

Aplicación de un modelo de análisis multicriterio en SIG para la evaluación del riesgo de inundación en el municipio de Tunja

Brenda Lorena Rojas Martin – bbrojasm@unadvirtual.edu.co

José Alexander Neira Castro – janeirac@unadvirtual.edu.co

Jhonatan Alexander Bautista Muñoz – jabautista@unadvirtual.edu.co

Duvan Orlando Albarracín Jiménez – doalbarracinj@unadvirtual.edu.co

Leonardo Fabio Rojas Rocero – lfrojasro@unadvirtual.edu.co

Docente asesor: Rolando Santos Santos – rolando.santos@unad.edu.co

Director de curso: Serrato Velosa, Yetfersson Arley – yetfersson.serrato@unad.edu.co

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el riesgo de inundación en el municipio de Tunja mediante la aplicación de un modelo de análisis multicriterio en un Sistema de Información Geográfica (SIG). La metodología se basó en la integración de variables ambientales, topográficas e hidrológicas, entre ellas la pendiente, la distancia a drenajes, el uso y la cobertura del suelo, la acumulación de flujo y la precipitación, las cuales fueron reclasificadas, ponderadas e integradas mediante la técnica de superposición ponderada en ArcGIS Pro. Como resultado, se obtuvo un mapa de zonificación del riesgo de inundación, en el cual el territorio se clasificó en categorías cualitativas de riesgo muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Las zonas de mayor riesgo se concentraron principalmente en sectores del sur y suroccidente del municipio, asociados a pendientes bajas, cercanía a los drenajes y alta acumulación de escorrentía, mientras que las áreas de menor riesgo se localizaron en sectores elevados del norte. El estudio evidencia la utilidad de los SIG como herramienta de apoyo para la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial, al permitir identificar zonas críticas y orientar la toma de decisiones enfocadas en la prevención y reducción de posibles afectaciones.

Palabras claves: Análisis espacial; Modelación multicriterio; Susceptibilidad hídrica; Gestión del riesgo; Escorrentía superficial

Abstract

The objective of this study was to assess flood risk in the municipality of Tunja through the application of a multicriteria analysis model supported by Geographic Information Systems (GIS). The methodology was based on the selection and integration of environmental, topographic, and hydrological variables, including slope, distance to drainage networks, land use and land cover, flow accumulation, and precipitation corresponding to October, selected for representing one of the periods with the highest rainfall in the region. The variables were reclassified, weighted, and integrated using the weighted overlay technique in ArcGIS Pro. As a result, a flood risk zoning map was obtained, classified into five categories: very low, low, medium, high, and very high. Areas with the highest risk were mainly located in zones with low slopes, proximity to water

bodies, and high runoff accumulation, while lower-risk areas were associated with elevated sectors of the municipality. The study highlights the usefulness of GIS as a decision-support tool for risk management and territorial planning, facilitating the identification of critical areas and the formulation of prevention strategies.

Keywords: Spatial analysis; Multicriteria modeling; Hydrological susceptibility; Risk management; Surface runoff

Introducción

El cambio climático ha intensificado la frecuencia y magnitud de los eventos naturales extremos, entre ellos las lluvias intensas, incrementado el riesgo de inundaciones en zonas urbanas y rurales. En Colombia, el IDEAM (2021) señala que el aumento de la variabilidad climática, asociado a fenómenos como La Niña, ha generado mayores volúmenes de precipitación y una mayor recurrencia de inundaciones. Estos eventos representan una amenaza directa para la población, la infraestructura y los sistemas productivos, especialmente en territorios donde la urbanización no ha sido planificada adecuadamente. En estos contextos, la expansión de superficies construidas incrementa la impermeabilización del suelo, reduce la infiltración natural del agua y aumenta la escorrentía superficial. Como consecuencia, los drenajes naturales reciben mayores volúmenes de flujo durante los periodos de lluvia intensa, elevando su caudal y, con ello, la vulnerabilidad de la población.

En el municipio de Tunja, capital del departamento de Boyacá, las temporadas de lluvia concentradas en los periodos de marzo–mayo y octubre–noviembre generan riesgos por inundaciones, desbordamiento de quebradas y saturación de suelos, afectando la movilidad, las viviendas, redes de servicios, áreas agrícolas y ecosistemas estratégicos (IDEAM, 2018; Alcaldía de Tunja, 2013; DNP, 2022). En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se consideran como herramientas fundamentales para la evaluación del riesgo, al permitir integrar variables ambientales, topográficas e hidrológicas mediante modelos de análisis multicriterio, facilitando la toma de decisiones territoriales (Malczewski, 2006; Eastman, 2012).

Por tal motivo, el presente estudio tiene como propósito aplicar un modelo de análisis multicriterio en un SIG para generar el mapa de riesgo de inundación del municipio de Tunja y realizar una primera interpretación de las zonas más críticas del territorio.

Objetivos

General

Evaluar el riesgo de inundación en el municipio de Tunja mediante la aplicación de un modelo de análisis multicriterio en un Sistema de Información Geográfica, integrando variables ambientales,

topográficas e hidrológicas, con el fin de la identificación de las zonas con mayor susceptibilidad y el apoyo en toma de decisiones en la gestión territorial y la reducción del riesgo.

Específicos

- Integrar la información geográfica del municipio de Tunja relacionada con precipitación, pendientes, red hídrica, uso del suelo y características del terreno, mediante su procesamiento y estandarización, con el fin de obtener los insumos necesarios para la modelación del riesgo de inundación conforme a los procedimientos establecidos en la Fase 4 del proyecto.
- Aplicar un modelo de análisis multicriterio en ArcGIS Pro, incluyendo la reclasificación, estandarización y ponderación de factores mediante técnicas de superposición ponderada, para obtener un mapa sintético de susceptibilidad y riesgo de inundación en el municipio.
- Identificar las zonas de mayor y menor riesgo de inundación en Tunja a partir del mapa resultante, mediante el análisis de sus posibles implicaciones sobre la población, la infraestructura, los ecosistemas y las actividades productivas, con el fin de generar insumos interpretativos para la gestión del riesgo y la planificación territorial.

Identificación del caso de estudio

El municipio de Tunja está ubicado en el centro-oriente de Colombia, en el departamento de Boyacá, dentro de la región andina y sobre el altiplano cundiboyacense. Se sitúa a una altitud promedio de 2.820 metros sobre el nivel del mar, convirtiéndola en una de las capitales departamentales más elevadas del país (IGAC, 2020). Su localización estratégica facilita la conectividad con los municipios del corredor central de Boyacá y con ciudades principales como Bogotá y Duitama. Administrativamente, Tunja se encuentra dividida en una zona urbana consolidada y un amplio territorio rural compuesto por 15 veredas, cuya estructura espacial influye en la distribución de riesgos y en la presencia de áreas potencialmente afectadas por procesos hidrometeorológicos (Alcaldía de Tunja, 2023).

El municipio de Tunja cuenta con una superficie aproximada de 121 km², de los cuales cerca del 20 % corresponde al área urbana y el 80 % restante la zona rural, compuesta principalmente por bosques, áreas destinadas a actividades agropecuarias, pastos, reservas ambientales y zonas de protección hídrica (DANE, 2022). Esta configuración territorial presenta una combinación de paisajes de ladera, valles interandinos y áreas ligeramente onduladas, cuyas características morfológicas influyen de manera directa en los patrones de escorrentía y en la acumulación de agua durante los periodos de mayor precipitación.

Desde el punto de vista físico y ambiental, Tunja presenta una topografía predominantemente inclinada en sus alrededores, mientras que el casco urbano se asienta en una planicie suavizada

derivada de antiguos procesos lacustres. Esta morfología favorece la concentración y movimiento de aguas superficiales hacia depresiones naturales y zonas bajas, aumentando la susceptibilidad de inundación en sectores específicos del municipio (Corpoboyacá, 2020). La red hidrográfica está conformada principalmente por las quebradas La Vega, La Sija, El Hato, Arrayanes y La Chapa, así como por cauces menores que atraviesan la zona rural y convergen en la cuenca del río Jordán, uno de los principales sistemas de drenaje regionales (IDEAM, 2018). Varios de estos cauces han experimentado procesos de canalización, intervención o reducción de sus rondas hídricas, incrementando el riesgo asociado a eventos de desbordamiento.

En cuanto al clima, Tunja presenta características típicas de zonas frías andinas, con temperaturas promedio cercanas a 13 °C y una marcada estacionalidad en las lluvias. De acuerdo con los registros del IDEAM, las precipitaciones anuales oscilan entre 800 y 1000 mm, concentrándose principalmente en los periodos marzo-mayo y octubre-noviembre, los cuales corresponden a las temporadas lluviosas del país (IDEAM, 2021). Estas temporadas generan picos de escorrentía superficial y saturación del suelo, particularmente en suelos arcillosos de baja infiltración, incrementando la posibilidad de formación de encharcamientos e inundaciones locales tanto en áreas urbanas como rurales. Para el desarrollo del presente estudio se consideró la información de precipitación correspondiente a los meses de mayor acumulación, coherente con los insumos utilizados en la Fase 4.

En términos de uso y cobertura del suelo, el municipio presenta áreas urbanas densamente edificadas, zonas de expansión y sectores industriales, mientras que en la zona rural predominan los pastos, cultivos transitorios y coberturas naturales en recuperación. Algunas de estas coberturas presentan vulnerabilidad ante procesos de saturación, especialmente en pendientes medias y altas, pudiendo influir en el comportamiento del drenaje y en el aumento del riesgo (POT Tunja, 2013). En conjunto, estas características físicas, ambientales e hidrológicas convierten a Tunja en un territorio donde los procesos de inundación, aunque no tan recurrentes como en otras zonas del departamento, representan un riesgo significativo para la infraestructura, la movilidad y la seguridad de la población. Por ello, la evaluación multicriterio soportada en SIG constituye una herramienta fundamental para comprender la distribución espacial de estos riesgos y orientar acciones de gestión ambiental y planificación territorial.

Metodología

En este estudio se aplicó para la identificación de zonas de riesgo, en especial, riesgo de inundación en el municipio de Tunja el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en conjunto con un modelo de análisis multicriterio, desarrollado en dos etapas: la preparación y procesamiento de capas geográficas previamente preparadas (Fase 4) y la integración de criterios mediante superposición ponderada para obtener el mapa final de riesgo de inundación (Fase 6). El proceso se estructuró de manera secuencial, garantizando la consistencia espacial de las capas, la

estandarización de unidades y la adecuada ponderación de los factores involucrados en la susceptibilidad a inundaciones.

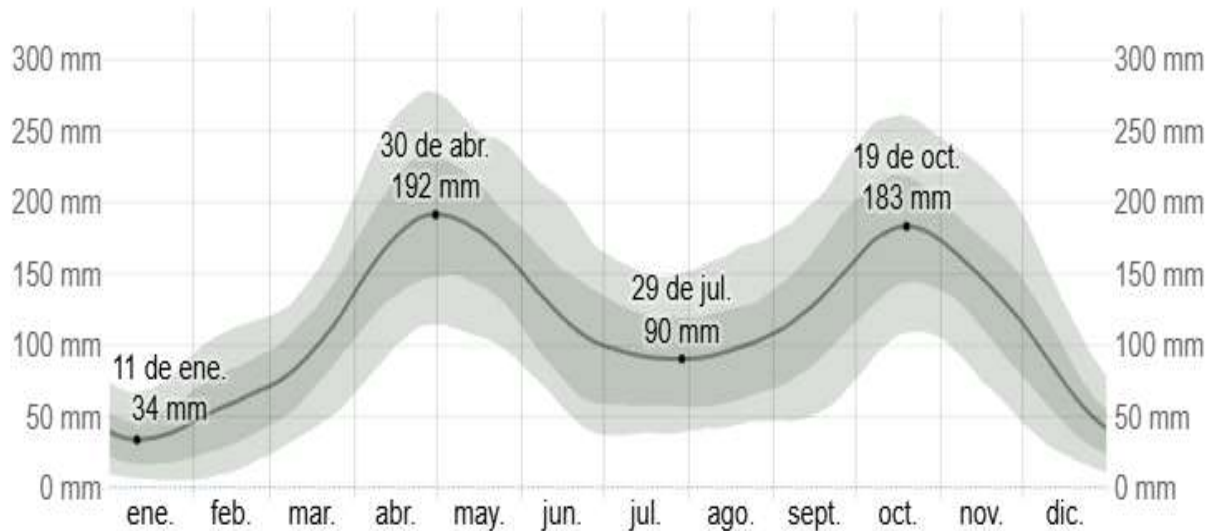
Preparación de insumos espaciales

En primer lugar, se recopilaron y organizaron los datos geográficos necesarios para la modelación¹. Estos insumos incluyeron información de pendiente derivada del modelo digital de elevación (DEM) con resolución de 30 m, red hidrográfica, uso y cobertura del suelo, precipitación acumulada para los meses de mayor intensidad (la selección del mes se justifica más adelante), acumulación de flujo y distancia a drenajes. Todos los datos fueron estandarizados al sistema de referencia MAGNA-SIRGAS, limpiados topológicamente y recortados para al municipio, y así, se aseguró la coherencia espacial del proyecto durante las Fases de desarrollo. Este proceso se ejecutó utilizando las herramientas (Clip, Project y Extract by Mask) de ArcGIS Pro.

Justificación de la selección del mes de octubre como referencia de precipitación

Entre los parámetros más importante a seleccionar en este estudio fue el mes de lluvia para el municipio de Tunja. El mes seleccionado corresponde al octubre como el mes representativo de lluvias fuertes en el municipio porque coincide con el segundo pico lluvioso del régimen bimodal característico del Altiplano Cundiboyacense. De acuerdo con WeatherSpark, s.f., octubre presenta la mayor frecuencia de días lluviosos del año, con un promedio de 23,3 días con precipitación, además de una precipitación mensual elevada (~183 mm), evidenciando lluvias persistentes y acumuladas. Estos valores lo convierten en un mes climáticamente significativo para estudios hidrológicos, ambientales y de riesgo, donde se requiere un periodo de referencia que capture condiciones de alta humedad y saturación del suelo (ver Fig. 3.1). Aunque otras bases de datos como Climate-Data.org indican que abril puede alcanzar valores de lluvia superiores (~243 mm), octubre sigue siendo un mes crítico por su recurrencia de eventos, su volumen acumulado y su coherencia con los estudios climatológicos de la región, que reconocen dos temporadas lluviosas bien definidas: abril-mayo y octubre-noviembre (Climate-Data.org, s.f.). Por ello, octubre constituye un mes robusto y metodológicamente justificable para representar condiciones de lluvia intensa en Tunja.

¹ Las Fase 2 y 3 corresponden a las siguientes actividades (forma global), respectivamente, Adquisición y preparación de datos espaciales en SIG y exploración y análisis de operaciones espaciales del territorio. En el desarrollo de las actividades de exploración y análisis espacial, se generaron diversas capas derivadas a partir del DEM utilizando herramientas hidrológicas como Fill, Flow Direction y Flow Accumulation, indispensables para corregir imperfecciones altimétricas, modelar la dirección preferencial de escorrentía y estimar los patrones de acumulación de flujo superficial.

Figura 3.1. Precipitación mensual promedio en Tunja

Nota: El gráfico muestra la distribución anual de la precipitación promedio en Tunja, evidenciando los picos lluviosos característicos de abril–mayo y octubre–noviembre, propios del régimen bimodal de la región andina. Fuente: Recuperada de WeatherSpark, s.f., 2025.

Reclasificación de variables ambientales y territoriales

Los factores seleccionados fueron reclasificados mediante la herramienta (Reclassify), asignando valores estandarizados en una escala común que permitiera la integración multicriterio. La reclasificación se realizó considerando criterios establecidos en literatura técnica sobre análisis de susceptibilidad a inundaciones y lineamientos conceptuales de sistemas de drenaje urbano y rural.

Los criterios empleados fueron:

- Pendiente: las pendientes bajas se relacionan con una mayor susceptibilidad, debido que reducen la velocidad de la escorrentía y favorecen la acumulación de agua.
- Distancia a drenajes: las áreas más próximas a cauces naturales y quebradas son más propensas a inundarse por desbordamientos o insuficiencia de capacidad hidráulica.
- Uso y cobertura del suelo: zonas urbanizadas y áreas con suelos impermeables aumentan la escorrentía superficial; coberturas naturales tienden a reducirla.
- Acumulación de flujo: valores altos indican concentración de agua en depresiones o laderas.
- Precipitación: las áreas con mayor intensidad de lluvia representan una presión adicional sobre el sistema de drenaje superficial.

Cada variable se reclasificó asignando categorías cualitativas expresadas en escala común, donde los valores más altos representan condiciones de mayor susceptibilidad a inundación para los casos del DEM, pendientes, precipitación y cobertura de tierras. Ya para el caso de distancias entre drenaje, se invirtió la escala. En este estudio se empleó los valores cualitativos de riesgo muy bajo

y bajo, riesgo medio, riesgo alto y muy alto con su correspondiente valor numérico, respectivamente, 2, 4, 6, 8 y 10 (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Estimación de clasificación cualitativa y cuantitativa

| Clasificación cualitativa | Valores |
|---------------------------|---------|
| Riesgo muy bajo | 2 |
| Riesgo bajo | 4 |
| Riesgo medio | 6 |
| Riesgo alto | 8 |
| Riesgo muy alto | 10 |

Nota: Esta tabla establece la correspondencia entre la descripción cualitativa del riesgo y su valor numérico cuantitativo. Fuente: Recuperada de UNAD, 2025a.

Asignación de ponderaciones mediante análisis multicriterio

Se empleó el método de superposición ponderada (Weighted Overlay) para integrar los factores reclasificados. La ponderación de cada criterio respondió a su importancia relativa según la literatura científica y guías técnicas de evaluación del riesgo (Malczewski, 2006; Eastman, 2012). Las ponderaciones se normalizaron para que su suma correspondiera al 100 % del peso total del modelo. Los valores usados para la ponderación del riesgo de inundación en el municipio de Tunja fueron obtenidos en la Fase 4 y se presentan en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Criterios de análisis para el riesgo de inundación

| Clasificación cualitativa | Valor relativo | Valor relativo porcentual (%) |
|-----------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Modelo de elevación digital DEM | 0.10 | 10 |
| Pendientes | 0.15 | 15 |
| Cobertura de tierras (Land cover) | 0.10 | 10 |
| Precipitación | 0.35 | 35 |
| Distancia entre drenajes | 0.30 | 30 |
| Total | 1 | 100 |

Nota: Esta tabla muestra los cinco factores del análisis de riesgo de inundación y el porcentaje de influencia de cada uno, así como su valor en escala decimal para aplicar en un análisis multicriterio. Fuente: Recuperada y modificada de UNAD, 2025a.

Cálculos métricos y análisis estadístico básico

Para el cálculo de las áreas por categoría de riesgo² y trabajar con unidades expresadas en km², el ráster de riesgo de inundación se transformó en una capa vectorial de polígonos. Esta conversión permitió cuantificar de manera precisa las cinco clases de riesgo (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto). Las áreas se calcularon en un sistema de coordenadas proyectadas adecuado para mediciones de superficie, garantizando la validez geométrica de los resultados. La información

²Este mapa fue elaborado a partir de los resultados de la Fase 4, los cuales corresponden a los resultados preliminares presentados anteriormente.

obtenida constituyó la base para los análisis cuantitativos y para la elaboración de gráficos que representan la distribución del riesgo en el municipio.

Asimismo, el análisis estadístico aplicado en capa vectorial de drenajes modelados (Streams), particularmente al campo de longitud (Shape_Length), permitió obtener medidas descriptivas — como valores medios— y construir un histograma de distribución que agrupa los segmentos de drenaje en distintas clases de longitud. Este procedimiento facilitó la caracterización de la red hídrica modelada y su relación con los patrones espaciales de riesgo identificados.

Mapas cartográficos

Algunos de los mapas cartográficos utilizados en este estudio provienen de fuentes externas, incluyendo artículos científicos y plataformas oficiales como el IGAC, el IDEAM y otros repositorios geoespaciales. Por su parte, el mapa final de riesgo de inundación —descrito en detalle en esta sección— fue generado mediante el método de análisis multicriterio, integrando los insumos procesados en las fases previas del proyecto.

validación conceptual

El análisis de resultados incluyó la identificación de zonas críticas de inundación y su relación con la infraestructura urbana, los equipamientos, los corredores viales, las áreas agrícolas y los ecosistemas presentes en el municipio. Si bien el estudio no incorpora una validación hidrológica instrumental o modelaciones de caudal, se realizó un contraste conceptual apoyado en registros de eventos históricos y en reportes oficiales sobre afectaciones por lluvias en Tunja. Este contraste permitió evaluar la coherencia espacial del modelo, verificando que las áreas clasificadas con mayor riesgo coincidan con sectores previamente documentados como susceptibles a inundaciones (Perico-Granados et al. 2021; Rincón-Díaz & Vargas-Gómez 2018; etc.).

Resultados

El análisis de riesgo por inundación se fundamenta en un conjunto de datos de entradas espaciales obtenidos y procesados previamente durante las actividades de las Fase 2, 3 y 4. Estas fases permitieron construir la base cartográfica, derivar variables hidrológicas y generar los componentes necesarios para la modelación multicriterio. A continuación, se presentan dos tipos de resultados: 1) resultados preliminares del riesgo de inundación obtenido en el desarrollo de la Fase 4 (capa formato ráster) y 2) resultados de riesgo de inundación usando el modelo multicriterio (capa vectorial)³.

A partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) correspondiente a municipio de Tunja Boyacá se modelaron las variables hidrológicas como son: la dirección y acumulación de flujo, identificación

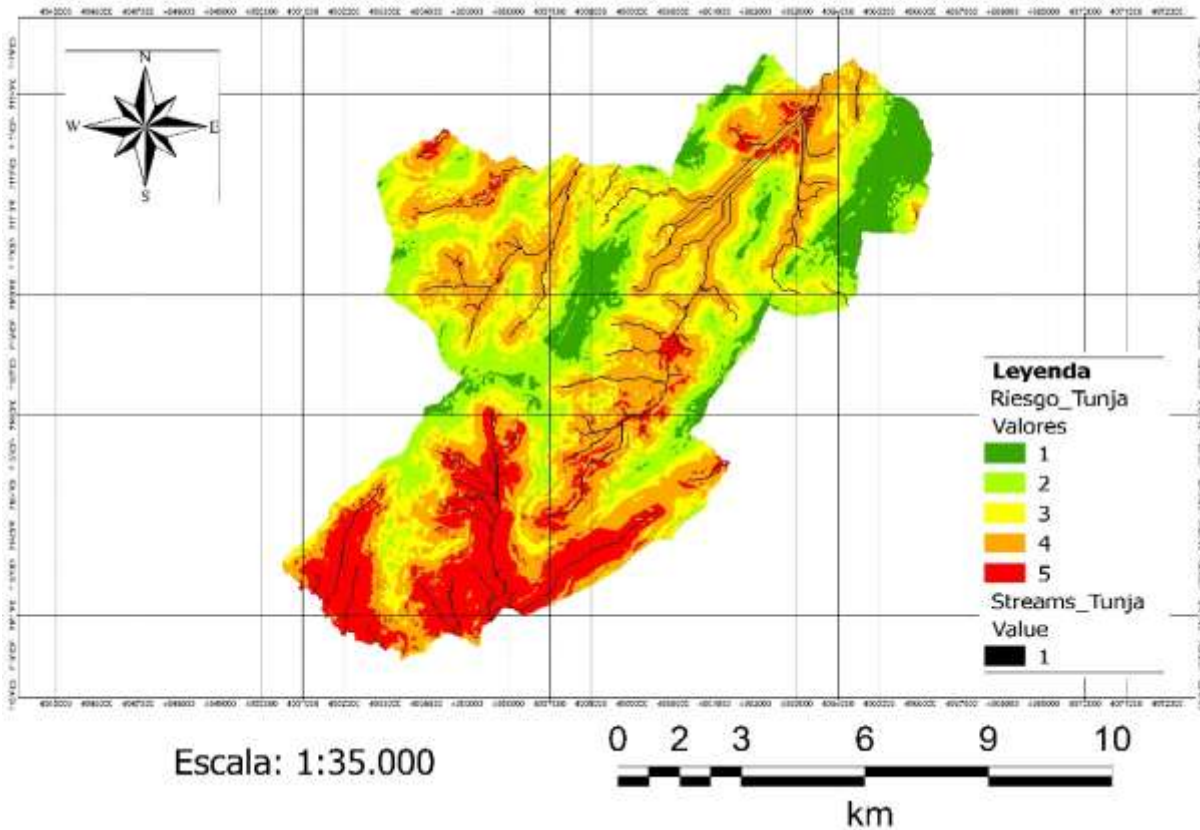
³Para complementar el análisis, se aplicó la herramienta Tabúlate Área o *Calculate Geometry con el fin de determinar la superficie correspondiente a cada categoría de riesgo en kilómetros cuadrados..

de drenajes principales, altitudes relativas (zonas bajas/altas) y, además fueron usados parámetros de reclasificación asociados al DEM, la Cobertura, Pendientes, Distancia a drenajes, Precipitación (seleccionado el mes de octubre – para mayor información ver la sección de la metodología) y criterios de riesgo de inundación, así permitió obtener una primera versión del mapa de Riego de Inundación para el municipio.

Resultados preliminares

El mapa de susceptibilidad a inundaciones generado en la **Fase 4** (ver Fig. 4.1) muestra una distribución espacial heterogénea del riesgo dentro del municipio de Tunja. La clasificación utilizada —muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, ver Tabla 3.1, sección metodología— evidencia zonas con mayor predisposición a presentar eventos de inundación, derivadas de la combinación del DEM, pendiente, distancia a drenajes y precipitación del mes de lluvia del mes de octubre.

Figura 4.2. Mapa de riesgo por inundación versión Fase 4

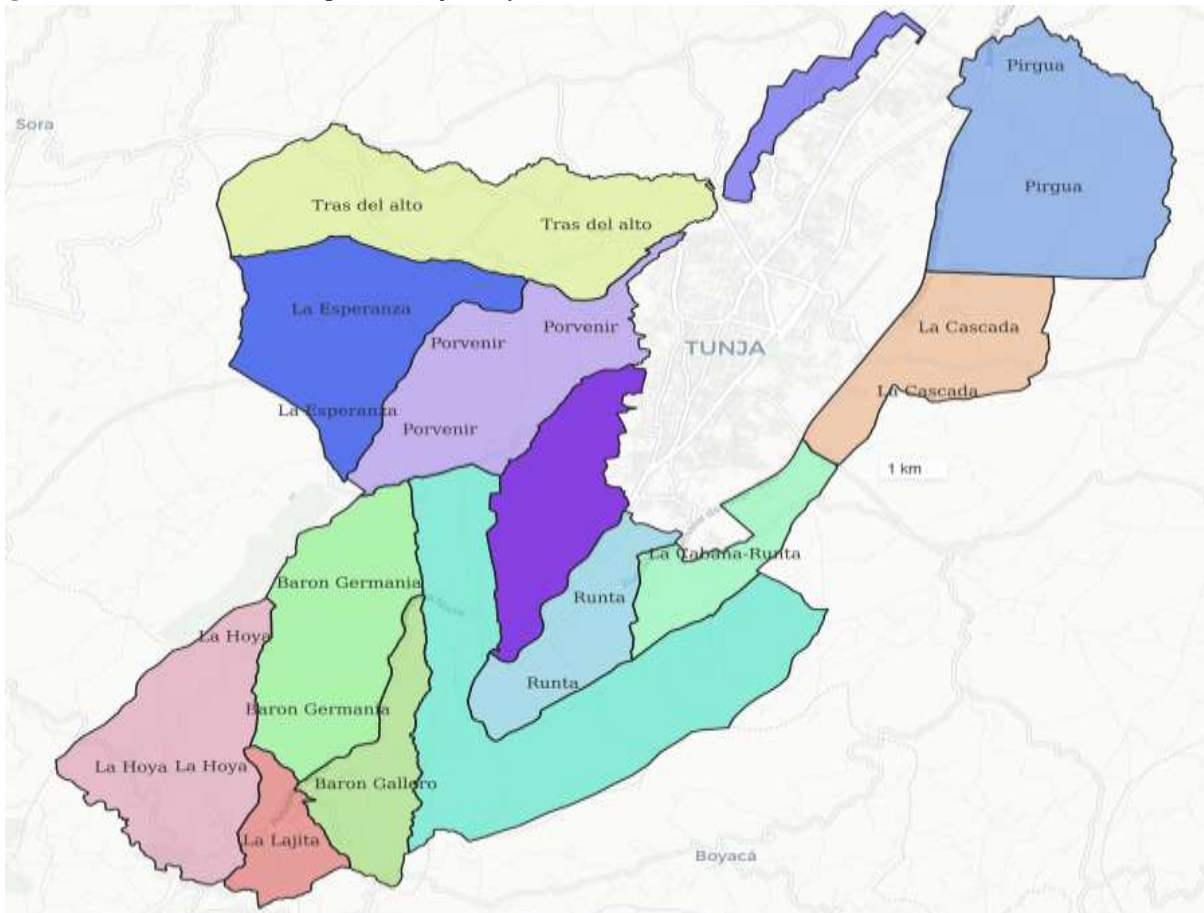


Nota: La imagen muestra la ciudad de Tunja Boyacá. La clasificación cuantitativa de la leyenda de la figura se puede observar en la Tabla 3.1. Fuente: Autoría propia, 2025 (ArcGIS Pro).

En términos generales, se observan pequeñas franjas de riesgo alto y medio sobre la ciudad, especialmente en la parte norte y nororiente del casco urbano, donde aparecen líneas rojas y

naranjas alineadas con los canales y drenajes urbanos. Asimismo, los drenajes modelados (Streams) derivados del DEM reflejan de manera preliminar el comportamiento hidrológico en estos sectores, mostrando rutas naturales de escorrentía que coinciden con los corredores donde históricamente se han presentado desbordamientos. Estudios como Perico-Granados et al., 2021; López & Rivera, 2018; Martínez et al., 2024, entre otros, documentan afectaciones recurrentes asociadas a los ríos Jordán y La Vega, respaldando la coherencia entre los patrones observados en este modelo preliminar y la dinámica hidrológica real del municipio.

Figura 4.2. Veredas del Municipio de Tunja (Boyacá)



Nota: La delimitación de veredas se obtuvo del geoportal Catastro Tunja a un clic, administrado por la Alcaldía de Tunja, y representa la división rural oficial del municipio. Fuente: (Alcaldía de Tunja, s.f.).

Por otro lado, la mayor concentración de áreas clasificadas como **riesgo alto y muy alto** se observa principalmente hacia la zona **sur y suroccidental** del municipio, donde las condiciones de topografía más abrupta, mayor convergencia de drenajes modelados y acumulación de flujo explican esta susceptibilidad. Esa zona corresponde al sector conformado por las veredas: La Hoya, La Lajita, Barón Gallero, Barón Germania y Sectores bajos de Runta (ver Fig. 4.2), Estas veredas coinciden con áreas donde el modelo hidrológico (DEM + Flow Accumulation) muestra

mayor convergencia de escorrentía, pendientes pronunciadas y acumulación de flujo. La morfología del terreno favorece la concentración del agua y explica la presencia de extensas manchas rojizas y naranjas que representan mayor susceptibilidad.

Las áreas de riesgo bajo y muy bajo se ubican mayormente en sectores elevados, laderas amplias y zonas donde la pendiente reduce la retención hídrica y, por tanto, la probabilidad de inundación. Las veredas que se destacan son: Tras del Alto, Sectores elevados de La Esperanza y Zonas superiores de Pirgua.

En la Tabla 4.1 se presenta la distribución de celdas por nivel de riesgo de inundación – Tunja, es decir, los valores de atributos del ráster, los cuales permiten cuantificar la extensión relativa de cada categoría por el total de celdas. La superficie está compuesta por un total de 125031 celdas, donde cada una tiene un área de 942.12 m². El área total calculada del mapa corresponde aproximadamente a 117.79 km², siendo un valor muy próximo al informado por la Alcaldía de Tunja (2020).

Tabla 4.1. Distribución de Celdas por Nivel de Riesgo.

| Clasificación cualitativa | Total celdas |
|---------------------------|--------------|
| Riesgo muy bajo | 11525 |
| Riesgo bajo | 22723 |
| Riesgo medio | 31597 |
| Riesgo alto | 31399 |
| Riesgo muy alto | 19787 |

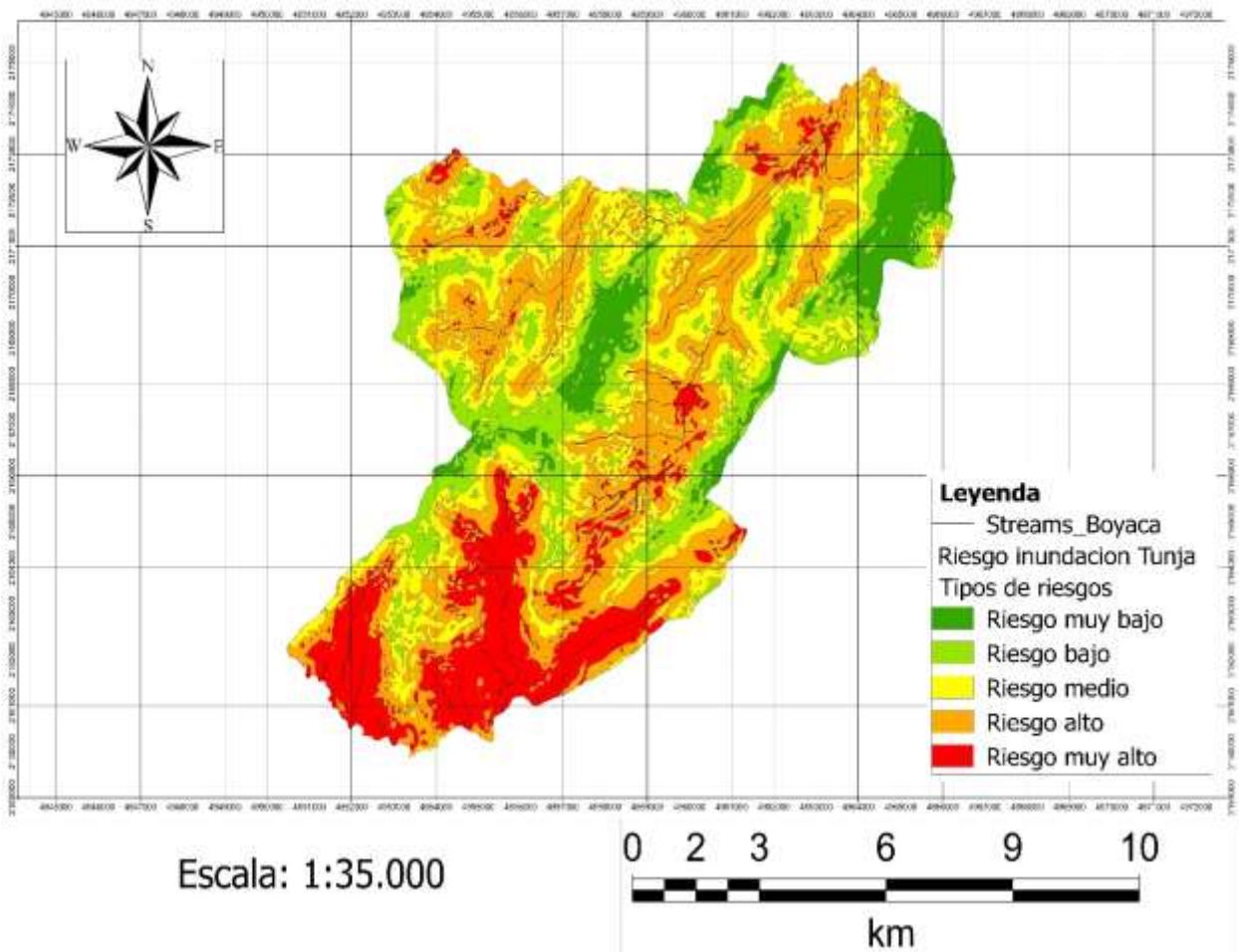
Los valores de atributo del ráster permiten cuantificar la extensión relativa de cada categoría. Fuente: Autoría propia, 2025 (ArcGIS Pro).

Resultados de riesgo de inundación usando el modelo multicriterio

En la Figura 4.3 se ilustra el mapa final de riesgo de inundación⁴ para Tunja. Los resultados muestran una distribución claramente estructurada de las cinco clases de riesgo de las diferentes clases de riesgos: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. El diseño del mapa incorporó una cuadrícula de coordenadas, una escala de 1:35.000 y la red de drenaje modelado (Streams), ésta última permite identificar los sectores del municipio más susceptibles a inundaciones.

⁴ Este mapa fue elaborado a partir de los resultados de la Fase 4, los cuales corresponden a los resultados preliminares presentados anteriormente.

Figura 4.3. Mapa final de riesgo por inundación versión Fase 6.



Nota: El mapa presenta el resultado final del análisis de riesgo de inundación para la ciudad de Tunja, Boyacá, elaborado a partir de la capa vectorial generada en la Fase 6. La reclasificación cualitativa se representa mediante una simbología de colores, donde el verde oscuro y el verde claro corresponden a los niveles de riesgo muy bajo y bajo; el amarillo indica riesgo medio; el naranja representa riesgo alto; y el rojo señala riesgo muy alto. Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro).

En términos generales, las áreas de riesgo alto y muy alto (colores naranja y rojo) se concentran en el sector sur y suroccidental del municipio y en corredores hidrológicos que siguen los valles de los ríos y quebradas principales, es decir, siguen la dirección de los drenajes principales. Por su parte, las zonas de riesgo medio (color amarillo) ocupan la franja intermedia y se observa que se distribuyen de forma continua alrededor de las zonas críticas, mientras que las áreas de riesgo bajo y muy bajo (verde y verde oscuro) se ubican en laderas y partes altas, donde la combinación de pendiente, altitud y mayor capacidad de drenaje reduce la probabilidad de inundación, es decir, con poca probabilidad de inundación. De otro lado, si superpone el mapa de veredas oficiales del municipio (ver Fig. 4.2), se observa que, las mayores extensiones de riesgo se asocian con veredas como La Hoya, La Lajita, Barón Gallero, Barón Germania y sectores bajos de Runta mostrando una fuerte correspondencia entre la estructura de drenajes y las áreas que fueron clasificadas como

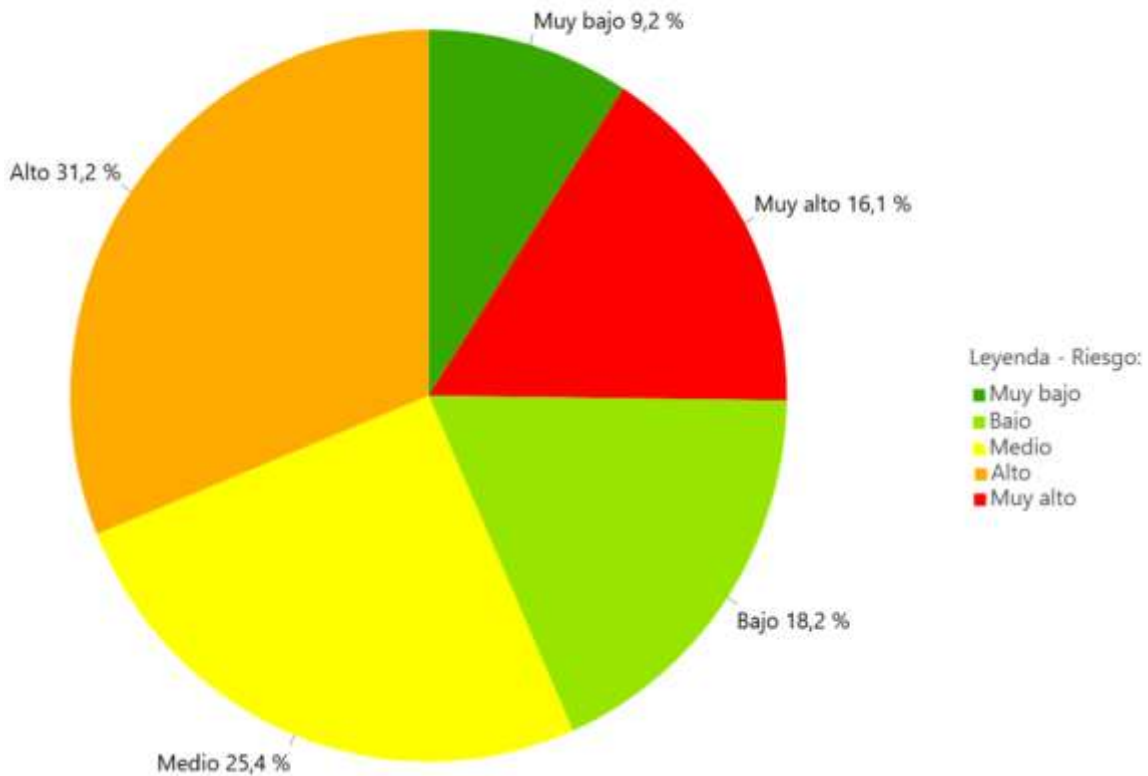
críticas. En contraste, veredas como Tras del Alto, La Esperanza y Pirgua tienden a presentar valores de riesgo bajo o muy bajo, coherentes con su posición topográfica más elevada o de mayor altitud y mejores condiciones de drenaje natural.

La validez de los resultados del modelo multicriterio empleado, también se refleja al compararlos con los resultados históricos de inundaciones documentado en Tunja. Diversos estudios y reportes noticiarios coinciden que la ciudad ha experimentado múltiples eventos de inundación entre 2007 y 2023. A continuación, se citan algunos trabajos que relacionan estos hechos. Perico-Granados et al. (2021) registran afectaciones en 2008, 2012 y 2016, asociadas principalmente al desbordamiento de los ríos La Vega (atraviesa la ciudad y afecta barrios céntricos y del sector norte) y Jordán (cruza la zona sur y suroccidente del casco urbano) que afectaron la zona urbana; es decir, lograron determinar los puntos críticos de inundación dentro de la ciudad. De manera similar, Rincón-Díaz y Vargas-Gómez (2018) señalan eventos reportados en 2007, 2010 y 2013 (los eventos son asociados a los ríos La Vega y Jordán), los cuales motivaron el desarrollo de modelos hidrodinámicos para la ciudad. A esto se suman reportes periodísticos (El Tiempo, 2017; 2019; 2022) que documentan inundaciones en sectores del casco urbano y en veredas como La Lajita, Runta y Pirgua, coincidiendo espacialmente con las zonas clasificadas como riesgo alto o muy alto en el presente estudio. Estudios más recientes de análisis de riesgo mediante SIG en el municipio (Rivera Rojas & López Castaño, 2024) corroboran que las áreas de menor altitud y próximas a cauces canalizados presentan una mayor exposición a inundaciones, reforzando la validez del modelo multicriterio aplicado en esta investigación. Finalmente, boletines del IDEAM (2010–2023) indican que las temporadas de abril–mayo y octubre–noviembre han concentrado los eventos de mayores crecientes súbitas, dando soporte el uso del mes de octubre como condición de entrada para la modelación multicriterio (ver la sección de metodología).

La Figura 4.4 ilustra la cuantificación vectorial de las áreas por clase de riesgo⁵ en la ciudad de Tunja. En términos de porcentajes, el municipio presenta aproximadamente 117,93 km² modelados (en los resultados preliminares se sustenta ésta información), de los cuales 9,1 % corresponden a riesgo muy bajo, 18,2 % a riesgo bajo, 25,4 % a riesgo medio, 31,2 % a riesgo alto y 16,1 % a riesgo muy alto. El patrón porcentual indica que más de la mitad del territorio (alrededor del 47 %) se concentra entre riesgo medio y alto, sugiriendo un grado de susceptibilidad significativo, especialmente si se considera que octubre es uno de los meses más lluviosos para Tunja y Boyacá (IDEAM, 2024; Climate-Data.org, 2025; Sánchez-Almanza, Patiño-Camargo, & Rodríguez-Valencia, 2024). Las áreas de riesgo muy alto, aunque menos extensas que el riesgo alto, se distribuyen en áreas relativamente continuas en los valles del sur y suroccidente, que las convierte en zonas críticas para la planificación del uso del suelo, la infraestructura vial y los sistemas agropecuarios. Por su parte, las áreas de riesgo muy bajo no son despreciables, pero se concentran sobre todo en porciones altas y relativamente estables del relieve, funcionando como zonas potencialmente seguras ante eventos extremos (ver Fig. 4.3).

⁵ Los datos fueron obtenidos a partir de la capa Riesgo inundación de la ciudad de Tunja.

Figura 4.4. Distribución porcentual del área por clase de riesgo de inundación en Tunja - versión Fase 6
 Distribución porcentual del área por clase de riesgo de inundación en Tunja



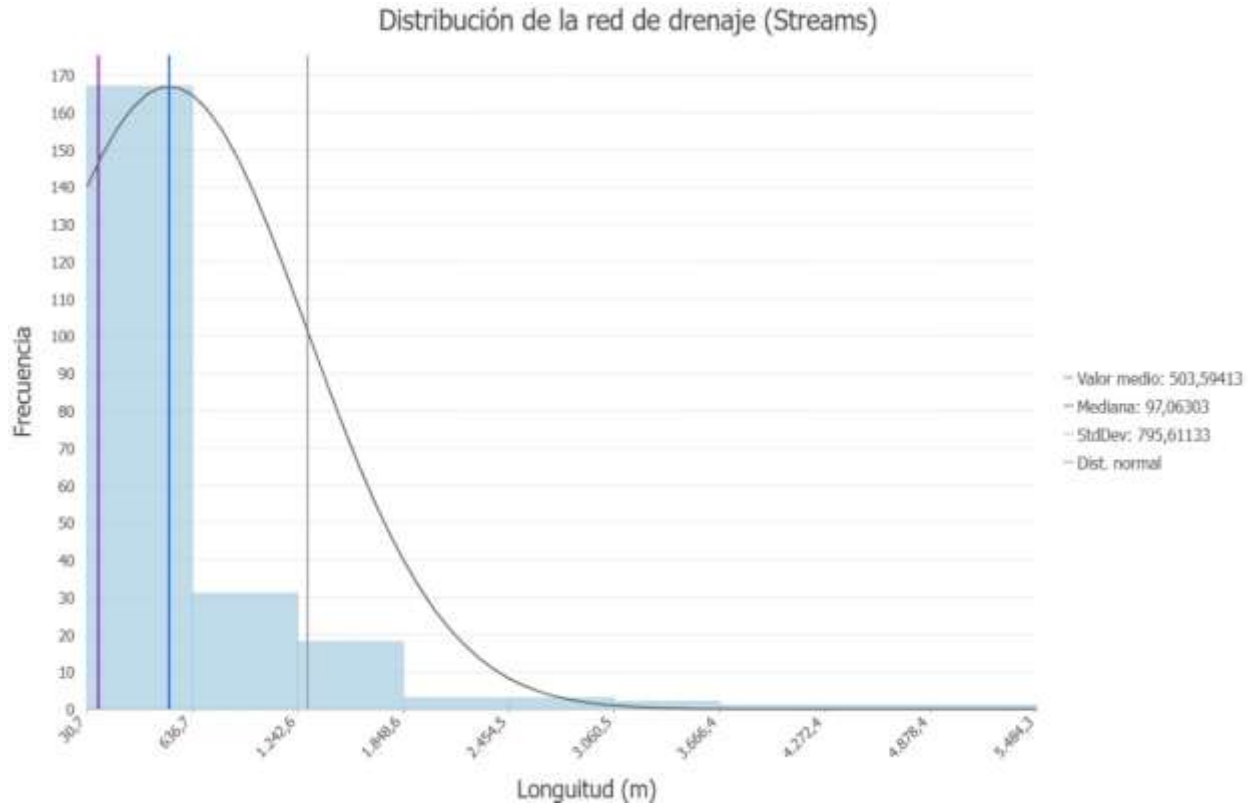
Nota: Los porcentajes se calcularon a partir de las áreas obtenidas en el ráster de riesgo de inundación. El área total midió aproximadamente 117.94 km². Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro).

La Figura 4.5 muestra el histograma de longitudes de la red de drenajes modelada. En total se identificaron 227 segmentos, con una longitud media de 503,6 m, una mediana de 97,1 m y una desviación estándar de 795,6 m. Está marcada diferencia entre media y mediana, junto con la amplia dispersión observada, evidencia que la distribución es fuertemente asimétrica hacia la derecha, dominada por un gran número de drenajes cortos y un reducido conjunto de cauces extensos. La curva de distribución normal superpuesta en el gráfico, claramente desplazada hacia valores altos, refuerza la presencia de una cola larga típica de redes hidrográficas jerárquicas, es decir, es un sistema de drenaje donde los causes pequeños se unen para formar causes más grandes (López, 2019).

En términos hidrológicos, estos resultados significan que la red de drenaje está dominada por drenajes cortos de primer y segundo orden, mientras que existe un número muy reducido de cauces largos que actúan como ejes colectores del flujo, entre ellos los tramos que representan los valles de los ríos La Vega y Jordán, así como varios tributarios que descienden desde veredas como Pirgua, La Cascada, La Esperanza y Tras del Alto hacia el casco urbano. El hecho que la mediana sea mucho menor que la media confirma la presencia de unos pocos segmentos muy largos que

controlan la estructura de la red, y es precisamente en las inmediaciones de estos colectores principales donde se superponen las áreas de riesgo alto y muy alto del mapa final.

Figura 4.5. Histograma de longitudes de la red de drenaje (Streams) en Tunja - versión Fase 6



Nota: La media (línea azul), la mediana (línea púrpura) y la desviación estándar (línea gris) indican la fuerte asimetría de la distribución, dominada por segmentos cortos y unos pocos cauces largos. Se incluye una curva normal teórica para referencia comparativa. Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro).

Este comportamiento espacial (morfología) de la red de drenaje caracterizado por la concentración de segmentos cortos en laderas y la presencia de cauces principales en los valles (en el sur y suroccidente del municipio), explica de manera coherente el patrón de riesgo obtenido en la Fig. 4.1. Los drenajes mayores actúan como ejes de convergencia de escorrentía, y es precisamente en sus alrededores donde el modelo identifica las zonas de riesgo alto y muy alto. Este resultado es consistente con los estudios hidrológicos previos realizados para la ciudad de Tunja, los cuales destacan que las áreas bajas y próximas a los cauces principales presentan mayor susceptibilidad a inundaciones (Perico-Granados et al., 2021; Rincón-Díaz & Vargas-Gómez, 2018; Rivera Rojas & López Castaño, 2024). Así, la red de drenaje aporta el fundamento geomorfológico que sustenta la distribución espacial del riesgo representada en el mapa final.

De otro lado, el uso del mes de octubre usado como el mes de precipitación para la modelación (en la metodología se valida el haber seleccionado este mes) refuerza aún más la interpretación de los resultados del análisis del riesgo de inundación. Los resultados climatológicos (regional) del

IDEAM y otros estudios sobre lluvia máxima para Tunja muestran que, en promedio, este mes se ubica entre los meses de mayor precipitación de la región, con valores entre los 183–192 mm mensuales en varias estaciones andinas (IDEAM, 2024; Weather-Spark, s. f., 2025; Sánchez-Almanza et al., 2024). Bajo este escenario de alta pluviosidad, las áreas de riesgo alto y muy alto identificadas en el modelo multicriterio deben interpretarse como zonas especialmente sensibles durante los picos de la segunda temporada de lluvias, mientras que las áreas de riesgo medio pueden experimentar anegamientos temporales o afectaciones localizadas dependiendo de la intensidad y duración de los eventos. Finalmente, en conjunto, la estructura de la red de drenaje y el patrón espacial del riesgo permiten concluir que el modelo multicriterio reproduce adecuadamente la dinámica hidrológica del territorio y ofrece información relevante para la gestión del riesgo, la planificación agroambiental y el ordenamiento territorial del municipio de Tunja.

Conclusiones

- El análisis multicriterio permitió identificar con claridad una marcada heterogeneidad espacial en el riesgo de inundación en el municipio de Tunja, evidenciando zonas de muy alto riesgo concentradas principalmente en el sector sur y suroccidente del territorio municipal. Estas áreas coinciden con regiones donde se presentan pendientes bajas, acumulación natural de escorrentía y proximidad a drenajes, lo que confirma la influencia significativa de la morfología local y la estructura hidrográfica en la determinación de la susceptibilidad.
- Las zonas clasificadas como riesgo alto y muy alto conforman corredores continuos asociados a cauces menores, microcuencas y depresiones topográficas, tal como se observa en las áreas rojas y naranjas del mapa. Esto indica que el territorio presenta sectores donde la interacción entre factores ambientales (pendiente, drenaje y acumulación de flujo) y antrópicos (impermeabilización del suelo, expansión urbana en áreas planas) incrementa notablemente la probabilidad de inundaciones durante eventos de lluvia intensa. Estos resultados son coherentes con los patrones históricos de afectación reportados por entidades ambientales y municipales.
- El uso de Sistemas de Información Geográfica y del modelo multicriterio demostró ser una herramienta adecuada y eficaz para la evaluación del riesgo de inundación en Tunja, permitiendo integrar de forma estructurada variables diversas y generar un producto cartográfico de alta utilidad para la planificación territorial. La representación espacial facilita la lectura del riesgo, la priorización de zonas críticas y la toma de decisiones informadas en el marco de la gestión del riesgo y la prevención de desastres.
- La distribución espacial del riesgo evidencia implicaciones importantes para el ordenamiento del territorio, particularmente en sectores rurales donde se identifican amplias zonas clasificadas como riesgo medio y alto. Estas áreas requieren estrategias de manejo de escorrentía, restauración de coberturas vegetales y protección de rondas

hídricas. En la zona urbana, el riesgo localizado indica la necesidad de fortalecer los sistemas de drenaje pluvial, mejorar la infraestructura de alcantarillado y evitar desarrollos urbanísticos en zonas de susceptibilidad elevada.

- En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que, aunque Tunja no presenta inundaciones generalizadas a gran escala, sí existen sectores específicos donde el riesgo es significativo y tiene potencial para afectar viviendas, vías rurales, infraestructura vial, suelos agrícolas y ecosistemas estratégicos. Por tanto, el mapa de inundación de riesgo constituye un insumo clave para la reducción de vulnerabilidades, la planificación preventiva y la construcción de estrategias adaptativas frente a la variabilidad climática actual y futura.

Recomendaciones

- Priorizar la intervención en las zonas clasificadas como riesgo muy alto y alto, especialmente en el sector sur y suroccidente del municipio, donde la convergencia entre pendientes bajas, drenajes naturales y acumulación de flujo favorece la ocurrencia de inundaciones. Se recomienda que la administración municipal formule planes específicos de manejo del drenaje, establezca obras de mitigación hidráulica y fortalezca los sistemas de alcantarillado pluvial en estas áreas críticas.
- Fortalecer la protección y recuperación de ronda hídricas, especialmente en los cauces que atraviesan zonas rurales y periurbanas. Las quebradas La Vega, La Sija, La Chapa, El Hato y otros drenajes secundarios deben contar con franjas de protección acordes con lo establecido por la normativa ambiental. Estas áreas deben ser intervenidas con procesos de revegetalización, control de vertimientos y eliminación de obstáculos artificiales que reduzcan su capacidad hidráulica.
- Promover prácticas de manejo sostenible del suelo en áreas rurales, donde predominan coberturas de pastos y zonas agrícolas ubicadas en áreas clasificadas como riesgo medio y alto. La adopción de estrategias como la reforestación en pendientes medias, la protección de microcuencas, el manejo de curvas a nivel y la implementación de barreras vivas puede reducir la escorrentía superficial y contribuir a la disminución del riesgo.
- Evitar la expansión urbana en zonas de alta susceptibilidad, especialmente en los corredores donde el modelo identificó acumulación de escorrentía y proximidad a drenajes naturales. Se recomienda que estos sectores sean incorporados en los instrumentos de planificación territorial como áreas de restricción o condicionamiento para futuros desarrollos urbanísticos, siguiendo los lineamientos del POT de Tunja y las recomendaciones de gestión del riesgo establecidas por las entidades ambientales.
- Mejorar y ampliar la infraestructura de drenaje urbano, principalmente en las áreas del casco urbano donde el riesgo es medio y donde podrían presentarse eventos de inundación asociados con insuficiencia del sistema de recolección de aguas lluvias. La instalación de captadores pluviales, ampliación de canales secundarios y limpieza periódica de redes permitiría disminuir la vulnerabilidad de estos sectores.

- Incorporar el mapa de riesgo en la toma de decisiones municipales, especialmente en los procesos de revisión catastral, licenciamiento urbanístico, formulación de proyectos de vivienda y mantenimiento vial. El mapa generado mediante SIG debe ser adoptado como un insumo técnico en el marco del Sistema Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres para orientar acciones preventivas e inversiones prioritarias.
- Realizar monitoreo climático y seguimiento hidrológico durante las temporadas de mayor precipitación (marzo–mayo y octubre–noviembre). La implementación de estaciones automáticas de monitoreo y la consolidación de alertas tempranas permitiría detectar rápidamente incrementos súbitos en los caudales, reduciendo el riesgo para la población y las actividades productivas.
- Desarrollar campañas de educación y sensibilización comunitaria, enfocadas en la importancia de mantener los cauces limpios, evitar la ocupación de zonas inundables y reconocer señales tempranas de riesgo. La participación comunitaria es esencial para reducir vulnerabilidades y fortalecer la resiliencia del territorio.

Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Tunja. (2020). Diagnóstico del Plan de Ordenamiento Territorial de Tunja: Versión funcional. https://pot-tunja.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/2.-Diagnostico_v1funcional.pdf
- Alcaldía de Tunja. (s. f.). Catastro Tunja a un clic: Mapas interactivos – Veredas. <https://catastro.tunja.gov.co/geoportal/index.php/mapas-interactivos/>
- Alcaldía de Tunja. (s. f.). ¿Sabías que 161 barrios y 15 veredas de Tunja proyectaron...? <https://alcaldiatunja.micolombiadigital.gov.co/presupuestos-participativos/sabias-que-161-barrios-y-15-veredas-de-tunja-proyectaron>
- Climate-Data.org. (s. f.). Clima Tunja. <https://en.climate-data.org/south-america/colombia/boyaca/tunja-5328/>
- Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva manual. Clark Labs, Clark University.
- El Tiempo. (2017–2022). Reportes de inundaciones en Tunja y veredas aledañas. <https://www.eltiempo.com>
- IDEAM. (2010–2023). Boletines climatológicos: Crecientes súbitas y eventos extremos por departamento. <https://www.ideam.gov.co>
- López, J. (2019). Estadística descriptiva (2.^a ed.). Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). <https://repositorio.uned.ac.cr/handle/120809/2043>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Perico-Granados, N. R., Arévalo-Algarra, H. M., Reyes-Rodríguez, C. A., Perico-Martínez, C. A., Vera, M. C., & Monroy, J. (2021). Sitios de inundaciones causadas por los ríos La Vega y Jordán, Tunja (Boyacá). *Tecnura*, 25(67), 86–101. <https://doi.org/10.14483/22487638.15248>

- Rincón-Díaz, C. A., & Vargas-Gómez, M. F. (2018). Hydrodynamic modeling for identification of flooding zones in Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, (86), 33–43. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/download/329060/20791090/>
- Sánchez-Almanza, F. D., Patiño-Camargo, Ó., & Rodríguez-Valencia, A. (2024). Regionalization of maximum daily rainfall in the Boyacá department. *Revista Facultad de Ingenierías Universidad de Antioquia*, (113), 106–118. <https://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n113/0120-6230-rfiua-113-106.pdf>
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2025a). Guía de aprendizaje – Fase 2: Adquisición y preparación de datos espaciales en SIG. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2025b). Guía de aprendizaje – Fase 3: Exploración y análisis de operaciones espaciales. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2025c). Guía de aprendizaje – Fase 4: Modelación agroambiental del territorio. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2025d). Guía para el desarrollo del componente práctico – Fase 5: Salida de campo. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2025e). Guía de aprendizaje – Fase 6: Evaluación final. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.
- WeatherSpark. (2025). Clima promedio en Tunja, Colombia durante todo el año. <https://es.weatherspark.com/y/24312/Clima-promedio-en-Tunja-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Enlace de sustentación: <https://youtu.be/BAkZ1Ef3i0U>