



Evaluación de la pérdida de sedimento del río Pamplonita en el sector “La Gazapa”, mediante datos satelitales y fotogrametría aérea

Assessment of sediment loss from the Pamplonita River in the “La Gazapa” sector, using satellite data and aerial photogrammetry

Carlos Alexis Bonilla Granados ¹, Jarol Derley Ramón Valencia ², Diego Iván Sánchez Tapiero ³

Fecha de Recepción: 12 de abril de 2026

Fecha de Aceptación: 31 de julio de 2026

Cómo citar: C. A. Bonilla-Granados, J. D. Ramón-Valencia y D. I. Sánchez-Tapiero, «Evaluación de la pérdida de sedimento del río Pamplonita en el sector “La Gazapa”, mediante datos satelitales y fotogrametría aérea», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 107–120. <https://doi.org/10.14483/22487638.25000>

Resumen

Contexto: Los cursos fluviales presentan una dinámica morfológica continua que puede comprometer la estabilidad de obras de infraestructura hidráulica e hipogeas, como los puentes. Fenómenos como la erosión, la sedimentación, la migración lateral del cauce y las actividades antrópicas de extracción de material de arrastre incrementan la vulnerabilidad de las estructuras aledañas.

Objetivo: Evaluar las modificaciones en la morfología del lecho de un tramo del río Pamplonita, en el sector del puente La Gazapa (Cúcuta, Colombia), producidas por los procesos de pérdida de sedimento.

Metodología: Se analizaron las variaciones topográficas del lecho en el periodo 2011-2024 mediante la integración de datos de topografía convencional, sensores remotos satelitales y fotogrametría aérea con vehículos aéreos no tripulados (UAV). Para el estado inicial (2011), los datos satelitales obtenidos de la *Alaska Satellite Facility* se procesaron y calibraron junto con levantamientos topográficos de campo para generar un Modelo Digital de Elevación (MDE) en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para el estado final (2024), se construyó un MDE multitemporal derivado de imágenes capturadas con UAV, procesadas en Agisoft Metashape e integradas en el SIG.

Resultados: Se determinó que el tramo analizado presenta un perfil longitudinal con pendientes comprendidas entre el $\pm 3\%$ y secciones transversales de tipo encajonado. El análisis diferencial de las superficies topográficas estimó una pérdida acumulada de material en el lecho de aproximadamente 547.000 m^3 , lo que representa un socavamiento o descenso medio de 5 metros de profundidad en la zona de estudio.

1 PhD Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, MSc. en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, Ingeniero Civil, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación Etenoha, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. Email: carlos.bonilla@unipamplona.edu.co

2 PhD Ingeniería Ambiental, MSc. en Ingeniería Ambiental, Ingeniero de Ambiental, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS), Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. Email: jarol.ramon@unipamplona.edu.co

3 MSc. en Ingeniería Ambiental, Ingeniero Civil, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación Etenoha, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. Email: diego.sanchez@unipamplona.edu.co

Conclusiones: La metodología integrada (UAV-SIG-Satélite) demostró ser una herramienta eficaz para el monitoreo morfológico multitemporal de cauces urbanos, permitiendo identificar zonas críticas de socavación que amenazan la estabilidad estructural del puente La Gazapa y aportando insumos técnicos para la gestión de riesgos y el diseño de obras de mitigación.

Palabras clave: Datos satelitales, fotogrametría con UAV, lecho de río, Modelo Digital de Elevación (MDE), morfología fluvial.

Abstract

Context: Rivers undergo constant morphological changes that can compromise the stability of hydraulic infrastructure such as bridges. Erosion, sedimentation, lateral channel migration, and riverbed material extraction activities can increase the vulnerability of nearby structures.

Objective: To assess the impact on the morphology of a section of the Pamplonita riverbed in the area of the “La Gazapa” bridge in Cúcuta, Colombia.

Methodology: Topographic changes in the riverbed between 2011 and 2024 were assessed through the integration of conventional topographic surveys, satellite data, and drone-based photogrammetry. For 2011, satellite data obtained from the Alaska Satellite Facility were processed together with topographic surveys to generate a Digital Elevation Model (DEM) integrated into a Geographic Information System (GIS). For 2024, a DEM was generated from drone imagery processed in Agisoft Metashape and incorporated into the GIS.

Results: The studied river section was found to have a longitudinal profile with slopes between $\pm 3\%$, as well as box-type cross sections. The topography analysis estimated an approximate cumulative loss of 547,000 m³ of bed material, equivalent to an average depth of 5 meters per square meter.

Conclusions: The topography was consistent despite differences in data sources, reflecting the influence of river dynamics and the bridge on the stability of the section, highlighting the need to implement mitigation and monitoring measures.

Keywords: Satellite data, drone photogrammetry, riverbed, Digital Elevation Model (DEM), fluvial morphology.

1. Introducción

Los ríos son sistemas dinámicos cuya morfología responde a la interacción continua entre procesos naturales y actividades antrópicas, los cuales inducen modificaciones progresivas en la configuración de sus cauces y llanuras de inundación [1], [2]. Estos cambios morfológicos alteran el régimen hidrodinámico y la capacidad de transporte de sedimentos, al tiempo que incrementan el nivel de riesgo para las obras de infraestructura crítica aledañas [1]– [3]. Los puentes, en particular, constituyen estructuras hidráulicas y viales fundamentales para la conectividad y el desarrollo socioeconómico de los entornos urbanos [4]; no obstante, su estabilidad estructural depende directamente de la evolución geomorfológica del lecho fluvial. Fenómenos como la erosión lateral y la socavación del lecho pueden degradar la capacidad de soporte de sus cimentaciones y estribos, generando vulnerabilidades que comprometen la seguridad funcional con severas repercusiones sociales y económicas en caso de colapso [5].

La socavación, entendida como el proceso erosivo originado por la interacción entre la dinámica del flujo y la presencia de estructuras sumergidas o encauzamientos [6], representa una de las principales

causas de fallo estructural en puentes. A este fenómeno natural se suman factores antrópicos no regulados, tales como la extracción desmedida de material de arrastre (gravas y arenas) del lecho, lo cual acelera la degradación del cauce, altera la pendiente longitudinal del río y desencadena impactos ecológicos negativos [1]. En este contexto, la evaluación del riesgo cimentada en la caracterización topográfica y morfológica de la dinámica fluvial resulta indispensable para anticipar procesos de inestabilidad y orientar la toma de decisiones e intervenciones oportunas [7], [8].

El avance de las tecnologías de teledetección y sensores remotos ha transformado substancialmente la caracterización y el monitoreo de los sistemas fluviales. Tanto las imágenes satelitales como los datos obtenidos mediante fotogrametría aérea se han consolidado como herramientas de alta precisión para el análisis geomorfológico. Estas técnicas permiten detectar con elevada resolución espacial y temporal las variaciones en el relieve, cuantificar pérdidas o ganancias volumétricas de sedimento y mapear patrones de migración lateral del cauce [9].

En particular, el empleo de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) ha optimizado los levantamientos de campo al ofrecer una alternativa eficiente, de alta densidad de datos y con costos operativos reducidos frente a los métodos topográficos convencionales [10]–[12]. La fotogrametría aérea basada en UAV aprovecha el procesamiento de fotogramas de alta resolución para generar Modelos Digitales de Elevación (MDE) e insumos tridimensionales, los cuales constituyen la base para evaluar cuantitativamente la evolución del relieve en cauces urbanos [13], [14].

En este trabajo se analizó la evolución morfológica del lecho del río Pamplonita, en el tramo correspondiente al puente La Gazapa (Cúcuta, Colombia), durante el periodo 2011-2024. El estudio se fundamentó en la generación y procesamiento multitemporal de MDE derivados de datos satelitales, levantamientos topográficos y fotogrametría con UAV, integrados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta investigación aporta insumos técnicos sobre la dinámica fluvial del tramo estudiado y evalúa el impacto de la pérdida de material de lecho en la estabilidad del lecho y de la infraestructura hidráulica asociada.

2. Localización

El área de estudio comprende el tramo del río Pamplonita contiguo al puente La Gazapa —denominado oficialmente puente Enrique Cuadros Corredor— (ver Figura 1), ubicado en el sector de Prados del Este (Comuna 4) de la ciudad de Cúcuta, departamento de Norte de Santander, Colombia. Esta estructura vial constituye un eje estratégico de conectividad entre el casco urbano de Cúcuta y el Anillo Vial Oriental, facilitando el tránsito de carga y pasajeros hacia los municipios del área metropolitana y la frontera colombo-venezolana. La construcción de la infraestructura concluyó en 2008 y su puesta en funcionamiento oficial tuvo lugar en julio de 2012. Por su parte, el río Pamplonita representa uno de los

afluentes principales de la cuenca del río Catatumbo, jugando un papel determinante en la dinámica ambiental regional, el abastecimiento hídrico municipal y el desarrollo de actividades productivas, entre las que destaca la extracción de material de arrastre [15].

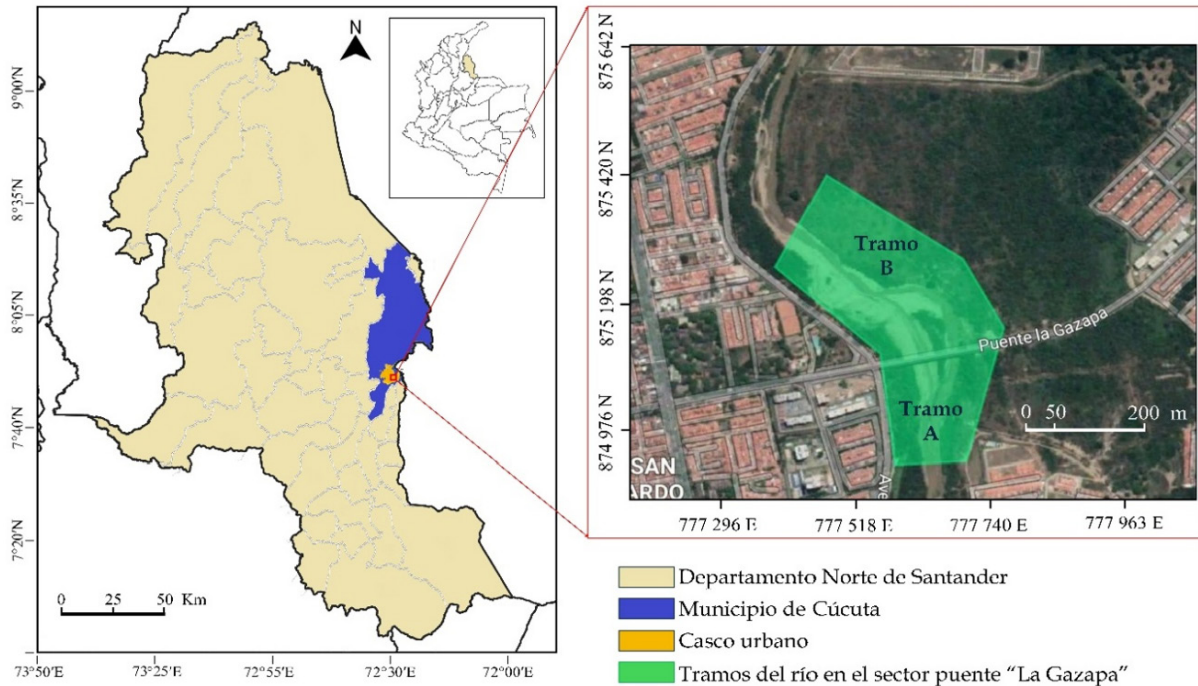


Figura 1. Ubicación de área de estudio.

Fuente: Autores.

3. Metodología

La presente investigación se enmarca en un diseño de tipo aplicado, de alcance explicativo y enfoque cuantitativo. Se estructuró como un estudio de caso sobre un tramo del río Pamplonita, en el sector del puente La Gazapa, orientado a analizar la evolución morfológica del lecho y evaluar las posibles causas asociadas a la pérdida de material de arrastre en el periodo 2011-2024. Para ello, se integraron datos satelitales y fotogrametría aérea basada en vehículos aéreos no tripulados (UAV).

El área de estudio se delimitó en dos subtramos de análisis: i) el tramo aguas arriba de la infraestructura (Tramo A) y ii) el tramo aguas abajo (Tramo B) (ver Figura 1). Esta zonificación se realizó con el propósito de aislar la superestructura del puente en el procesamiento de datos satelitales y fotogramétricos, evitando que la elevación de la obra civil interfiera en la reconstrucción continua de la superficie topográfica del terreno (*ground points*).

Para la caracterización topográfica correspondiente al año 2011, se emplearon datos satelitales procedentes del centro de datos de la *Alaska Satellite Facility* (ASF) de la Universidad de Alaska Fairbanks, comercializados a través del marco *Distributed Active Archive Center* (DAAC) de la NASA, especializado en sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) [16]. Se utilizaron productos RTC (*Radiometrically Terrain Corrected*) derivados del sensor ALOS PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite – Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), los cuales poseen una resolución espacial de 12,5 m. A partir de estas fuentes, se estructuró un Modelo Digital de Elevación (MDE) en el software QGIS (versión 3.8 Zanzíbar), el cual fue calibrado e integrado con levantamientos de topografía convencional *in situ*. Esta superficie combinada constituyó la línea base geométrica de comparación para el análisis multitemporal.

La caracterización del terreno para el año 2024 se fundamentó en un levantamiento fotogramétrico aéreo mediante un UAV DJI Phantom 4. El plan de vuelo se programó de manera autónoma, estableciendo un solape longitudinal y traslape transversal superiores al 70 %, garantizando los requerimientos de reconstrucción geométrica tridimensional [17]. La misión aérea tuvo una duración total de 47 minutos de vuelo, cubriendo la totalidad del dominio de estudio delimitado.

Las imágenes capturadas durante la misión fotogramétrica se procesaron mediante el software especializado *Agisoft Metashape* [18]. A partir de un conjunto de 394 fotogramas aéreos de alta resolución, se ejecutó la alineación, la densidad de nube de puntos y la posterior generación de la malla poligonal tridimensional. La validación posicional y el ajuste de reproyección espacial se sustentaron en Puntos de Control en Terreno (GCP, por sus siglas en inglés) levantados con topografía de alta precisión y georreferenciados en la zona de estudio. El Modelo Digital de Elevación (MDE) resultante se exportó en formato ráster (.tif) e importó en el software de código abierto QGIS (versión 3.8.0 Zanzíbar), bajo el sistema de referencia de coordenadas *World Geodetic System 1984* proyectado en la métrica *Pseudo-Mercator* (WGS 84 / EPSG:3857). Para la contextualización cartográfica del modelo y la comprobación de bordes del cauce, se emplearon capas base georreferenciadas de *Google Earth* y *Google Maps*.

El análisis geomorfológico multitemporal de los Tramos A y B se basó en el procesamiento diferencial de las superficies topográficas (MDE) correspondientes a los años 2011 y 2024. Para caracterizar la geometría del cauce, se trazó el eje del perfil longitudinal del río y se extrajeron secciones transversales a intervalos regulares de 10 m. Las pendientes y variaciones altimétricas de la línea de talweg se graficaron mediante la herramienta *Terrain Profile* de QGIS.

Finalmente, la estimación del balance volumétrico de sedimento se cuantificó en QGIS a través del algoritmo *Raster Surface Volume*, el cual calcula el volumen acumulado de una capa ráster con respecto a un plano datum de referencia. La herramienta se ejecutó para ambos periodos ajustando la cota umbral a las características locales de cada sector: para el Tramo A (aguas arriba) se fijó un plano base a 274,5 m s. n. m., mientras que para el Tramo B (aguas abajo) la cota de corte se estableció en 272,5 m s. n. m. Estos

niveles de referencia correspondieron a las curvas de nivel mínimas absolutas registradas en la batimetría/topografía fotogramétrica del lecho, garantizando una línea base homogénea para la comparación temporal.

4. Resultados

El perfil longitudinal y las secciones transversales del cauce en el sector de La Gazapa se ilustran en la Figura 2. En total se trazaron 53 secciones transversales: 13 ubicadas aguas arriba del puente (Tramo A) y 40 aguas abajo (Tramo B). En el Tramo A, los perfiles transversales abarcaron una extensión de 50 m a cada lado del eje longitudinal; por su parte, en el Tramo B, debido a la mayor anchura del cauce, la extensión de las secciones se amplió a 80 m hacia la margen izquierda y 100 m hacia la margen derecha, garantizando la cobertura geométrica de la llanura activa.

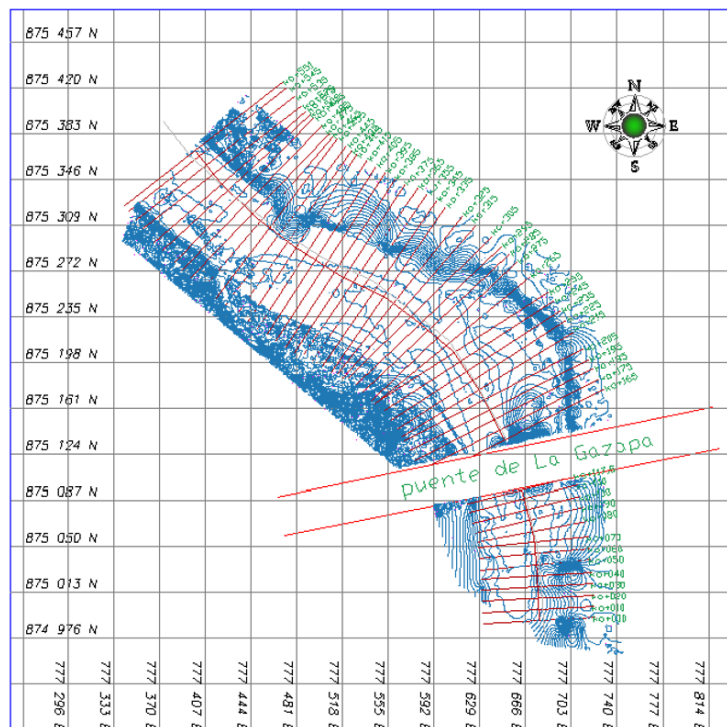


Figura 2. Vista en planta de la topografía del sector puente “La Gazapa”.

Fuente: Autores.

Los MDE procesados evidenciaron, en una primera aproximación visual, modificaciones morfológicas substanciales en el tramo de estudio durante el periodo evaluado, independientemente de las diferencias en la resolución de las técnicas de adquisición. En el MDE de 2011 prevalecieron tonalidades claras, asociadas a menores profundidades y cotas de lecho más elevadas. En contraste, en el MDE de 2024 se observó un predominio de tonalidades oscuras, lo que confirma un ahondamiento generalizado del cauce. Asimismo, se evidenció la diferencia en el nivel de detalle espacial según la fuente de datos: el

sensor satelital ofreció una caracterización del relieve regional a escala macro, mientras que la fotogrametría aérea con UAV aportó una alta resolución espacial centimétrica para el análisis local. En la Figura 3 se presenta la comparación entre el modelo ráster satelital (a) y el modelo fotogramétrico (b), ambos estructurados bajo un marco de normalización cartográfica homogéneo (sistema de referencia proyectado, escala gráfica, grilla de coordenadas, orientación al Norte y simbología altimétrica unificada), lo que asegura la comparabilidad espacial.

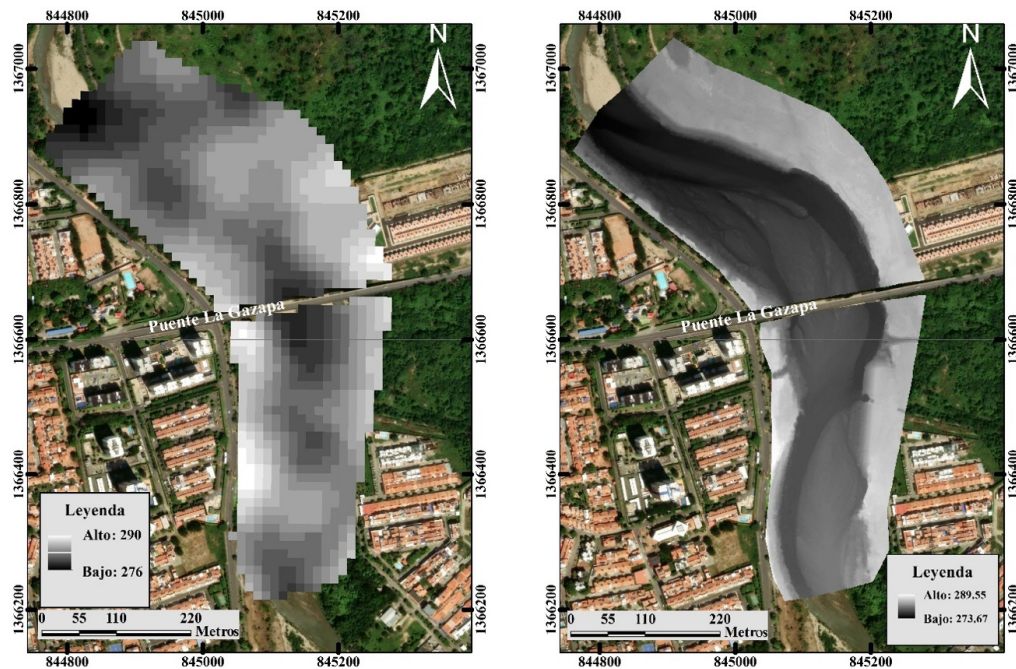


Figura 3. Ráster del modelo de elevación digital: a) datos satelitales y b) fotogrametría con dron.

Fuente: Autores.

El análisis diferencial de los MDE en el entorno SIG permitió evaluar las variaciones de la pendiente en el perfil longitudinal del cauce. En el Tramo A (aguas arriba), el perfil presentó oscilaciones acentuadas (entre el -20% y el +10%), lo que refleja un lecho con alta irregularidad topográfica caracterizado por alternancia de zonas de socavación profunda y barras de deposición. En contraste, el Tramo B (aguas abajo) exhibió fluctuaciones de pendiente más moderadas (entre el -6% y el +8%), con oscilaciones continuas de menor amplitud. Este comportamiento indica que el Tramo A está sujeto a procesos locales intensos de erosión y acumulación, mientras que en el Tramo B predomina una redistribución longitudinal del material de arrastre. El comportamiento aguas arriba de la estructura coincide con lo reportado por estudios previos, donde se documenta el retroceso de orillas por descalce y la amplificación de procesos erosivos asociados a la contracción del flujo causada por los apoyos del puente [17].

La Figura 4 muestra la variación porcentual de las pendientes a lo largo del perfil longitudinal. El eje horizontal representa la distancia acumulada sobre el eje del cauce (120 m para el Tramo A y 400 m para el Tramo B), mientras que el eje vertical expresa el porcentaje de pendiente (%), donde las cifras positivas representan pendientes ascendentes y las negativas, pendientes descendentes. La línea roja describe la variación puntual de la pendiente paso a paso; la línea verde representa la tendencia lineal general del tramo; y la línea negra actúa como plano de referencia o *datum* (cota base de 274,5 m s. n. m. para el Tramo A y 272,5 m s. n. m. para el Tramo B). Los valores situados por encima de este umbral indican sobreelevaciones del lecho, mientras que los valores inferiores representan zonas de incisión o pérdidas relativas de relieve.

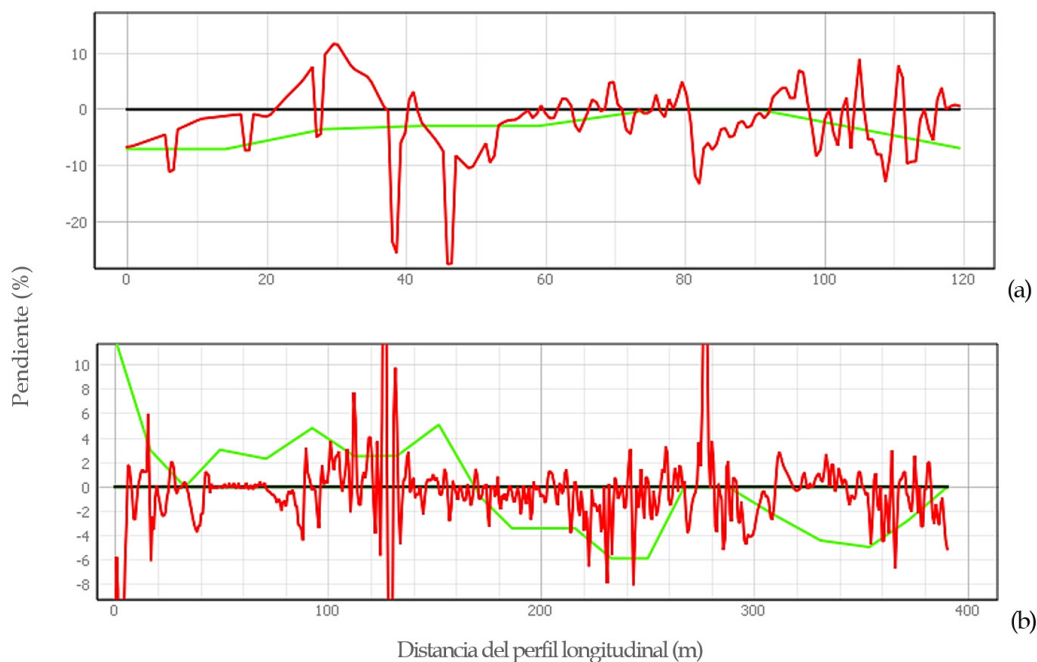


Figura 4. Variación del porcentaje de pendientes en el perfil longitudinal: a) tramo A y b) tramo B.

Fuente: Autores.

Para el análisis de las secciones transversales, se comparó la topografía del lecho del río obtenida mediante ambas técnicas para las 53 secciones trazadas. La Figura 5 ilustra las geometrías transversales representativas a lo largo del eje longitudinal. El eje horizontal representa la distancia sobre la transversal del cauce (ancho del río medido de margen a margen) y el eje vertical expresa la cota o elevación del terreno (m s. n. m.). Las líneas verde y roja corresponden a las superficies del terreno levantadas para los años 2011 y 2024, respectivamente.

La superposición de los perfiles en la Figura 5 muestra que, en la mayoría de las secciones, la superficie de 2024 (línea roja) se posiciona por debajo de la de 2011 (línea verde), lo que evidencia un proceso generalizado de incisión y profundización del lecho. En sectores puntuales se observa un comportamiento

inverso, correspondiente a la acumulación local de sedimentos. En conjunto, estos patrones sugieren una dinámica combinada de socavación y deposición, influenciada por la migración natural del cauce y por la alteración de las líneas de corriente generada por la infraestructura del puente [19]. Asimismo, los eventos climáticos extremos (particularmente los periodos de lluvias intensas asociados a la variabilidad hidrológica) han exacerbado la erosión en el sector, al punto de comprometer las obras de protección de la vía y provocar el colapso de muros de contención [20]-[22]. A estas presiones naturales se suman las intervenciones antrópicas asociadas a la extracción no regulada de materiales de arrastre para la construcción [23].

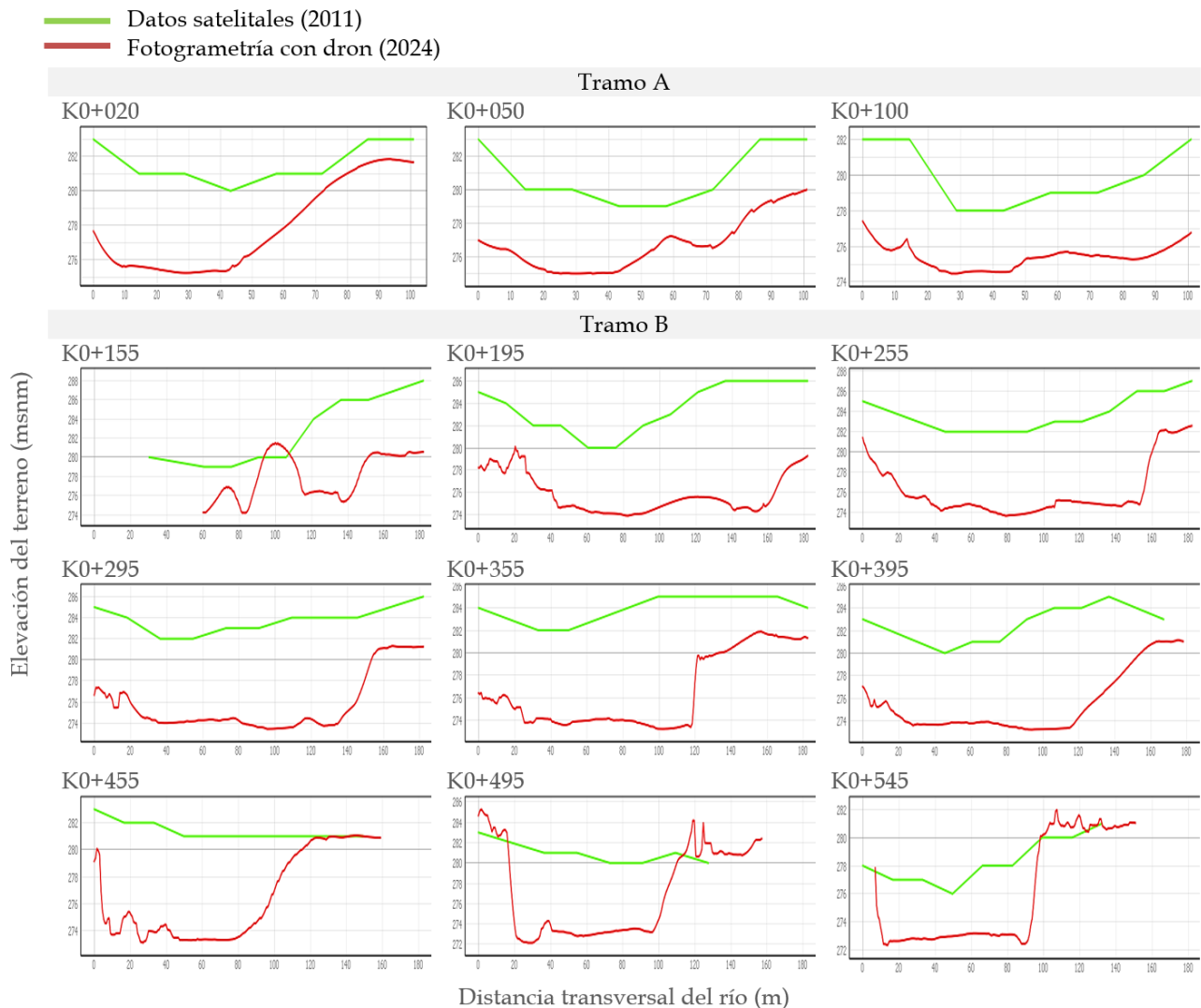


Figura 5. Comparación de las secciones transversales del cauce con base en datos satelitales (2011) y fotogrametría con dron (2024).

Fuente: Autores.

La pendiente longitudinal del tramo oscila predominantemente entre el -3% y el +3%, lo que refleja variaciones locales en la disipación de energía del flujo. Por su parte, la sección transversal exhibe una morfología predominantemente encajonada. De acuerdo con el sistema de clasificación de Rosgen [23], estas características permiten tipificar el tramo del río dentro de los patrones B, C y E, correspondientes a canales con pendientes moderadas a bajas, configuraciones de ancho-profundidad variables y dinámicas fluviales gobernadas por la sinuosidad y el transporte de sedimentos.

La cuantificación del balance de sedimento en el lecho para el periodo 2011-2024 se sintetiza en la Tabla 1. En el Tramo A (aguas arriba), el volumen disponible en el lecho se redujo de 137 350 m³ en 2011 a 66 959 m³ en 2024, lo que representa una pérdida neta de 70 391 m³ en un área inundable de 18 425 m². Por su parte, el Tramo B (aguas abajo) registró una contracción volumétrica de 857 217 m³ en 2011 a 380 449 m³ en 2024, equivalente a un déficit de 476 768 m³ en una extensión de 81 373 m². Si bien ambos sectores experimentaron una degradación severa, la magnitud de la erosión fue notablemente superior en el Tramo B, en concordancia con la mayor amplitud de su llanura de inundación y la concentración de líneas de flujo aguas abajo de la obra de arte.

Tabla 1. Estimación del volumen de lecho del río desplazado del 2011 y 2024 del sector puente “La Gazapa”.

Tramo	Área (m ²)	Volumen desplazado (m ³)	Área total (m ²)	Volumen total (m ³)
A	18.425	70.391	99.798	547.159
B	81.373	476.768		

Fuente: Autores.

De manera complementaria, la Figura 6 ilustra la variabilidad multitemporal de la huella del cauce en el sector del puente La Gazapa para el periodo 2011-2024, digitalizada a partir de imágenes satelitales de *Google Earth*. Las poligonales destacadas en color naranja delimitan las zonas con mayor migración lateral de la banda de flujo, las cuales coinciden con los sectores que registraron las mayores tasas de pérdida volumétrica de sedimento. Las líneas de contorno anuales evidencian un desplazamiento progresivo del eje del río, lo que confirma que la redistribución del material de arrastre no solo se manifiesta en la incisión del lecho, sino también en una marcada inestabilidad planimétrica caracterizada por la erosión marginal y el socavamiento de orillas.

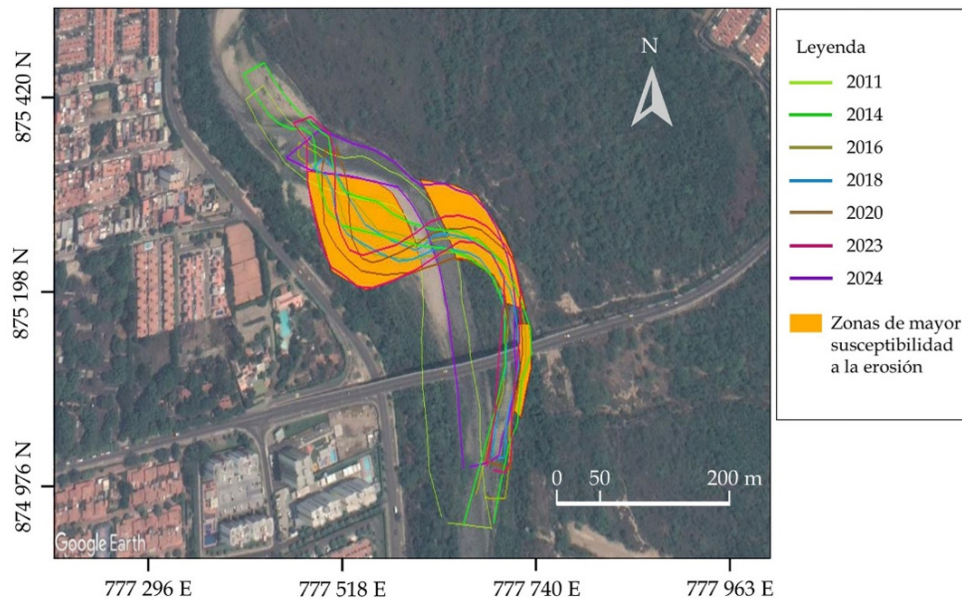


Figura 6. Variación del cauce del río en el sector “La Gazapa” (2011-2024) en Google Earth.

Fuente: Autores.

La pérdida significativa de material en el lecho y la persistencia de focos críticos de socavación acentúan la urgencia de evaluar el riesgo hidráulico e estructural del puente La Gazapa, así como de implementar medidas de mitigación que garanticen su estabilidad operativa. Como acciones prioritarias de intervención, se sugiere ejecutar labores de dragado selectivo, rectificación y encauzamiento del lecho [19]. Estas recomendaciones concuerdan con lo planteado en la literatura especializada, donde se subraya la necesidad de adoptar esquemas de mantenimiento preventivo y obras de protección en la cimentación de puentes para prevenir fallas estructurales o el colapso de apoyos [24], [25]. Finalmente, además de las variables hidrodinámicas e hidroclimáticas, las presiones antrópicas documentadas en el sector —como la extracción no controlada de agregados pétreos [26]— incrementan la vulnerabilidad del cauce y aceleran los procesos de erosión retrogresiva [6], [7]. En consecuencia, la gestión del riesgo en este tramo debe abordar de forma integral tanto la dinámica fluviomorfológica natural como los impactos derivados de la actividad humana.

5. Conclusiones

El análisis comparativo de los MDE correspondientes a los años 2011 y 2024 permitió cuantificar el impacto geomorfológico en el lecho del río Pamplonita, en el sector del puente La Gazapa. Los resultados confirman una alteración morfológica severa, caracterizada por una pérdida neta acumulada de aproximadamente 547 159 m³ de material de arrastre en el área de estudio. Este volumen equivale a un descenso medio del nivel del lecho cercano a 5,5 m, evidenciando la predominancia de procesos intensivos de incisión, erosión retrogresiva y socavación generalizada.

La evaluación espacial por subtramos reflejó respuestas hidrogeomorfológicas diferenciadas aguas arriba (Tramo A) y aguas abajo (Tramo B) de la infraestructura. La presencia de las cimentaciones del puente actúa como un elemento de severa perturbación del régimen hidráulico local, derivando en una magnificación de la erosión aguas abajo (Tramo B), donde se registró el 87,13 % del volumen total perdido. Estos hallazgos evidencian la urgencia de implementar obras de protección en los apoyos de la estructura y establecer un programa de monitoreo topo-batimétrico periódico para vigilar la evolución del cauce.

A pesar de la heterogeneidad en las fuentes de adquisición de datos —un MDE satelital para la línea base de 2011 y un levantamiento fotogramétrico por UAV para la superficie de 2024—, la integración multitemporal demostró una sólida coherencia espacial y geomorfológica. La metodología empleada permitió identificar con precisión patrones continuos de erosión, transporte y deposición de sedimentos a escala de detalle, validando el uso combinado de sensores remotos y fotogrametría aérea en estudios de dinámica fluvial.

En síntesis, la interacción entre la restricción hidráulica impuesta por el puente, la variabilidad hidrológica y las intervenciones antrópicas (como la extracción de áridos) constituye una amenaza crítica para la integridad estructural de la obra civil. Se concluye sobre la necesidad imperativa de incorporar herramientas geoespaciales de alta resolución en la evaluación continua del riesgo hidráulico, la ordenación de cuencas y la gestión preventiva de la infraestructura vial en la cuenca del río Pamplonita.

Referencias

- [1] M. K. Dhali, S. Ayaz, M. Sahana, and S. Guha, “Response of sediment flux, bridge scouring on river bed morphology and geomorphic resilience in middle-lower part of river Chel, Eastern Himalayan foothills zone, India,” *Ecol. Eng.*, vol. 142, p. 105632, Jan. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105632>
- [2] Y. Zhang, B. Chen, S. Wang, and X. Zhang, “Physical model research on the impact of bridge piers on river flow in parallel bridge construction projects,” *Appl. Sci. (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, p. 6581, Jun. 2025, <https://doi.org/10.3390/app15126581>.
- [3] T. Lazzarin, G. Constantinescu, and D. P. Viero, “Advanced hydrodynamic modelling of flow at a river bridge: Insights from 3D computational fluid dynamics,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2024, pp. 625–632, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.087>
- [4] M. Pregnotato, A. O. Winter, D. Mascarenas, A. D. Sen, P. Bates, and M. R. Motley, “Assessing flooding impact to riverine bridges: An integrated analysis,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 22, no. 5, pp. 1559–1576, May 2022, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1559-2022>
- [5] V. Hrissanthou, “Research on hydraulics and river dynamics,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, p. 3018, Oct. 2022 <https://doi.org/10.3390/w14193018>

- [6] A. Pizarro, S. Manfreda, and E. Tubaldi, “The science behind scour at bridge foundations: A review,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 2, p. 374, Feb. 2020 <https://doi.org/10.3390/w12020374>
- [7] A. M. Bento, A. Gomes, T. Viseu, L. Couto, and J. P. Pêgo, “Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations,” *Eng. Struct.*, vol. 223, p. 111115, Nov. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111115>
- [8] L. Buonora, B. Moccia, E. Ridolfi, F. Russo, and F. Napolitano, “Safety assessment of bridges: Analysis and criticalities of the guidelines for hydraulic risk management,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2024, pp. 647–652, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.090>
- [9] D. Backes, M. Smigaj, M. Schimka, V. Zahs, A. Grznárová, and M. Scaioni, “River morphology monitoring of a small-scale alpine riverbed using drone photogrammetry,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Aug. 2020, pp. 1017–1024 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1017-2020>
- [10] A. K. H. Dewedar, D. Palumbo, and M. Pepe, “Hydraulic risk assessment on historic masonry bridges using hydraulic open-source software and geomatics techniques: A case study of the ‘Hannibal Bridge’, Italy,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 16, no. 16, p. 2994, Aug. 2024 <https://doi.org/10.3390/rs16162994>
- [11] P. Paron, M. Mazzoleni, A. Reali, L. Brandimarte, T. Hackl, and B. Adey, “To drone or not to drone? Impact of UAV photogrammetry on the flood simulation process of bridges in mountain regions,” Madrid, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/109439>
- [12] J. Vorobioff, N. Boggio, M. Gutierrez, F. Checozzi, and C. Rinaldi, “Design of drones for monitoring of volcanic areas,” *Tecnura*, vol. 24, no. 66, pp. 27–35, Oct. 2020, <https://doi.org/10.14483/22487638.16800>
- [13] B. Arévalo Vera, E. Bayona Ibáñez, and I. K. Rincón Parada, “Metodología para documentación 3D utilizando fotogrametría digital,” *Revista Tecnura*, vol. 19, pp. 113–120, 2015, <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.SE1.a09>
- [14] J. O. Escalante Torrado, J. J. Cáceres Jiménez, and H. Porras Díaz, “Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV,” *Revista Tecnura*, vol. 20, no. 50, pp. 119–140, 2016 <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09>
- [15] CORPONOR, “Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Pamplonita,” 2010. [Online]. Available: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/handle/20.500.11762/22602>
- [16] University of Alaska Fairbanks, “Alaska Satellite Facility,” NASA Distributed Active Archive Center (DAAC) for Synthetic Aperture Radar (SAR). [Online]. Available: <https://asf.alaska.edu>
- [17] T. Gracchi, G. Rossi, C. T. Stefanelli, L. Tanteri, R. Pozzani, and S. Moretti, “Tracking the evolution of riverbed morphology on the basis of UAV photogrammetry,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–16, Feb. 2021 <https://doi.org/10.3390/rs13040829>
- [18] Agisoft, “Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.8,” 2022. [Online]. Available: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf
- [19] CORPONOR, Resolución 137 de 2018. Colombia, 2018, p. 14. [Online]. Available: https://www.corponor.gov.co/ACTOSJURIDICOS/RESOLUCIONES/2018/RESOLUCION_137_18.pdf
- [20] N. Mojica, “El puente La Gazapa en Cúcuta está a pocos metros de la tragedia,” *La Opinión*, Cúcuta, May 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.laopinion.co/cucuta/el-puente-la-gazapa-en-cucuta-esta-pocos-metros-de-la-tragedia>

-
- [21] N. Mojica, “Una problemática silenciosa ronda en el puente La Gazapa de Cúcuta,” *La Opinión*, Cúcuta, Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.laopinion.co/cucuta/una-problematika-silenciosa-ronda-en-el-puente-la-gazapa-de-cucutagbv>
- [22] M. J. Salcedo, “Por riesgo de colapso admiten acción popular sobre puente de La Gazapa,” *La Opinión*, Cúcuta, Apr. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.laopinion.co/cucuta/por-riesgo-de-colapso-admiten-accion-popular-sobre-puente-de-la-gazapa>
- [23] D. L. Rosgen, “Catena A classification of natural rivers,” *Catena (Amst)*, vol. 22, pp. 169–199, 1994 [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)
- [24] J. S. Tan, K. Elbaz, Z. F. Wang, J. S. Shen, and J. Chen, “Lessons learnt from bridge collapse: A view of sustainable management,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, Feb. 2020, <https://doi.org/10.3390/su12031205>
- [25] S. A. Derseh and T. A. Mohammed, “Bridge structures under progressive collapse: A comprehensive state-of-the-art review,” Jun. 01, 2023, Elsevier B.V., doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101090>
- [26] areacucuta.com, “Capturadas siete personas por extracción ilegal de material aluvión del río Pamplonita,” *areacucuta.com El portal de Cúcuta*, Cúcuta, Oct. 2014. [Online]. Available: <https://www.areacucuta.com/capturadas-siete-personas-por-extraccion-ilegal-de-material-aluvion-del-rio-pamplonita/>

