

Análisis Espacial y Evaluación Multicriterio del Riesgo de Inundación en el Municipio de Paipa (Boyacá, Colombia)

Gyovanny Emir López Torres - gelopezt@unadvirtual.edu.co

Rolando Santos Santos - rolando.santos@unad.edu.co

Resumen

El estudio tuvo como objetivo analizar el riesgo de inundación en el municipio de Paipa mediante un modelo de evaluación multicriterio implementado en un entorno de Sistemas de Información Geográfica. La metodología empleada integró variables físicas, hidrológicas, climáticas y de cobertura del suelo, procesadas a partir de insumos como el Modelo Digital de Elevación, la red hídrica, datos de precipitación y la cartografía oficial del territorio. A través de técnicas de reclasificación, estandarización y suma ponderada, se generó el mapa de riesgo por inundación, permitiendo identificar espacialmente las zonas más susceptibles dentro del municipio. Los resultados indican que las áreas de mayor riesgo se ubican principalmente en el sector norte, donde predominan pendientes bajas, acumulación de flujo y cercanía a microcuencas. Las zonas de riesgo medio se distribuyen en la parte central, mientras que las zonas de riesgo bajo y muy bajo se localizan hacia el sur del territorio. Estos hallazgos evidencian patrones hidrológicos consistentes con la geomorfología local y con eventos históricos reportados en temporadas de lluvias intensas. El estudio demuestra la utilidad de los SIG para la evaluación del riesgo y aporta elementos relevantes para orientar la planificación ambiental y la gestión territorial en Paipa.

Palabras claves: Inundación, riesgo, SIG, análisis multicriterio, Paipa

Introducción

El aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos es una de las manifestaciones más evidentes del cambio climático, lo cual ha incrementado la vulnerabilidad de numerosos territorios frente a fenómenos como inundaciones y deslizamientos. Diversos estudios han documentado cómo el calentamiento global intensifica los ciclos de precipitación y modifica el comportamiento hidrológico de las cuencas, aumentando la probabilidad de inundaciones repentinas y alteraciones en la esorrentía (IPCC, 2021; Trenberth, 2011). En Colombia, este tipo de eventos ha mostrado una tendencia creciente asociada a variaciones climáticas de gran escala, como El Niño y La Niña, afectando especialmente a los municipios ubicados en sistemas de montaña (IDEAM, 2018; Poveda, 2019).

En este contexto, el estudio del riesgo de inundación en Paipa adquiere especial relevancia debido a la presencia de asentamientos rurales, infraestructura vial sensible y actividades agrícolas en zonas próximas a cauces y microcuencas. Documentos oficiales, como el Plan de Desarrollo Municipal y el Esquema de Ordenamiento Territorial, señalan que sectores del norte del municipio

han registrado afectaciones recurrentes durante temporadas de lluvia, lo que exige una evaluación técnica que permita identificar zonas críticas y orientar la toma de decisiones locales (Alcaldía de Paipa, 2020).

Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta fundamental para estos análisis, ya que permiten integrar variables diversas y representar espacialmente la distribución del riesgo de manera precisa, facilitando la planificación preventiva y la gestión territorial (Longley et al., 2021; Kimerling et al., 2016).

En consecuencia, este estudio aplica un modelo de análisis multicriterio en SIG para generar el mapa de riesgo de inundación en Paipa e interpretar las zonas con mayor susceptibilidad dentro del territorio municipal.

Objetivos

General

Analizar el riesgo de inundación en Paipa mediante evaluación espacial multicriterio para apoyar el ordenamiento ambiental y la gestión territorial.

Específicos

Identificar las áreas del municipio con distintos niveles de riesgo de inundación mediante análisis espacial y reclasificación temática.

Evaluar la relación entre variables hidrológicas, topográficas y de cobertura para determinar su influencia en la generación del riesgo.

Interpretar los resultados obtenidos para estimar impactos potenciales y orientar acciones de gestión agroambiental en el territorio.

Identificación del caso de estudio

El municipio de Paipa se ubica en el departamento de Boyacá, en la región centro-oriental de Colombia, dentro de la cuenca alta del río Chicamocha. Su posición geográfica aproximada se encuentra entre los 5°46' y 5°39' de latitud norte y los 73°05' y 73°06' de longitud oeste, conformando una división político-administrativa que incluye áreas urbanas y una amplia zona rural distribuida en veredas. El municipio cuenta con una extensión cercana a los 300 km², predominando el área rural sobre el área urbana, lo que condiciona su dinámica territorial y ambiental (IGAC, 2020).

Las características físicas del territorio evidencian condiciones determinantes para la generación de riesgo por inundación. Paipa se localiza a una altitud promedio de 2.525 metros sobre el nivel del mar, en un valle interandino rodeado por elevaciones que facilitan procesos de escorrentía hacia zonas más planas. La red hídrica está conformada principalmente por el río Chicamocha, además de microcuencas como las quebradas Chontales y río Cuestano, cuyo comportamiento hidrológico influye en la susceptibilidad del municipio frente a eventos de inundación. La

configuración del relieve presenta pendientes fuertes en las partes altas y pendientes bajas en el área central, donde se concentran los procesos de acumulación superficial (IDEAM, 2018).

En términos climáticos, Paipa presenta un régimen bimodal de precipitaciones característico de la región andina, con incrementos notorios en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. Estas condiciones intensifican el riesgo cuando se combinan con suelos saturados, baja capacidad de infiltración en ciertos sectores y presiones antrópicas sobre la cobertura vegetal. Para la modelación aplicada en la fase 4, se emplearon los valores correspondientes al periodo de mayores precipitaciones del segundo semestre, coincidentes con la temporada de lluvias más intensa, lo cual permitió evaluar de manera precisa los escenarios de riesgo asociados a eventos hidrometeorológicos recurrentes (Poveda, 2019).

Metodología

El análisis del riesgo de inundación se desarrolló mediante un método de evaluación multicriterio integrado en un entorno SIG, lo que permitió combinar diversos factores ambientales y topográficos para representar espacialmente el comportamiento del riesgo en el municipio. Este enfoque se fundamenta en la capacidad del análisis raster para modelar procesos hidrológicos y territoriales a escala continua, posibilitando la identificación de áreas críticas con alta precisión. La metodología se ejecutó en varias etapas consecutivas que abarcaron la preparación de información, la construcción de variables, la estandarización, la ponderación y, finalmente, la obtención del mapa de riesgo.

Preparación y depuración de la información espacial

El proceso inició con la consolidación de las capas base necesarias para la modelación, incluyendo el límite municipal, el Modelo Digital de Elevación, la red hídrica, las coberturas de la tierra y la información climática asociada al régimen de precipitaciones. Cada capa fue recortada exclusivamente al ámbito territorial del municipio, lo cual garantizó que todos los análisis posteriores se ajustaran estrictamente al área de estudio. Esta depuración inicial permitió mejorar el rendimiento computacional y evitar inconsistencias geométricas durante la integración de los factores.

Posteriormente, algunas capas vectoriales fueron transformadas para optimizar su manejo dentro del modelamiento raster. Por ejemplo, ciertos polígonos de cobertura fueron disueltos para reducir la fragmentación espacial y facilitar su conversión posterior, evitando discontinuidades que podrían alterar la precisión del análisis multicriterio. Esta estandarización inicial constituyó una base sólida para los procesos de reclasificación y ponderación.

Construcción de variables base para el análisis multicriterio

Una vez preparadas las capas, se generaron los modelos espaciales necesarios para representar el comportamiento físico del territorio frente al fenómeno de inundación. Este conjunto de variables permitió integrar tanto condiciones hidrológicas como características topográficas y climáticas.

Acumulación de flujo

A partir del Modelo Digital de Elevación se derivó la dirección de flujo y, posteriormente, la acumulación de flujo. Esta variable identifica los puntos del terreno donde convergen mayores volúmenes de escorrentía superficial. La acumulación de flujo es fundamental para estimar la probabilidad de inundación, dado que concentra los aportes hídricos provenientes de áreas altas y canaliza la escorrentía hacia sectores de menor pendiente.

Pendientes del terreno

Se generó un modelo de pendientes que permitió clasificar el territorio según la inclinación del relieve. Las pendientes bajas, generalmente asociadas a zonas planas y depresiones topográficas, representan condiciones más favorables para la acumulación de agua y, por tanto, para la ocurrencia de inundaciones. En contraste, las pendientes altas favorecen una rápida evacuación de la escorrentía.

Distancias a la red hídrica

Las zonas cercanas a ríos y quebradas presentan mayor susceptibilidad a inundaciones por desbordamiento o saturación del cauce. Para captar esta relación espacial, se elaboró un modelo de distancia desde cada celda del territorio hasta la red hídrica. Este factor permitió incorporar gradientes de riesgo basados en la proximidad a cuerpos de agua.

Precipitación

La precipitación constituye uno de los factores detonantes del fenómeno de inundación. Se utilizó la información correspondiente al periodo de mayor intensidad de lluvias registrado para la zona, la cual refleja el comportamiento estacional más crítico del clima local. Esta variable fue convertida a formato raster y reclasificada para asignar rangos de mayor o menor contribución al riesgo según sus valores.

Coberturas de la tierra

Las coberturas superficiales influyen directamente en los procesos de infiltración y escorrentía. Zonas con vegetación natural presentan mayor capacidad de absorción de agua, mientras que áreas agropecuarias o de uso antrópico suelen incrementar el escurrimiento superficial. La capa de coberturas fue transformada a raster y reclasificada considerando este comportamiento diferencial.

Reclasificación y estandarización de los factores

Cada variable fue sometida a un proceso de reclasificación, asignando valores numéricos ordenados de menor a mayor contribución al riesgo. Este paso permitió estandarizar los factores, haciendo comparable la influencia de cada uno dentro del modelo, independientemente de sus unidades originales. Esta homogeneización garantiza que la posterior ponderación combine correctamente las variaciones territoriales de cada criterio.

Asignación de ponderaciones

La ponderación se realizó mediante un esquema de suma ponderada, donde cada factor recibió un peso relativo según su importancia en la generación del riesgo. Esta asignación respondió a criterios hidrológicos y topográficos ampliamente reconocidos en la literatura y a la dinámica del territorio, en la cual la acumulación de flujo y la pendiente se consideran variables determinantes del proceso.

Tabla 1. *Ponderaciones asignadas a los factores del modelo*

Factor	Peso (%)
Acumulación de flujo	30
Pendiente	25
Distancia a red hídrica	20
Precipitación	15
Coberturas del suelo	10

La aplicación de estas ponderaciones mediante álgebra raster produjo un modelo continuo que sintetiza el comportamiento espacial del riesgo a partir de la integración balanceada de sus condicionantes.

Obtención del mapa final de riesgo

El raster resultante de la suma ponderada fue reclasificado nuevamente para obtener las cinco categorías cualitativas del riesgo: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Este proceso permitió transformar el modelo continuo en una representación categórica más adecuada para la interpretación territorial.

Posteriormente, el raster fue convertido a polígono con el fin de generar unidades de análisis claramente delimitadas. Estos polígonos fueron suavizados para mejorar su calidad cartográfica y disueltos según la categoría de riesgo, lo que facilitó la cuantificación del área correspondiente a cada nivel de amenaza.

Finalmente, se calcularon las superficies ocupadas por cada clase y se aplicó una simbología diferenciada para representar visualmente el riesgo en el mapa final.

Resultados

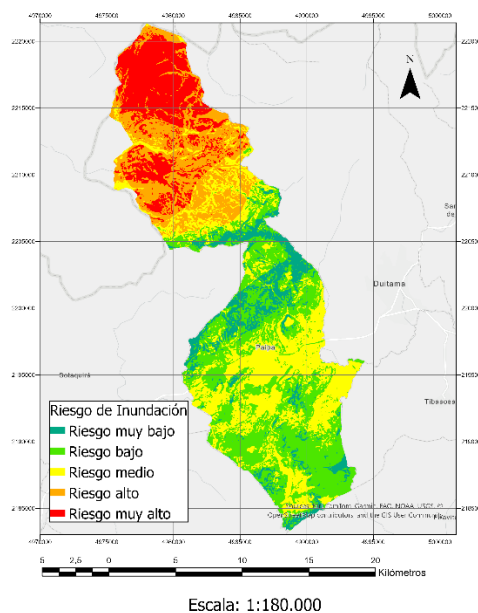
El análisis multicriterio permitió obtener una representación espacial del riesgo de inundación en el municipio de Paipa, integrando variables topográficas, hidrológicas, de cobertura del suelo y

climáticas. Los productos obtenidos constituyen una base sólida para la interpretación territorial y la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo, coherente con lo planteado por metodologías de evaluación de amenazas hidrometeorológicas a escala municipal (Smith & Ward, 2015).

Mapa de riesgo por inundación

El producto principal corresponde al mapa de riesgo por inundación del municipio de Paipa, resultado de la suma ponderada de los factores modelados. El mapa presenta adecuadamente los elementos cartográficos fundamentales —título, leyenda, escala gráfica, orientación y cuadrícula de coordenadas— lo que garantiza una lectura precisa y facilita su uso en procesos de ordenamiento territorial (Kimerling et al., 2016).

Figura 1. *Mapa de riesgo por inundación del municipio de Paipa.*



El mapa evidencia una distribución heterogénea del riesgo, con predominio de clases bajas y medias en la zona central y austral del municipio, mientras que los sectores septentrionales muestran una concentración marcada de áreas clasificadas como riesgo alto y muy alto. La espacialización obtenida permite visualizar patrones topográficos y de drenaje que coinciden con el comportamiento hidrológico esperado para cuencas de montaña, donde la geomorfología juega un papel determinante en la redistribución de la escorrentía (Chow et al., 1988).

Área por categoría cualitativa de riesgo

El proceso de conversión raster–vector y la posterior disolución por clase permitieron calcular las superficies correspondientes a cada nivel de riesgo. Esta cuantificación es fundamental para

conocer la magnitud de la amenaza y orientar estrategias de gestión, tal como señalan autores que estudian el impacto territorial de los fenómenos de inundación (Merz et al., 2010).

La distribución del área por categoría fue la siguiente:

Categoría de riesgo	Área (km²)	Porcentaje
Muy bajo	28.49	9.45 %
Bajo	93.88	31.13 %
Medio	81.70	27.09 %
Alto	52.07	17.27 %
Muy alto	45.41	15.06 %

Los resultados muestran que más del 32 % del territorio municipal se ubica en niveles de riesgo alto y muy alto, lo cual evidencia condiciones relevantes de susceptibilidad a procesos de inundación. Esta proporción es significativa para un municipio con características geomorfológicas de valle interandino, donde la convergencia de microcuencas potencia la escorrentía superficial.

Interpretación y análisis de los resultados

Identificación de zonas de mayor riesgo

Las zonas clasificadas como riesgo muy alto y alto se concentran principalmente en:

- El sector norte del municipio.
- Las veredas asociadas a microcuencas como Cuestano y Chontales.
- Áreas de baja pendiente próximas al cauce del río Chicamocha.

Estas áreas comparten condiciones que favorecen la acumulación de agua, como pendientes suaves, suelos con menor capacidad de infiltración y cercanía a drenajes naturales. Esto coincide con los principios hidrológicos que explican la formación de inundaciones en cuencas de montaña, donde los gradientes topográficos y la acumulación de flujo desempeñan un rol clave (Ponce, 1989).

La presencia de actividades agropecuarias en estas zonas añade un componente adicional de vulnerabilidad, ya que los suelos intervenidos y compactados pueden reducir su capacidad de absorción, incrementando el riesgo de escorrentía superficial.

Zonas de menor riesgo

Los niveles de riesgo bajo y muy bajo se observan en áreas centrales y meridionales, donde la mayor pendiente y la mejor estructura de drenaje natural permiten evacuar el agua de manera más eficiente. En estos sectores se registran condiciones que limitan la acumulación superficial, alineadas con lo establecido por estudios sobre dinámica de cuencas en zonas de alta montaña (García, 2011).

Aunque estas áreas presentan menor riesgo, siguen siendo susceptibles a procesos locales de inundación cuando ocurren eventos extremos o cuando existe alteración de las coberturas vegetales.

Relación con poblaciones, infraestructura y ecosistemas

El análisis muestra que las comunidades rurales ubicadas en zonas noroeste y norte del municipio son las más expuestas, especialmente aquellas asentadas cerca de cauces o en sectores donde la microtopografía favorece la acumulación de agua. Esto implica riesgos asociados a:

- Pérdida de cultivos por anegamiento.
- Afectación de viviendas.
- Interrupción temporal de la movilidad por daño en vías terciarias.
- Riesgos sanitarios asociados a la degradación del agua.

En cuanto a infraestructura, la vulnerabilidad se manifiesta particularmente en caminos rurales que conectan veredas, cuya estructura es sensible a saturación del suelo y erosión hídrica. La literatura señala que sistemas viales en zonas de montaña tienden a sufrir deterioro acelerado en presencia de inundaciones y escorrentía intensa (FAO, 2016).

En relación con los ecosistemas, los humedales locales y las áreas cercanas al Pantano de Vargas pueden experimentar procesos de sedimentación y alteraciones en el régimen de flujo, afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados.

Comparación con eventos históricos

Los resultados presentan coherencia con inundaciones registradas en el municipio durante años recientes. En 2016 se reportaron inundaciones en áreas urbanas debido al colapso del sistema de alcantarillado, afectando sectores donde el modelo identifica riesgo medio y alto. A su vez, en temporadas de lluvia intensas han ocurrido anegamientos en veredas del norte, coincidiendo con las zonas clasificadas como riesgo alto y muy alto.

Este tipo de correspondencia entre la modelación espacial y la realidad empírica es fundamental para establecer la confiabilidad de los modelos de riesgo, como lo plantean Plate (2002) y Merz et al. (2010), quienes destacan la importancia de validar resultados con evidencia histórica.

Conclusiones

La distribución espacial del riesgo de inundación en Paipa evidencia una concentración significativa de áreas de riesgo alto y muy alto en el sector norte del municipio, donde convergen factores como pendientes suaves, alta acumulación de flujo y proximidad a drenajes naturales. Este patrón confirma que la geomorfología local y la configuración de las microcuencas influyen de manera determinante en la susceptibilidad del territorio, mientras que las zonas centrales y meridionales presentan condiciones más favorables para el drenaje y menor tendencia a la acumulación de agua.

El uso de Sistemas de Información Geográfica y del análisis multicriterio demostró ser una metodología adecuada y eficaz para modelar el riesgo de inundación en el municipio, permitiendo integrar variables de distinta naturaleza —hidrológicas, topográficas, climáticas y de cobertura del suelo— en un producto espacial coherente y cuantificable. La capacidad de reclasificación y ponderación dentro de un entorno SIG facilitó la identificación de áreas críticas y mostró consistencia con eventos históricos registrados, lo que valida la pertinencia de este enfoque para estudios territoriales de amenaza y riesgo.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas para la gestión del territorio y la reducción de afectaciones futuras, ya que permiten priorizar zonas donde deben concentrarse los esfuerzos de intervención, especialmente en comunidades rurales expuestas, corredores viales vulnerables y áreas agroproductivas susceptibles a anegamientos. Identificar de manera precisa las zonas de riesgo facilita la planificación agroambiental, la formulación de estrategias de mitigación, la prevención de daños a infraestructura y la protección de ecosistemas hídricos estratégicos del municipio.

Recomendaciones

Fortalecer la planificación agroambiental en zonas de riesgo alto y muy alto, promoviendo prácticas de manejo del suelo que reduzcan la escorrentía superficial, tales como la implementación de barreras vivas, sistemas agroforestales y revegetación de áreas degradadas, de manera que se minimice la susceptibilidad del territorio a la acumulación de agua.

Mejorar la infraestructura de drenaje urbano y rural, especialmente en sectores donde los resultados muestran coincidencia entre riesgo medio–alto y eventos históricos de inundación. Esto incluye el mantenimiento periódico del alcantarillado, la ampliación de canales de desagüe y la adecuación de cunetas y alcantarillas en vías terciarias que presentan vulnerabilidad ante lluvias intensas.

Integrar el mapa de riesgo de inundación dentro de los instrumentos de ordenamiento territorial del municipio, de modo que las decisiones de expansión urbana, ubicación de equipamientos, delimitación de áreas de protección y planificación de usos del suelo respondan a criterios de seguridad hídrica y minimización de exposición.

Desarrollar estrategias de educación y comunicación comunitaria orientadas a sensibilizar a la población rural y urbana sobre la dinámica del riesgo en su territorio. Esto permitirá fortalecer la preparación ante emergencias, la gestión comunitaria del riesgo y la adopción de prácticas acordes con la realidad ambiental identificada.

Implementar sistemas de monitoreo permanente en los sectores críticos, incorporando herramientas como estaciones de precipitación, sensores de nivel en cauces y seguimiento satelital del uso del suelo. Esto permitirá anticipar eventos extremos y responder oportunamente, reduciendo las posibles afectaciones a la población y a las actividades productivas.

Referencias Bibliográficas

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- FAO. (2016). *Damage assessment methodologies in rural infrastructure systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- García, L. (2011). Dinámica hidrológica en cuencas de montaña. *Revista Colombiana de Geografía*, 20(2), 45–60.
- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC. (2020). *Atlas básico de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Kimerling, A. J., Buckley, A. R., Muehrcke, P. C., & Muehrcke, J. O. (2016). *Map Use: Reading, Analysis, Interpretation*. Esri Press.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2021). *Geographic Information Systems and Science*. Wiley.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thielen, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1697–1724.
- Plate, E. (2002). Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267(1–2), 2–11.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Poveda, G. (2019). Variabilidad climática y régimen de precipitaciones en la región andina colombiana. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Smith, K., & Ward, R. (2015). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Wiley-Blackwell.

Enlace de sustentación:

https://drive.google.com/drive/folders/1jGnS36KP5_dYfJesuyCwE1uW_KtIF9ty?usp=sharing