

## Condiciones geomorfológicas y geotécnicas que determinan susceptibilidad ante socavación y migración de meandros en el río Unete afectando la infraestructura vial

### *Geomorphological and geotechnical conditions that determine susceptibility to bank erosion and meander migration in the Unete River channel affecting the road infrastructure*

Alejandro Franco Rojas,\* Luis Efrén Ayala Rojas,\*\* Edgar Alexander Padilla Gonzalez,\*\*  
Sara Tatiana Fajardo Ortiz<sup>+</sup> y Juan Camilo Aguirre Alonso<sup>++</sup>

Recibido: 17/6/2024. Aceptado: 8/10/2024. Publicado: 15/11/2024.

**Resumen.** Todo cauce natural está expuesto a socavación o erosión fluvial, producto de la interacción con el agua, ocasionando cambios morfológicos y desplazamientos del lecho que pueden impactar infraestructuras y población cercana. En este caso, el río Unete ubicado en el departamento de Casanare en Colombia, es un río meándrico con alta dinámica fluvial, cuyo desplazamiento lateral amenaza el único corredor vial que conecta los municipios Aguazul y Maní, situación que impactaría negativamente el transporte, abastecimiento y economía de estos dos municipios.

Para evaluar la susceptibilidad de la vía Aguazul-Maní se realizó un análisis geomorfológico multitemporal, superponiendo imágenes satelitales y fotografías aéreas en un periodo de 27 años, que permitió identificar sectores críticos por proximidad entre el río y la vía, y por tasa de desplazamiento del cauce. Una vez conocidos los puntos

críticos, se tomaron muestras representativas del suelo, mediante ensayos de laboratorio se caracterizó el material y se cuantificó la fuerza tractiva admisible, arrojando mayor susceptibilidad en las geoformas asociadas a terrazas recientes compuestas por arenas limosas, seguidas de terrazas altas con arcillas de alta y baja plasticidad. No obstante, la afectación más importante en la vía, se prevé en sectores con suelos cohesivos, debido a la presencia de curvas más pronunciadas y con mayor desplazamiento, de tal manera, que la susceptibilidad ante la socavación es resultado del tipo de suelo, geometría del cauce y morfología, siendo necesario combinar análisis espacial, trabajo de campo y laboratorio para su determinación.

**Palabras clave:** geomorfología, erosión fluvial, teledetección, análisis multitemporal, migración de ribera.

\* Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá. Av. Calle 26 # 92-32, Bogotá, Colombia. Orcid: 0000-0003-3760-3510 Email: [alejandro.franco@gestiondelriesgo.gov.co](mailto:alejandro.franco@gestiondelriesgo.gov.co). Autor de correspondencia.

\*\* Universidad de La Salle, Bogotá. Carrera 2 # 10-70, Bogotá, Colombia. Orcid: 0000-0001-6758-8206. Email: [layalar@unisalle.edu.co](mailto:layalar@unisalle.edu.co)

\*\*\* Universidad de La Salle, Bogotá. Carrera 2 # 10-70, Bogotá, Colombia. Orcid: 0000-0002-4263-6416. Email: [edpadilla@unisalle.edu.co](mailto:edpadilla@unisalle.edu.co)

<sup>+</sup> Universidad de La Salle, Bogotá. Carrera 2 # 10-70, Bogotá, Colombia. Orcid: 0009-0001-5612-4884. Email: [Sfajardo94@unisalle.edu.co](mailto:Sfajardo94@unisalle.edu.co)

<sup>++</sup> Universidad de La Salle, Bogotá. Carrera 2 # 10-70, Bogotá, Colombia. Orcid: 0009-0003-3924-2576. Email: [jaguirre20@unisalle.edu.co](mailto:jaguirre20@unisalle.edu.co)

**Abstract.** Fluvial erosion is a dynamic and natural process that occurs in riverbeds due to the constant interaction of moving water with the bed and banks of these streams, a phenomenon that can cause significant morphological changes. River erosion can have considerable impacts on infrastructure and nearby communities, generating risks such as the collapse of bridges, the destruction of roads and the threat of flooding, as is the case of the road that connects the municipalities of Aguazul and Maní, in the department of Casanare, Colombia. The Únete river, which crosses this region, has a meandering behavior and high fluvial dynamics, increasing the possibility of scour and lateral displacement of the riverbed.

The main objective of this study was to evaluate the susceptibility of the Aguazul-Maní road to the effects of scour of the Únete river, analyzing how fluvial dynamics influence the critical points along the road and determining the associated risks.

The analysis began with a multi-temporal geomorphological assessment, which consisted of superimposing satellite images and aerial photographs obtained over a period of 27 years. The images were downloaded from the Earth Explorer platform, using Landsat 8 satellite data. This tool made it possible to identify changes in the geomorphology of the river and their influence on the road over time. Special attention was paid to the areas closest to the riverbed and those where the greatest displacements of the riverbed were recorded.

The results made it possible to identify several critical points along the road, which were the subject of a more detailed study. A field visit was made to verify the geomorphological characteristics and contrast them with the data obtained from the theoretical analysis. Four piles were taken at the critical points identified in order to extract representative soil samples from the left bank of the river, which is the most vulnerable area due to its proximity to the road.

The soil samples were subjected to laboratory tests to evaluate their physical properties and susceptibility to erosion. The results indicated that the soil in the critical areas of the Únete River is mainly classified into two types: cohesive soils (such as clays) and non-cohesive soils (such

as silty sands). Soil cohesion is a key factor in determining scour resistance, as non-cohesive soils are more susceptible to being washed away by water flow.

Recent terraces, composed of silty sands, were found to be more susceptible to scour. On the other hand, higher terraces, with clayey soils of high and low plasticity, showed greater resistance, but were not immune to erosion. However, the sectors at greatest risk were located in areas with cohesive soils on the river banks, especially in areas with sharp bends, where the lateral displacement of the riverbed is more evident.

The analysis of fluvial dynamics revealed that the critical points of the river experience greater lateral displacement in the bends, where the velocity of the water flow is greater on the outside of the bends. The most affected sectors of the road correspond to those areas where the river has sharp bends, which accelerate scour and put the stability of adjacent land at risk, including that which supports the road.

The high fluvial dynamics in these bends contribute to an increase in the carrying capacity of solids and the depth of erosion. In these areas, erosion is particularly dangerous, as the riverbed can move rapidly and affect the road infrastructure. As a result, the road is at risk, especially at the El Viso bend, where the river shows active scour just 50 meters from the road.

The results indicate that the combination of non-cohesive soils, the geometry of the riverbed and the high water velocity in the bends increase the susceptibility to erosion at these critical points. It is essential to implement protective measures, such as stabilization of the river banks and construction of defense structures, to mitigate scour risks and protect both road infrastructure and nearby communities.

This study demonstrates the importance of combining geomorphological analysis, field studies and laboratory tests for a comprehensive assessment of fluvial risks, and highlights the need to take preventive measures in areas vulnerable to fluvial erosion.

**Keywords:** geomorphology, fluvial erosion, remote sensing, multitemporal analysis, bank migration.

## INTRODUCCIÓN

Los ríos sostienen una condición de equilibrio morfológico resultado de la interacción entre el caudal líquido, la carga sólida, el tamaño de los sedimentos y la pendiente del cauce, dando lugar a un alineamiento en planta y perfil que se mantienen en el tiempo, aunque de manera local existan procesos de erosión o socavación (Rodríguez, 2010). Sin embargo, los cambios en la morfología fluvial pueden ocurrir de forma natural o estar asociados a actividades antrópicas como la minería (Ghoshal, 2010), la construcción de presas (Yang, 2015), los trasvases de cuenca (Dragičević, 2017),

el cambio en la cobertura vegetal (Kunal, 2021) y la construcción de obras de confinamiento lateral (Yang, 2015), modificando con ello el aporte de sedimentos y el equilibrio del sistema fluvial. Entre las causas naturales cabe mencionar los cambios estacionales (Payne *et al.*, 2018) y la fuerte variación entre caudales máximos y mínimos, con inundaciones repentinas de corta duración, tal como ocurre en el río Kolubara en Serbia (Dragičević, 2017) y el río Mahananda en India (Kunal, 2021), donde la torrencialidad de la cuenca constituye la principal fuerza de modelamiento del cauce.

Los principales cambios en la morfología de los ríos incluyen la agradación del lecho, lo que provo-

ca la aparición de barras de sedimento y patrones de cauces trenzados, asociados a la sobrealimentación de sedimentos (Ibitoye, 2021). También se observa la erosión del lecho y de los taludes laterales, lo que conduce a la progresiva desaparición de las barras de sedimento y a la consolidación de un único canal más recto, lo que en ocasiones puede resultar en la incisión del lecho a escala regional (Yang, 2015; Ghoshal, 2010). Además, los procesos de avulsión del lecho son significativos, particularmente el corte de meandros sobre planicies aluviales y la migración lateral, que ocurre principalmente en terrazas y cauces sinuosos (Dragičević, 2017). Algunos ríos, como el Yuba en California, experimentan cambios en el cauce tan drásticos que pueden considerarse un metamorfismo en la llanura aluvial, observándose transiciones de un patrón trenzado a un único canal confinado por terrazas (Ghoshal, 2010).

Esta dinámica, propia de los cauces naturales en su intento por alcanzar una nueva condición de equilibrio (Kunal, 2021), suele afectar diversas actividades productivas, como la agricultura (Ibitoye, 2021; Dragičević, 2017; Payne *et al.*, 2018), así como obras de infraestructura, incluyendo puentes, carreteras y zonas urbanas (Kunal, 2021). También impacta la navegabilidad (Payne *et al.*, 2018) y la biodiversidad, además de la conectividad entre ecosistemas ribereños (Ghoshal, 2010). Asimismo, puede intensificar los escenarios de amenaza por inundaciones (Dragičević, 2017; Ghoshal, 2010) e incluso condicionar las estrategias de localización de comunidades ribereñas, como se observa en el río Juruá (Nagel, 2022).

Para contener la migración del cauce o mitigar los efectos de su dinámica fluvial suelen implementarse obras de ingeniería como presas para la retención de sedimentos, espolones que redireccionen el flujo hacia la parte central del canal, así como diques y muros de contención que confinan el cauce y restringen su desplazamiento lateral (Ghoshal, 2010). Por otro lado, se impulsa el uso de soluciones basadas en la naturaleza y obras de bioingeniería tendientes a estabilizar las riberas con ayuda de la vegetación, a controlar la erosión y el aporte de sedimentos desde las zonas de ladera e incluso a demoler obras hidráulicas para restablecer el territorio fluvial original (Gurnell *et al.*, 2014).

Existen diversas técnicas para caracterizar los cambios en la morfología fluvial, entre las que se incluyen mediciones directas en campo, modelación física, teledetección y modelos numéricos. Según Nagel (2022), modelar la dinámica fluvial requiere datos topográficos precisos, caudales, estudios de suelos y cobertura vegetal, lo que limita su uso. En contraste, la combinación de series históricas de imágenes obtenidas mediante sensores remotos permite estudiar la dinámica de las llanuras aluviales con alta precisión, facilitando la diferenciación de dos técnicas relevantes. La digitalización manual de los bancos ribereños y geoformas a partir de imágenes de sensores remotos, técnica que se emplea principalmente en cauces relativamente pequeños, en los cuales la resolución espacial o el tamaño del píxel impide la automatización del proceso (Menting, 2019; Dragičević, 2017; Ghoshal, 2010). Esta técnica se complementa con la medición del desplazamiento lateral a lo largo de líneas perpendiculares al cauce (Ibitoye, 2021; Kunal, 2021). En el caso de grandes ríos, la distancia entre las riberas permite una clara identificación del espejo de agua y los bancos, lo que facilita la automatización del proceso de delimitación de geoformas, permitiendo analizar grandes distancias. Un ejemplo de esto es el río Juruá, donde se desarrolló un algoritmo para detectar cambios en la superficie de agua, lo que permitió abarcar una extensión de 3,000 km con una resolución espacial de 30 m por píxel (Nagel, 2022). Otros casos similares incluyen el río Jingjiang (Yang, 2015) y el río Colville en Alaska (Payne *et al.*, 2018), donde el uso de imágenes de alta resolución permitió mapear tasas de erosión a escala regional mediante métodos automatizados.

La tasa de desplazamiento lateral permite distinguir entre cauces lateralmente inmóviles y cauces activos (Van den Berg, 1995). Pueden contrastarse casos como el río Drentsche Aa, en Países Bajos con una tasa máxima de migración lateral de 0.33 m/año (Menting, 2019) respecto a ríos como Jingjiang, en China (Yang, 2015) y el Níger, en África Occidental (Ibitoye, 2021), con tasas de migración de hasta 31.05 m/año y 89.90 m/año, respectivamente. En consecuencia, clasificar un río como estable o como lateralmente inmóvil, no significa la ausencia de procesos de erosión y

deposición, sino que las tasas de migración lateral son poco significativas.

La tasa de desplazamiento lateral del cauce afecta principalmente a la llanura aluvial y depósitos recientes poco consolidados, por cuanto ofrecen menor resistencia al esfuerzo cortante y las fuerzas abrasivas del flujo, ocasionando el colapso del soporte basal y el transporte de sedimentos (Kunal, 2021). La velocidad e intensidad de dicho desplazamiento está condicionada por varios aspectos, entre los cuales cabe resaltar la pendiente y sinuosidad del canal, la composición del material del banco (cohesividad y granulometría), el alineamiento horizontal del cauce, la altura y composición del talud (Payne *et al.*, 2018), las características del flujo (variabilidad en el nivel del agua y régimen de caudal) y la presencia de vegetación ribereña (Ibitoye, 2021) (Kunal, 2021) e incluso la presencia de fallas tectónicas (Dragičević, 2017). Otros autores recomiendan detallar aspectos hidrológicos como el caudal formativo, la frecuencia de caudales máximos y la carga de sedimentos, así como la cohesión de las riberas y su contenido de materia orgánica, prestando especial atención a la heterogeneidad de la llanura aluvial (Menting, 2019), y en caso de disponer de batimetrías históricas, que pueden aportar datos reveladores (Ghoshal, 2010).

El caudal formativo cobra especial importancia, por cuanto es considerado como aquel que da forma a la sección transversal, es decir, el caudal que por su magnitud y frecuencia hace que la geometría del cauce, en planta y sección transversal, permanezca aún ante posibles desbordamientos (Rodríguez, 2010). Para cuantificar dicho caudal existen distintas aproximaciones, entre las cuales cabe resaltar el flujo a sección llena para cauces que discurren sobre planicies aluviales y sistemas de terrazas, así como el caudal que se presenta en promedio dos veces al año o que tiene un período de retorno de 1.5 años, criterio especialmente útil en ríos cuyo confinamiento impide el desbordamiento.

Determinar la tasa de desplazamiento lateral del cauce apoyado en análisis multitemporal y su correlación con parámetros físicos del suelo permite identificar puntos críticos, al igual que priorizar las acciones preventivas y predictivas tendientes

a proteger la población, actividades productivas y obras de infraestructura expuestas (Ibitoye, 2021).

Payne *et al.* (2018) propone complementar el análisis de las tasas de desplazamiento lateral (m/año) con las tasas de área de erosión (m<sup>2</sup>/año), con el fin de evaluar la erosión a nivel regional. Sin embargo, el objetivo de este estudio es analizar el riesgo de afectación sobre la carretera Aguazul-Maní debido al desplazamiento lateral del río Unete, en cuyo caso la tasa de migración resulta ser el parámetro más pertinente. Considerando el ancho relativamente pequeño del cauce, así como la conformación de un valle aluvial con vegetación ribereña que ocupa la planicie inundable y las barras de sedimento, se considera más adecuada la delimitación manual de las orillas, técnica que, además, es reconocida como la más precisa y apropiada para sitios puntuales (Payne *et al.*, 2018).

La socavación o incisión consiste en la profundización del fondo del cauce de una corriente, causada por un aumento del caudal, un incremento en la pendiente del cauce, un déficit de sedimentos en el flujo o por la disminución de la rugosidad del cauce, generalmente asociada a obras de regulación del canal (Suárez, 2001). Sin embargo, diferentes materiales se socavan en proporciones distintas: los suelos granulares sueltos se erosionan rápidamente, mientras que los suelos arcillosos son más resistentes a la erosión. Aunque la socavación de los suelos cohesivos puede alcanzar profundidades similares a las de los suelos arenosos, el tiempo requerido para que ocurra varía significativamente. Esta interacción entre el agua y los suelos de distinta resistencia o erodabilidad confiere a los ríos una dinámica particular.

Un criterio utilizado para calcular la fuerza que el agua en movimiento ejerce sobre las partículas del suelo es la **fuerza tractiva**, que se define como la fuerza de corte ejercida por el flujo sobre las partículas del cauce en un punto determinado. En consecuencia, la resistencia a la fuerza tractiva hace referencia a la capacidad del suelo para resistir la acción erosiva del agua. Para determinarla, es necesario diferenciar entre suelos granulares o no cohesivos y suelos cohesivos, estos últimos definidos como aquellos que contienen más del 10% de partículas de arcilla (Suárez, 2001). En

suelos cohesivos, la resistencia a la fuerza tractiva ( $\tau_c$ ) se determina mediante la ecuación propuesta por Smierd y Beisli, que depende del índice de plasticidad (IP):

$$\tau_c = 0,0034 * IP^{0,84}$$

En el caso de los suelos no cohesivos, se deben involucrar variables como peso específico, coeficiente de forma y granulometría del material, como se muestra en el Cuadro 1.

## EL ÁREA DE ESTUDIO

La aproximación desde la geomorfología aborda la forma del relieve, enfatizando el origen geológico de cada material y el comportamiento de las geoformas, lo que permite comprender las variaciones en sus propiedades como resultado de la interacción con las condiciones climáticas, topográficas, los cursos de agua, la escorrentía y la vegetación. Por su parte, la dinámica fluvial se centra en la historia, edad, estabilidad, grados de libertad, y resistencia del material que conforma el lecho y las bancas del río, así como en los procesos de transporte de sedimentos e incisión del cauce. En este sentido, es pertinente contar con una ventana de análisis mínima de 30 años (Vargas, 2012). En conjunto, la geomorfología y la dinámica fluvial permiten evaluar la estabilidad de un cauce, entendida como

la conservación en el tiempo de su tamaño, forma o posición. No obstante, los ríos de lecho aluvial son altamente dinámicos e inestables, por lo que es frecuente que experimenten cambios debido a la erosión lateral de las orillas y variaciones en la elevación del lecho.

El río Unete desciende por la cordillera oriental, hace parte de la cuenca del río Cusiana, atravesando el municipio de Aguazul en sentido noroccidento-oriental. Su cuenca hidrográfica posee una superficie de 943.3 km<sup>2</sup>, distribuidos entre los municipios de Aguazul y Maní, alcanza a recorrer 156 km antes de entregar sus aguas al río Cusiana en la cuenca del Orinoco como se observa en la Figura 1. En su recorrido es posible diferenciar una cuenca alta y media con alta torrencialidad y carga sólida, así como una cuenca baja con pendiente significativamente menor, con alineamiento meándrico, que discurre en medio de un sistema de terrazas de origen aluvial.

Aunque la dinámica fluvial es natural en todo río, se manifiesta en la variedad de geoformas y paisajes, que en conjunto con el régimen hidrológico aportan a la biodiversidad y la sostenibilidad del ecosistema, tal como se observa en la zona riparia y la planicie de inundación del río Unete. No obstante, la proximidad entre la vía Aguazul-Maní y el río Unete constituye un riesgo para la infraestructura vial asociado al desplazamiento lateral del cauce, especialmente en la vereda El Viso, pues sobre la margen izquierda del río se observa un

Cuadro 1. Expresiones para el cálculo de resistencia a la fuerza tractiva.

Autor	Ecuación	Variables
Schoklitsch	$\tau_c = 0,000285 * (\gamma_s - \gamma_w) * d^{1/3}$	gs: peso unitario del suelo en kg/m <sup>3</sup> gw: peso unitario del agua en kg/m <sup>3</sup> d: diámetro medio en m
Shields	$\tau_c = 0,06 * \gamma_s * d$	gs: peso unitario del suelo en kg/m <sup>3</sup> d: diámetro medio en m
Miller y otros autores	$\tau_c = 0,045 * (\gamma_s - \gamma_w) * d$	gs: peso unitario del suelo en kg/m <sup>3</sup> gw: peso unitario del agua en kg/m <sup>3</sup> d: diámetro medio en m
Meyer-Peter	$\tau_c = 0,047 * (\gamma_s - \gamma_w) * d$	gs: peso unitario del suelo en kg/m <sup>3</sup> gw: peso unitario del agua en kg/m <sup>3</sup> d: diámetro medio en m

Fuente: control de erosión en zonas tropicales (Suarez, 2001).

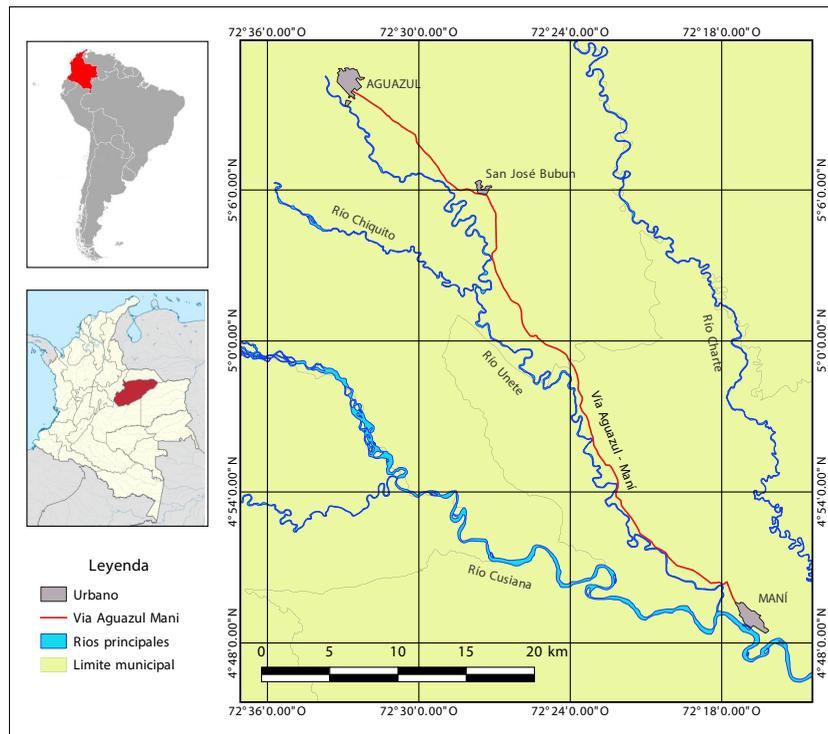


Figura 1. Identificación del río Unete entre la confluencia con el río Chiquito y el río Cusiana, con alineamiento paralelo a la vía Aguazul-Maní.

proceso activo de erosión fluvial aproximadamente a 50 metros de la carretera. En este escenario, determinar la susceptibilidad tanto de la vía como de los suelos próximos al cauce, constituye una labor compleja que involucra caracterizar el tipo de suelo, la geometría del cauce y su morfología, siendo necesario combinar análisis espacial, trabajo de campo y ensayos de laboratorio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La dinámica fluvial y la intensidad del desplazamiento lateral del río Unete se determinaron mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales y fotografías aéreas proporcionadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, correspondientes a los años 1992, 2004 y 2019. Sobre estas imágenes, se identificaron las geoformas existentes y se realizaron comparaciones para detectar los cambios geomorfológicos como se muestra en la Figura 2, con el fin de establecer los puntos críticos. Utilizando el software ArcGIS, se trazaron los

límites de cada geoforma y de la vía Aguazul-Maní, que se utilizó como estructura de referencia.

Según la proximidad del cauce respecto a la vía, se establecieron siete secciones de control que fueron numerados en sentido del flujo como se muestra en la Figura 3, los cuales son perpendiculares al cauce del río, con el objetivo de cuantificar el desplazamiento lateral de los meandros. En cada sección se cuantificó la tasa de desplazamiento, la distancia que separa actualmente al río de la vía y la proyección en años estimados para que la erosión fluvial alcance a la vía, determinando con ello las tasas de migración y las geoformas asociadas a cada sector.

Una vez identificados los sitios críticos, sobre las terrazas y taludes se realizó la toma de muestras de suelo por medio de apiques, con el propósito de realizar análisis de laboratorio y establecer la resistencia del suelo a la erosión fluvial. Los ensayos realizados fueron: humedad natural, peso unitario, granulometría, gravedad específica, límite plástico, límite líquido e índice de plasticidad como se observa en la Figura 4.

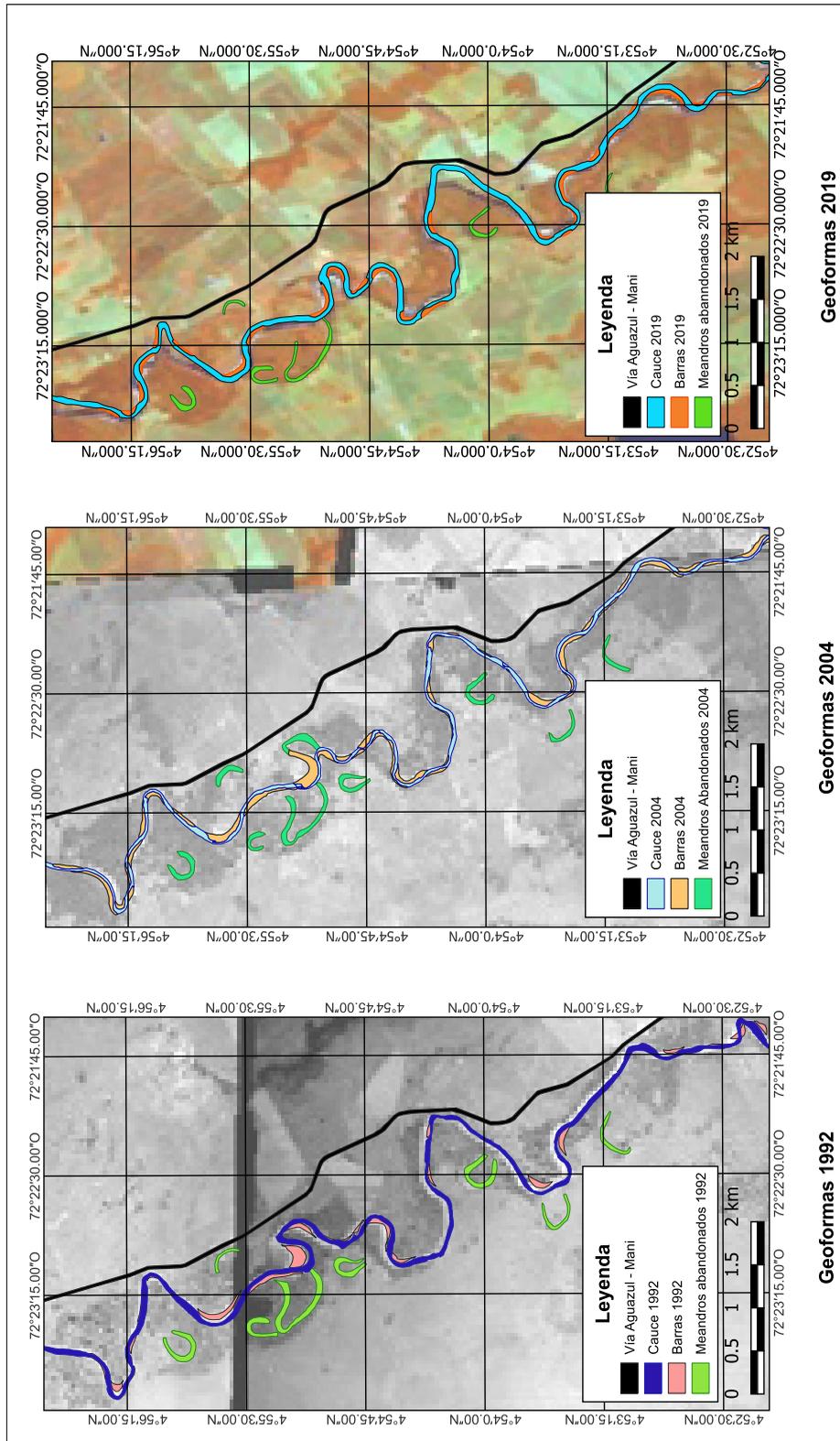


Figura 2. Trazado de geoformas: A) 1992, B) 2004, C) 2019. Fuente: Aguirre y Fajardo (2020).

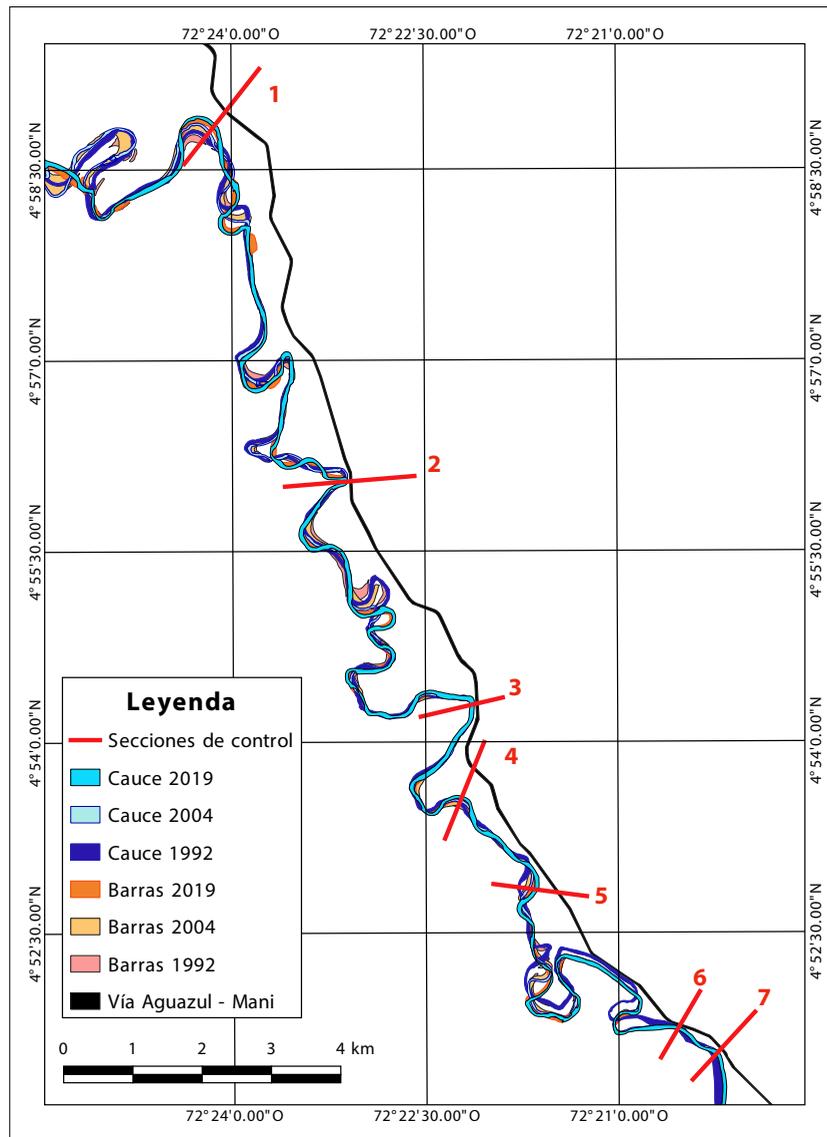


Figura 3. Identificación de secciones de control para desplazamiento lateral. Fuente: Aguirre y Fajardo (2020).

De igual forma, en el lecho y barras de sedimento ubicadas dentro del cauce, se tomaron muestras de material aluvial para su caracterización, en función de la granulometría, gravedad específica y proporción de gravas, arenas y finos.

Los ensayos de laboratorio se realizaron siguiendo las normas de ensayo de materiales para carreteras I.N.V. E-122-13 (Normas de Ensayo para materiales de carreteras-Instituto Nacional de Vías) para determinación en laboratorio del contenido de agua (Humedad) del suelo, I.N.V. E-123-13 para determinación de tamaños de partículas de

los suelos, I.N.V. E-128-13 para determinar la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del material llenante mineral mediante picnómetro, I.N.V. E-125-13 e I.N.V. E-126-13 para determinación del límite líquido de los suelos y límite plástico e índice de plasticidad.

Para la caracterización del cauce y sus procesos morfológicos, es importante calcular la sinuosidad, resultado del cociente entre la longitud curva y longitud recta del tramo de estudio, esto permite identificar la naturaleza morfológica del río, el tipo de carga sólida predominante y la estabilidad



Figura 4. Análisis de laboratorio a muestras de suelo de puntos críticos. Nota: adaptado de Aguirre y Fajardo (2020).

relativa del cauce. También es necesario determinar el caudal formativo, en cuyo caso se utilizaron dos criterios: el flujo a banca llena sin desbordamiento y caudales máximos según período de retorno, siendo preciso utilizar series de caudales con resolución diaria de la estación limnigráfica Los Esteros (35197030), aforo líquido y levantamiento de sección transversal y pendiente del cauce con equipos de topografía.

Complementariamente, es preciso analizar los resultados a la luz de estudios previos y de herramientas conceptuales como son: la clasificación de resistencia relativa a la erosión propuesta por (Vargas, 2012), la clasificación morfológica de cauces naturales propuesta por (Schumm, 1985) y la analogía de la balanza de Lane. Como parámetro de comparación se dispone de los resultados de investigaciones sobre migración lateral y resistencia a la erosión en los ríos Cravo Sur (Sandoval y Cruz, 2019) y Guaviare (Ramírez y Pardo, 2018), ambos ríos localizados en la región de la Orinoquía Colombiana y caracterizados por la presencia de terrazas y depósitos no consolidados, condiciones geomorfológicas similares con las observadas en el río Unete (Figura 5). De igual forma, se realiza la comparación con los resultados reportados para ríos meándricos por Brice (1983).

## RESULTADOS

La sinuosidad del río Unete entre 1992 y 2019 en el tramo de análisis fluctúa entre 1.85 y 1.92 como se muestra en el Cuadro 2, lo cual permite clasificarlo como un río meándrico, caracterizados por el predominio de un flujo tridimensionalidad helicoidal en cada curva, con tendencia a la erosión en la margen exterior y tendencia a la sedimentación en la margen interior de la curva (Rocha, 1998).

En el Cuadro 3 el cálculo de tasas de desplazamiento lateral indica, en todos los casos, un desplazamiento hacia la margen izquierda, de modo que el cauce cada vez se aproxima más a la vía. En

Cuadro 2. Sinuosidad del río Unete en el tramo de estudio.

Año	LC (km)	LR (km)	Sinuosidad
1992	44.61	24.18	1.85
2004	46.19	24.02	1.92
2019	44.52	24.01	1.85

Nota1: LC Longitud Curva, LR Longitud Recta.

Fuente: Aguirre y Fajardo (2020).

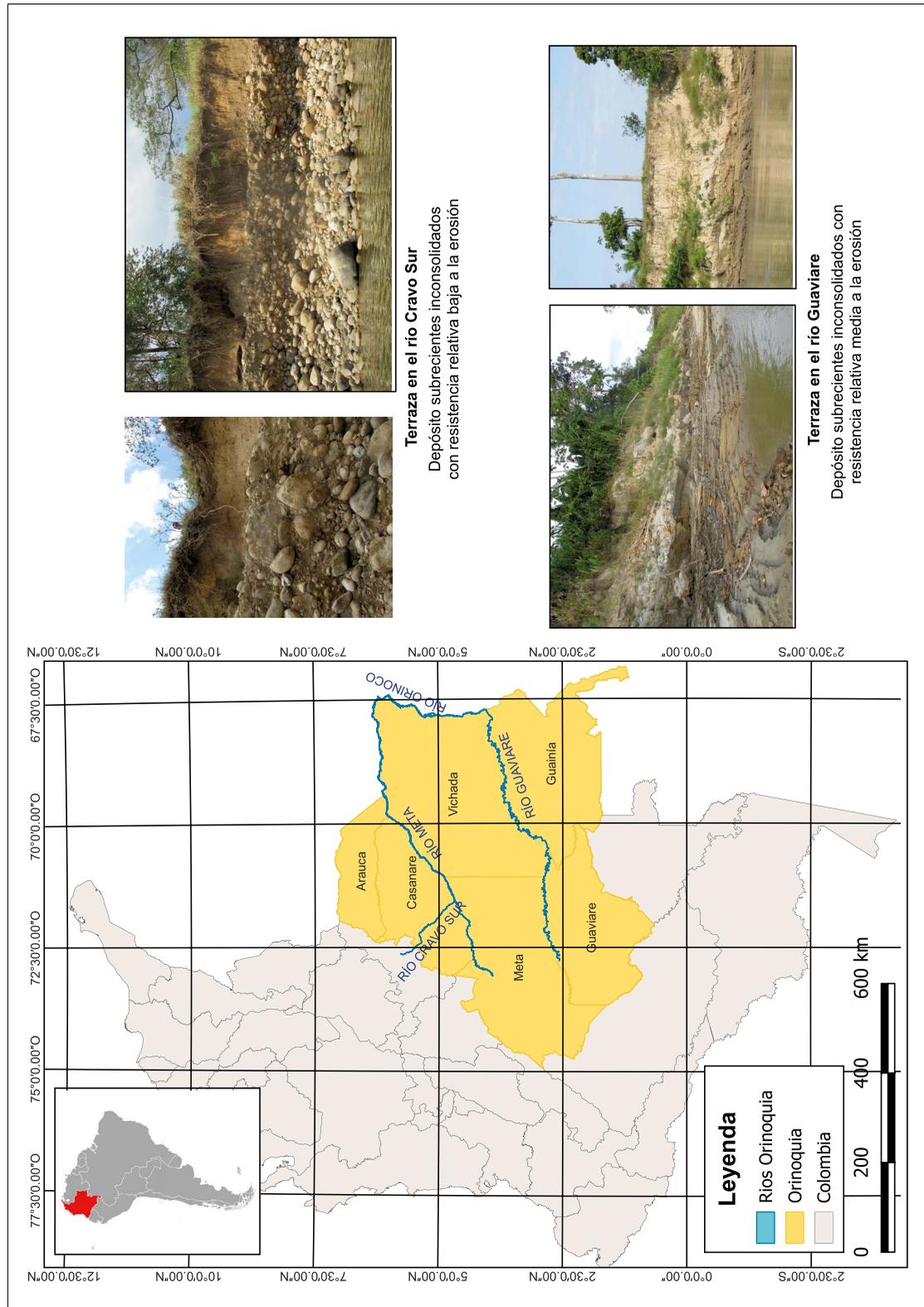


Figura 5. Condiciones geomorfológicas de ríos de la Orinoquia similares al río Unere.

Cuadro 3. Tabla de desplazamiento y proyección del cauce.

Sección	Rango (años)	Desplazamiento (m)	Distancias de margen izq. a la vía (m)	Tasa de Desplazamiento (m/año)	Proyección (años)	
1	1992	2004	106.17	227.07	8.85	26
	2004	2019	128.70		8.58	
2	1992	2004	6.38	30.77	0.53	20
	2004	2019	23.12		1.54	
3	1992	2004	9.40	24.64	0.78	34
	2004	2019	11.01		0.73	
4	1992	2004	20.11	422.04	1.68	120
	2004	2019	52.80		3.52	
5	1992	2004	96.68	269.83	8.06	35
	2004	2019	115.88		7.73	
6	1992	2004	11.66	16.18	0.97	53
	2004	2019	4.54		0.30	
7	1992	2004	36.36	46.77	3.03	56
	2004	2019	12.53		0.84	

Nota: adaptado de Aguirre y Fajardo (2020).

general, la velocidad de desplazamiento entre 1992 y 2004, fue mayor con respecto al rango de años comprendido entre 2004 y 2019, a excepción de las secciones 2 y 4, sugiriendo mayor estabilidad del cauce en el último periodo.

Igualmente, se logró identificar que los meandros analizados en las secciones 1 y 5, aunque presentan la mayor tasa de erosión 7.73 m/año a 8.85 m/año, dicho desplazamiento es longitudinal sobre el eje del cauce. Por lo tanto, este tipo de desplazamiento no es significativo en este estudio debido a que no denota amenaza para la estructura de la vía. En el caso de la sección 4 se observa una distancia superior a 400 m de la orilla del río y la vía, lo que representa una proyección de 120 años, antes de requerirse obras de mitigación.

En consecuencia, se seleccionaron como puntos críticos las secciones 2, 3, 6 y 7 como se muestra en la Figura 6, por cuanto presentan tasas de desplazamiento considerables y mayor proximidad a la vía, que en conjunto constituyen mayor exposición.

Vale la pena resaltar que en la sección 2, entre 1992 y 2004, la erosión del río avanzó hasta gene-

rar el colapso de la infraestructura vial (Figura 7), obligando al cambio de la ubicación o realineamiento del corredor vial, producto de la pérdida de la banca original.

La sección 3 se caracteriza por un meandro que impacta perpendicularmente el talud de la vía, y luego cambia abruptamente la dirección del cauce hasta desarrollar un alineamiento paralelo a la vía, pero sin ocasionar un desplazamiento evidente del cauce en los 27 años de análisis. Este comportamiento llevó a incluir este sector como punto crítico, y consecuentemente, a la caracterización del material que compone el talud.

En el caso de las secciones 6 y 7, la distancia entre el cauce y la vía es de 16.2 m y 46.8 m respectivamente, con un desplazamiento lateral significativo entre 1992 a 2004, con una tasa de 0.97 m/año para la sección 6 y de 3.03 m/año para la sección 7, condiciones que llevaron a seleccionarlos como puntos críticos.

Como resultado se logra la caracterización del suelo según American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

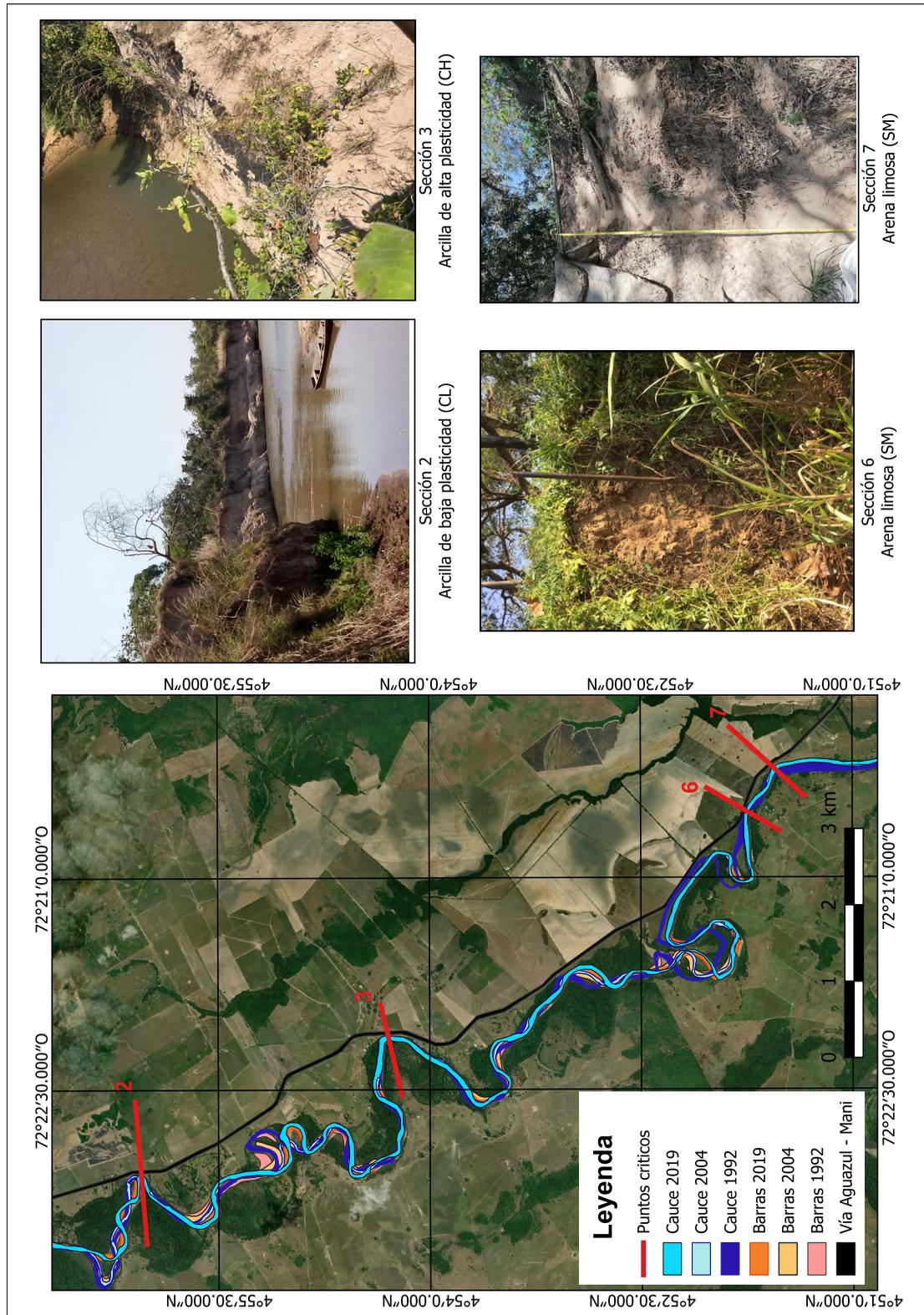


Figura 6. Puntos críticos ante erosión fluvial del río Unete. Nota: adaptado de Aguirre y Fajardo (2020).

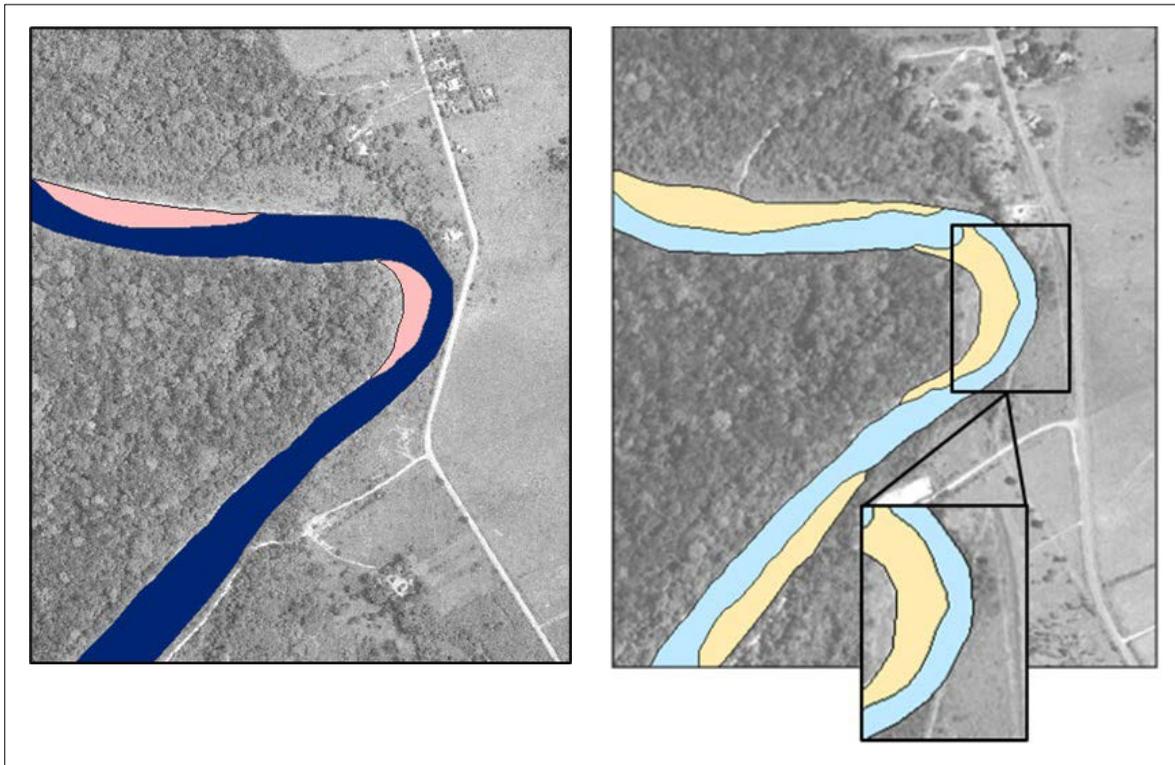


Figura 7. Afectación de la vía entre 1992 y 2004 en la sección 2. Fuente: Aguirre y Fajardo (2020).

y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como se muestra en el Cuadro 4. Se establece que el material de la sección 2 es una arcilla de baja plasticidad (CL), que la muestra de la sección 3 se clasifica como arcilla de alta plasticidad (CH),

mientras que el material de las secciones 6 y 7 corresponden a una arena limosa (SM).

De acuerdo con los resultados de laboratorio obtenidos y la clasificación del suelo mediante los sistemas de clasificación AASHTO y SUCS, se deter-

Cuadro 4. Resultados de ensayos de laboratorio y clasificación del tipo de suelo en puntos críticos.

Sección	Humedad Natural (%)	LL (%)	LP (%)	IP	G <sub>s</sub>	Peso Unitario (g/cm <sup>3</sup> )	% Arena	% Finos	SUCS	AASHTO
2	9.10	30.18	13.45	16.74	2.63	1.90	NP	NP	CL	A-6
3	17.83	51.28	24.09	27.19	2.32	1.59	NP	NP	CH	A-7
6	4.92	NP	NP	NP	2.58	1.56	80.64	19.36	SM	A-2
7	7.64	NP	NP	NP	2.58	1.48	85.15	14.85	SM	A-2

Nota 1: adaptado de Aguirre y Fajardo (2020).

Nota 2: LL Limite Liquido, LP Limite Plastico, IP Indice de Plasticidad y G<sub>s</sub> Gravedad específica.

minó el estado de cohesión del suelo, permitiendo agrupar los materiales presentes en las secciones críticas como suelos cohesivos y no cohesivos, permitiendo seleccionar ecuaciones apropiadas para calcular la resistencia a la fuerza tractiva en los dos tipos de suelos.

Con el fin de obtener un valor representativo de resistencia a la fuerza tractiva para cada muestra de suelo no cohesivo, se realizó un promedio con los resultados de las distintas ecuaciones, determinando una resistencia de 0.16 N/m<sup>2</sup> y 0.28 N/m<sup>2</sup> para las secciones 6 y 7, correspondientes a arena limosa. Para las muestras de suelo cohesivo, se implementó la expresión de Smierd y Beisli basada en el índice de plasticidad, obteniendo una fuerza tractiva de 1.72 N/m<sup>2</sup> y 2.61 N/m<sup>2</sup> para las secciones 2 y 3, compuestos por arcilla de baja y alta plasticidad, respectivamente.

En el caso del material aluvial que conforma el lecho y las barras de sedimento ubicadas dentro del cauce, se logra determinar que corresponde con material no cohesivo, grava y arena gruesa, con peso específico relativo de 2.66 como se muestra en el Cuadro 5. La diferencia tan significativa entre el material del lecho y las terrazas muestra que estas últimas corresponden con terrazas antiguas y subcrecientes según su grado de consolidación.

Cuadro 5. Resultados caracterización de material del lecho.

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	G <sub>s</sub>	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)
1	0.78	99.14	0.08	2.65	0.20	0.45	1.5
2	10.13	88.20	1.68	2.66	0.18	0.35	5.0
3	68.03	31.87	0.10	2.66	0.45	12.0	32.0

El aforo líquido permitió establecer un caudal de 3.51 m<sup>3</sup>/s, el cual fluye con velocidad de 0.54 m/s, por una sección mojada de 6.50 m<sup>2</sup>, perímetro 30.01 m y pendiente media de 0.00154 m/m, como se muestra en la Figura 8. Despejando de la ecuación de Manning se obtiene un coeficiente de resistencia de 0.026 propio de grava media. Para utilizar este coeficiente en la sección a banca llena, conviene realizar una corrección por la presencia de troncos y obstrucciones, obteniendo un valor de 0.031, permitiendo estimar un caudal formativo de 394.06 m<sup>3</sup>/s.

$$Q = \frac{1}{0.031} * \frac{(182,60m^2)^{5/3}}{(81,97m)^{2/3}} * \sqrt{0,00154} = 394,06 m^3/s$$



Figura 8. Sección transversal aforada en el río Unete, conformada por gravas, arenas y material vegetal que obstruye levemente el cauce.

Aplicando el criterio hidrológico, se tomaron registros diarios de la estación Los Esteros (35197030) entre 1975 y 2015, determinando que el caudal con período de retorno de 1.3 años alcanza un valor de  $361.78 \text{ m}^3/\text{s}$ . En consecuencia, es posible validar el caudal de  $394.06 \text{ m}^3/\text{s}$  como aquel que da forma en planta y perfil al cauce del río Unete.

## DISCUSIÓN

El río Unete en el tramo estudiado se clasifica como un río meándrico con barras de punta en la margen interior de cada curva y pendiente suave, coincidiendo con un cauce tipo 3b como se muestra en la Figura 10, dichos meandros son irregulares, sin repetición del patrón, parámetros que lo identifican como río meándrico irregular. Este tipo de ríos tienen carga de sedimentos mixta, es decir, sin predominio de carga en suspensión (finos) ni de fondo (arenas), condición que se evidencia en la combinación de las geoformas terrazas bajas, barras de punta y barras longitudinales como se muestra en la Figura 9. De acuerdo con Brice (1983), la resistencia de los taludes de este tipo de ríos es menor respecto a los ríos trenzados y ríos multicanales o canaliformes, lo cual les otorga mayor dinámica.

Dada la poca variación en el valor de la sinuosidad puede considerarse al río Unete como un río en

equilibrio entre su caudal líquido y su carga sólida, entre los procesos de deposición y socavación. Aun así, tanto en las imágenes aéreas como en la visita de campo se evidencia la erosión de los taludes en la margen exterior de las curvas, dando lugar a terrazas entre 3 m y 8 m de altura con taludes aproximadamente verticales.

El análisis multitemporal entre 1992 y 2019 evidencia un desplazamiento continuo del río Unete hacia su margen izquierda, en dirección a la vía que conecta los municipios de Aguazul y Maní. En base a esto se establecieron como puntos críticos las secciones 2 y 7 bajo el criterio de proximidad al corredor vial, mientras que las secciones 3 y 6 se seleccionaron como puntos críticos, no solo porque son los más cercanos a la vía, sino por un comportamiento poco común, sin desplazamiento evidente en los 27 años de análisis, a pesar del alineamiento perpendicular del cauce respecto al talud de la vía.

Los suelos de las terrazas altas identificadas en las secciones 2 y 3, se clasificaron como arcilla de baja plasticidad y arcilla de alta plasticidad respectivamente, suelos que de acuerdo con Lambe y Whitman (1972) poseen una resistencia cohesiva que aumenta al disminuir la humedad. La permeabilidad de la arcilla es muy baja y es difícil de compactar en estado húmedo, pero compactada es resistente a la erosión. Ante cambios de humedad, sufre procesos de expansión y retracción que la hacen vulnerable a la acción erosiva del agua,



Figura 9. Identificación de geoformas representativas del río Unete. Nota: adaptado de Aguirre y Fajardo (2020).

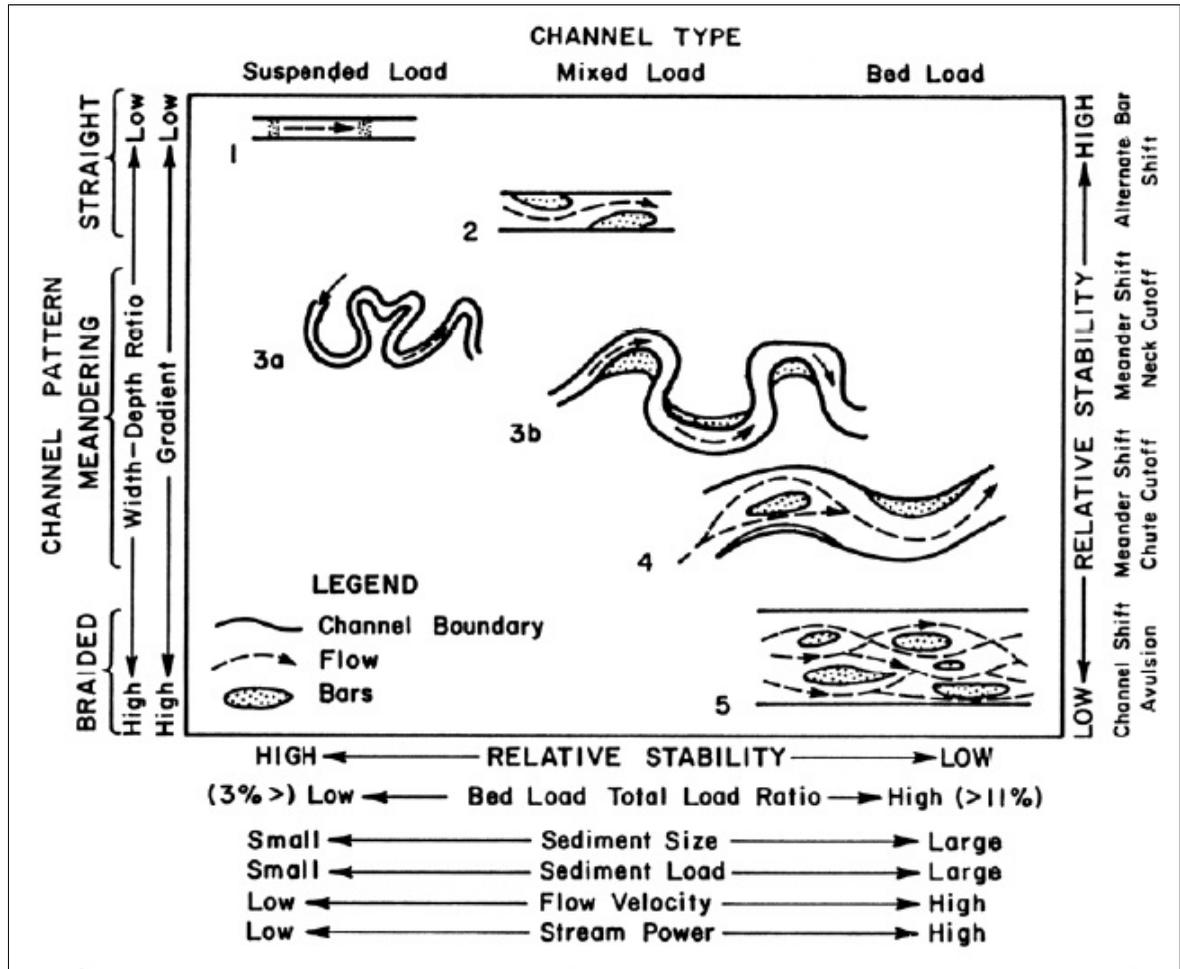


Figura 10. Clasificación de cauces naturales según su morfología, tipo de carga sólida y estabilidad relativa (Schumm, 1985)

especialmente si se considera su localización en un meandro con radio de curva pequeño. En el caso del suelo de las secciones 6 y 7, obtenidos de terrazas bajas, se clasifican como arena limosa que según Lambe y Whitman (1972), tienden a ser inestables especialmente cuando aumenta la humedad, con tendencia a fluir cuando está saturado, difícil de compactar, relativamente impermeable y fácilmente erosionable.

Los suelos encontrados en las secciones 2 y 3 se clasifican como de resistencia media por cuanto fueron obtenidas de un depósito inconsolidado de origen aluvial y se componen de arcilla. En el caso de las secciones 6 y 7, aunque se tomaron de una terraza aluvial, se clasifican con una resistencia

relativa baja, debido a su caracterización como arena limosa.

Como resultado, para cada sitio crítico se identificó la geoforma a la cual se encuentra asociado, y se determinó su tasa de desplazamiento, tipo de material y resistencia a la tracción, con lo cual se logra establecer la susceptibilidad del suelo y de la vía a ser afectados por socavación y desplazamiento lateral del cauce del río Unete.

Al comparar los valores de fuerza tractiva y resistencia a la erosión fluvial obtenidos para cada una de las geoformas del río Unete, respecto al río Cravo Sur como se muestra en los Cuadros 6 y 7, se identifica que el suelo de las terrazas en las secciones 3 y 6 tiene un comportamiento similar

Cuadro 6. Valores de resistencia a la fuerza tractiva para cada muestra y geoforma.

Geoforma	Sección	Tasa de desplazamiento (m/año)	Tipo de suelo	$\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )	Resistencia relativa a la erosión fluvial
Talud de la terraza	2	1,54	Arcilla de baja plasticidad (CL)	1,72	Media
Terraza	3	0,73	Arcilla de alta plasticidad (CH)	2,61	Media
Terraza	6	0,3	Arena Limosa (MS)	0,16	Baja
Terraza	7	0,84	Arena Limosa (MS)	0,28	Baja

Nota: adaptado de Aguirre y Fajardo (2020).

a lo que sería una barra de sedimento (0.1 a 0.5 N/m<sup>2</sup>), pero respecto al río Guaviare, es similar al talud de la terraza (0.19 N/m<sup>2</sup>). En los dos casos la resistencia relativa a la erosión es baja, asociada a depósitos subcrecientes inconsolidados, que coincide con la clasificación asignada.

La muestra de la terraza de la sección 3 posee un valor de resistencia a la fuerza tractiva muy cercana al valor de la geoforma terraza del río Guaviare (2,39 N/m<sup>2</sup>) como se muestra en el Cuadro 8, dando lugar en los dos ríos a una clasificación de resistencia media a la erosión fluvial. Puede observarse, que en general los resultados obtenidos guardan consistencia con estudios similares realizados en otros ríos colombianos.

La mayor tasa de erosión se presentó en la sección 1 (8,85 m/año) donde las barras de punta se complementan localmente con pequeñas barras en medio del cauce (*Sinuuous point bar, locally braided*), mientras que aguas abajo las barras en medio del cauce desaparecen (*Sinuuous point bar*) y la tasa de desplazamiento se reduce significativamente (3.5 a 0.30 m/año). Estos resultados de estabilidad lateral del río Unete obtenidos mediante análisis multitemporal, guardan relación con valores típicos para ríos meándricos (Brice, 1983) mostrados en el Cuadro 9.

Para el punto crítico establecido en la sección 2 se evidencia un desplazamiento en el cauce que obligó al cambio de posición en la vía para el año 2004. Aunque se modificó el trazado de la vía para distanciarse del río, debido a que no se construyó una medida de mitigación en el talud, persiste la tasa de desplazamiento en los últimos 15 años de 1.54 m/año, entonces, se estima que en 26 años el

Cuadro 7. Resistencia relativa a la erosión fluvial del río Cravo sur.

Geoforma	$\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )	Resistencia relativa a la erosión fluvial
Escarpe	10,8 a 29,5	Alta
Terraza alta	N-A	Media
Terraza baja	1,8 a 3,7	Media Baja
Barra de sedimento	0,1 a 0,5	Muy Baja

Fuente: Sandoval y Cruz (2019).

Cuadro 8. Resistencia relativa a la erosión fluvial del río Guaviare.

Geoforma	$\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )	Resistencia relativa a la erosión fluvial
Terraza	2,39	Media
Terraza baja	1,59	Media Baja
Barra de sedimento	0,4	Muy Baja
Talud terraza	0,19	Muy Baja

Fuente: Ramírez y Pardo (2018).

río pueda socavar los 227 m que separan el río de la vía, afectando la estructura del pavimento, como ya se presentó antes.

La visita de campo se desarrolló en enero de 2020, coincidiendo con el periodo de estiaje, logrando observar en las secciones 2 y 3 un borde libre en el talud del orden de 7 m, con presencia escasa de vegetación y raíces. En el tercio superior del talud el suelo estaba agrietado a causa de la

Cuadro 9. Tasas de erosión de bancas en ríos meándricos.

Río	Tasa de erosión de orilla (m/año)	Periodo de observación (años)	Tipo de río
Mississippi	17,5	64	Sinuoso con barras de punta, trenzado localmente
Mississippi	7,8	64	Sinuoso
Yellowstone	4,7	29	Trenzado, sinuoso y anastomosado
Apalachicola	1,3	29	Sinuoso
Sacramento	5,1	27	Sinuoso con barras de punta, trenzado localmente
Elkhorn	8,4	30	Sinuoso con barras de punta, trenzado localmente
West Fork White	1,7	29	Sinuoso con barras de punta
Iowa	0,9	33	Sinuoso con barras de punta
North Canadian	4,5	30	Sinuoso trenzado
Tallahala	0,5	28	Sinuoso con barras de punta
Kanaranzi Creek	0,2	14	Sinuoso con barras de punta

Fuente: Brice (1983).

contracción por pérdida de humedad, así como erosión fluvial de la parte baja del talud, con el posterior desprendimiento del material sobrante en voladizo, condiciones que demuestran el mecanismo y proceso de erosión fluvial predominante. El análisis multitemporal permitió resaltar la sección 3 por su evidente resistencia a la erosión y baja tasa de desplazamiento (0.78 a 0.73 m/año). En campo, el apique excavado en la parte superior de esta terraza ofreció mayor resistencia a la excavación en comparación con los demás puntos de muestreo, producto de una mayor plasticidad de la arcilla. Para las secciones 6 y 7, aunque corresponden a una terraza baja compuesta por materiales no cohesivos, la tasa de desplazamiento es baja (0.30 a 0.84 m/año) en los últimos 15 años, producto de la interacción con un meandro con menor radio de curvatura, lo cual significa, menor capacidad erosiva.

De esta manera, la resistencia relativa a la erosión y la tasa de desplazamiento lateral del cauce están en función de: la composición del material, el alineamiento en planta del cauce del río y las condiciones ambientales, particularmente del cambio de humedad en el periodo de estiaje. Al respecto, Burke (1983) indica que las tasas de erosión resultan ser muy variables en un mismo río producto de la variedad de materiales de los

taludes, su posición relativa respecto al flujo, la pendiente, el establecimiento de la vegetación, y la ocurrencia de grandes crecientes que moldean la forma del canal.

Ante un eventual nuevo colapso de la vía, producto de la erosión fluvial del talud del río Unete, se afectaría notoriamente la vida y economía del municipio de Maní, por cuanto su economía se basa en la agricultura, ganadería, pesca y explotación de hidrocarburos. El 89% de la superficie municipal está dedicada a pasto para ganadería, y es reconocido como uno de los principales centros ganaderos del departamento del Casanare. Estos productos son movilizados a través del corredor vial en estudio. Esto implica la necesidad de un corredor vial en óptimas condiciones y la identificación de sectores priorizados para el monitoreo e intervención con medidas estructurales.

En este sentido, considerando la tasa de desplazamiento del cauce en los últimos años y la distancia del margen izquierdo del río a la vía, la sección 2 representa mayor amenaza para la infraestructura que conecta los municipios de Aguazul y Maní, donde se obtuvo una proyección de 20 años, a una tasa de 1.54 m/año, para que el cauce socave los 30.77 m de suelo existentes. No obstante, la menor resistencia de los suelos no cohesivos en

los puntos críticos 6 y 7, así como la proximidad a la vía (16.2 m y 46.8 m), exigen un monitoreo frecuente tanto de la tasa de desplazamiento, como del posible cambio de alineamiento del cauce del río Unete, especialmente si se reconoce que la socavación local es resultado de la presencia de estrechamientos, curvas o estructuras en la corriente de un río, que provocan aumento en la intensidad del flujo capaz de remover el material del lecho (Toapaxi *et al.*, 2015).

En el caso del río Unete, los resultados del análisis multitemporal y la visita a campo permiten afirmar que no hay presencia de estrechamientos abruptos ni estructuras dentro del cauce, por, lo que la socavación local en curvas constituye el proceso predominante.

## CONCLUSIONES

Para determinar la resistencia relativa a la erosión de un cauce se recomienda considerar la composición del material y su respuesta ante condiciones ambientales, particularmente ante el cambio de humedad en el periodo de estiaje, así como la geomorfología, el alineamiento en planta del cauce y su tasa de desplazamiento lateral. Resulta pertinente combinar el análisis multitemporal de dinámica fluvial, el trabajo de campo y la caracterización del suelo mediante ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio realizados en las muestras recolectadas en los puntos críticos permitieron caracterizar el suelo aledaño a la vía Aguazul-Maní, y a su vez establecer el comportamiento mecánico del suelo y la resistencia a la fuerza tractiva de estos suelos. Las muestras tomadas en terrazas altas corresponden a arcilla de baja plasticidad (CL) y arcilla de alta plasticidad (CH), esta última con menor susceptibilidad a la erosión, debido a una menor presencia de poros, lo que limita el paso del agua a través de la estructura del suelo. En el caso de las muestras obtenidas de terrazas bajas, se clasificó el suelo como arena limosa, con baja resistencia a la erosión, producto de la presencia de material de granos finos, no cohesivos, condición que le otorga mayor tendencia a fluir cuando se encuentran saturados; por esta razón, son fácilmente erosionables.

Las terrazas conformadas por arcillas de baja y alta plasticidad presentan una resistencia relativa a la erosión media (1.7 a 2.6 N/m<sup>2</sup>), demostrando que los suelos de grano fino son menos susceptibles a la erosión fluvial a consecuencia de la estructura interna y la cohesión entre partículas, permitiendo alcanzar taludes verticales del orden de 5 m de altura.

Las geoformas conformadas por materiales heterogéneos, no consolidados y poco cohesivos ofrecen una resistencia relativa a la fuerza tractiva baja con valores entre 0.15 N/m<sup>2</sup> a 0.30 N/m<sup>2</sup>, valores que aumentan según el tamaño de la partícula de suelo. Como resultado a pesar de la presencia de raíces y vegetación ripiara los taludes son menos estables, susceptibles a la erosión fluvial exigiendo un monitoreo más frecuente.

Se demostró mediante el análisis multitemporal de dinámica fluvial del río Unete el predominio durante los últimos 27 años de un desplazamiento hacia la margen izquierda del cauce en sentido del flujo, a una tasa entre 8.85 y 0.30 m/año, amenazando la única estructura vial que permite la conexión entre los municipios de Aguazul y Maní, siendo una arteria vial vital para el desarrollo de los dos municipios.

El sector crítico por erosión fluvial y posible afectación del corredor vial corresponde a la sección 2, con una tasa de desplazamiento de 1.54 m/año. Así las cosas, se espera que en 20 años la estructura vial se vea afectada debido a la dinámica del río Unete, mientras que los puntos críticos en las secciones 3, 6 y 7 presentan una tasa de desplazamiento entre 0.30 y 0.84 m/año, para los cuales se proyecta un tiempo de 34, 53 y 56 años, respectivamente, para que el río pueda afectar la vía. En consecuencia, no se considera necesario implementar obras de mitigación, ni el cambio del alineamiento de la vía, pero sí, realizar un monitoreo frecuente tanto a la tasa de desplazamiento, como al posible cambio de alineamiento del cauce del río Unete.

## REFERENCIAS

Aguirre, J. y Fajardo, S., (2020). Susceptibilidad ante socavación de la vía Aguazul-Maní por dinámica fluvial

- del río Unete. Disponible en [https://bibliotecadigital.odal.com/Record/ir-ing\\_civil-1879?sid=138349](https://bibliotecadigital.odal.com/Record/ir-ing_civil-1879?sid=138349)
- Brice, J. (1983). Planform properties of meandering rivers. En *River Meandering: proceedings of the conference rivers '83*. New Orleans, Louisiana, 24-26 de octubre. American Society of Civil Engineers.
- Burke, T. (1983). Channel migration on the Kansas River. En: *River Meandering: proceedings of the conference rivers '83*. New Orleans, Louisiana, 24-26 de octubre. American Society of Civil Engineers.
- Dragičević, S., Pripuzić, M., Živković, N., Novković, I., Kostadinov, S., Langović, M., Milojković, B. y Čvorović, Z. (2017). Spatial and temporal variability of bank erosion during the period 1930–2016: Case study—Kolubara River Basin (Serbia). *Water (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/w9100748>
- Ghoshal, S., James, L. A., Singer, M. B. y Aalto, R. (2010). Channel and Floodplain Change Analysis over a 100-Year Period: Lower Yuba River, California. *Remote Sensing*, 2(7), 1797-1825. <https://doi.org/10.3390/rs2071797>
- Gurnell, A. M., Bussettini, M., Camenen, B., González del Tánago, M., Grabowski, R., Hendriks, D., Henshaw, A., Latapie, A., Rinaldi, M. y Surian, N. A. (2014). Hierarchical multi-scale framework and indicators of hydromorphological processes and forms. *Proj. Rep. REFORM D*, 237.
- Ibitoye, (2021). A remote sensing-based evaluation of channel morphological characteristics of part of lower river Niger, Nigeria. *SN Applied Sciences*, 3(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04215-1>
- Kunal Chakraborty and Snehasish Saha. (2021). Assessment of bank erosion and its impact on land use and land cover dynamics of Mahananda River basin (Upper) in the Sub Himalayan North Bengal, India. *SN Applied Sciences*, 12. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04904-x>
- Lambe, W. y Whitman, R. (1972). *Mecánica de suelos*. Limusa.
- Menting, F. y Meijles, E. W. (2019). Local factors determining spatially heterogeneous channel migration in a low-energy stream. *Water (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/w11102149>
- Nagel, G. W., de Moraes Novo, E. M. L., Martins, V. S., Campos-Silva, J. V., Barbosa, C. C. F. y Bonnet, M. P. (2022). Impacts of meander migration on the Amazon riverine communities using Landsat time series and cloud computing. *Science of the Total Environment*, 806 (Part 2). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150449>
- Payne, C., Panda, S. y Prakash, A. (2018). Remote sensing of river erosion on the Colville river, North Slope Alaska. *Remote Sensing*, 10(3). <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/3/397>
- Ramirez, D. y Pardo, L. E. (2018). Estudio geomorfológico y de resistencia a la erosión fluvial del suelo en el río Guaviare, tramo: Río Inirida y Río Atabapo. Bogotá.
- Rocha, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodríguez, H. (2010). *Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones-Socavación*. Escuela Colombiana de Ingeniería
- Sandoval, F. y Cruz, J. P. (2019). Resistencia relativa a la erosión fluvial de los suelos que conforman la ribera del río Cravo Sur, tramo: casco urbano Yopal, Casanare.
- Schumm, S. A. (1985). *Patterns of Alluvial Rivers*. [www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)
- Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales/>
- Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X. y Valencia, N. (2015). Analisis de la Socavacion en Cauces Naturales. *Revista Politecnica*, 35(3), 1-11.
- Van den Berg, J. H. (1995). Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology*, 12(4), 259-279. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00014-V](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00014-V)
- Vargas, G. (2012). *Geología, geomorfología y dinámica fluvial aplicada a hidráulica de ríos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Yang, C., Cai, X., Wang, X., Yan, R., Zhang, T., Zhang, Q. y Lu, X. (2015). Remotely sensed trajectory analysis of channel migration in Lower Jingjiang Reach during the period of 1983-2013. *Remote Sensing*, 7(12), 16241-16256. <https://doi.org/10.3390/rs71215828>