera complementaria, el Processing Report del proyecto constituye el soporte documental del expediente, ya que registra el ajuste del bloque y resume el estado del procesamiento, quedando disponible para consulta en formatos PDF/HTML dentro del directorio del proyecto.

En coherencia con el objetivo, los productos se orientan a soportar análisis territoriales a escala 1:5.000 y a facilitar su integración en SIG municipal (PBOT y GRD), manteniendo sistema de referencia y documentación técnica.

Figura 19

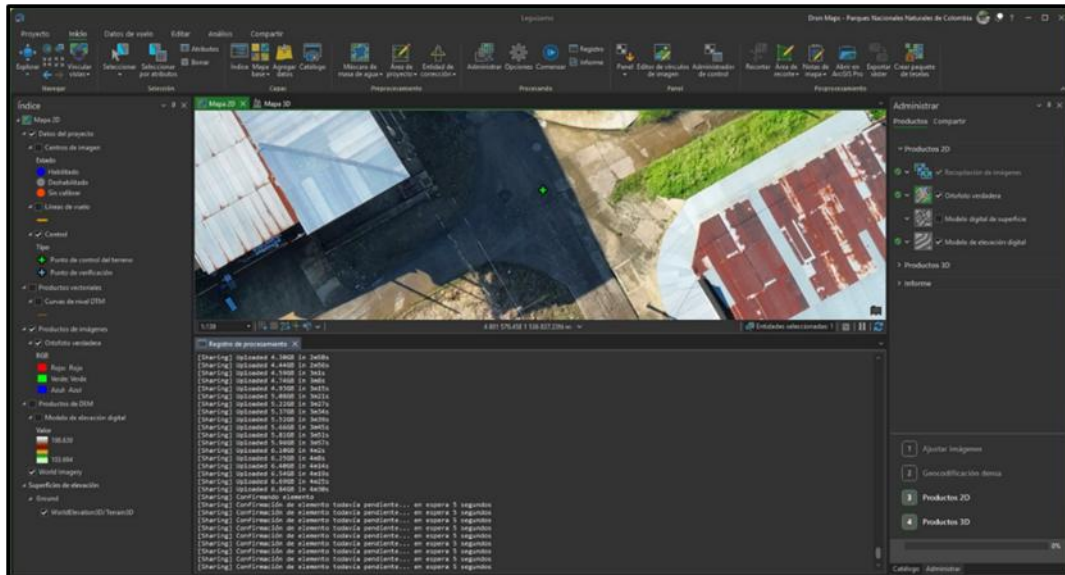
Procesamiento realizado en Drone2Map para el caso del casco urbano de Puerto Leguízamo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 20

Registro final del procesamiento realizado en Drone2Map para el caso del casco urbano de Puerto Leguízamo.



Fuente: Elaboración propia

Productos Cartográficos 2D

a) Ortofoto / Ortofoto verdadera (True Orthophoto)

Se genera una ortofoto verdadera como producto 2D principal para interpretación, digitación y análisis SIG. Su relevancia en PBOT radica en que permite lectura fina del entorno construido y soporte a delimitaciones temáticas (ocupación, infraestructura, borde urbano). En Drone2Map, este producto se deriva de la geometría reconstruida y su precisión espacial queda condicionada por la exactitud absoluta lograda con control y ajuste.

Figura 21

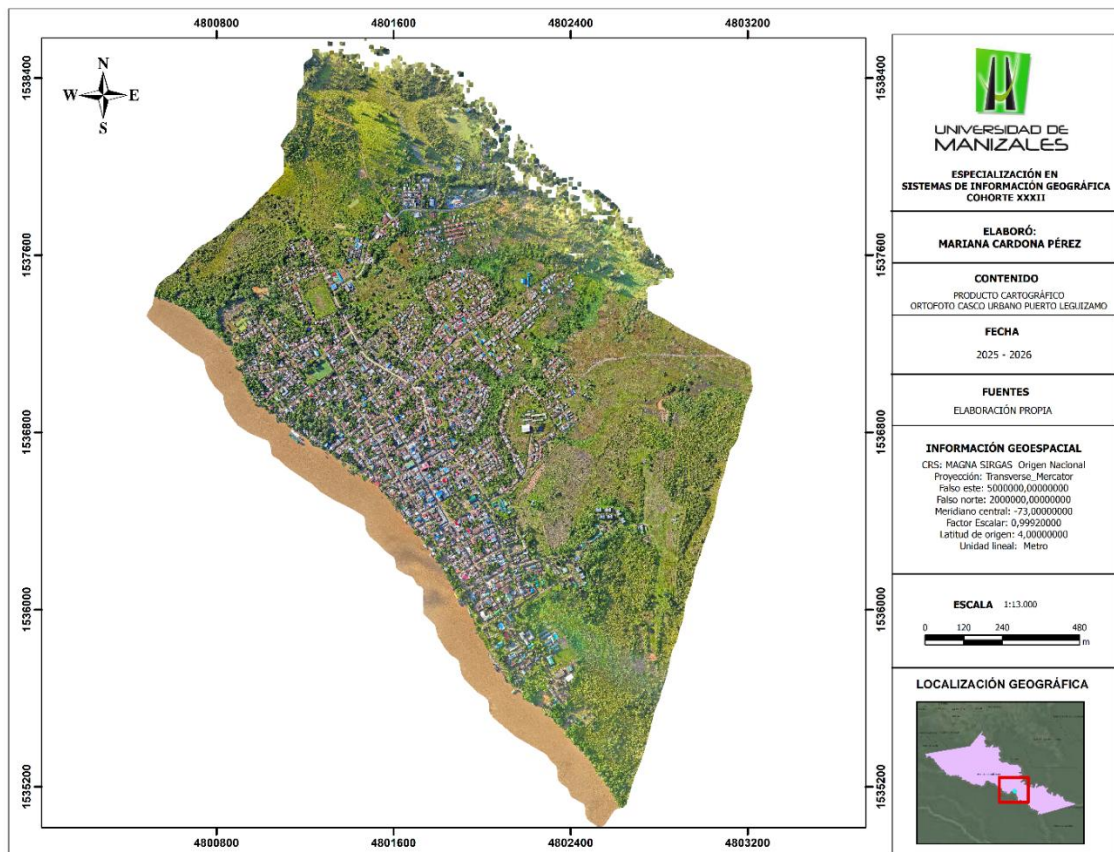
Información raster de la ortofoto generada para el casco urbano de Puerto Leguizamó.

Layer Properties	
General Source Key Metadata Extent Display Symbology Time	
Property	Value
Raster Information	
Columns and Rows	96000, 124000
Number of Bands	3
Cell Size (X, Y)	0,028900187, 0,028900187
Uncompressed Size	33,26 GB
Format	TIFF
Source Type	Generic
Pixel Type	unsigned integer
Pixel Depth	8 Bit

Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Producto cartográfico 2D: Ortofoto casco urbano Puerto Leguizamó.



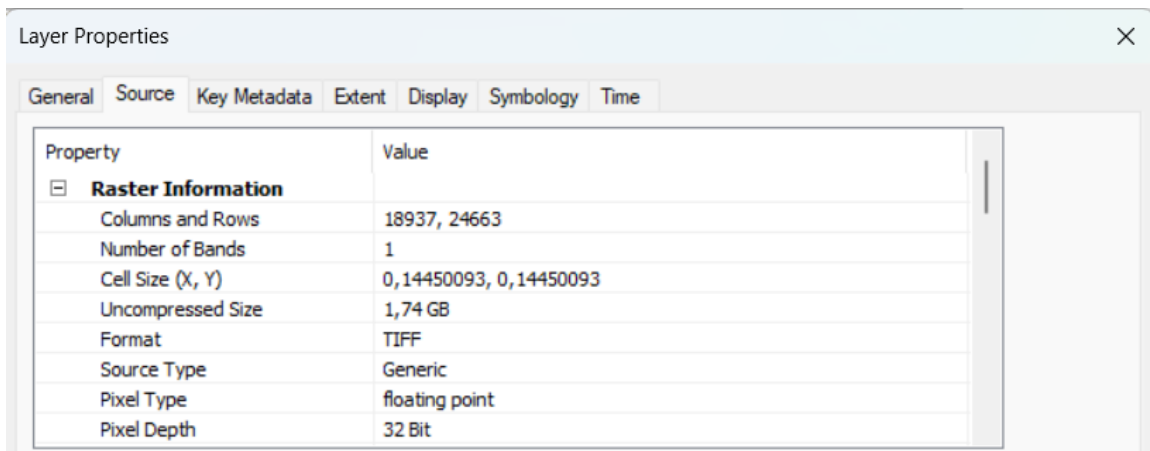
Fuente: Elaboración propia

b) Modelo Digital del Terreno (DTM)

Se genera el DTM como producto de elevación orientado a representar el terreno, insumo clave para análisis del relieve local y derivaciones morfométricas (pendiente, sombreado). La producción del DTM depende del bloque ajustado y de la forma en que el software reconstruye la escena y modela la superficie. Por ello, su consistencia espacial está ligada al control terrestre y a la calidad del ajuste.

Figura 23

Información raster del modelo digital del terreno generado para el casco urbano de Puerto Leguizamó.

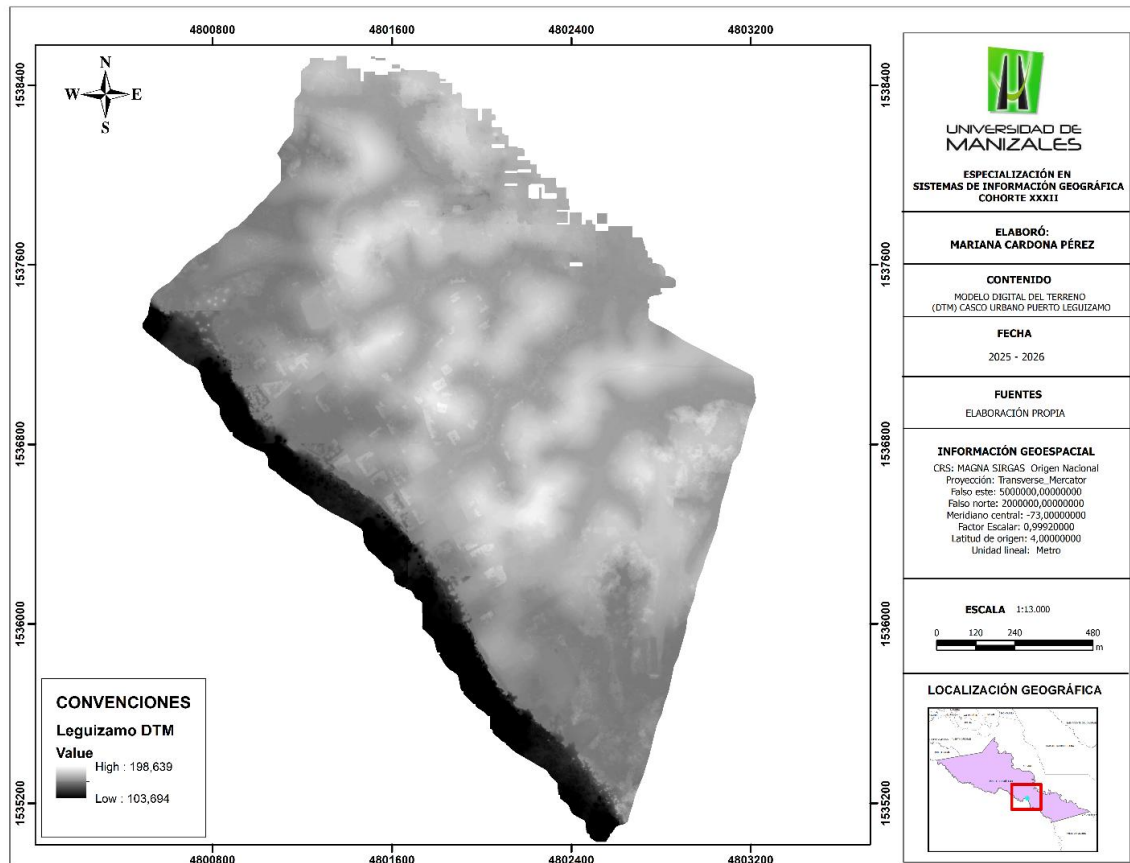


Property	Value
Raster Information	
Columns and Rows	18937, 24663
Number of Bands	1
Cell Size (X, Y)	0,14450093, 0,14450093
Uncompressed Size	1,74 GB
Format	TIFF
Source Type	Generic
Pixel Type	floating point
Pixel Depth	32 Bit

Fuente: Elaboración propia

Figura 24

Producto cartográfico 2D: modelo digital del terreno generado para el casco urbano de Puerto Leguízamo.



Fuente: Elaboración propia

Productos cartográficos 3D

c) Producto 3D (malla 3D texturizada / reconstrucción 3D)

Se genera el producto 3D (malla 3D texturizada) como entregable de visualización y soporte a lectura espacial. Aunque su uso principal es exploratorio/visual, su coherencia geométrica también se origina en el ajuste del bloque y queda documentada por los indicadores de calidad del reporte.

Una vez generada la malla 3D texturizada y la reconstrucción 3D, esta información es cargada a la web mediante el enlace Scene Viewer de Esri, que permitirá que cualquier usuario pueda visualizar en tres dimensiones la información procesada.

Producto cartográfico 3D: malla texturizada 3D visualizada en Scene Viewer, Esri.



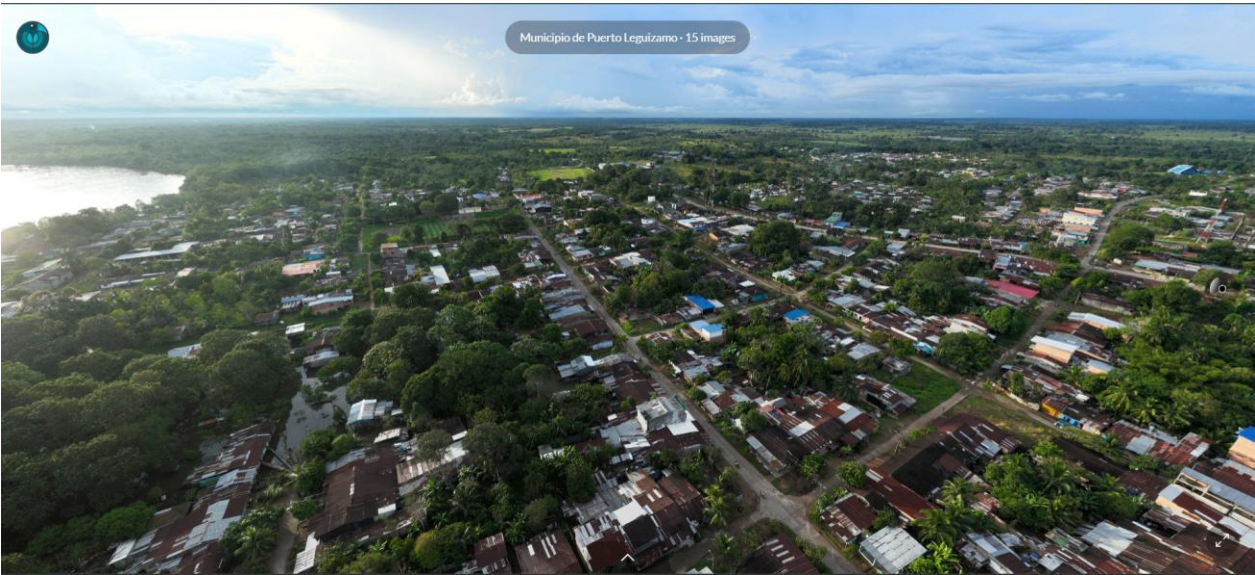
Adicionalmente con el vuelo fotogramétrico fueron procesadas imágenes 360° que pueden ser visualizadas en la web a través de la página “Panoraven” donde fueron cargadas, esta permite tener una visualización 3D y 360° de las tomas realizadas.

Producto cartográfico 3D: Escenas 360 grados del casco urbano de Puerto Leguizamó, visualizadas en Panoraven.



Fuente: Elaboración propia

Figura 27
Producto cartográfico 3D: Escenas 360 grados del casco urbano de Puerto Leguízamo, visualizadas en Panoraven.



Fuente: Elaboración propia

Se presenta la siguiente tabla síntesis que presenta los resultados del procesamiento en Drone2Map y los productos cartográficos generados.

Tabla 3
Productos generados y configuración efectiva de procesamiento (ArcGIS Drone2Map)

Productos generados y configuración efectiva de procesamiento (ArcGIS Drone2Map)		
Componente	Parámetro	Valor reportado
Identificación del proyecto	Nombre del proyecto	Puerto Leguízamo
Identificación del proyecto	Fecha/hora de procesamiento	28/07/2025 3:27 p. m.
Identificación del proyecto	Software	ArcGIS Drone2Map Advanced (v 2024.1.0)
Identificación del proyecto	Modelo de cámara	DJI M3E
Resumen fotogramétrico	Imágenes calibradas / total	3.990 / 4.015
Resumen fotogramétrico	Área de proyecto	992,901 ha (9,929 km²)
Resumen fotogramétrico	Resolución del terreno (GSD)	0,029 m

Resumen fotogramétrico	Resolución del proyecto	Automático 1×GSD (0,029 m)
Resumen fotogramétrico	Tiempo total de procesamiento	17 h 57 m 52 s
Referencia espacial	Sistema de coordenadas de imagen	GCS_WGS_1984 / VCS: EGM96 Geoid
Referencia espacial	Sistema de coordenadas del proyecto	MAGNA-SIRGAS_2018_Origen-Nacional / VCS: EGM96 Geoid
Referencia espacial	Sistema de coordenadas de GCP	MAGNA-SIRGAS_2018_Origen-Nacional / VCS: EGM96 Geoid
Preprocesamiento	Área de proyecto	No
Preprocesamiento	Máscara de masa de agua	No
Preprocesamiento	Entidad de corrección	No
Productos 2D	Crear Ortofoto verdadera	Sí
Productos 2D	Crear Modelo digital del terreno (DTM)	Sí
Productos 2D	Crear Modelo digital de superficie (DSM)	No
Productos 2D	Balance de color	Sí
Productos 2D	Mejorar Ortofoto verdadera	Sí
Productos 2D	Fusionar teselas	Sí
Productos 3D	Crear nube de puntos	No
Productos 3D	Fusionar teselas LAS	No
Productos 3D	Crear malla 3D texturizada	Sí
Productos 3D	Mejorar malla texturizada	Sí

Fuente: Elaboración propia a partir del reporte de procesamiento.

6.2.7 Validación de calidad geométrica: desempeño del control (GCP) e indicadores del ajuste

En la sección de Puntos de control del terreno, el reporte presenta residuales por punto (dX, dY, dZ) y resume el desempeño global mediante RMSE por componente, métricas empleadas para describir la consistencia entre las coordenadas levantadas en campo y la solución ajustada del modelo. Para el proyecto “Puerto Leguísimo”, el reporte consignó un RMSE en GCP de 0,016 m (X), 0,018 m (Y) y 0,016 m (Z). Adicionalmente, se registraron estadísticos descriptivos (mínimo, máximo, mediana y media) y el estado de observaciones, lo cual permite identificar puntos con residuales mayores susceptibles de revisión y sustenta la trazabilidad del control incorporado.

En el conjunto reportado, los residuales máximos alcanzaron valores de hasta 0,060 m en Z y -0,085 m en Y para puntos específicos, información que se conserva como evidencia técnica del comportamiento del control durante el ajuste.

Además del control absoluto, el reporte documenta indicadores asociados a la consistencia interna del bloque. En la sección de Quality Checks se reporta el Tie Point Mean Reprojection Error RMSE (en píxeles), métrica que resume el error promedio de reproyección de los puntos de enlace del proyecto. Para este proyecto, el reporte incluyó estadísticos de error de reproyección en tie points (mediana 0,381 y media 0,455) y un RMSE global de reproyección. Estos valores aportan evidencia cuantitativa sobre la estabilidad de la alineación entre imágenes y el ajuste de la orientación de cámaras dentro del bloque, complementando la evaluación basada en GCP.

6.2.8 Evaluación de exactitud posicional y aseguramiento de calidad en SIG

El aseguramiento de calidad y la evaluación de exactitud posicional de los productos generados se documentaron dentro del marco técnico definido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para cartografía básica oficial. En particular, la Resolución 471 de 2020 establece las especificaciones técnicas mínimas para los productos de cartografía básica oficial de Colombia, y la Resolución 197 de 2022 introduce modificaciones a dicho marco.

En coherencia con este marco, el proyecto consolidó un expediente técnico de calidad que integra: evidencia del ajuste fotogramétrico y del control incorporado (reporte de procesamiento), métricas de consistencia del control (RMSE y residuales en GCP) y trazabilidad de productos generados para su uso e integración en SIG. El reporte de procesamiento constituye el soporte documental del ajuste y permite revisar la calidad de los puntos usados en el ajuste (GCP y tie points).

La tabla número 4 expone los valores de validación geométrica y demás factores representados en el reporte de procesamiento:

Tabla 4

Validación geométrica mediante control terrestre (GCP) e indicadores del Reporte de Procesamiento

Validación geométrica mediante control terrestre (GCP) e indicadores del Reporte de Procesamiento		
Componente de validación	Indicador	Resultado reportado
Control terrestre (GCP)	Número de GCP reportados	51
RMSE de GCP (m)	RMSE X (m)	0,016
RMSE de GCP (m)	RMSE Y (m)	0,018
RMSE de GCP (m)	RMSE Z (m)	0,016
Residuales por componente (m)	dX mínimo / máximo	-0,045 / 0,032
Residuales por componente (m)	dY mínimo / máximo	-0,085 / 0,037
Residuales por componente (m)	dZ mínimo / máximo	-0,026 / 0,060
Tendencia central de residuales (m)	Mediana dX / dY / dZ	0,002 / 0,001 / -0,003
Tendencia central de residuales (m)	Valor medio dX / dY / dZ	0,000 / -0,000 / -0,000
Estado de observación en imágenes	Puntos con 4/4 observaciones	49 de 51
Estado de observación en imágenes	Puntos con 3/4 observaciones	1 de 51
Estado de observación en imágenes	Puntos con 3/3 observaciones	1 de 51
Coherencia interna del ajuste	Tie points (puntos de enlace)	16.443.924
Coherencia interna del ajuste	Solution points (puntos de solución)	5.387.025

Fuente: Elaboración propia a partir del reporte de procesamiento.

Figura 28

Detalles obtenidos en el informe de procesamiento donde se evidencia los valores obtenidos para cada uno de los puntos de control del terreno y el valor RMS final.

Puntos de control del terreno					
	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	Error de proyección (píxeles)	Estado
gcp1	0.004	0.012	0.002	1.245	4/4
gcp10	0.008	-0.005	-0.003	0.718	4/4
gcp11	-0.002	0.000	-0.002	0.660	4/4
gcp12	0.020	-0.015	-0.010	1.330	3/4
gcp13	0.000	-0.029	-0.010	1.370	4/4
gcp14	-0.024	-0.010	-0.010	0.881	4/4
gcp15	0.025	0.009	0.015	0.957	4/4
gcp16	0.005	0.022	-0.001	2.013	4/4
gcp17	-0.004	-0.000	0.015	1.265	4/4
gcp18	-0.020	-0.001	-0.016	0.666	4/4
gcp19	-0.023	0.011	-0.011	0.896	4/4
gcp2	0.032	-0.007	-0.017	1.325	4/4
gcp20	-0.026	0.037	0.007	1.453	4/4
gcp21	0.018	-0.007	0.015	0.720	4/4
gcp22	-0.020	-0.008	0.023	2.644	3/5
gcp23	-0.008	0.023	-0.006	0.769	4/4
gcp24	-0.013	0.033	0.003	1.121	4/4
gcp25	-0.007	0.005	0.001	0.592	4/4
gcp26	0.005	0.027	-0.008	0.978	4/4
gcp27	0.016	0.013	0.020	0.769	4/4
gcp28	-0.018	0.004	0.021	0.918	4/4
gcp29	0.012	-0.006	-0.018	0.895	4/4
gcp3	-0.015	0.001	-0.006	0.717	4/4
gcp30	0.006	0.001	-0.006	0.681	4/4
gcp31	0.019	-0.006	-0.019	0.751	4/4
gcp32	0.023	-0.002	0.020	0.692	4/4
gcp34	0.004	-0.016	-0.005	0.530	4/4
gcp35	0.010	0.005	0.026	0.649	4/4
gcp36	0.020	-0.004	-0.010	1.003	4/4
gcp37	-0.045	0.007	-0.025	1.650	4/4
gcp38	-0.024	0.014	0.012	0.970	4/4

	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	Error de proyección (píxeles)	Estado
gcp4	-0.001	0.003	0.003	0.415	4/4
gcp41	0.020	-0.006	-0.010	0.786	4/4
gcp42	-0.001	-0.004	0.019	0.513	4/4
gcp43	0.014	0.001	0.010	0.832	4/4
gcp44	-0.008	-0.012	0.003	0.741	4/4
gcp45	0.014	0.007	0.030	0.619	4/4
gcp46	-0.003	-0.006	-0.007	0.652	4/4
gcp47	0.008	-0.019	-0.026	0.710	4/4
gcp48	-0.028	-0.085	0.060	2.544	4/4
gcp49	0.023	0.009	-0.022	0.851	4/4
gcp5	0.003	0.001	-0.003	0.542	4/4
gcp51	0.005	-0.001	-0.010	0.604	4/4
gcp52	-0.028	0.018	-0.021	1.057	4/4
gcp53	-0.009	-0.005	-0.018	0.525	4/4
gcp55	0.007	0.003	-0.004	0.807	4/4
gcp57	-0.002	0.008	-0.009	0.858	4/4
gcp6	0.020	-0.010	0.008	1.122	4/4
gcp7	-0.003	0.007	0.005	0.390	4/4
gcp8	-0.010	0.005	-0.017	0.606	4/4
gcp9	0.002	0.009	0.007	0.500	4/4
RMS	0.016	0.018	0.018		
Min.	-0.045	-0.085	-0.026		
Máx.	0.032	0.037	0.060		
Mediana	0.002	0.001	-0.003		
Valor medio	0.000	-0.000	-0.000		

Fuente: Elaboración propia a partir del reporte de procesamiento.

6.3 Analizar la utilidad y aplicabilidad de los productos cartográficos en escenarios de ordenamiento territorial, incluyendo planificación de infraestructura, gestión del riesgo y actualización catastral

Los productos cartográficos y tridimensionales generados a partir del procesamiento fotogramétrico constituyen insumos técnicos de alta resolución que permiten fortalecer diferentes componentes del ordenamiento territorial. En este apartado se presentan resultados asociados a su aplicabilidad práctica en tres escenarios prioritarios: planificación de infraestructura y equipamientos, gestión del riesgo y actualización catastral.

La utilidad se evalúa a partir de la capacidad de estos productos para integrarse en entornos SIG, soportar análisis espaciales a escala local y aportar información actualizada y verificable para procesos institucionales, particularmente en el marco de la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT).

6.3.1 Aplicabilidad en escenarios de planificación de infraestructura y equipamientos

La ortofoto verdadera generada constituye un insumo fundamental para la planificación de infraestructura, dado que proporciona una representación geométricamente corregida del territorio, en la cual es posible identificar con precisión la localización y el estado de la infraestructura existente (vías, puentes, equipamientos, redes visibles y áreas intervenidas). Su resolución espacial permite realizar interpretaciones detalladas del entorno urbano y periurbano, facilitando la identificación de trazados, alineamientos y áreas disponibles para la localización de nuevos proyectos de infraestructura.

Desde el punto de vista técnico, la utilidad de la ortofoto se evidencia en su capacidad para servir como base cartográfica actualizada sobre la cual se pueden superponer capas temáticas (red vial, equipamientos, usos del suelo, proyectos propuestos), reduciendo la dependencia de cartografía desactualizada o de menor resolución. Asimismo, la coherencia espacial garantizada por el control geométrico permite que las mediciones de distancia y área realizadas en SIG sean consistentes con el terreno, lo cual es relevante para estudios preliminares de diseño y planificación.

De manera complementaria, los productos 3D (malla 3D texturizada y escenas tridimensionales) aportan una representación espacial integrada del entorno construido y natural, útil para análisis visual, identificación de relaciones topográficas básicas y comunicación técnica con actores institucionales. Aunque estos productos no sustituyen estudios de ingeniería detallados, su aporte se ubica en la fase de diagnóstico y formulación de alternativas, al facilitar la lectura espacial del territorio y la verificación visual de condiciones del entorno.

Salidas gráficas asociadas: cartografía temática con soporte en ortofoto verdadera

Todas las salidas gráficas desarrolladas en el presente apartado se elaboran tomando como insumo base la ortofoto verdadera generada en el proyecto, la cual presenta consistencia espacial y resolución suficiente para interpretación urbana detallada.

El uso de la ortofoto como capa base responde a su función como insumo de cartografía básica multipropósito para procesos de ordenamiento territorial, en tanto posibilita identificar elementos físicos del territorio, reconocer patrones de ocupación y construir cartografía temática con soporte espacial verificable. Este enfoque es coherente con la orientación institucional de las

especificaciones técnicas de cartografía básica (ortoimágenes y modelos del terreno) como insumos para planeación territorial y usos multipropósito.

a) Conflictos de uso del suelo y cruces con rondas hídricas/humedales urbanos

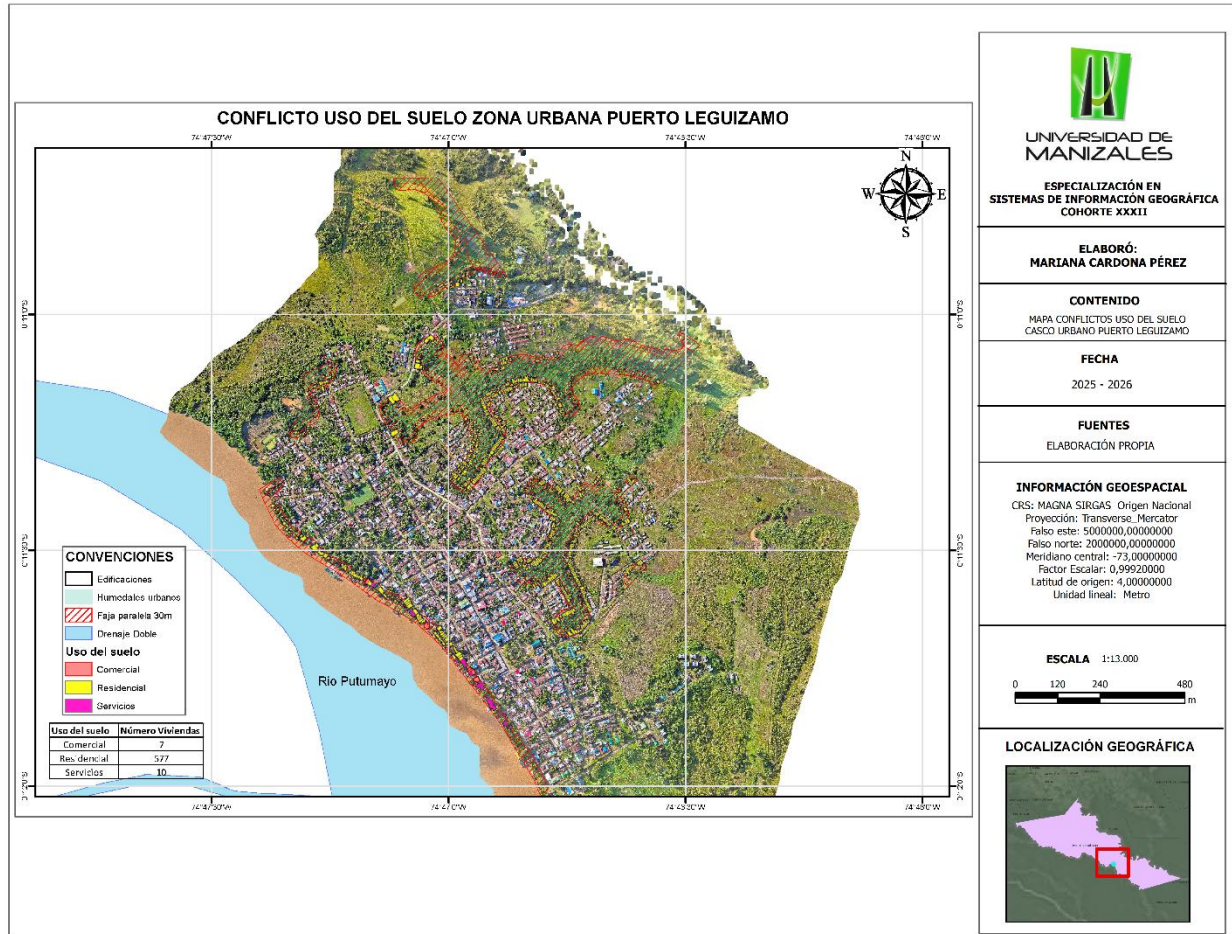
Como resultado temático se generó un mapa de conflictos de uso del suelo que identifica interacciones críticas entre ocupación edificada y componentes ambientales urbanos (drenajes y humedales urbanos), con el fin de aportar evidencia espacial para determinantes y restricciones en el PBOT. Este tipo de análisis se articula con los objetivos del ordenamiento territorial municipal, que incluyen el uso racional del suelo, la protección ambiental y la prevención de riesgos.

Para establecer un criterio espacial de referencia asociado a rondas hídricas, se incorporó una faja paralela de hasta treinta metros desde el cauce permanente en cuerpos de agua, de acuerdo con la definición contenida en el artículo 83 del Decreto 2811 de 1974, Código Nacional de Recursos Naturales (Presidencia de la República de Colombia, 1974). El cruce espacial entre esta franja y la ocupación edificada permitió identificar zonas con presencia de edificaciones dentro del área de referencia, así como sectores donde se evidencia presión antrópica sobre humedales o drenajes urbanos.

La Figura 29 presenta: edificaciones clasificadas por uso (comercial, residencial y servicios), drenajes/humedales urbanos, la faja paralela de referencia, y los cruces resultantes sobre la ortofoto verdadera. Esta salida constituye un insumo directo para la lectura de conflictos y para la formulación de medidas de manejo en escenarios de planificación territorial, al hacer explícita la localización espacial de conflictos en relación con determinantes ambientales.

Figura 29

Conflictos de uso del suelo y cruces con rondas hídricas/humedales urbanos en el casco urbano Puerto Leguizamo.



Fuente: Elaboración propia a partir de ortofoto generada.

b) Desarrollo urbano: crecimientos 2004–2018–2025 y zonas de expansión

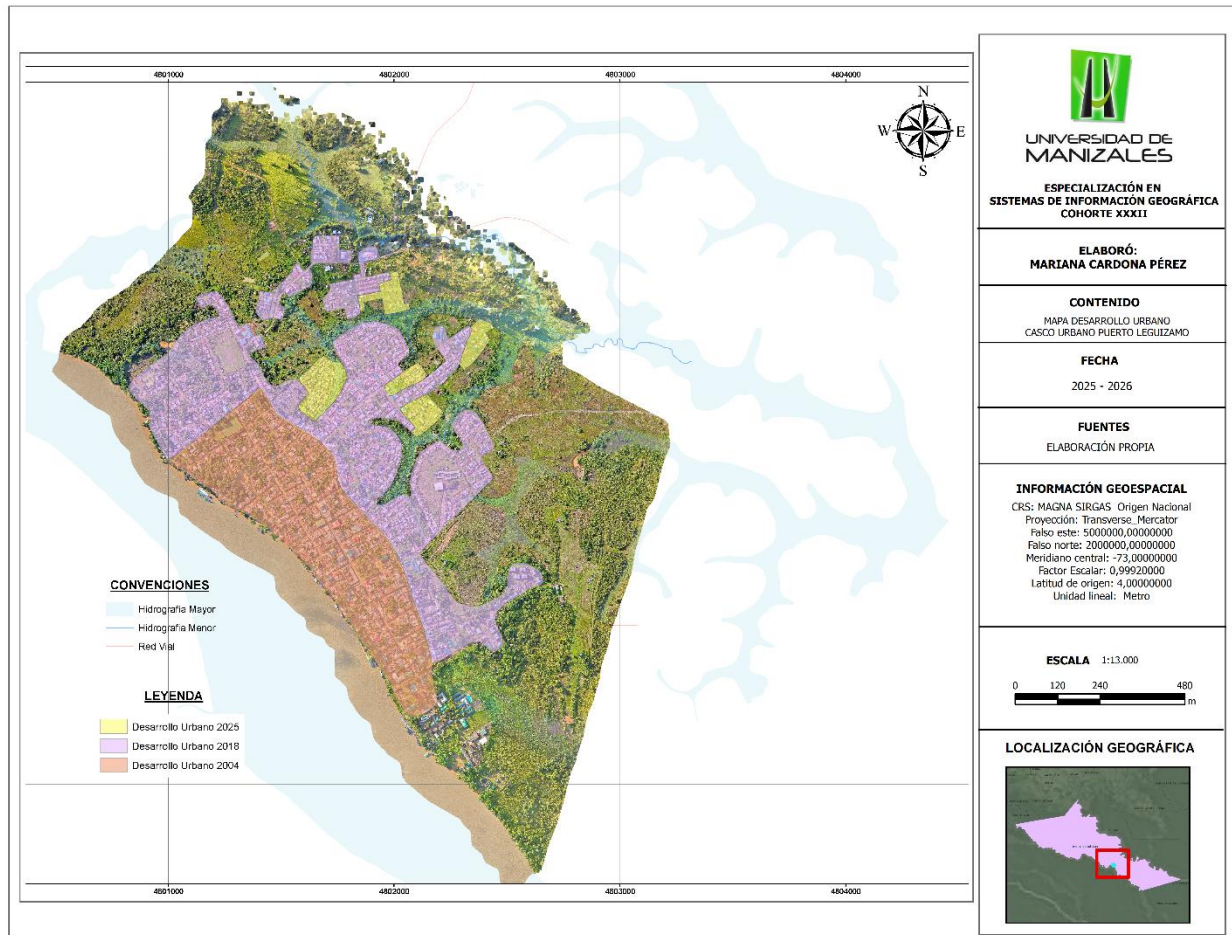
Como resultado del análisis multitemporal se generó un mapa de desarrollo urbano que representa áreas de crecimiento del casco urbano en tres momentos (2004, 2018 y 2025) y su relación con zonas de expansión. La salida integra los periodos históricos y la referencia contemporánea sobre la ortofoto verdadera 2025, permitiendo documentar cartográficamente la dinámica de ocupación consolidada y los frentes espaciales hacia los cuales se han orientado los procesos de expansión.

La comparación por periodos permite identificar patrones de crecimiento (dirección, continuidad de manchas urbanas, posibles zonas de densificación y expansión periférica), y aporta evidencia espacial para sustentar la delimitación de zonas de expansión en el diagnóstico PBOT. Este tipo de lectura es pertinente en el marco del ordenamiento territorial municipal, en tanto la Ley 388 de 1997 concibe el ordenamiento como un conjunto de acciones de planificación física para regular el uso, transformación y ocupación del suelo, orientadas al interés general, la función social y ecológica de la propiedad y la mejora de la seguridad frente a riesgos.

En este contexto, la ortofoto verdadera 2025 funciona como base de referencia de alta resolución para reconocer el estado actual de la ocupación, mientras que las capas 2004 y 2018 permiten contrastar la evolución espacial del crecimiento urbano. La figura 30 presenta las áreas de crecimiento urbano por periodo y la delimitación de zonas de expansión, integradas sobre la ortofoto verdadera como soporte de referencia espacial para el análisis.

Figura 30

Desarrollo urbano: crecimiento 2004–2018–2025 y zonas de expansión en el casco urbano de Puerto Leguizamo.



Fuente: Elaboración propia a partir de ortofoto generada

c) Elementos de interés patrimonial (cementeros, parques, catedrales/capillas, monumentos, biblioteca)

Como resultado del componente de planificación de infraestructura y equipamientos, se generó un mapa temático de elementos de interés patrimonial (cementeros, parques, catedrales/capillas, monumentos y biblioteca), orientado a su identificación y espacialización como referentes urbanos estructurantes dentro del diagnóstico PBOT. Esta salida aporta evidencia cartográfica sobre la localización y el contexto espacial de hitos representativos del territorio, aspecto pertinente dado que la Ley 388 de 1997 incorpora entre los objetivos del ordenamiento

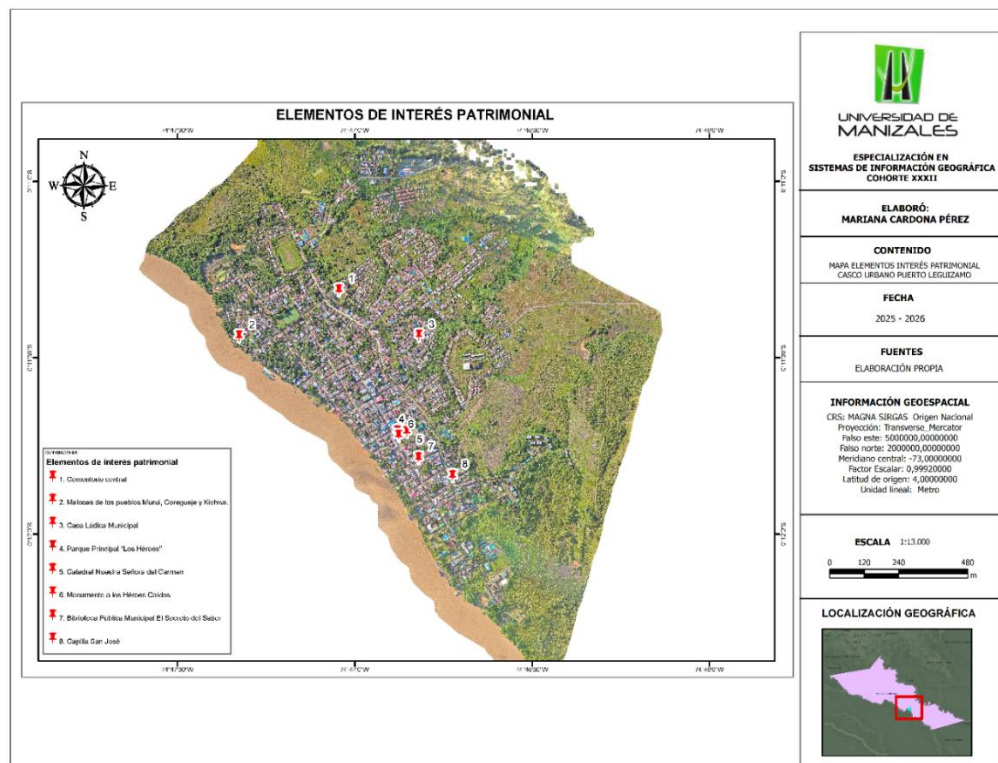
territorial la preservación y defensa del patrimonio cultural y natural, lo que requiere su reconocimiento territorial con soporte técnico.

La ortofoto verdadera (2025) permitió reconocer huellas físicas y límites visibles de varios de estos elementos con un nivel de detalle superior al de cartografía general, facilitando su delimitación espacial y su integración con capas institucionales existentes en un entorno SIG. Este uso es coherente con la orientación del IGAC sobre cartografía básica oficial, donde las ortoimágenes y los modelos del terreno se consideran insumos de referencia para usos multipropósito y pueden soportar múltiples procesos de planificación y ordenamiento territorial, incluidos inventarios y delimitaciones temáticas.

En conjunto, el inventario espacial de elementos patrimoniales constituye un insumo para la lectura de estructura urbana (centralidades, nodos y espacios públicos), la priorización de intervenciones y la articulación de determinantes culturales dentro del PBOT, al disponer de una capa cartográfica verificable y actualizada sobre la distribución de estos referentes.

Figura 31

Delimitación de elementos de interés patrimonial en el casco urbano de Puerto Leguízamo.



Fuente: Elaboración propia a partir de ortofoto generada

d) Espacio público y equipamientos recreativos (con red vial, malla predial y perímetro urbano)

Como resultado del análisis de infraestructura y equipamientos se generó un mapa temático de espacio público y equipamientos recreativos, en el cual se delimitan y localizan parques, coliseos, zonas verdes, canchas, estadios y otros equipamientos asociados a la recreación y al uso colectivo. Esta salida se integró con la red vial, la malla predial y el perímetro urbano, con el propósito de representar estos elementos en relación con accesibilidad, distribución territorial y cobertura espacial de equipamientos dentro del casco urbano.

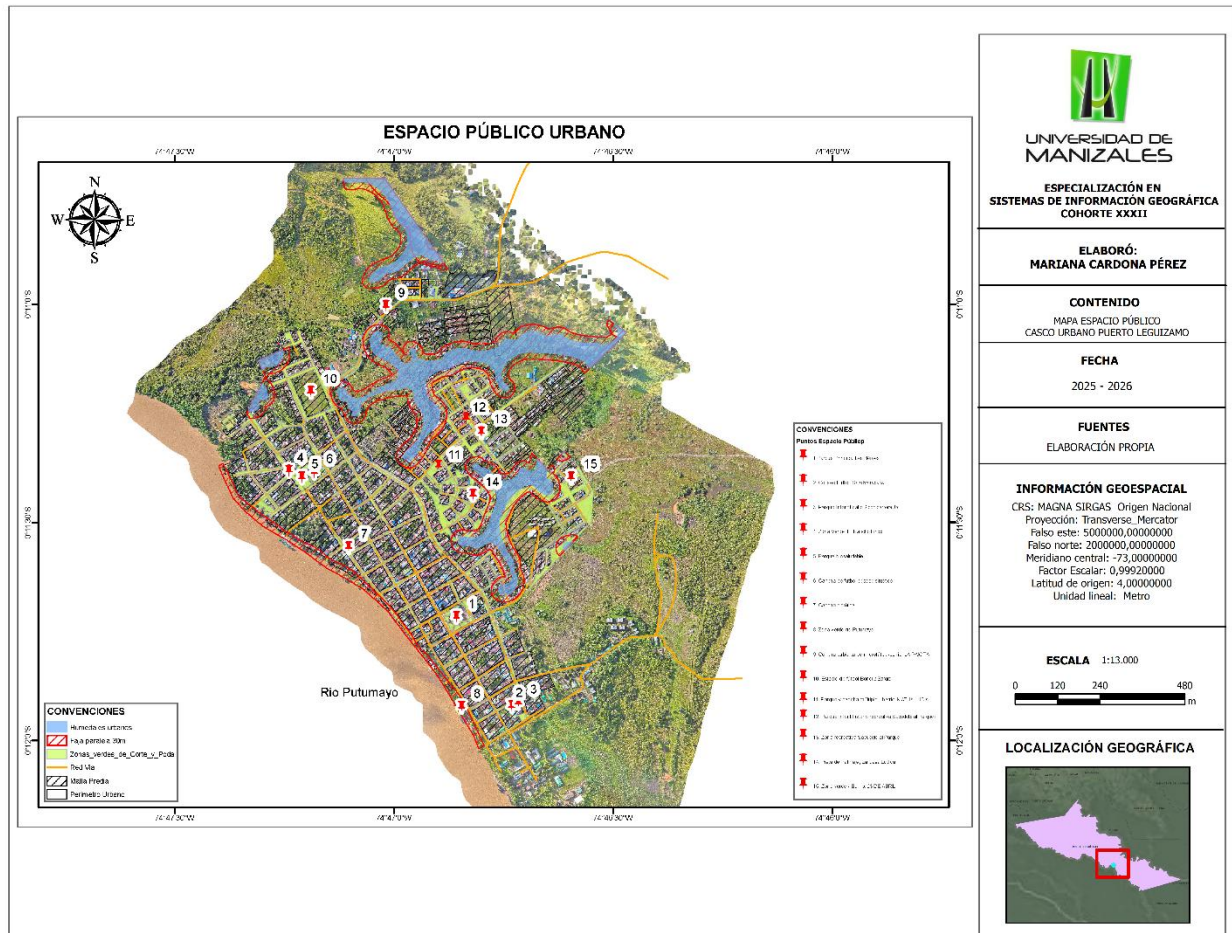
La pertinencia de este producto para el diagnóstico PBOT se sustenta en que la Ley 388 de 1997 concibe el ordenamiento territorial como función pública orientada, entre otros fines, a asegurar el acceso a infraestructuras y espacios públicos y a la defensa del espacio público y su destinación al uso común. En este sentido, la cartografía resultante permite disponer de un inventario espacial verificable de equipamientos recreativos y de espacios públicos, articulado a la estructura urbana (vías y predios) y al límite urbano, facilitando su lectura como componente estructurante del territorio.

La integración de ortofoto verdadera con red vial, predial y perímetro urbano permitió, además, verificar la presencia física y los límites observables de varios equipamientos y áreas recreativas, reduciendo la dependencia de registros desactualizados o incompletos. Este uso es coherente con el carácter multipropósito de la cartografía básica oficial y con el rol de las ortoimágenes como insumos de referencia para planeación territorial y elaboración de cartografía temática en entornos SIG.

En conjunto, el mapa constituye un insumo para identificar patrones de distribución de equipamientos recreativos, reconocer sectores con mayor o menor disponibilidad relativa de espacio público y orientar, con soporte espacial, la formulación de estrategias de consolidación o ampliación de equipamientos en el PBOT.

Figura 32

Delimitación de espacio público y equipamientos recreativos con red vial, malla predial y perímetro urbano Puerto Leguizamo.



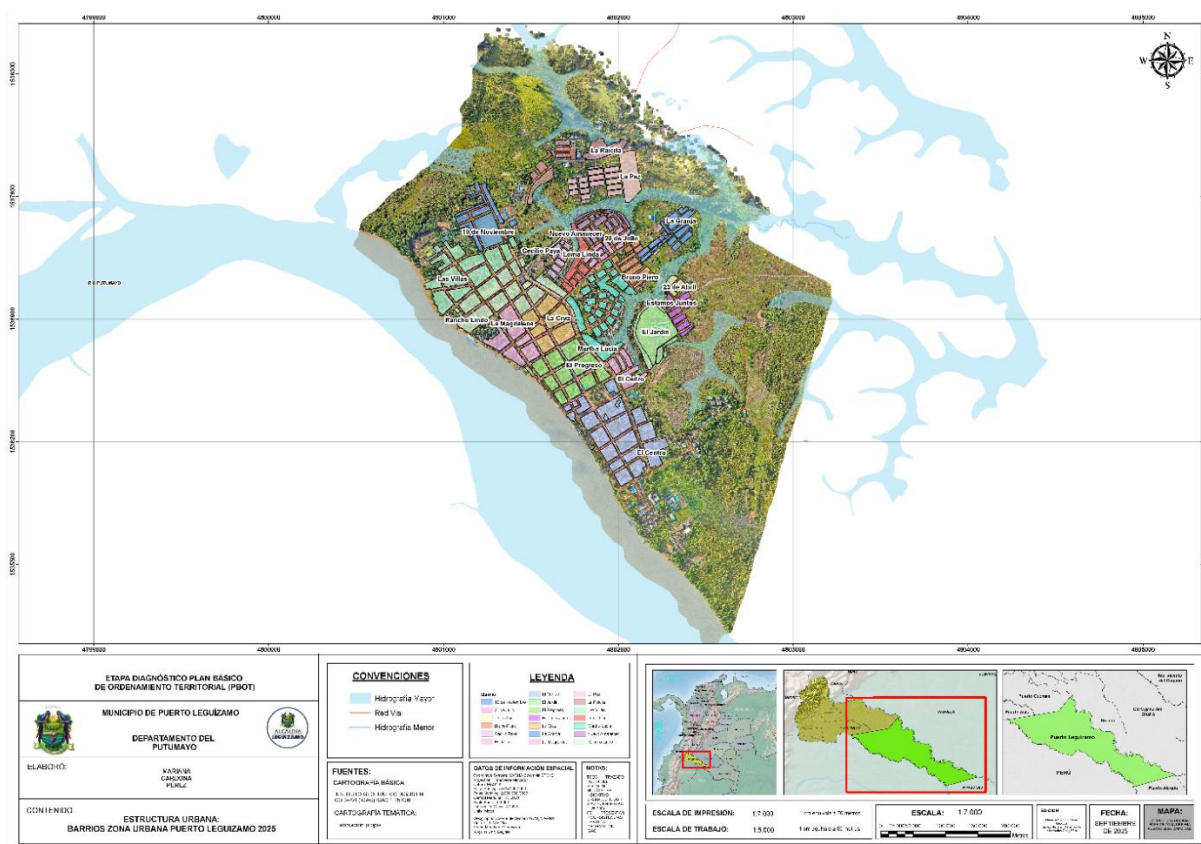
Fuente: Elaboración propia a partir de ortofoto generada

e) Estructura urbana 2025: barrios y manzanas (nomenclatura actualizada PBOT)

El mapa de estructura urbana 2025 se integra para consolidar una lectura organizada del tejido urbano mediante la identificación y delimitación de barrios y manzanas, incorporando su nomenclatura actualizada para el proceso de revisión PBOT 2025. Esta salida permite fortalecer la coherencia del diagnóstico urbano, ya que proporciona una unidad espacial intermedia (manzana) y una unidad socio-territorial (barrio) que facilitan análisis de equipamientos, accesibilidad, densificación, conflictos de uso y priorización de intervenciones. La pertinencia de esta cartografía deriva de la necesidad de ordenar el territorio bajo criterios verificables y de soportar decisiones urbanísticas con delimitaciones claras.

En la figura 33, se presenta la delimitación de barrios y manzanas del casco urbano con nombres actualizados para PBOT 2025, construida sobre ortofoto verdadera y con referencia espacial documentada.

Estructura urbana 2025: barrios y manzanas con nomenclatura actualizada zona urbana Puerto Lequízamo.



Fuente: Elaboración propia a partir de ortofoto generada.

6.3.2 Gestión del riesgo (inundación): lectura topográfica y susceptibilidad a partir del DTM

En el marco del componente de conocimiento del riesgo, la gestión del riesgo requiere insumos que permitan comprender el territorio desde su configuración física y su relación con fenómenos potenciales, como la inundación. La Ley 1523 de 2012 concibe la gestión del riesgo como un proceso orientado al conocimiento y reducción del riesgo y su integración a la planificación territorial, lo que implica disponer de insumos espaciales consistentes para caracterizar el entorno.

En este escenario, el Modelo Digital del Terreno (DTM) generado en el proyecto se utiliza como insumo central porque representa la topografía con resolución y referencia espacial documentadas en el expediente técnico.

Con base en ese DTM se construyen productos derivados que no reemplazan una modelación hidráulica, pero sí fortalecen el diagnóstico territorial al permitir identificar patrones de relieve, gradientes y zonas potencialmente predispuestas a acumulación o conducción de escorrentía. En este apartado se incluyen: sombreado del relieve (hillshade), pendiente y, opcionalmente, zonas bajas o unidades críticas preliminares. Asimismo, la ortofoto verdadera permite identificar elementos expuestos (viviendas, vías, equipamientos) y rasgos superficiales relevantes para la lectura territorial.

a) Relieve sombreado derivado del DTM

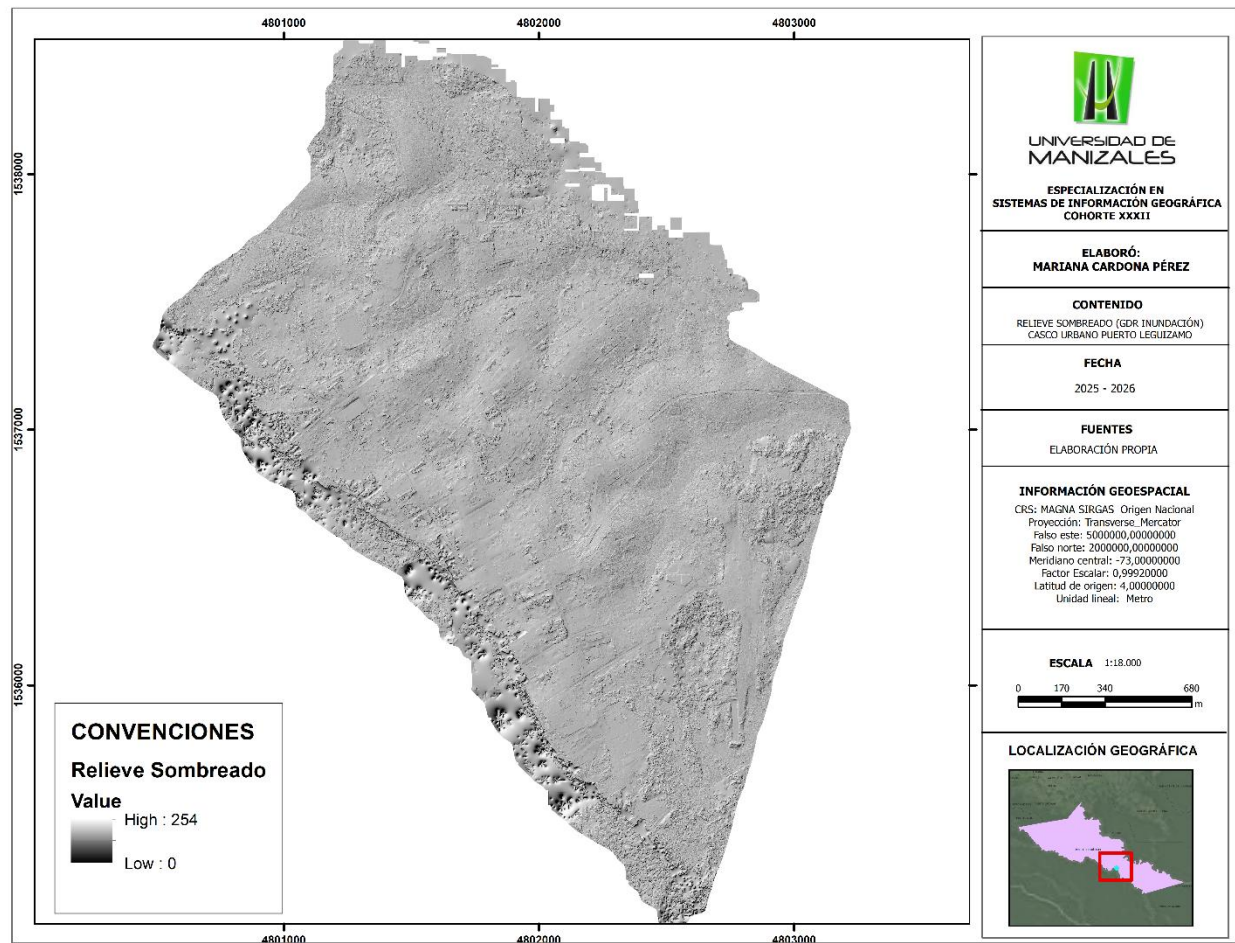
El relieve sombreado o Hillshade se incorpora como salida gráfica porque permite una lectura más clara del relieve que la elevación cruda, al simular iluminación y sombras sobre la superficie. En ArcMap, la función Hillshade produce una representación en escala de grises del terreno considerando la posición relativa del sol y la combinación entre pendiente y orientación de la superficie; además, se define como un método cualitativo de visualización que no entrega valores absolutos de elevación, sino que mejora la interpretación de formas del terreno.

En términos de gestión del riesgo por inundación, esta salida resulta útil para identificar microformas del terreno urbano (depresiones, lomas, cambios bruscos de pendiente, bordes de terraza, taludes) que influyen en la acumulación y circulación del agua durante eventos de lluvia o desbordamiento. El valor del hillshade radica en que facilita la lectura de continuidad topográfica, permitiendo reconocer corredores de escorrentía o zonas de estancamiento potencial que,

posteriormente, pueden cruzarse con elementos expuestos y componentes hídricos del diagnóstico PBOT. El hillshade se emplea como representación cualitativa del relieve para mejorar la lectura de formas del terreno y discontinuidades topográficas relevantes en el análisis de susceptibilidad por inundación.

Figura 34

Sombreado del relieve (hillshade) derivado del DTM del casco urbano Puerto Leguizamó.



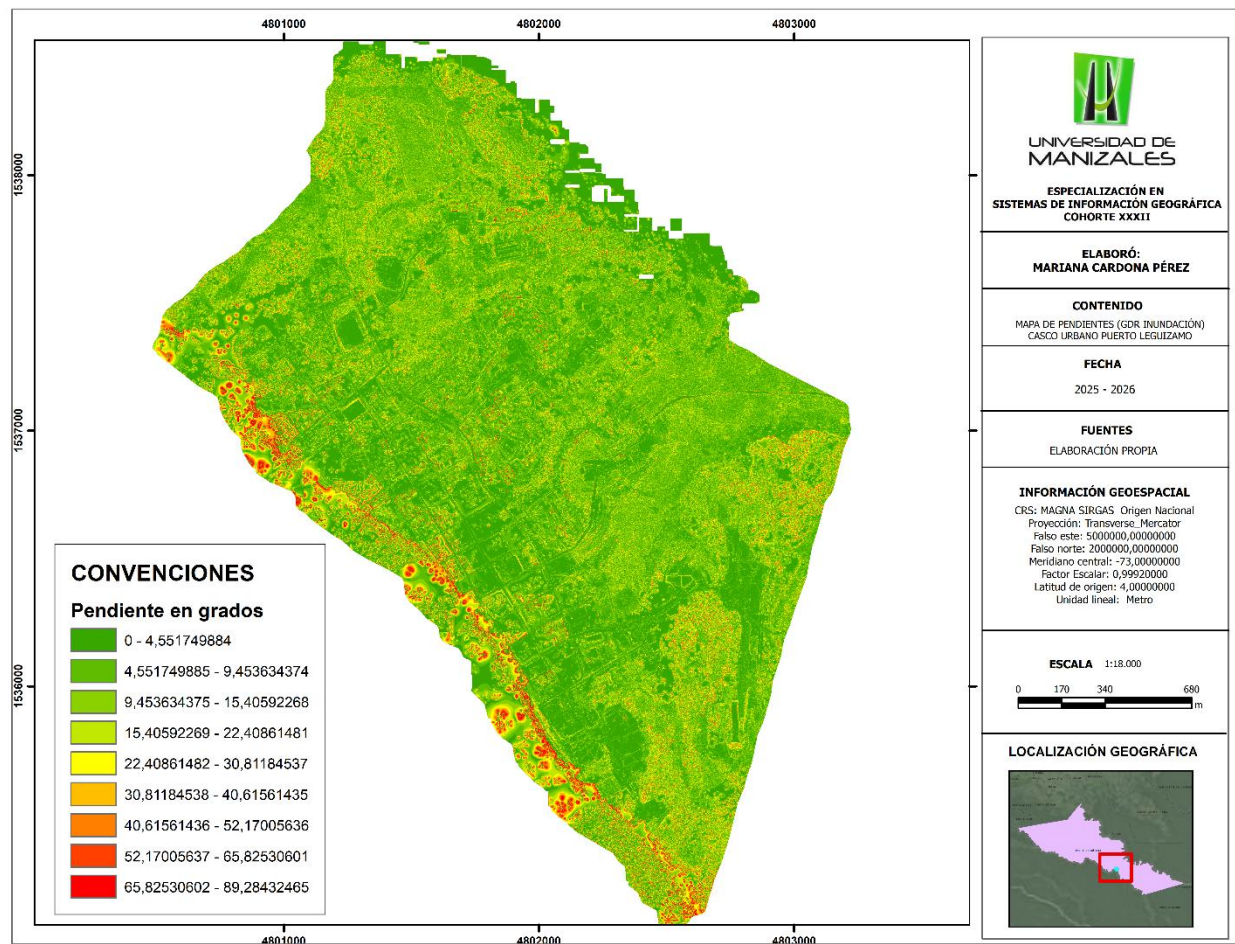
Fuente: Elaboración propia a partir de DTM generado.

b) Pendiente derivada del DTM

El mapa de pendiente se incorpora porque cuantifica el gradiente del terreno y permite diferenciar sectores planos o de baja inclinación (potencialmente asociados a acumulación) frente a sectores con mayores inclinaciones (potencialmente asociados a conducción rápida de escorrentía). En ArcMap la herramienta Slope identifica la pendiente a partir de cada celda del raster, utilizando una ventana móvil 3×3 para estimar la inclinación; su salida puede expresarse en grados o porcentaje, y su interpretación debe considerar la escala y la resolución del DTM.

Para el diagnóstico de inundación, la pendiente funciona como variable base para reconocer áreas con menor capacidad de drenaje gravitacional, y para delimitar transiciones topográficas que condicionan rutas preferenciales del flujo superficial. A diferencia del hillshade (que es cualitativo), la pendiente aporta un componente cuantitativo que fortalece la argumentación técnica del PBOT al permitir clasificar el territorio según rangos de inclinación y asociar dichos rangos a dinámicas de escorrentía, en coherencia con el enfoque de conocimiento del riesgo exigido en la planificación.

La pendiente se utiliza como variable cuantitativa del relieve para diferenciar sectores de baja inclinación y sectores de mayor gradiente, útiles en la lectura de susceptibilidad por inundación y escorrentía superficial.

Figura 35*Pendiente del casco urbano Puerto Leguízamo derivada del DTM.*

Fuente: Elaboración propia a partir de DTM generado.

En conjunto, las salidas gráficas asociadas a relieve sombreado, pendiente y la delimitación preliminar de zonas bajas permiten estructurar una lectura topográfica más robusta del casco urbano, aportando evidencia espacial para el componente de gestión del riesgo dentro del PBOT. Estas capas se utilizan como soporte para cruces posteriores con elementos expuestos y componentes ambientales urbanos, manteniendo la claridad metodológica de que se trata de insumos de susceptibilidad topográfica y no de mapas definitivos de amenaza.

c) Salidas gráficas complementarias relacionadas al componente Gestión del Riesgo por Inundación

De manera complementaria a los derivados morfométricos presentados (hillshade y pendiente), se consolidó un conjunto de salidas cartográficas y analíticas orientadas específicamente al componente de inundación, elaboradas a partir de la ortofoto verdadera y el Modelo Digital del Terreno (DTM) generados en el proyecto.

En este sentido, la relevancia del expediente no se limita a la existencia de un DTM y una ortofoto como productos finales, sino a que estos habilitan una cadena de insumos derivados que permiten caracterizar condiciones del territorio relacionadas con inundación: elementos geomorfológicos, delimitación preliminar de áreas inundables, definición de cuencas y subcuencas, así como insumos para modelaciones hidráulicas de cauce y la construcción de cartografía temática de elementos expuestos, condiciones de amenaza y escenarios de riesgo. Estas salidas se entienden como parte del “paquete técnico” que soporta el conocimiento del riesgo requerido en instrumentos de ordenamiento, dado que la gestión del riesgo exige conocimiento del territorio y soporte técnico para orientar decisiones, sin que ello implique que cada mapa sea, por sí solo, una declaración definitiva de amenaza.

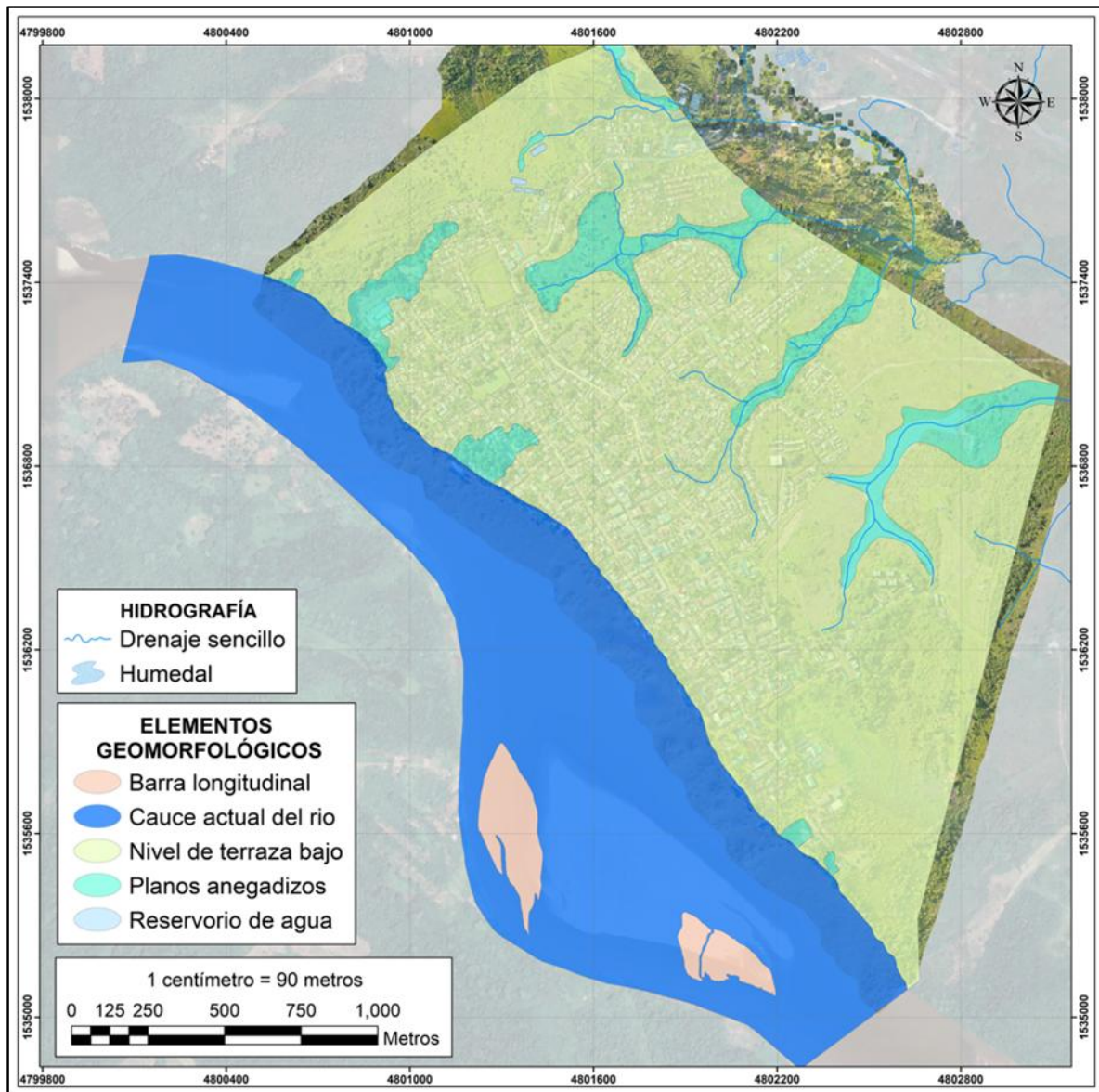
La importancia metodológica de este bloque de mapas radica en que la mayor parte del componente de inundación pudo desarrollarse porque el DTM y la ortofoto constituyen una base cartográfica consistente, controlada y trazable.

a) Mapa geomorfológico

El mapa de geomorfología se incorpora para representar, a escala urbana, elementos y rasgos del terreno que condicionan el comportamiento de la inundación (por ejemplo, planicies, terrazas, bordes topográficos y zonas de transición morfológica). La utilidad de esta salida radica en que la geomorfología aporta una lectura “estructural” del territorio: permite comprender por qué ciertas áreas tienden a concentrar flujos o a retener agua, y por qué otras se comportan como corredores naturales de drenaje. La delimitación se apoya en la interpretación integrada del DTM y la ortofoto verdadera generados en el proyecto, cuyos parámetros de resolución y referencia espacial se encuentran documentados en el expediente técnico.

Figura 36

Elementos geomorfológicos del entorno urbano y su relación con el relieve local casco urbano Puerto Leguízamo.



Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguízamo, 2025.

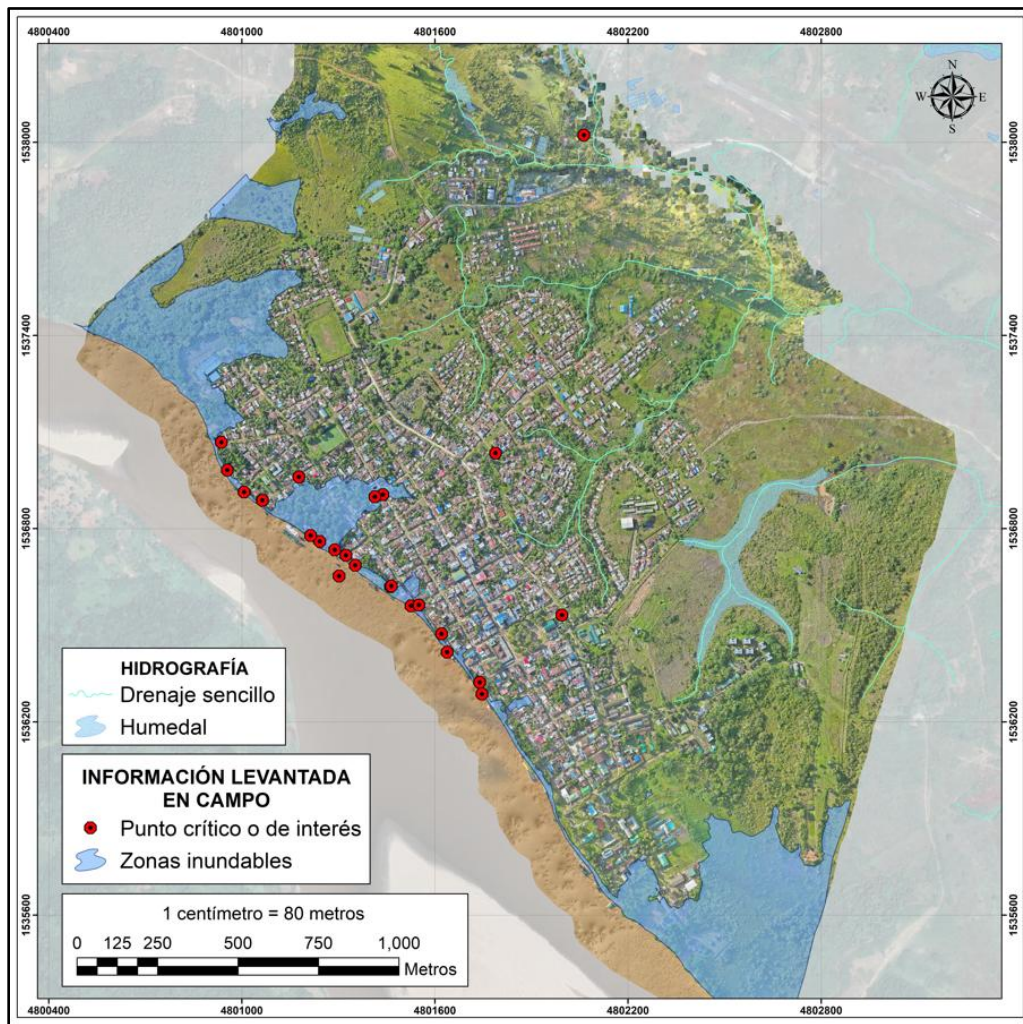
b) Zonas históricas inundadas

El mapa de zonas históricas inundadas se incluye como insumo de contextualización del riesgo, ya que permite espacializar sectores con evidencia o registro de afectaciones previas y contrastarlos con la configuración actual del territorio. Su utilidad técnica consiste en aportar una

referencia empírica para la lectura de recurrencia espacial del fenómeno y para la validación cualitativa del diagnóstico, especialmente al cruzarse posteriormente con relieve, hidrografía, exposición y resultados de modelación. Al representarse sobre la ortofoto verdadera, se mejora la lectura de correspondencia entre zonas reportadas y la ocupación actual, fortaleciendo la trazabilidad del diagnóstico a escala local.

Figura 37

Mapa de Zonas Históricamente Inundadas en el Casco Urbano de Puerto Leguízamo.



Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguízamo, 2025.

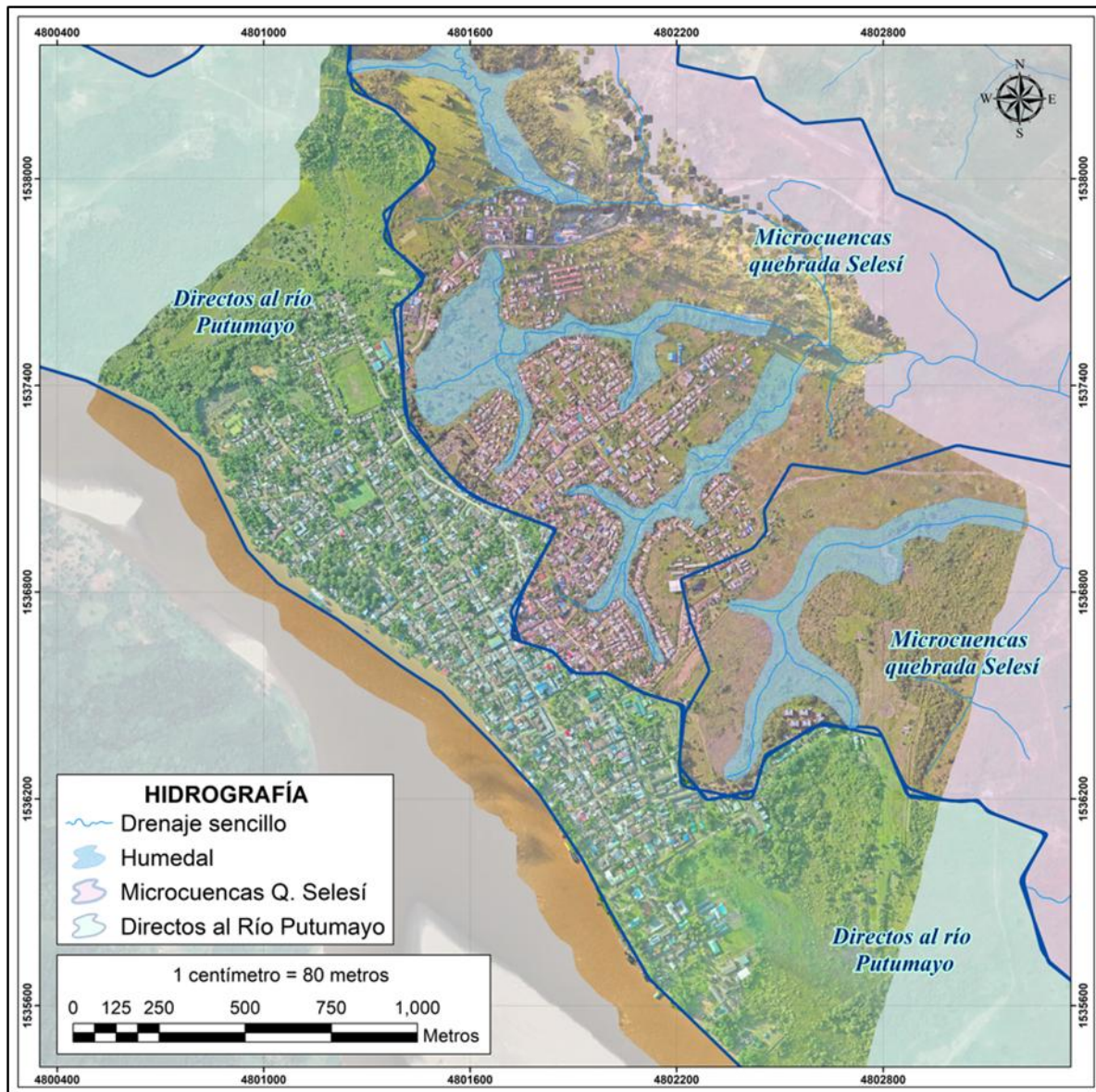
c) Cuencas hidrográficas

El mapa de cuencas y subcuencas se incorpora porque la inundación debe analizarse desde unidades hidrológicas funcionales: delimitar cuencas permite identificar áreas aportantes,

direcciones principales de escorrentía y relaciones entre el entorno urbano y su drenaje natural. Esta salida es clave para estructurar análisis posteriores (por ejemplo, parametrización de entradas, definición de secciones o unidades de modelación), ya que organiza el territorio por unidades que responden a la topografía. La delimitación se apoya en el DTM generado en el proyecto, cuya consistencia espacial se encuentra respaldada por el expediente de procesamiento.

Figura 38

Delimitación de cuencas y subcuencas asociadas al casco urbano Puerto Leguízamo.



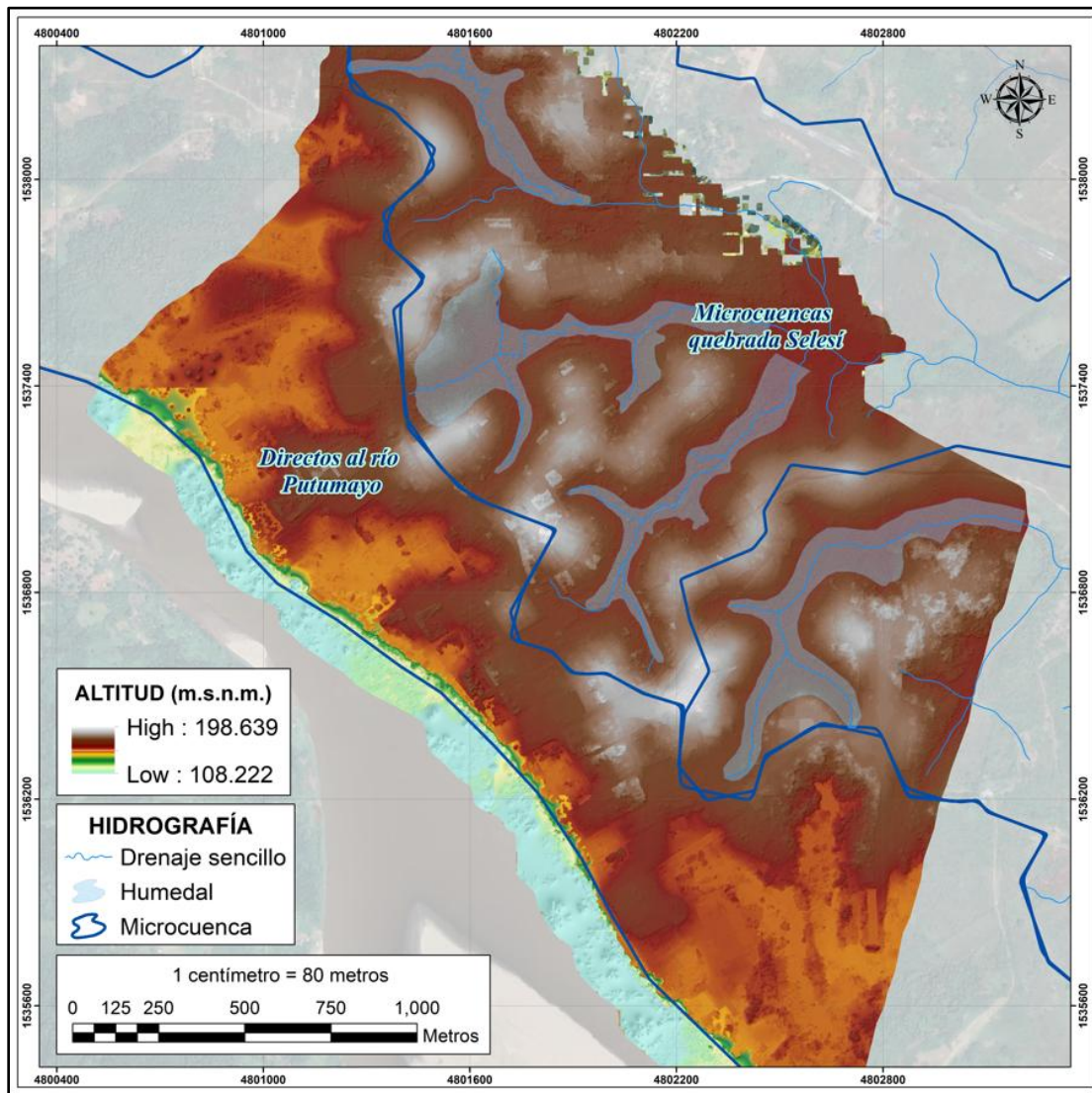
Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguízamo, 2025.

d) DTM con hidrografía

El mapa de DTM con hidrografía se presenta para integrar el relieve con la red de drenaje, permitiendo verificar coherencia entre rutas preferenciales del flujo superficial y el trazado/jerarquía de cauces y drenajes. Esta integración aporta valor diagnóstico porque facilita identificar sectores donde la ocupación urbana ha modificado la conectividad hidráulica (canalizaciones, drenajes dobles, interrupciones) y donde pueden generarse puntos de acumulación por condiciones topográficas y de drenaje. La lectura se sustenta en el DTM y la ortofoto verdadera del proyecto, cuyo sistema de referencia y resolución se documentan en el informe técnico.

Figura 39

Modelo Digital del Terreno (DTM) de 15 centímetros de resolución espacial elaborado a partir del levantamiento fotogramétrico con DRON.



Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguísimo, 2025.

e) Calado de la lámina de agua (m) — resultado de Iber

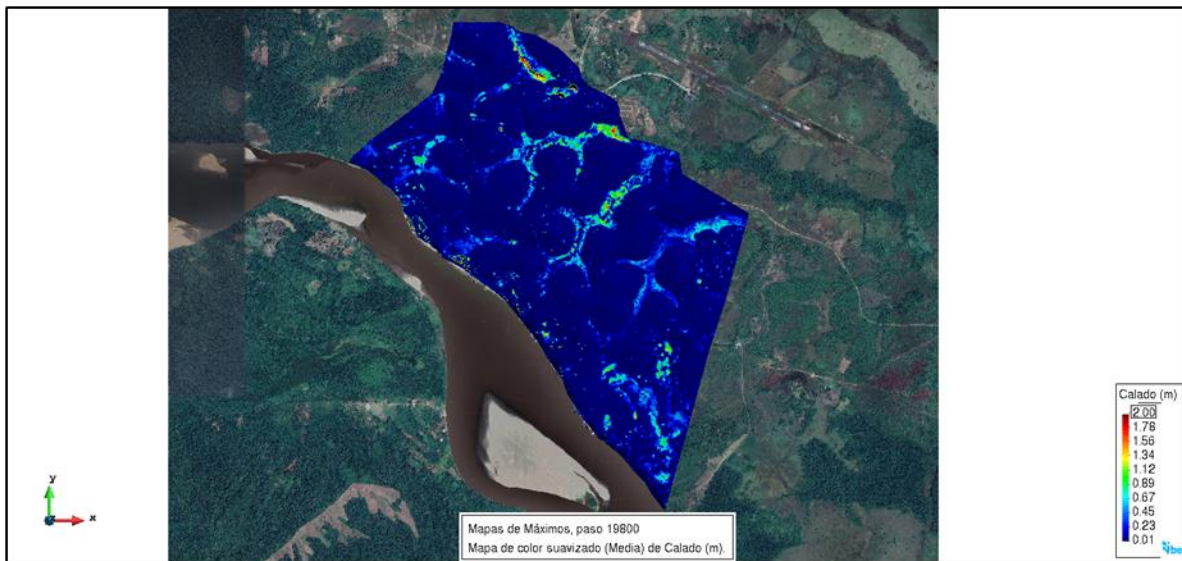
El mapa de calado (profundidad) de la lámina de agua se incorpora como resultado central del modelamiento hidráulico en dos dimensiones, dado que la profundidad es una variable hidráulica fundamental para describir la intensidad de la inundación y su distribución espacial. Iber se describe en la literatura técnica como un modelo numérico bidimensional para la simulación de flujo en lámina libre en régimen no permanente, ampliamente utilizado para obtener variables como

profundidad y velocidad y, a partir de ellas, delimitar áreas inundadas (Sanz-Ramos et al., 2022; Martins et al., 2018).

A nivel de diagnóstico PBOT, la profundidad permite reconocer gradientes de intensidad dentro de la planicie urbana y priorizar sectores donde, potencialmente, se concentran mayores tirantes durante escenarios simulados, sin que ello implique por sí mismo una declaración definitiva de amenaza; su utilidad principal en este capítulo es evidenciar que los productos cartográficos base habilitaron modelaciones y salidas hidráulicas espaciales con coherencia territorial.

Figura 40

Calado de lámina de agua (m) obtenido mediante modelación hidráulica 2D en Iber para la cuenca del casco urbano.



Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguizamó, 2025.

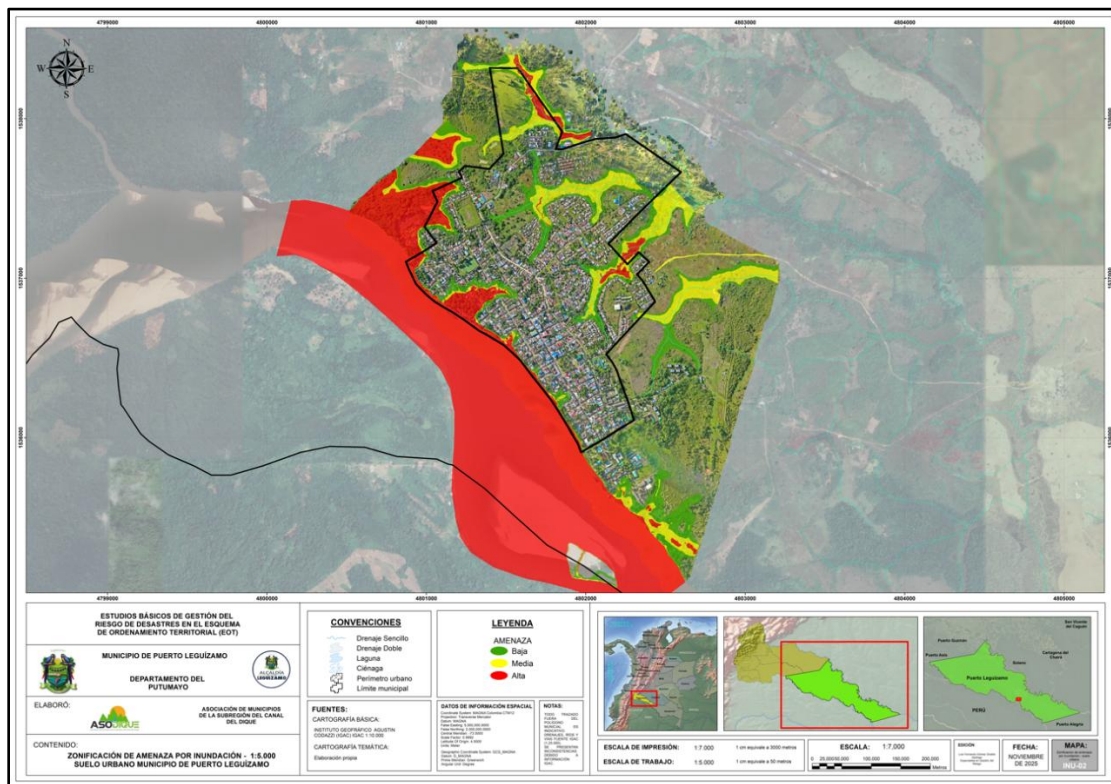
f) Zonificación de amenaza por inundación (escala 1:5.000)

La zonificación de amenaza por inundación a escala 1:5.000 se incorpora como síntesis cartográfica que traduce las variables hidráulicas modeladas y la lectura territorial en clases de amenaza interpretables para la planificación. Su finalidad en el PBOT es delimitar espacialmente niveles de amenaza que puedan ser utilizados como determinantes para el uso del suelo, restricciones y priorización de medidas de reducción del riesgo, en coherencia con el mandato de integrar la gestión del riesgo a la planificación territorial. Desde un enfoque técnico, esta zonificación se apoya en la lógica ampliamente reconocida en la

literatura: la peligrosidad se clasifica a partir de indicadores derivados de profundidad y velocidad (o combinaciones de ambos), con el fin de representar intensidad del fenómeno y su variabilidad espacial; por ello, el mapa se presenta como un producto de síntesis derivado de los resultados hidráulicos y no como un elemento aislado (Maranzoni et al., 2022; Sanz-Ramos et al., 2022).

Figura 41

Zonificación de amenaza por inundación a escala 1:5.000 para el suelo urbano del municipio de Puerto Leguizamo.



Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguizamo, 2025.

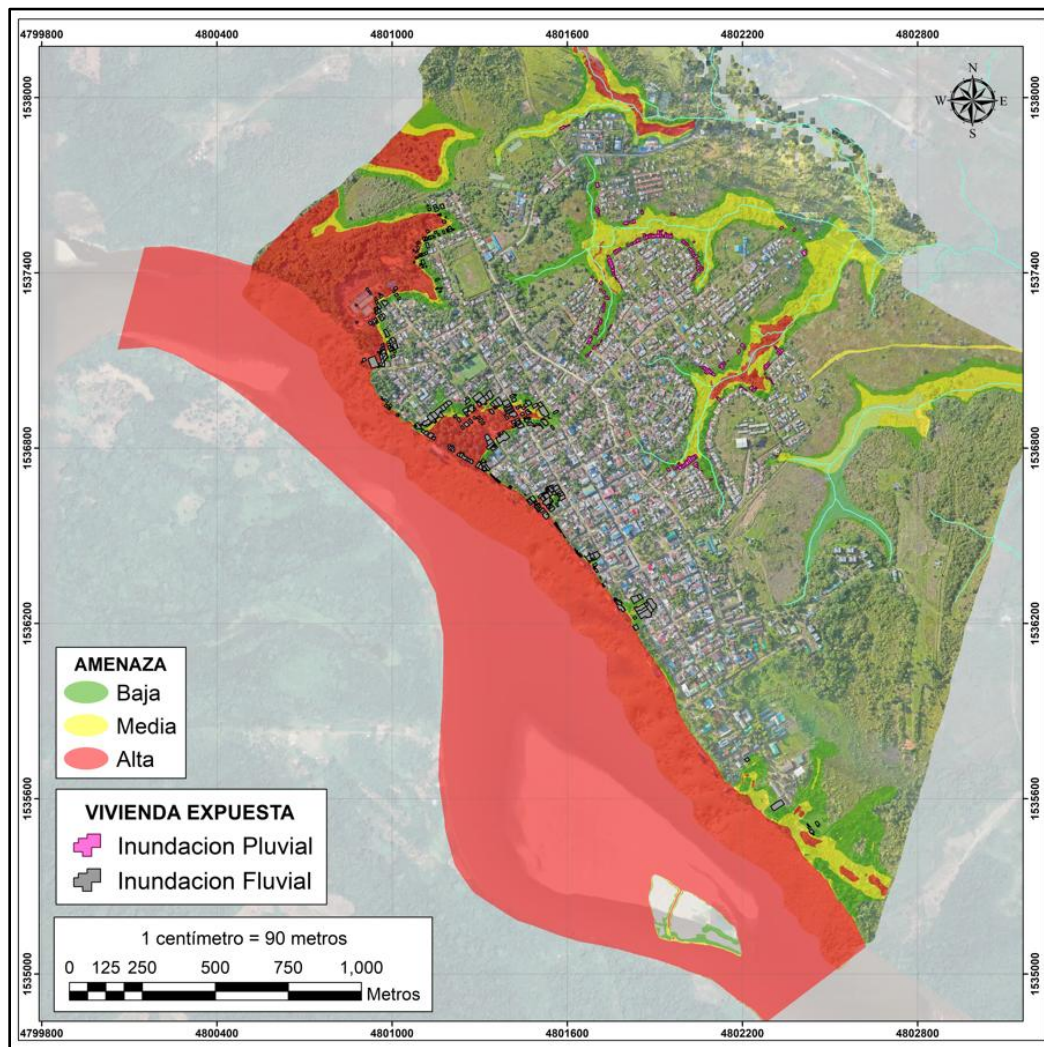
g) Viviendas expuestas a amenaza por inundación fluvial y pluvial

El mapa de viviendas expuestas se incorpora para materializar el componente de exposición, que es esencial para transitar desde amenaza a riesgo. La exposición se entiende como la presencia de elementos susceptibles de afectación (en este caso viviendas) dentro de zonas clasificadas con amenaza por inundación fluvial o pluvial; su representación permite cuantificar y localizar espacialmente dónde se intersecta la amenaza con el tejido habitacional, aportando evidencia directa para priorización de intervenciones y medidas de reducción del riesgo.

La base cartográfica de alta resolución (ortofoto verdadera) facilita la identificación y delimitación de la huella construida, mientras que la amenaza se incorpora como insumo de superposición espacial. En resultados, la relevancia se centra en mostrar que la cadena DTM/ortofoto → modelación → amenaza permitió producir cartografía de exposición con coherencia espacial, apoyada en el expediente de procesamiento.

Figura 42

Viviendas expuestas a amenaza por inundación fluvial y pluvial en el casco urbano de Puerto Leguizamó.



Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguizamó, 2025.

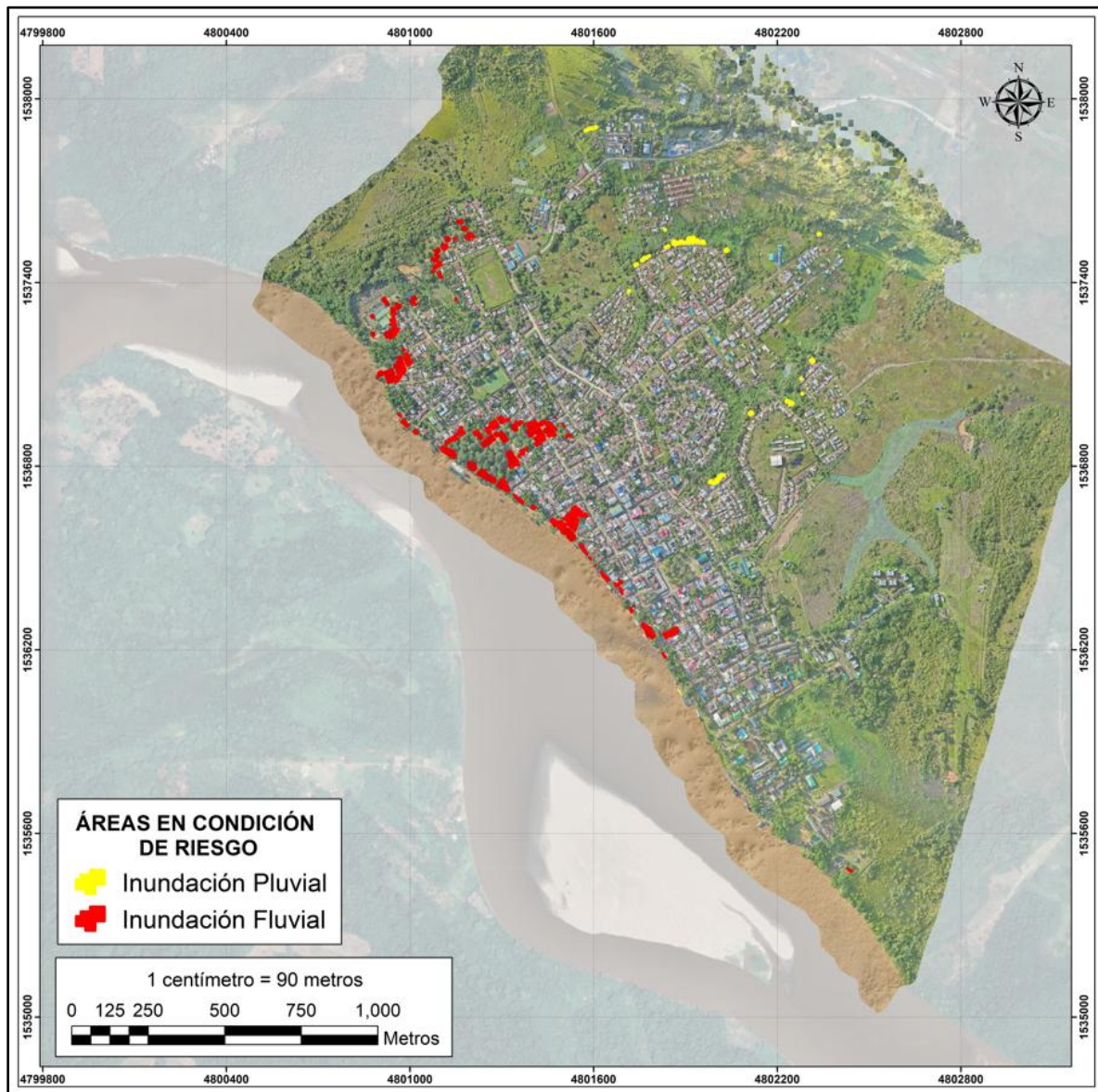
h) Áreas en condición de riesgo por inundación fluvial y pluvial

El mapa de áreas en condición de riesgo se presenta como producto integrador orientado a la toma de decisiones, al combinar la información de amenaza con la presencia de elementos expuestos y criterios de interpretación territorial. En términos de gestión del riesgo, el riesgo se comprende como la potencial ocurrencia de efectos adversos derivados de la interacción entre amenaza y condiciones del territorio; por ello, la cartografía de riesgo se incorpora para orientar la priorización de acciones, la focalización de medidas y el soporte espacial de decisiones en el PBOT.

A nivel técnico, esta salida se entiende como una síntesis territorial que permite identificar sectores donde la amenaza modelada y la exposición confluyen de manera más crítica, facilitando la comunicación de resultados hacia actores institucionales. Su robustez depende de la consistencia espacial de los insumos base (ortofoto y DTM) y de la trazabilidad del procesamiento reportada en el expediente, razón por la cual se presenta como parte del paquete de resultados aplicados del componente de inundación.

Figura 43

Áreas en Condición de Riesgo por Inundación Fluvial y Pluvial en el Suelo Urbano del Municipio de Puerto Leguízamo.



Fuente: Equipo Gestión del Riesgo de Desastres, PBOT Puerto Leguízamo, 2025.

En conjunto, estas salidas cartográficas evidencian que la disponibilidad de una ortofoto verdadera y un DTM con calidad geométrica documentada habilitó la construcción del componente de inundación desde una lógica progresiva: lectura física del territorio (geomorfología, hidrografía, cuencas), resultados hidráulicos, síntesis de amenaza y, finalmente, mapas de exposición y

condición de riesgo. Este encadenamiento responde al enfoque de gestión del riesgo basado en conocimiento y soporte técnico para la planificación territorial.

6.3.3 Soporte a decisiones gubernamentales

Escena 3D pública: <https://arcg.is/1yKKPP1>

Visor 360°: <https://panoraven.com/es/embed/bt57vLYEHH>

Como resultado demostrativo para la socialización técnica de los insumos, se consolidó un componente de visualización accesible en web compuesto por: (i) una escena 3D pública titulada “Casco Urbano Puerto Leguízamo” (<https://arcg.is/1yKKPP1>) y (ii) un repositorio de imágenes 360° publicado en Panoraven (<https://panoraven.com/es/embed/bt57vLYEHH>). La escena 3D fue configurada con permisos de acceso público, por lo cual puede ser abierta desde un navegador sin necesidad de autenticación. En el entorno de Scene Viewer, la visualización web 3D permite navegación interactiva y dispone de herramientas de exploración y análisis, incluyendo funciones de medición (distancia/área) y opciones de presentación/compartición cuando la escena es pública. De manera complementaria, el repositorio 360° quedó conformado por 15 registros: 4 correspondientes al casco urbano y 11 asociados a centros poblados. Panoraven proporciona un visor 360° orientado a la publicación y compartición en web, incluyendo opciones de incrustación (embed) y distribución mediante enlace para facilitar su consulta en distintos entornos.

En conjunto, estos dos recursos constituyen evidencia visual verificable del levantamiento y facilitan la consulta remota del territorio a través de navegadores web, complementando los productos cartográficos 2D/DTM y fortaleciendo el expediente de socialización técnica asociado al PBOT en actualización.

6.4 Proponer estrategias para la apropiación y uso efectivo de los productos cartográficos por parte de autoridades municipales y entidades de planeación, fomentando su incorporación en la toma de decisiones.

La apropiación institucional de productos geoespaciales no se reduce a la entrega de archivos; implica que los datos puedan descubrirse, comprenderse, evaluarse, integrarse y

reutilizarse en los ciclos de planeación municipal. En este sentido, la apropiación se sustenta en dos pilares técnicos complementarios: metadatos (para descubrimiento y trazabilidad) y calidad de datos (para determinar aptitud de uso). ISO 19115-1:2014 define un esquema para describir información geográfica y servicios mediante metadatos, incorporando identificación, extensión, calidad, referencia espacial, distribución y otros atributos orientados a facilitar el acceso y el uso consistente de los datos (ISO, 2014).

Bajo esta lógica, un producto cartográfico se vuelve utilizable cuando su expediente permite responder preguntas operativas típicas de planeación: ¿qué es?, ¿cuándo se capturó?, ¿en qué sistema de referencia está?, ¿qué precisión tiene?, ¿cómo se valida?, ¿cuál es su vigencia? y ¿cómo se consulta sin software especializado? Este enfoque es coherente con la orientación institucional del IGAC, que promueve especificaciones técnicas verificables para cartografía básica (por ejemplo, ortoimágenes y modelos del terreno) y ratifica procesos de validación/oficialización de productos generados por terceros con fines oficiales, favoreciendo su incorporación en planeación y gestión territorial (IGAC, 2022).

6.4.1 Estrategia 1: Expediente técnico estandarizado (QA/QC + trazabilidad) como mecanismo de confianza institucional

La primera estrategia de apropiación consiste en consolidar un expediente técnico estandarizado por unidad territorial (casco urbano y centros poblados), integrando productos, evidencias de calidad y trazabilidad, de manera que el conjunto sea verificable y reutilizable por actores institucionales. Este expediente busca reducir incertidumbre sobre el origen, el sistema de referencia, la consistencia y la aptitud de uso del producto, y facilitar su incorporación a procesos PBOT, infraestructura, gestión del riesgo y catastro.

Se propone que cada expediente territorial integre, como mínimo, los siguientes componentes:

- Productos finales: ortofoto verdadera, DTM y malla 3D (según aplique en cada unidad territorial).
- Reporte de procesamiento (Processing Report) y salidas de ajuste (block adjustment).
- Tabla de control y validación geométrica (residuales y RMSE por componente en GCP).

- Ficha técnica mínima por producto, incluyendo: nombre, fecha de captura, extensión, GSD/resolución, sistema de referencia, formato(s), tamaño(s), responsable y restricciones de uso.
- Evidencia cartográfica de cobertura (mapa de área cubierta por unidad territorial, con referencia a figuras del documento).

Esta estrategia se alinea con lineamientos de validación técnica y oficialización de productos cartográficos (incluyendo productos generados por terceros con fines oficiales), donde se enfatiza la necesidad de especificaciones, conformidad, metadatos y trazabilidad como soporte para su incorporación como información oficial.

6.4.2 Estrategia 2: Publicación y acceso libre mediante Scene Viewer 3D (consulta, medición y comunicación interinstitucional)

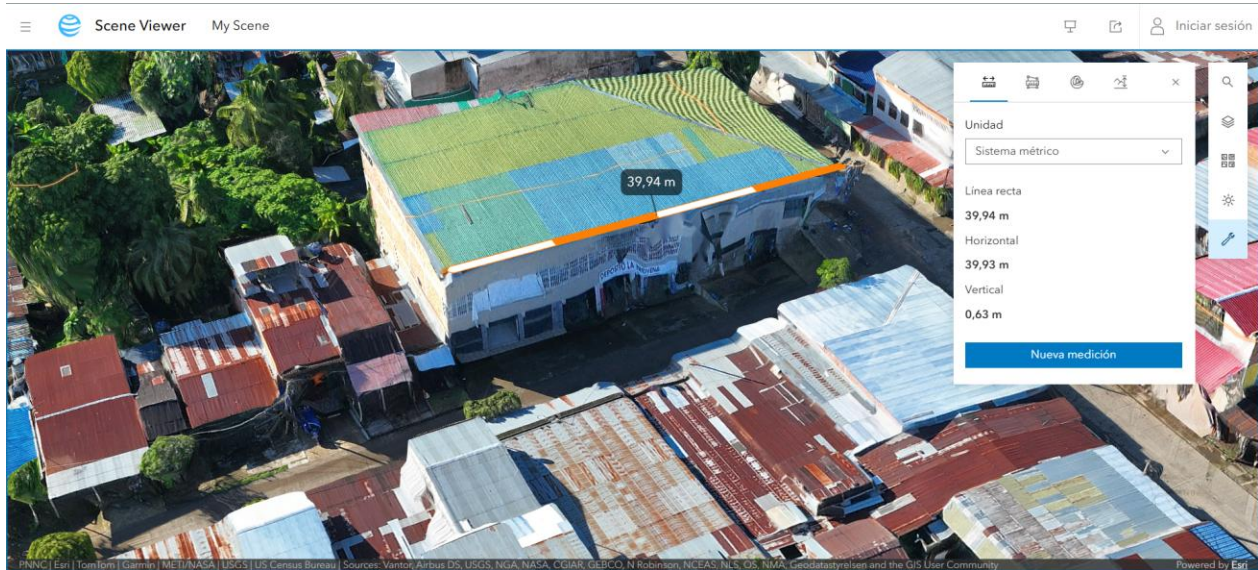
Una barrera recurrente de apropiación municipal es la dependencia de software especializado para consultar productos complejos. Para reducirla, se propone el uso de Scene Viewer como canal de consulta, verificación y comunicación técnica, dado que permite visualizar escenas 3D en un entorno interactivo desde navegador y dispone de herramientas de exploración y análisis básico, incluyendo medición (distancias/áreas), perfiles y utilidades de presentación.

Cuando una escena se comparte públicamente y sus capas también están compartidas con el público, puede abrirse sin necesidad de iniciar sesión, lo que facilita su consulta por equipos interinstitucionales y actores no especializados. Esta estrategia convierte productos como la malla 3D texturizada y capas temáticas en un recurso accesible para equipos de planeación, infraestructura y gestión del riesgo, facilitando revisión rápida de sectores, socialización y sesiones de trabajo sin instalar software de escritorio.

Desde el punto de vista funcional, Scene Viewer incluye herramientas para medir distancias y áreas, y ofrece opciones para compartir escenas, generar enlaces cortos, abrir en modo presentación y usar diapositivas (slides) para guiar recorridos, lo cual es útil para integrar resultados en portales institucionales, informes, actas y procesos de socialización.

Figura 44

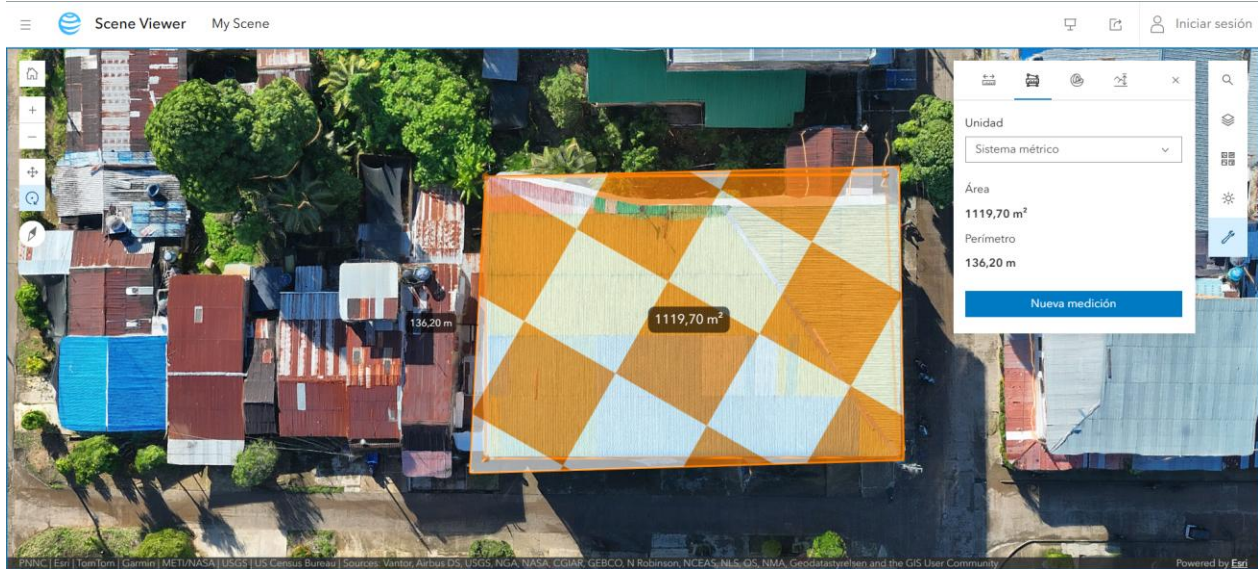
Medición de distancias (horizontales y verticales) en Scene Viewer, útil como estrategia para decisiones gubernamentales.



Fuente: Elaboración propia a partir de producto cartográfico generado en Scene Viewer.

Figura 45

Medición de áreas en Scene Viewer, útil como estrategia para decisiones gubernamentales.



Fuente: Elaboración propia a partir de producto cartográfico generado en Scene Viewer.

6.4.3 Estrategia 3: Evidencia inmersiva con fotografías 360° para verificación visual y soporte a decisiones

Como complemento a la cartografía, se incorpora la estrategia de fotografías 360° como evidencia inmersiva para verificación visual del territorio. Este recurso contribuye a la apropiación institucional al reducir ambigüedades entre lo representado en los mapas y lo observado en campo, facilitando la lectura de condiciones de drenaje, ocupación, infraestructura, accesos y elementos expuestos, especialmente para actores no técnicos.

Para viabilizar su consulta y reutilización, se propone emplear plataformas web orientadas a la publicación de fotografías 360° que permitan compartir y embeber contenido en entornos institucionales. En particular, Panoraven ofrece opciones de compartición mediante enlace y posibilidades de incrustación (embed) de contenido 360° en sitios web, con enfoque en acceso ágil desde navegador.

Para mantener coherencia con el carácter institucional del PBOT, esta estrategia se plantea como apoyo documental y evidencia complementaria (no como sustituto del análisis SIG). Las 360° se vinculan preferiblemente a sectores estratégicos (puntos críticos de inundación, drenajes urbanos, áreas expuestas, equipamientos y corredores de acceso), reforzando la trazabilidad del diagnóstico y facilitando procesos de validación interna y socialización técnica.

Figura 46

Fotografía 360° casco urbano de Puerto Leguízamo, visualizada en Panoraven



Fuente: Elaboración propia a partir de producto cartográfico generado en Panoraven.

6.4.4 Estrategia 4: Capacitación orientada a roles y “casos de uso”

La apropiación sostenible no se logra únicamente entregando datos; requiere fortalecimiento de capacidades para que los equipos institucionales integren los productos a decisiones recurrentes. En el marco de este objetivo se plantea una estrategia de capacitación orientada por roles institucionales (planeación, gestión del riesgo, infraestructura y catastro), estructurada en torno a casos de uso con productos concretos (ortofoto/DTM/mapas temáticos y recursos 3D) y no únicamente en formación de software.

La adopción real ocurre cuando el funcionario asocia el insumo con decisiones recurrentes: delimitación y evaluación de expansión urbana, priorización de intervenciones de mitigación, identificación preliminar de exposición, lectura de espacio público y equipamientos, y verificación rápida de sectores para soporte a actas y mesas técnicas. Este enfoque busca que la capacitación esté alineada con necesidades operativas y con el expediente técnico (calidad y trazabilidad) que sustenta confiabilidad del dato.

Como propuesta de implementación, el paquete de apropiación se organiza en módulos cortos y aplicados:

- Módulo 1: Consulta de ortofoto verdadera y DTM en SIG (visualización, medición básica y lectura territorial).
- Módulo 2: Lectura del Processing Report y métricas de control (RMSE y residuales) para comprender confiabilidad y límites de uso.
- Módulo 3: Interpretación de salidas temáticas (amenaza/exposición/riesgo o diagnósticos PBOT) y criterios de trazabilidad.
- Módulo 4: Uso de Scene Viewer en modo presentación para socialización y revisión rápida (recorridos por diapositivas, consulta web y herramientas de exploración/medición).

Este enfoque se soporta en que Scene Viewer está diseñado para explorar, analizar y presentar escenas 3D en un entorno web, y dispone de herramientas como medición, perfiles, navegación y presentación por diapositivas.

6.4.5 Estrategia 5: Gobernanza, custodia y actualización (versionamiento, acceso, seguridad y sostenibilidad)

Un componente crítico —y frecuentemente subestimado— es la gobernanza del dato: quién custodia, quién actualiza, cómo se versiona, qué se publica y bajo qué restricciones. En entornos municipales, esta gobernanza debe equilibrar el principio de máxima publicidad con la protección de información sensible.

En materia de acceso a información pública, la Ley 1712 de 2014 consagra el principio de máxima publicidad, según el cual la información en posesión, control o custodia de sujetos obligados es pública y solo puede limitarse por disposición constitucional o legal. En paralelo, la Ley 1581 de 2012 establece disposiciones generales para la protección de datos personales y el tratamiento responsable de información en bases de datos, aplicable a datos personales registrados y susceptibles de tratamiento.

Con base en este marco, la estrategia propone dos niveles complementarios de acceso y custodia:

- Repositorio interno completo (uso institucional): productos, reportes, capas editables y documentación completa; con control de acceso, control de versiones y bitácora de cambios.
- Repositorio de divulgación (acceso público): capas generalizadas, escenas 3D sin información sensible y selección de evidencias 360° (solo las necesarias para comunicación), con versionamiento y registro de actualizaciones.

Para materializar la divulgación controlada, se propone que los recursos web (escenas y productos de comunicación) se compartan con configuración apropiada de permisos. En Scene Viewer, las escenas pueden compartirse mediante enlace, pueden generar enlace corto y pueden embeberse en sitios web; además, es posible habilitar apertura en modo presentación y control por diapositivas cuando la escena se ha configurado con slides.

Como resultado del OE4, se propone consolidar un paquete de apropiación integrado por: (i) expediente técnico con QA/QC y metadatos, (ii) productos cartográficos listos para SIG, (iii) recursos de consulta y comunicación (Scene Viewer 3D y evidencia 360°), (iv) lineamientos de gobernanza y custodia (acceso/seguridad/versionamiento) y (v) módulos de capacitación basados en casos de uso. Este paquete se alinea con la orientación del IGAC sobre cartografía básica y su enfoque de especificaciones verificables y reutilizables, así como con procedimientos institucionales de validación/oficialización para productos cartográficos con fines oficiales.

En términos de gestión del riesgo, el aporte es especialmente relevante porque las decisiones requieren no solo mapas, sino mecanismos de consulta, comunicación y verificación que permitan convertir evidencia espacial en acciones de planificación, priorización y seguimiento, manteniendo trazabilidad técnica y criterios de protección de información cuando aplique.

Tabla 5

Estrategias de apropiación y uso efectivo de productos cartográficos

Estrategias de apropiación y uso efectivo de productos cartográficos			
Estrategia / Producto	Mecanismo propuesto	Resultado esperado en la toma de decisiones	Soporte / referencia (marco técnico y/o normativo)
Expediente técnico (reporte + QA/QC + metadatos)	Entrega estandarizada de productos (ortofoto/DTM/3D) con reporte de procesamiento, tablas de control, ficha técnica y metadatos mínimos.	Confianza institucional, auditabilidad y trazabilidad para incorporar insumos en PBOT/GRD e infraestructura.	ISO 19115-1 (metadatos); ISO 19157-1 (calidad de datos); Processing Report Drone2Map
Scene Viewer 3D (consulta y comunicación)	Publicación de escena 3D con capas temáticas y navegación guiada (slides), con posibilidad de compartir/enlazar y embeber.	Consulta sin software especializado, mejor comunicación interinstitucional y soporte visual para decisiones.	ArcGIS Online: Scene Viewer (tools) y Share scenes
Herramientas de medición 3D en escena	Uso de medición de distancias (directa/horizontal/vertical) y áreas/perímetros dentro de la escena 3D.	Verificación rápida de proximidades, áreas de intervención y lectura relieve-ocupación en mesas técnicas.	Scene Viewer: Measure distance / Measure area
Fotografías 360° (evidencia inmersiva)	Registro 360° en puntos críticos y publicación/embebido como evidencia complementaria a mapas.	Reducción de ambigüedades, verificación visual y soporte a socialización técnica.	Plataformas de visores 360°, (en este caso Panoraven)
Capacitación por roles y casos de uso	Módulos cortos para equipos de planeación/GRD/infraestructura/catastro, basados en tareas recurrentes y no solo en software.	Adopción efectiva: uso recurrente del insumo en rutinas de análisis y formulación.	Scene Viewer: presentación por slides; especificaciones IGAC como marco de uso multipropósito
Gobernanza, custodia y versionamiento	Repositorio interno (completo) + repositorio de divulgación (capas generalizadas), control de versiones y política de acceso.	Sostenibilidad del insumo, continuidad operativa y publicación responsable.	Ley 1712 (transparencia) y Ley 1581 (datos personales); Share scenes (control de publicación)
Interoperabilidad y formatos	Estandarización de formatos y nomenclatura, estructura de carpetas y metadatos; publicación como servicios cuando aplique.	Reutilización y articulación con SIG institucional y otros instrumentos de planificación.	IGAC (especificaciones cartografía básica); ISO 19115-1 / ISO 19157-1

Fuente: Elaboración propia

7 Discusión

La investigación abordó la pregunta sobre cómo generar productos cartográficos de alta precisión mediante fotogrametría UAV y cómo garantizar su empleabilidad en procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo en Puerto Leguízamo (Putumayo). Los resultados obtenidos permiten sostener que la “alta precisión” no se explica por el nivel de detalle visual de la ortoimagen, sino por la evidencia técnica que respalda el control geométrico del bloque, la coherencia interna del ajuste, el sistema de referencia adoptado y la trazabilidad documentada en el expediente del proyecto. Esta forma de argumentar es consistente con la literatura reciente, que enfatiza que la calidad métrica de productos UAV depende del control, la georreferenciación y la validación, más que del tamaño de píxel por sí mismo.

En el marco del primer objetivo (planificar y ejecutar la adquisición de datos UAV y el levantamiento del control terrestre), la discusión central se sitúa en la diferencia entre resolución y precisión. En el proyecto, el GSD reportado (0,029 m) habilita interpretación urbana detallada, pero la evidencia académica muestra de forma reiterada que un GSD bajo no garantiza exactitud posicional: la exactitud absoluta se comporta como una función del esquema de georreferenciación y del diseño del control. Por ejemplo, estudios comparativos recientes evidencian que, sin GCP, los errores —en especial en Z— pueden mantenerse en rangos aceptables en algunos contextos, pero tienden a ser más sensibles a obstrucciones GNSS, geometrías complejas y configuración del vuelo, lo que justifica el uso de GCP cuando el objetivo es robustecer exactitud altimétrica y reducir sesgos sistemáticos. En particular, investigaciones orientadas a evaluar técnicas y distribuciones de GCP reportan que configuraciones bien distribuidas producen errores centimétricos, mientras que la ausencia de control o un control mal ubicado incrementa el RMSE y degrada la estabilidad espacial de los productos. Este contraste apoya que la etapa de campo en Puerto Leguízamo no se reduzca a “acompañar el vuelo”, sino que opere como el componente que habilita sostener precisión defendible en productos finales, especialmente cuando se pretende integrar el resultado a SIG institucional y a procesos PBOT/GRD.

En el segundo objetivo (procesar y generar productos cartográficos de alta precisión y validar su calidad), el argumento de precisión se fortalece cuando se discute en dos planos: exactitud absoluta (control terrestre) y coherencia interna (ajuste del bloque). En el proyecto, el RMSE de GCP reportado (0,016 m en X; 0,018 m en Y; 0,016 m en Z), junto con residuales por

punto, constituye evidencia cuantitativa de que la georreferenciación final fue controlada y evaluada. En estudios recientes de producción fotogramétrica UAV, la obtención de errores del orden de centímetros con georreferenciación indirecta (GCP) es un resultado recurrente, especialmente cuando se cuida la distribución espacial y se mantiene solape suficiente; por ejemplo, se reportan RMSE horizontales $\sim 2,5$ cm y verticales $\sim 3,0$ cm bajo configuraciones de GCP homogéneas, mientras que los mayores RMSE se observan sin GCP. Adicionalmente, estudios comparativos de software y escenarios de georreferenciación muestran que la georreferenciación directa puede exhibir mayor debilidad en vertical, y que la incorporación de GCP tiende a mejorar el desempeño altimétrico, con RMSE verticales frecuentemente ubicados en rangos de centímetros a decímetros dependiendo de condiciones de captura y procesamiento. En este marco, el desempeño centimétrico reportado en Puerto Leguízamo se ubica dentro de rangos consistentes con estudios contemporáneos, lo que permite sostener que el resultado no es únicamente “un número del software”, sino un desempeño compatible con evidencia académica sobre fotogrametría UAV bajo control terrestre.

La coherencia interna del ajuste se discute como condición necesaria para que el control no “fuerce” deformaciones. El proyecto reporta una red amplia de correspondencias (tie points y solution points) y métricas de reproyección, lo cual es consistente con el comportamiento esperado en flujos SfM donde la redundancia geométrica incrementa estabilidad de la orientación relativa. En términos académicos, se reconoce que una red densa de correspondencias favorece un bloque más robusto; sin embargo, también se enfatiza que este hecho no garantiza exactitud absoluta si el control es insuficiente o si existen sesgos sistemáticos en la georreferenciación. Este balance coincide con la interpretación técnica del propio Drone2Map: el reporte de procesamiento está diseñado para revisar el ajuste del bloque y evaluar la calidad de GCP, tie points y checkpoints (cuando existan), y reporta indicadores como imágenes calibradas y el RMSE medio de reproyección de tie points, con guías típicas de aceptación para vuelos nadir. Por tanto, la evidencia de alta conectividad (tie/solution points) se interpreta en discusión como soporte de estabilidad interna del bloque, complementario a la evidencia del control absoluto (RMSE de GCP).

Respecto a los productos generados (true ortho, DTM/DEM, malla 3D, escenas y 360°), la discusión se fortalece al conectarlos con literatura específica para cada tipo de salida. En entornos urbanos, la ortofoto verdadera es particularmente relevante porque reduce artefactos asociados a oclusión y doble mapeo en presencia de objetos altos. Revisiones técnicas sobre ortofotos

verdaderas describen que estos productos incorporan detección de oclusiones y se apoyan en modelos de superficie detallados (DSM) para lograr una representación nadiral más consistente, lo que incrementa la confiabilidad para inventarios y delimitaciones en áreas construidas. Este soporte académico conecta directamente con el uso que el proyecto dio a la ortofoto verdadera: base para cartografía temática PBOT (equipamientos, patrimonio, espacio público, expansión), donde la coherencia planimétrica es crítica para digitaciones y cruces espaciales.

En el caso del DTM/DEM, el vínculo con gestión del riesgo se discute a la luz de literatura reciente sobre inundación urbana y microtopografía. Estudios en contextos urbanos muestran que elevar la resolución del modelo de terreno mejora de manera significativa la identificación de rutas de escorrentía y la delimitación de áreas afectables, especialmente cuando se capturan estructuras urbanas que condicionan el flujo (muros, puentes, pasos y discontinuidades). Un caso ilustrativo reporta mejoras en modelación de inundación urbana local al utilizar DTMs de muy alta resolución (0,3 m) derivados de UAV-LiDAR frente a DTMs de 10 m, con cambios sustanciales en la representación del flujo y la localización de áreas inundables; aunque el sensor es distinto, el principio para la discusión es transferible: el detalle altimétrico y la representación de microestructura urbana impactan la utilidad del modelo para GRD. Además, trabajos recientes basados en UAV para eventos reales muestran que es posible delimitar extensión de inundación y estimar profundidad con un nivel de error suficientemente bajo para decisiones operativas (por ejemplo, cierres viales), reforzando que productos UAV pueden apoyar respuesta y planificación en riesgo hidrometeorológico cuando se documenta su calidad y alcance. Este contraste fortalece la interpretación del bloque de inundación: la ortofoto y el DTM no se limitan a “mapas”, sino que actúan como insumos que habilitan análisis espacial integrado y preparación de insumos para modelación, siempre que se mantenga la distinción conceptual entre derivados morfométricos (pendiente/hillshade) y resultados de amenaza hidráulica (profundidad/velocidad).

En relación con el tercer objetivo (utilidad y aplicabilidad en ordenamiento territorial), la discusión se apoya en el hecho de que los productos sí se tradujeron en análisis concretos. Para infraestructura y equipamientos, la ortofoto verdadera permitió inventarios y delimitaciones que alimentan diagnóstico urbano y formulación PBOT. Estudios de caso recientes en ingeniería civil y planeación reportan que la fotogrametría UAV produce ortofotos y mapas útiles para tareas pre-constructivas y de planificación de sitio, principalmente por su actualización y capacidad de representar con detalle condiciones del terreno y del entorno construido.

En gestión del riesgo, la discusión se robustece al conectar el uso del DTM con el estado del arte: metodologías recientes proponen cuantificar áreas inundadas y volúmenes en zonas urbanas pequeñas usando imágenes UAV y GIS, destacando que la precisión local mejora la evaluación de daños y la toma de decisiones. Este tipo de evidencia apoya el argumento de que productos UAV no solo embellecen el diagnóstico, sino que aportan información que suele estar ausente en escalas municipales cuando se depende de modelos globales o cartografía desactualizada. Para catastro y cartografía temática, la discusión reconoce un límite inherente: la digitación/clasificación introduce variabilidad por criterio del analista, pero este riesgo se mitiga con trazabilidad (criterios de clasificación, evidencia cartográfica, reproducibilidad) y con la consistencia geométrica del producto base. La literatura de evaluación de exactitud en UAV mapping resalta precisamente que el control y la documentación de calidad son lo que convierte un producto en “apto para uso” y auditable por terceros.

En cuanto al cuarto objetivo (estrategias de apropiación), en vez de asumir que la adopción se resuelve con la entrega técnica, la literatura sobre adopción de innovación digital en gobiernos locales identifica barreras recurrentes relacionadas con capacidades internas, recursos, coordinación y gobernanza, lo que explica por qué estrategias como expediente estandarizado, capacitación por roles y canales de consulta web son relevantes para convertir datos en decisiones. En línea con esta evidencia, el expediente técnico (metadatos + QA/QC) se discute como mecanismo de confianza institucional: ISO 19115-1 define que el mínimo de metadatos debe permitir descubrimiento, evaluación de aptitud, acceso y uso consistente mediante información de identificación, extensión, referencia espacial, distribución y calidad; este marco se interpreta como soporte para que el municipio pueda responder preguntas operativas sobre qué es el dataset, cuándo se capturó, en qué sistema está y cómo se valida. Complementariamente, ISO 19157-1 establece principios para describir y reportar calidad y aclara que los umbrales aceptables no son universales sino dependientes de la especificación y del propósito, lo cual respalda la necesidad de trazabilidad de criterios de aceptación a fuentes explícitas (TDR, tablas normativas o criterios internos).

La estrategia de publicación web 3D también se discute con literatura académica sobre modelos urbanos 3D y soporte a decisiones. Casos documentados de modelos urbanos 3D para planeación y toma de decisiones resaltan el valor de cadenas que integran adquisición, gestión, análisis y visualización web para permitir exploración por múltiples públicos cuando no existe información confiable o accesible, mostrando que la visualización web 3D incrementa la capacidad

de comunicación y uso práctico. La plataforma Scene Viewer aporta viabilidad técnica al proveer herramientas de exploración y análisis básico (medición, perfiles, navegación) y opciones de presentación y compartir, lo cual disminuye fricción de acceso al permitir consulta desde navegador, coherente con el principio de “reducción de barreras” que la literatura de adopción institucional señala como condición para uso sostenido.

La evidencia inmersiva 360° se discute con apoyo directo de estudios y revisiones sistemáticas. En infraestructura, se reportan sistemas de inspección que combinan imágenes 360° con detección de daño y navegación contextual (por ejemplo, drenajes pluviales), mostrando que la evidencia panorámica reduce pérdida de contexto y favorece evaluación y documentación de condiciones en activos urbanos. Además, revisiones sistemáticas sobre aplicaciones 360° en arquitectura, ingeniería y construcción identifican beneficios en presencia, monitoreo y entrenamiento, así como desafíos técnicos, lo que respalda su uso como evidencia complementaria (no sustitutiva) para socialización y validación interna. De manera complementaria, revisiones sobre gestión del riesgo destacan la utilidad de tecnologías inmersivas para reconocimiento, evaluación rápida y comunicación pública, reforzando que la estrategia 360° aporta una capa de verificación visual útil para actores no técnicos sin reemplazar el análisis SIG. En lo operativo, plataformas como Panoraven permiten compartir y embeber contenidos 360° en web, lo que facilita anexos digitales y micrositos como parte del expediente demostrativo, aumentando la accesibilidad del insumo cartográfico en contextos municipales.

A nivel operativo, la documentación de Scene Viewer y de compartir/embeber escenas refuerza que la publicación pública requiere que escena y capas estén correctamente compartidas, lo cual obliga a una política explícita sobre qué se divulga y qué permanece bajo control institucional.

En conjunto, la evidencia permite responder la pregunta de investigación con una afirmación sólida y matizada: la producción de cartografía de alta precisión mediante fotogrametría UAV en Puerto Leguízamo es técnicamente viable y defendible cuando la precisión se sustenta en métricas cuantitativas de control y ajuste comparables con estudios académicos (RMSE en control, coherencia interna del bloque) y cuando la empleabilidad se construye con productos aplicados a diagnósticos PBOT/GRD y con estrategias de apropiación que reduzcan fricción de acceso y uso (expediente, 3D web, 360°, capacitación por roles) bajo una gobernanza responsable. Esta interpretación coincide con tendencias recientes reportadas en el estado del arte: la cartografía

UAV agrega valor público cuando combina exactitud, trazabilidad y mecanismos institucionales de adopción que conectan el dato técnico con decisiones municipales, especialmente en escenarios urbanos y de riesgo donde se requiere evidencia espacial actualizada y verificable.

8 Conclusiones

Se concluye que la fotogrametría UAV es una alternativa viable para producir insumos cartográficos de alta precisión en Puerto Leguízamo, siempre que la precisión se sustente en evidencia técnica verificable y no únicamente en el nivel de detalle visual. En este sentido, los resultados del proyecto confirman que la calidad y la empleabilidad se apoyan en tres condiciones integradas: una adquisición planificada con cobertura suficiente y control terrestre, un procesamiento documentado mediante un reporte técnico que permita auditar el ajuste y el control, y un paquete de entrega que facilite integración, consulta y reutilización institucional.

A partir de la fase de adquisición, se concluye que la resolución de captura (GSD) es un indicador del nivel de detalle alcanzable, pero no define por sí misma la exactitud posicional. La precisión final depende del diseño del control en tierra, de la conectividad del bloque de imágenes y de la consistencia del dataset, por lo que la verificación de integridad del conjunto de imágenes y la incorporación de GCP constituyeron condiciones determinantes para habilitar un ajuste estable y trazable, coherente con las prácticas de aseguramiento de calidad previas al procesamiento fotogramétrico.

En relación con el procesamiento y la generación de productos, se concluye que el proyecto permitió producir salidas 2D y 3D (incluyendo ortofoto verdadera y modelo del terreno) con soporte documental verificable. En particular, el reporte de procesamiento de Drone2Map constituye el respaldo formal del ajuste del bloque y de la calidad del proyecto, pues registra el resultado del ajuste y orienta la revisión de los puntos usados en el ajuste, así como los principales indicadores de coherencia interna y desempeño del control. En consecuencia, la calidad del proyecto quedó sustentada en métricas cuantificables del ajuste y del control, lo que permite afirmar que la validación no dependió de apreciación visual sino de evidencia técnica reportada.

En cuanto a la utilidad para ordenamiento territorial, se concluye que la ortofoto verdadera y los productos derivados funcionaron como base cartográfica operativa para análisis a escala local, habilitando la generación de cartografía temática para diagnóstico urbano y soporte de decisiones en PBOT (por ejemplo, inventarios, delimitaciones y cruces espaciales). Este resultado es consistente con la orientación del IGAC sobre la cartografía básica como insumo multipropósito (incluyendo ortoimágenes y modelos del terreno) para procesos de planeación, gestión y usos institucionales diversos.

Para la gestión del riesgo por inundación, se concluye que el modelo de elevación del proyecto fue el insumo clave para estructurar el componente analítico asociado al riesgo, al permitir integrar lectura del relieve y delineaciones espaciales con insumos y resultados de modelación, consolidando evidencia territorial útil para diagnóstico y soporte de decisiones. En términos de resultado metodológico, esto confirma que la elevación de alta resolución, cuando está documentada y controlada, puede incorporarse a análisis de riesgo a escala municipal como soporte técnico para la comprensión espacial del fenómeno y la articulación con escenarios de exposición.

En términos de empleabilidad institucional, se concluye que el uso efectivo no se garantiza solo por entregar archivos precisos, sino por acompañar los productos con un expediente técnico que permita descubrimiento, trazabilidad y evaluación de aptitud de uso.

Adicionalmente se concluye que la reducción de barreras de acceso fortalece la apropiación municipal cuando existen limitaciones de licenciamiento o disponibilidad de software especializado. En este marco, la consulta web mediante escenas 3D se reconoce como un canal viable para socialización y revisión técnica, dado que Scene Viewer ofrece herramientas de exploración, medición, presentación por diapositivas y mecanismos de compartición e incrustación (embed) para uso en entornos web. De forma complementaria, la evidencia 360° publicada en plataformas web constituye un recurso útil para verificación visual y comunicación técnica, al permitir compartir e incrustar contenido 360° como soporte documental en anexos digitales o micrositios, lo que incrementa accesibilidad del expediente demostrativo.

Finalmente, se concluye que la apropiación sostenible requiere gobernanza del dato (custodia, versionamiento, niveles de acceso y criterios de publicación), equilibrando transparencia y protección de información sensible. Este equilibrio se enmarca en el principio de máxima publicidad y acceso a la información pública, y en la regulación de protección de datos personales y tratamiento responsable de información, lo que justifica diferenciar repositorios internos y de divulgación y definir criterios de publicación para recursos web sin comprometer privacidad o sensibilidad territorial.

En síntesis, la investigación confirma que la fotogrametría UAV permitió generar productos cartográficos con precisión sustentada en evidencia verificable del ajuste y del control, y que su incorporación a PBOT y gestión del riesgo se fortalece cuando se acompaña de expediente técnico, metadatos, mecanismos de acceso web y lineamientos de gobernanza que faciliten su uso sostenido por actores municipales e interinstitucionales.

9 Recomendaciones

1) Consolidar un “paquete cartográfico oficializable” por producto (ortofoto, DTM y 3D) con metadatos y ficha técnica mínima: Se recomienda, como línea de trabajo aplicada, estructurar para cada producto un paquete estandarizado que incluya: ficha técnica (Sistema Referencia, resolución, cobertura, fecha), metadatos mínimos y un resumen de calidad, de modo que el producto sea fácilmente reutilizable por planeación municipal sin depender del productor original.

2) Fortalecer la validación geométrica con verificación independiente (checkpoints) y reporte de exactitud por producto: Se recomienda desarrollar una línea de validación que incorpore puntos de verificación independientes (checkpoints) para estimar exactitud externa del producto (no solo consistencia respecto a GCP). Esto permite separar control de evaluación, reforzando la confianza institucional cuando los productos se usen como base de PBOT/GRD o cuando se proyecte su validación técnica formal. La recomendación se fundamenta en que Drone2Map documenta el ajuste y presenta métricas de control/chequeos en el reporte de procesamiento, por lo que la incorporación de CP mejoraría la evidencia de exactitud y la defendibilidad del producto cartográfico como insumo oficializable.

3) Robustecer el DTM como producto “hidráulicamente confiable”: sensibilidad vertical y control del microrelieve urbano: Se recomienda orientar una línea de trabajo específica a evaluar la sensibilidad del DTM (y sus derivados) en análisis de inundación urbana, dado que el microrelieve condiciona de manera significativa la delimitación de zonas bajas, rutas preferenciales de esorrentía y resultados hidráulicos. En el proyecto se generó DTM con resolución del terreno 0,029 m y SR documentado, lo que hace pertinente estudiar cuánto cambian las salidas temáticas (zonas inundables, profundidad, etc.) ante variaciones verticales pequeñas o sesgos locales. Esta línea permite mejorar el producto cartográfico no solo como raster de elevación, sino como insumo robusto para análisis de riesgo, reforzando su empleabilidad real en el componente de inundación del PBOT.

4) Consolidar un esquema multitemporal de actualización de productos (ortofoto/DTM) y control de versiones: Se recomienda desarrollar una línea de trabajo orientada a la actualización

multitemporal de la ortofoto y el DTM (por ejemplo, campañas periódicas), con un esquema de versionamiento que permita comparar cambios en ocupación, exposición y elementos críticos para GRD. En contextos urbanos dinámicos, la empleabilidad institucional se fortalece cuando el producto no es “una foto fija”, sino un insumo actualizable con trazabilidad de versiones para planeación y seguimiento. Esta recomendación se sustenta en el enfoque multipropósito de la cartografía básica y su uso en planeación municipal, donde la vigencia y el control de cambios condicionan la confianza y el uso sostenido del producto.

5) Potenciar la empleabilidad mediante productos consultables (Scene Viewer 3D y 360°) con gobernanza de publicación: Se recomienda consolidar una línea de trabajo aplicada que convierta parte de los productos en formatos de consulta sin fricción para autoridades: publicación de escenas 3D (malla 3D + capas temáticas clave) en Scene Viewer con slides y herramientas de medición, y soporte complementario con evidencia 360° en puntos estratégicos. Scene Viewer está diseñado para explorar escenas 3D y permite medición de distancia/área, además de compartir o embeber escenas, lo cual mejora la apropiación en mesas técnicas y socialización institucional.

Referencias

- Adesina, E. A., Odumosu, J. O., Ajayi, O. G., Musa, A., Onuigbo, I. C., & Adesiji, A. R. (2025). Evaluating the impact of the spatial resolution of digital elevation models on flood modelling. *Water Resources Management*, 39, 5359–5390. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04206-6>
- Agudelo, L., Muñoz, A., Enriquez, V., Andrea, N., & Lozano, R. (2023). Calidad fisicoquímica del río Mulato en Mocoa, Putumayo Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(6). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-06-05>
- Ajayi, O. G., & Oruma, E. (2022). On the applicability of integrated UAV photogrammetry and automatic feature extraction for cadastral mapping. *Advances in Geodesy and Geoinformation*, 71(1), e19. <https://doi.org/10.24425/gac.2022.141172>
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2015). ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(3), A1–A26. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26>
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2023). *ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data (Edition 2, Version 1.0)*. https://aagsmo.org/wp-content/uploads/2023/03/ASPRS_PosAcc_Edition2_MainBody.pdf
- Annis, A., Nardi, F., Morrison, R. R., & Castelli, F. (2020). Investigating hydrogeomorphic floodplain mapping with remote sensing and DEMs. *Water*, 12(2), 341. <https://doi.org/10.3390/w12020341>
- Ariza Vides, R. A., Buritica Ceballos, C., Ruiz Oquendo, J. H., & Tapias Pacheco, R. A. (2025). *Análisis de riesgo de inundación en el municipio de Puerto Leguízamo, ubicado en el departamento del Putumayo, mediante datos cartográficos* [Trabajo académico]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/70472>
- Atik, M. E., & Arkali, M. (2025). Comparative assessment of the effect of positioning techniques and ground control point distribution models on the accuracy of UAV-based photogrammetric production. *Drones*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.3390/drones9010015>
- Bassanelli, H. R., Fava, M. C., Tomasella, J., Santos, J. C., Vasconcelos, A. F. (2026). Combining low-cost drone surveys and citizen science to identify flood-prone areas. *Frontiers in Water*, 8. <https://doi.org/10.3389/frwa.2026.1748523>
- Benavides Ramírez, L. G., Prieto Moreno, A., Manrique Castro, M. A., & Márquez Díaz, J. E. (2024). *Drones para el catastro multipropósito y el ordenamiento territorial: Un vuelo hacia la eficiencia y la transparencia*. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. <https://doi.org/10.26507/paper.3657>

- Cheng, D., Cui, Y., Su, F., Jia, Y., & Choi, C. E. (2018). The characteristics of the Mocoa compound disaster event, Colombia. *Landslides*, 15, 1223–1232. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0969-1>
- Congreso de la República de Colombia. (1947, 23 de octubre). *Ley 12 de 1947: Por la cual se aprueba la Convención sobre Aviación Civil Internacional, firmada en Chicago el 7 de diciembre de 1944*. Compilación jurídica de la Cancillería de Colombia. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de https://www.cancilleria.gov.co/normograma/compilacion/docs/ley_0012_1947.htm
- Congreso de la República de Colombia. (1997, 18 de julio). *Ley 388 de 1997: Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 3 de 1991 y se dictan otras disposiciones (Ordenamiento territorial)*. Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339>
- Congreso de la República de Colombia. (2012, 24 de abril). *Ley 1523 de 2012: Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Congreso de la República de Colombia. (2012, 17 de octubre). *Ley Estatutaria 1581 de 2012: Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales*. Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49981>
- Congreso de la República de Colombia. (2014, 6 de marzo). *Ley 1712 de 2014: Por medio de la cual se crea la Ley de Transparencia y del Derecho de Acceso a la Información Pública Nacional y se dictan otras disposiciones*. Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=56882>
- Congreso de la República de Colombia. (2019, 25 de mayo). *Ley 1955 de 2019: Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022 “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad”*. Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=93970>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES). (2019, 26 de marzo). Documento CONPES 3958: Estrategia para la implementación de la política pública de catastro multipropósito. Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3958.pdf>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

- Córdoba Nomelin, D. (2020). *Diacronismo fluvial del río Putumayo para la identificación de amenaza por inundación – Municipio de Puerto Asís, Putumayo* [Trabajo de especialización]. Repositorio Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.umng.edu.co/bitstreams/915d6cd4-47fc-4d87-9107-43ceb9dbd1ad/download>
- Cortés Millán, Y. H., Hernández Santana, J. S., Avendaño Arias, J. A., & Upegui Cardona, E. S. (2023). Reconstrucción 3D con enfoque catastral para la identificación física de bienes inmuebles. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 32(1), 194–210. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v32n1.98058>
- Deliry, S. I., & Avdan, U. (2021). Accuracy of unmanned aerial systems photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping: A review. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1997–2017. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01366-x>
- Escalante T., J. O., Cáceres J., J. J., & Porras D., H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Revista Tecnura*, 20(50), 119–140. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09>
- García Delgado, H., Machuca, S., & Medina, E. (2019). Dynamic and geomorphic characterizations of the Mocoa debris flow (March 31, 2017, Putumayo Department, southern Colombia). *Landslides*, 16, 597–609. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-01121-3>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020, 14 de mayo). Resolución 471 de 2020: Por medio de la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.igac.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/normograma/resolucion-no-471-de-2020>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2021, 29 de septiembre). Resolución 1468 de 2021: Por medio de la cual se establecen los lineamientos técnicos mínimos requeridos en la materialización, medición y administración de vértices geodésicos para su integración a la Red Geodésica Nacional de la República de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Recuperado el 16 de marzo de 2026, de https://redgeodesica.igac.gov.co/documentos/resolucion_1468_de_2021.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2022, 27 de enero). Resolución No. 197 de 2022: Por medio de la cual se modifica la Resolución 471 y 529 de 2020 “Por medio de la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia”. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.igac.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/normograma/resolucion-no-197-de-2022>

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2022, 5 de diciembre). Resolución 1440 de 2022: Por medio de la cual se actualiza la reglamentación de los aspectos técnicos propios de la diligencia de deslinde y la publicación del mapa oficial y de entidades territoriales de la República de Colombia y se deroga la Resolución No. 1093 de 2015. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.igac.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/normograma/resolucion-1440-de-2022>
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 19115-1:2014 Geographic information—Metadata—Part 1: Fundamentals*. <https://www.iso.org/standard/53798.html>
- International Organization for Standardization. (2023a). *ISO 19157-1:2023 Geographic information—Data quality—Part 1: General requirements*. <https://www.iso.org/standard/78900.html>
- International Organization for Standardization. (2023b). *ISO 19115-3:2023 Geographic information—Metadata—Part 3: XML schema implementation for fundamental concepts*. <https://www.iso.org/standard/80874.html>
- James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>
- Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Marcial-Pablo, M. de J., & Enciso, J. (2021). Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 285. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>
- Koeva, M., Bennett, R., & Persello, C. (Eds.). (2022). Remote sensing for land administration 2.0. MDPI Books. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-5408-2>
- Lemus-Romani, J., Rueda, E. J., Becerra-Rozas, M., Cabrera, C., Liu, J., & Astorga, G. (2025). Optimization of UAV flight parameters for urban photogrammetric surveys: Balancing orthomosaic visual quality and operational efficiency. *Drones*, 9(11), 753. <https://doi.org/10.3390/drones9110753>
- Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C. (2022). *Quantitative flood hazard assessment methods: A review*. Journal of Flood Risk Management. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12855>
- Martín Calvo, J. F., Castañeda Gómez, J. A., Díaz Cuesta, Y. A., & Escobar Mahecha, D. (2020). Análisis del desastre ocurrido en Mocoa (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 24(47). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd24-47.adom>
- Martins, M., Gomes, A., & Pinto Santos, P. (2018). Hydraulic modeling for the assessment of flood hazard using the Iber software in the Amarante urban center. *FOSS4G Conference Proceedings*, 18, Article 4. <https://doi.org/10.7275/xzfg-pc52>

- Massiris-Cabeza, Á. (2002). *Ordenación del territorio en América Latina*. Scripta Nova, VI(125). https://www.researchgate.net/publication/28061124_Ordenacion_del_territorio_en_America_Latina
- Niu, Z., Xia, H., Tao, P., & Ke, T. (2024). *Accuracy assessment of UAV photogrammetry system with RTK measurements for direct georeferencing*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, X-1-2024, 169–176. <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/X-1-2024/169/2024/>
- Open Geospatial Consortium. (2023). *3D Tiles specification (Version 1.1)* (OGC Doc. 22-025r4). <https://docs.ogc.org/cs/22-025r4/22-025r4.html>
- Organización de Aviación Civil Internacional. (1944). *Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Convenio de Chicago, 7 de diciembre de 1944)*. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de https://www.icao.int/sites/default/files/2024-12/Chicago_ES.pdf
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2011). Circular 328: Unmanned Aircraft Systems (UAS). SKYbrary Aviation Safety. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://skybrary.aero/bookshelf/icao-circular-328-unmanned-aircraft-systems-uas>
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2020a, 23 de junio). ICAO model UAS regulations: Parts 101 and 102. <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/safety/UA/Documents/Model%20UAS%20Regulations%20-%20Parts%20101%20and%20102.pdf>
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2020b, 23 de junio). ICAO model UAS regulations: Part 149 (Approved Aviation Organizations). <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/safety/UA/Documents/Model%20UAS%20Regulations%20-%20Part%20149.docx>
- Palacios Bucheli, V. J., & Bokelmann, W. (2017). Agroforestry systems for biodiversity and ecosystem services: The case of the Sibundoy Valley in the Colombian province of Putumayo. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13(1), 380–397. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1391879>
- Prada Sarmiento, L. F., Cabrera, M. A., Camacho, R., Estrada, N., & Ramos Cañón, A. M. (2019). The Mocoa Event on March 31 (2017): analysis of a series of mass movements in a tropical environment of the Andean Amazonian Piedmont. *Landslides*, 16, 2459–2468. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01263-y>
- Presidencia de la República de Colombia. (1974, 18 de diciembre). Decreto 2811 de 1974: Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>

- Presidencia de la República de Colombia. (2015, 26 de mayo). Decreto 1077 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio (versión integrada con modificaciones). Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>
- Presidencia de la República de Colombia. (2021, 14 de octubre). Decreto 1294 de 2021: Por el cual se modifica la estructura de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil – Aerocivil. Departamento Administrativo de la Función Pública. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=172506>
- Quamar, M. M., Al-Ramadan, B., Khan, K., Shafiullah, M., & El Ferik, S. (2023). Advancements and applications of drone-integrated geographic information system technology—A review. *Remote Sensing*, 15(20), 5039. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>
- Rabiu, L., & Ahmad, A. (2023). Unmanned aerial vehicle photogrammetric products accuracy assessment: A review. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W6-2022, 279–288. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W6-2022-279-2023>
- Robayo Nieto, A. A., Sani, J. C., & Tierra Criollo, A. R. (2015). *Vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la elaboración de cartografías a escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS-Ecuador: Control horizontal*. X Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2015.
- Romero-Rodríguez, J. F., & Mejía Fals, M. (2017). *Cartografía de uso actual del suelo urbano del municipio de Cota, a partir de un vehículo aéreo no tripulado*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/items/b121ad26-2bd0-49b7-aa1f5ab8ef4248ec>
- Sanz Ramos, M., Cea, L., Bladé, E. (2022). *Iber v3: Manual de referencia*. CIMNE. <https://iberaula.cimne.upc.edu/>
- Shylesh, D. S., Manikandan, N., Sivasankar, S., Surendran, D., Jaganathan, R., & Mohan, G. (2023). Influence of quantity, quality, horizontal and vertical distribution of ground control points on the positional accuracy of UAV survey. *Applied Geomatics*, 15, 897–917. <https://doi.org/10.1007/s12518-023-00531-w>
- Sohl, M. A., & Mahmood, S. A. (2024). Low-cost UAV in photogrammetric engineering and remote sensing: Georeferencing, DEM accuracy, and geospatial analysis. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 8, Article 14. <https://doi.org/10.1007/s41651-024-00176-2>
- Tuquerres Imbachi, J. A., Ordoñez Rodríguez, E. E., & Casanova Tribiño, I. A. (2024). *Identificación de zonas de riesgo por inundación del municipio de Sibundoy, Putumayo, a partir del uso de sistemas de información geográfica* [Trabajo académico]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/65279>

- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2023a, 27 de septiembre). Resolución 1983 de 2023: Por medio de la cual se incorpora la norma “RAC 100 – Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS” a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia, se modifica una sección y se deroga el Apéndice 13 de la norma RAC 91 de dichos reglamentos. SUIN-Juriscol. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30050174>
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2023b). RAC 100: Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) (Edición inicial; adoptado mediante Resolución 1983 de 2023). Reglamentos Aeronáuticos de Colombia – Aerocivil. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de https://www.aerocivil.gov.co/autoridad_aeronautica/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=16966
- Vásquez Durango, W. F. (2025). *Riesgo de inundación en Puerto Leguízamo (Putumayo): análisis con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el ordenamiento agroambiental* [Trabajo académico]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/75612>
- Vásquez Santamaría, J. E., Gómez Vélez, M. I., & Martínez Hincapié, H. D. (2018). *La avenida torrencial de Mocoa, Putumayo: ¿ejemplo de una retrospectiva sin punto final en la gestión del riesgo de desastres detonados por eventos naturales?* *Revista de Derecho*, (50), 145–186. <https://doi.org/10.14482/dere.50.0007>
- Wang, Z., Shi, L., Li, J., Dai, W., Lu, W., & Li, M. (2025). The synergistic effects of GCPs and camera calibration models on UAV-SfM photogrammetry. *Drones*, 9(5), 343. <https://doi.org/10.3390/drones9050343>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Woo, H.-J., Seo, D.-M., Kim, M.-S., & Lee, H.-K. (2024). Development of methodology for calculating flooded area and flood volume in small urban areas based on unmanned aerial vehicle images. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1482330>
- Zhong, H., Duan, Y., Tao, P., & Zhang, Z. (2025). *Influence of ground control point reliability and distribution on UAV photogrammetric 3D mapping accuracy*. *Geo-spatial Information Science*. <https://doi.org/10.1080/10095020.2025.2451204>