

Erosión general en la zona de meandro ubicada en el sector Morasurco, cuenca media del río Pasto

Jarol Oswaldo Lasso-Martínez¹

Francisco Ricardo Mafla-Chamorro²

Resumen

En la presente investigación se propone estimar la erosión general sobre una zona de meandro ubicada en el sector Morasurco cuenca media del río Pasto, donde se estima presencia de altas tasas de acumulación de residuos y un desgaste significativo sobre el talud y el lecho del río; para ello, se emplea el software de modelación Hec Ras, para determinar el comportamiento de los procesos de erosión y depositación de sedimentos.

La caracterización geomorfológica e hidrodinámica de la zona de estudio identifica el cauce como moderadamente encajado, ubicado en zona de planicie, de aspecto meandriforme por sus índices de sinuosidad; cuyo material dominante va desde gravas muy finas hasta arenas finas, características de los ríos tipo E.

La sección 40, ubicada aguas arriba, muy cercana a la zona urbana, sufre mayor alteración en las condiciones geométricas del canal, con una variación en el lecho de 3.5 metros para el caudal proyectado, con un total de material erosionado de 248.8 toneladas, concentración de sedimentos circulante sobre la sección de 2.960 mg/l, profundidad efectiva de 1.48 m, velocidad de flujo de 3.2 m/s; además, la sección está experimentando sobre el fondo y sobre el talud un esfuerzo cortante de 10.1 Pa.

Palabras clave: erosión; hidrología; geomorfología; hidrodinámica; modelación.

¹Estudiante del Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana. Correo electrónico: jarlasso@umariana.edu.co

²Docente del Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana. Correo electrónico: fmaffla@umariana.edu.co

General erosion in the meander zone located in the Morasurco sector, the middle basin of the Pasto river

Abstract

In this research, it is proposed to estimate the general erosion on a meander zone located in the Morasurco sector, middle basin of the Pasto river, where the presence of high rates of accumulation of waste and significant wear on the slope and the river bed is observed, using Hec Ras modeling software to determine the behavior of erosion and sediment deposition processes.

The geomorphological and hydrodynamic characterization of the study area identifies the channel as moderately embedded, located in a flat area, with a meandering aspect due to its sinuosity indexes, whose dominant material ranges from very fine gravel to fine sand, characteristics of type E rivers.

Section 40, located upstream, very close to the urban area, suffers greater alteration in the geometric conditions of the canal, with a variation in the bed of 3.5 meters for the projected flow, with a total of 248.8 tons of eroded material; the concentration of sediment circulating is over the section of 2,960 mg / l; the effective depth, of 1.48 m; flow velocity, of 3.2 m / s, in addition to being experimenting on the bottom and on the slope, shear stress of 10.1 Pa.

Keywords: erosion; hydrology; geomorphology; hydrodynamics; modeling.

Erosão geral na zona do meandro localizada no setor Morasurco, a bacia média do rio Pasto

Resumo

Nesta pesquisa, propõe-se estimar a erosão geral em uma zona meandrada localizada no setor do Morasurco, bacia média do rio Pasto, onde há presença de elevados índices de acúmulo de resíduos e desgaste significativo na encosta e no leito do rio, usando o software de modelagem Hec Ras para determinar o comportamento dos processos de erosão e deposição de sedimentos.

A caracterização geomorfológica e hidrodinâmica da área de estudo identifica o canal como moderadamente embutido, localizado em área plana, com aspecto sinuoso devido aos seus índices de sinuosidade, cujo material dominante varia de cascalho muito fino a areia fina, características dos rios tipo E.

O trecho 40, localizado a montante, muito próximo à área urbana, sofre maior alteração nas condições geométricas do canal, com variação do leito de 3,5 metros para a vazão projetada, com um total de 248,8 toneladas de material erodido; a concentração de sedimento circulante ultrapassa a seção de 2.960 mg / l; a profundidade efetiva, de 1,48 m; velocidade de fluxo, de 3,2 m / s, além de ser experimentada no fundo e na encosta, uma tensão de cisalhamento de 10,1 Pa.

Palavras-chave: erosão; hidrologia; geomorfologia; hidrodinâmica; modelagem.

INTRODUCCIÓN

La erosión fluvial puede darse tanto en las bancas como en el fondo del canal, dependiendo los grados de libertad del cauce (Maza Álvarez y García Flores, 1996). La erosión natural del fondo en cauces naturales producida por un incremento del caudal líquido, sea por crecidas naturales o inducidas, es llamada erosión general, y la estimación de su profundidad es un tema de gran importancia en ingeniería fluvial, especialmente útil para la toma de decisiones en el diseño de obras de cruce a través del cauce, tales como puentes, tuberías, túneles subfluviales, etc. Farias (como se citó en Barbosa, 2013, p. 1).

El estudio de la erosión general puede ser de carácter determinístico, se basa en un análisis de carácter cualitativo y cuantitativo donde se emplean fundamentos teóricos y experimentales, ya que cada estudio depende de las condiciones en las que se encuentre el lugar de interés, esto conlleva a la formulación de modelos semiempíricos que dependen mucho del criterio del profesional evaluador.

Por lo tanto, es necesario realizar un estudio morfológico en un cauce natural como los ríos, que puede estipularse en función de las condiciones climatológicas y meteorológicas de la zona donde se encuentre; así mismo, es preciso analizar la acción antrópica que puede holgadamente significar alteraciones sobre las condiciones físicas del cauce.

De igual manera, el estudio hidrológico e hidráulico de las condiciones locales del cauce resulta ser fundamental en cuanto a las crecidas, ya que estas generan mayor turbulencia e incrementa la capacidad de arrastre en un cauce, lo que provoca un aumento en la cantidad de sedimentos transportados.

“Cuando el caudal desciende a los niveles normales, el sedimento se deposita en el fondo, reconfigurando el mismo a su nivel normal, excepto por algunos tramos que se ven afectados por la disminución del nivel del lecho, originando la socavación” (Toapaxi et al., 2015, p. 1). Uno de los mayores problemas ocasionados por una crecida, y como agente seguido la socavación general, está fundamentado en la falla de las estructuras hidráulicas ubicadas sobre los cauces, debido al choque agresivo que se puede presentar con la cantidad de sedimentos que se pueden acarrear.

Uno de los factores fundamentales para estimar la erosión general, en cualquier tipo de cauce natural, es el tipo de material del lecho que conforma el cauce y las fuerzas erosivas de la corriente.

El tipo de material que conforma el cauce hace referencia al tamaño del mismo, e investigaciones han demostrado que, en ríos aluviales, es decir, aquellos que corren sobre materiales transportados por el propio río en el pasado geológico,

la granulometría del material del lecho está directamente relacionada con las características geomorfológicas de un corriente. Autumn y Springer (como se citó en Barbosa, 2013, p. 1)

Con ánimo de avanzar en este tipo de estudios, a partir de la década de los 60, se dio un nuevo enfoque a las metodologías desarrolladas para calcular la profundidad de erosión y cantidad de material removido, “basadas en el equilibrio entre la velocidad de flujo y la velocidad crítica para el material que conforma el lecho, entre las que se destacan las formulaciones de Lischtvan y Lebediev (1959), Laursen, (1963), Maza Álvarez, (1973), Neill, (1980)” (Barbosa, 2013, p. 2).

Todas estas formulaciones semi-empíricas, en su desarrollo conceptual, parten de hipótesis que simplifican el problema, entre las que se destaca la asunción de flujo permanente, situación que durante una creciente no ocurre y que no tiene en cuenta que la iniciación del movimiento de las partículas de fondo ocurre luego de un denominado tiempo de “stress”. Asimismo, la velocidad crítica es calculada a partir de coeficientes empíricos que representan las condiciones de los cauces donde fueron calibrados y se debe verificar su aplicación en otras cuencas, sin mencionar que el efecto de escondimiento de las partículas no es tenido en cuenta por ninguna de estas metodologías (Schreider et al., 2001. Yager, Kirchner y Drietrich, 2007). (Barbosa, 2013, p. 2)

Descripción de la situación actual y formulación del problema

La erosión general en un cauce natural puede ser un indicador de la alteración de sus condiciones físicas y químicas, lo cual puede traducirse en fuertes afecciones en la calidad del agua y de los distintos sistemas sobre el cauce, producto de la actividad erosiva y transporte de sedimentos de tal fenómeno. En muchas ocasiones, los cauces cumplen la funcionalidad de fuente de abastecimiento de una población, además de ser albergue de diferentes ecosistemas que yacen en el entorno acuático, motivo por el cual el fenómeno de erosión general puede suceder por un desequilibrio en el entorno biofísico, que afecta el entorno social, económico, ambiental y de salud.

En este orden de ideas, se empieza a concebir la erosión general como una problemática de índole ambiental, social y económica, ya que son muchas las repercusiones que se pueden desencadenar cuando en un cauce natural no se evalúan este tipo de factores.

Por ello, en el presente estudio surge una idea que enmarca como contexto global de la investigación: la estimación de la erosión general; mediante un cuestionamiento que se basa en una idea investigativa, que seguramente puede entregar una serie de resultados favorables para la buena práctica de la Ingeniería y para la sociedad. De esta manera, surge el siguiente interrogante: ¿cuál es la erosión general que se presenta en la zona meandrica sobre el sector Morasurco, cuenca media del río Pasto?, con

el fin de atender a grupo social involucrado, ya sea de manera directa e indirecta, en un contexto de mitigación en eventualidades catastróficas, como las que se ha presenciado en el país y en el departamento en los últimos años.

Por tal motivo, numerosos estudios se han encaminado en determinar algunos modelos matemáticos con los cuales se pueda apreciar de manera más clara el proceso de erosión general sobre los cauces naturales. Cabe mencionar que son muy variados los métodos que se utilizan para predecir el fenómeno; esto depende de la calidad del flujo circulante sobre el cauce del río, del ángulo y de la velocidad de ataque del flujo.

En consecuencia, se pretende realizar la estimación de la erosión general sobre un tramo representativo del río Pasto que comprende la zona de meandro ubicada en el sector Morasurco. Para ello se empleó el software de modelación hidráulico Hec Ras, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del Us Army Corps, para el análisis hidráulico y, principalmente, para modelar el comportamiento de los sedimentos y la influencia de este fenómeno ante eventualidades de crecidas e inundaciones.

Metodología

Caracterización geomorfológica

La caracterización geomorfológica de la zona de estudio se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Rosgen (1996), donde se contempla las siguientes variables: sección transversal del canal, correspondiente a la profundidad de la lámina de agua y al ancho del cauce, encajamiento de cauce, relación ancha/profundidad; perfil longitudinal, correspondiente a pendiente longitudinal del cauce y las formas de lecho; planta, donde se determinan la sinuosidad y la relación de anchura del meandro.

Variable de la sección transversal del cauce

Para el levantamiento de las secciones transversales, se dividió la zona de estudio en 20 tramos, de esta manera, se realizó las mediciones directas en cada sección, se determinó el ancho y la profundidad del cauce; con base en esta información batimétrica se pudo generar las secciones transversales, vista en planta y corte longitudinal, mediante el software AutoCAD-Civil 3D.

- **Encajamiento.** Se determina mediante la proporción entre la anchura de “flood-prone” (2 veces la profundidad de bankfull) y la anchura de bankfull (zona más ancha del canal), es una relación que se usa para describir el grado de incisión vertical del canal fluvial.
- **Relación anchura/profundidad.** Se determina mediante la relación anchura bankfull / profundidad media del bankfull; es una relación que indica la forma de la sección del canal.

- **Variables en el perfil longitudinal.**
- **Pendiente longitudinal del cauce.**

La determinación de la pendiente longitudinal del cauce se lleva a cabo mediante una diferencia entre las cotas de elevación en m s. n. m. contenida desde el punto inicial hasta el punto final del tramo de estudio en relación con la longitud del cauce; las cotas se obtienen mediante puntos GPS y la longitud del cauce se determina con base en la información planimétrica levantada.

- **Formas de lecho.** El tamaño del material y la composición de la fracción granulométrica del cauce se determinan mediante el proceso de tamizado y ajuste de la curva granulométrica, desarrollado en el laboratorio de estudio de suelos Construcción e Ingeniería (EAR).

Variables en planta

- **Sinuosidad.**

La sinuosidad es la relación entre la longitud del Thalweg y la longitud total del valle. El valor mínimo de la sinuosidad es 1, el cual corresponde a un río totalmente recto, mientras que el valor máximo está alrededor de 4 (Leopold y Wolman, 1960), Para calcular la sinuosidad, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$S_v = \frac{L_v}{L_{vr}}$$

$$S_r = \frac{L_r}{L_{vr}}$$

S_v : sinuosidad del valle

S_r sinuosidad del río

L_v : Longitud del valle

L_r : Longitud del río. (Olivares, 2016, p. 8)

Para clasificar el grado de sinuosidad de un cauce, Rocha (2009) propone unos valores umbrales para cada rango, así:

Baja sinuosidad : ≤ 1.3

Moderadamente sinuosos: 1.3 - 2

Altamente sinuosos: ≥ 2

La metodología empleada para el estudio de la migración lateral del cauce se fundamenta en el estudio realizado por el investigador Ingeniero Billy Solórzano, quien propuso “un estudio de análisis de migración de ríos, sus causas y consecuencias en su tesis denominada: ‘Procesos fluviomorfológicos de relevancia en el río Tahuamanu en el ámbito del puente Tahuamanu’” (Olivares, 2016, p. 3).

Junto con ello se articulan los modelos matemáticos de:

J. Abad quien, junto al Ing. M. García, se han valido del software RVR meander para analizar los ríos con el fin de obtener sus ratios de erosión y migración a lo largo de los años, como lo presentan en “*RVR meander a toolbox for remeandering of channelized streams*”. (Olivares, 2016, p. 4)

Las características geométricas y fluviomorfológicas de los meandros se modelan mediante las siguientes ecuaciones:

$$L_M: (10.32B^9)^{1.5}$$

$$W_M: (25.969)^{0.69}$$

$$L_M: ((79.96R)^c)^{0.388}$$

Finalmente, la tasa de migración de los meandros se obtiene mediante el siguiente modelo:

$$M: \{B^{*0.0068} * [\ln R_c/B] + 0.0157\}$$

M: tasa de migración por año

B: ancho del cauce del río

Rc: Radio de curvatura

Caracterización hidrodinámica

- **Régimen hidrológico.** La determinación de los caudales se lleva a cabo mediante un registro histórico de datos de 15 años, comprendidos entre el año 2004 y el año 2019, ya que es el rango que se encuentra vigente por parte de la estación Universidad de Nariño –AUT- (Código 52045080, siendo esta la estación más cercana al sector de estudio).
- **Régimen fluvial. Pendiente.** La determinación de la pendiente se realiza para cada tramo, se emplea la herramienta de medición de Auto Cad-Civil 3D para la longitud de cada tramo; por su parte, la diferencia de cotas se realiza mediante puntos GPS, aplicando el modelo de pendiente longitudinal (s) $s = (\text{diferencia de cotas entre los puntos de inicio de cada tramo en m s. n. m.} / \text{longitud del cauce})$. *Estructura en planta y las secciones hidráulicas.* Se obtiene de la planimetría junto con la información de batimetría obtenida en campo por parte del presente estudio; el procesamiento de los datos se lleva a cabo mediante el software Auto Cad-Civil 3D.

Resultados, análisis y discusión de la investigación

Según la metodología propuesta, para estimar la erosión general en la zona de estudio, es necesario conocer las características geomorfológicas e hidrodinámicas, por lo tanto, se procedió en el orden planteado.

Caracterización geomorfológica zona de Meandro sector Morasurco

Las variables que se consideran para la caracterización son siempre relativas al cauce del río y son marcadamente hidromorfológicas, como se señaló anteriormente. Todas las variables utilizadas tienen como referencia de medida la geometría, que corresponde a una situación hidrológica concreta que es la del caudal bankfull expresada en la sección transversal del río, donde el flujo de agua toma sus mayores valores con respecto al ancho y a la profundidad. A partir de lo anterior, se realiza la determinación de la zona de bankfull que tendrá influencia en la toma de los datos correspondientes para la caracterización.

La zona de bankfull encontrada presentó un valor de 9.8 m de ancho, con una profundidad en la lámina de agua de 4.3 m; ubicada a 2.501 m s. n. m., en la sección 10 del total de las secciones levantadas, aproximadamente a 390 m desde el punto de descarga. En esta sección se puede evidenciar que concentra la mayor cantidad de agua circulante sobre el canal de toda la zona de estudio (Ministerio de Medio Ambiente, 2003). Según la misma fuente, la zona de “bankfull corresponde al caudal para el cual la conservación del canal es más efectiva. Es, cuando más eficientes son los movimientos de sedimentos (formando y destruyendo barras, cambiando la banda activa de los meandros)” (Ministerio de Medio Ambiente, 2003, p. 7).

Una vez se determinó a zona de bankfull y cada una de las secciones transversales de la zona de estudio-anchura y profundidad del cauce-, se procedió a determinar las variables de la sección transversal, variables del perfil longitudinal y variables de planta.

Variables sección transversal

Las variables de la sección transversal corresponden a la zona de flood prone, encajamiento del cauce y relación anchura-profundidad; algunas de ellas son dependientes una de otra, por eso, fue necesario proceder en el orden planteado.

Zona del flood prone (zona propensa a inundación)

La zona de flood prone fue de 18.4 m, correspondiente a la zona de cobertura de la llanura de inundación y la zona de terrazas más jóvenes (zona de contacto entre la banca del río y la planicie de inundación).

Encajamiento del cauce

Se obtuvo un encajamiento del cauce de 1.9, que corresponde a moderadamente encajado. Sin embargo, en la estimación de este parámetro, puede presentar influencia el efecto de alteración al cual está sometido el cauce, pese a que existen estructuras civiles que pueden afectar su curso libre.

En este sentido, Ollero (2011) realizó un estudio de la cuenca del Ebro, donde evaluó el impacto geomorfológico de los cauces cuando existen estructuras civiles en sus inmediaciones. En el documento se resaltó las características hidráulicas del cauce con respecto al ancho y a la profundidad, las cuales se ven seriamente afectadas, puesto que normalmente se llevan canalizaciones cuando se realizan las pantallas o muros de contención.

Relación ancha /profundidad (zona de bankfull)

Según la relación propuesta se caracteriza al cauce como un río tipo G con un valor de 2.3, propio de ríos tipo A, G o E, que presentan valores menores a 12. Por su parte, el rango que cubre los ríos tipo G es para relaciones menores o iguales a 5.6

De las características correspondientes a las variables en la sección transversal, se presentan fuertes indicios acerca de un alto grado de dinámica fluvial, que conlleva al cauce en estudio a presentar divagancia lateral, según los datos hasta el momento recolectados; para poder determinar con mayor claridad el comportamiento del cauce se procede a determinar las características de las variables en el perfil longitudinal.

Variables en el perfil longitudinal

Las variables en el perfil longitudinal corresponden a la pendiente longitudinal del cauce y material dominante en el cauce.

Pendiente longitudinal del cauce

Para la pendiente longitudinal del cauce, se identificó que la zona de estudio parte desde 2.511 m s. n. m. hasta el punto final ubicado a 2.495 m s. n. m. y contiene una longitud de recorrido de 600 m; a raíz de ello, se determinó el valor de la pendiente de 2,7 %, esto caracterizó a la zona de estudio como planicie, según los criterios de análisis de pendientes enmarcados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2015); “de acuerdo con Jarrett (1990), un río de montaña sería aquél cuyo curso tiene una pendiente longitudinal superior al 0,2%” (López, 2005, p. 37).

Material dominante en el cauce. El material dominante en la zona de estudio se lo caracterizó por su naturaleza y según la estructura del cauce, como material de riffle y pool, (zona de cauce recto y zonas de curvatura o de meandro).

Variables en planta

Las variables en planta corresponden a la sinuosidad del cauce y relación de anchura de los meandros.

Sinuosidad del cauce

Se encontró un índice de sinuosidad total de 3.9 y un índice de sinuosidad hidráulica de 3.1; basado en ello y fundamentado en los criterios de clasificación de sinuosidad para cauces fluviales de la Escuela de Ingeniería y Medio Ambiente (EIMA, 2017), se identificó que los dos valores se encuentran dentro del rango característico de un cauce Meandriforme (cauce único con índice de sinuosidad superior a 1.3).

Relación de anchura de los meandros

La relación de anchura de meandros se realiza para los dos meandros en estudio. El primer meandro presenta una longitud de 14 m; el segundo, una longitud de 23 m y el ancho de bankfull es de 9.8 m, por lo cual, se tiene una relación de 1.5 y 2.5 para el primer y segundo meandro, respectivamente.

Para coeficientes bajos (<1), se determinó bandas activas de meandros que no han sufrido afección por la dinámica fluvial; para rangos mayores a 1, se identifican cauces con banda activa en constante alteración por la carga sedimentaria, característico de la zona de estudio.

Caracterización hidrodinámica de la zona de Meandro sector Morasurco

La caracterización hidrodinámica abordó tres aspectos fundamentales, que dependieron de los requerimientos necesarios para la modelación de la erosión general, mediante el software Hec Ras 5.07, a saber: el régimen hidrológico, las características fluviales y las condiciones hidráulicas locales.

Régimen hidrológico

La determinación de los caudales se llevó a cabo mediante un registro histórico de datos de 14 años, comprendidos entre 2005 y 2019, rango que se encuentra vigente por parte de la estación Universidad de Nariño AUT, estación más cercana al sector de estudio.

Se identificó tres caudales asociados al proceso de modelación con valores de 35,61 y 65.5 m³/s, correspondiente a periodos de retorno de 1.5, 5 y 8 años, respectivamente.

Régimen fluvial

El estudio de las características fluviales está basado principalmente para aquellas características que pueden ser influentes en la alteración de la escala del canal, o de sus condiciones físicas; frente a ello, se evaluó las condiciones de pendiente por tramos, la estructura en planta y la geometría hidráulica.

Pendiente local

La pendiente (en esta ocasión por tramos) se estableció en un valor medio para cada tramo de 2 %, puesto que el análisis estadístico de prueba T para medias de muestras únicas presenta una significancia bilateral <0.05 , lo cual niega la existencia de diferencias significativas entre los datos y se acepta los valores medios propuestos en la prueba.

Estructura en planta

La estructura en planta y la geometría hidráulica se las obtuvo del procesamiento de la información de planimetría, de la cual se extrae las secciones hidráulicas para cada punto de muestreo, permitiendo conocer la profundidad y ancho de la lámina de agua circulante por el canal, los valores de área de cada tramo (correspondiente a la zona mojada), perímetro y radio hidráulico, además se pudo identificar el corte transversal de cada sección, con el fin de realizar un avistamiento de la forma general que presenta el río, útil en los procesos de modelación.

Condiciones hidráulicas locales

En este apartado se tuvo en cuenta en cuenta las consideraciones que permiten identificar la actividad dinámica del cauce, y aquellos parámetros que pueden repercutir en la representación del fenómeno de erosión general; con base en esto, la metodología de Rosgen (1996) propone la determinación de las condiciones de velocidad media del flujo, a partir del caudal de diseño y de las condiciones hidráulicas de cada sección.

Modelación de la erosión general en la zona de Meandro sector Morasurco cuenca media del río Pasto mediante software Hec Ras

En los procesos de modelación de la erosión general sobre el cauce es necesario vincular las principales características de los sedimentos, tamaño y forma de transporte para cada tramo, puesto que como se mencionó en apartados anteriores este ítem es fundamental para el presente estudio.

El análisis de los sedimentos se llevó a cabo mediante el estudio granulométrico desarrollado en el laboratorio EAR estudio de suelos construcción e ingeniería de la ciudad de Pasto; del cual se obtuvo los resultados de tamaño de partícula y se determinó el porcentaje de las fracciones presentes en la muestra (637.4 g).

Determinación de la erosión general

Finalmente, se pudo determinar de manera cuantitativa y cualitativa la erosión general presente en la zona de Meandro sector Morasurco cuenca media del río Pasto, complementando con la estimación de los valores de depositación que se han presentado.

Variación del lecho del canal para periodo de retorno de 1.5 años

Con la simulación de un flujo constante de $35 \text{ m}^3/\text{s}$, se puede identificar la alteración en la geometría que ha sufrido el cauce para las secciones transversales

Bajo estas condiciones de flujo se pudo identificar que el canal ha sufrido un notorio proceso de erosión, puesto que el nivel del lecho, después de haber transcurrido 24 horas de flujo, está por debajo de la cota inicial con una variación de 3.5 m en la zona más crítica correspondiente a la sección 20 y de 0.001 m para la sección 140, que fue la que presentó menor variación en todos los procesos de simulación; las mediciones se realizaron en los puntos más bajos del canal, antes del transcurso del flujo y después de haberse presentado el evento.

Variación del lecho del canal para periodo de retorno de 5 años

El caudal asociado a este periodo de retorno fue de $61 \text{ m}^3/\text{s}$, bajo estas condiciones fue posible notar que el canal sufrió alteraciones en su condición geométrica, que corresponde a un fenómeno de erosión entre las secciones 20 hasta la 120; debido a que el nivel en el fondo del canal se encontraba por debajo después de haber transcurrido 24 horas de flujo. Las secciones 140 hasta la 180 presentan fenómeno de depositación de sedimentos, lo anterior en función de que el nivel del lecho del canal después de haber transcurrido 24 horas de flujo se encontraba por encima del nivel inicial, y en la última sección analizada, correspondiente a la sección 200, el canal nuevamente presentó un proceso de erosión, al apreciar variación en orden de descenso en el nivel del fondo del río.

La variación del fondo del canal sucedió con valores que oscilan entre los 5.241 m en el punto más crítico de erosión, correspondiente a la sección 200, hasta un valor de 0.025 m en la zona de menor influencia del fenómeno para este proceso de simulación; por su parte, los valores de depositación corresponden a 0.106, 0.752 y 1.374 m para las secciones 140, 160 y 180, respectivamente.

Variación del lecho del canal para periodo de retorno de 8 años

El último proceso simulado corresponde a un tiempo de retorno de 8 años, para el cual el flujo tomó un valor proyectado de $65.5 \text{ m}^3/\text{s}$; en este caso, el fenómeno de erosión se representó en las primeras secciones de análisis identificadas entre las secciones 20 y 140, de ahí en adelante, desde la sección 160 hasta la sección 180, el canal se sometió a un proceso de depositación y, finalmente, en la sección 200, el canal sufre nuevamente proceso de erosión.

Los valores pico de erosión en esta simulación se representaron en las secciones 200 y 120 con valores máximo y mínimo respectivamente, con una longitud de profundización sobre el canal de 5.572 m y 0.032 m, en el mismo orden; y por su parte, la depositación tomó valores de 0.149, 0.847 y 276 para las secciones 140, 160 y 180, respectivamente.

En síntesis de la información presentada en cuanto a la variación del fondo del canal, se evidenció que se presentan mayores valores en la magnitud de profundización para el periodo de retorno de 8 años, cuyo caudal es de $65.5 \text{ m}^3/\text{s}$ con un valor total de profundización sobre el canal de 5.5 m; de igual forma, los procesos de deposición se ven favorecidos porque incrementan los valores de flujo, de esta manera, presentan, para el periodo de retorno de 8 años, altura de deposición sobre el lecho del canal en el punto más crítico de 1.276 m.

Erosión general para un periodo de retorno de 1.5 años

En las primeras secciones correspondiente a las progresivas entre 00+ 20 m hasta la progresiva 00+ 180 m del tramo de estudio, se puede evidenciar que el fenómeno presente corresponde a erosión general principalmente sobre el lecho del canal, con una remoción significativa de material catalogado como fine sand (FS) o arena fina y MS (Medium Sand) o arena media.

Para las siguientes secciones (200 hasta 260), se pudo estimar la predominancia del fenómeno de depositación de sedimentos sobre la sección transversal, siendo el material más depositado las arenas muy finas (VFS por sus siglas en inglés *Very Fine Sand*). Entre las secciones 280 y 380 se visualizó la presencia del fenómeno de erosión, siendo las clases más dinámicas las correspondientes a FS y MS.

Para el último tramo del estudio se pudo identificar la presencia nuevamente del fenómeno de depositación, principalmente para las clases de material FS y MS. Se encontró que la sección 40 fue la sección más erosionada con un valor total en toneladas de 248.8 de material removido, alcanzando un descenso en el fondo del canal de 3.507 m tras haberse presentado un flujo constante de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ por un periodo de 24 horas.

Del total de la erosión, 52 toneladas corresponden a arenas finas y 50 toneladas corresponden a arenas medias; sumando entre las dos clases un total de 102 toneladas, estos valores se traducen en un 41 % del total de material removido, el otro 59 % está distribuido entre las 10 clases de materiales restantes.

Erosión general para un periodo de retorno de 5 años

El fenómeno de erosión general sobre el lecho del canal se evidenció tanto para las primeras secciones entre los 20 y 120 m del tramo de estudio y de igual manera en las secciones comprendidas entre 240 y 540 m; por su parte, el fenómeno de depositación se presentó entre las secciones 160 y 220 y en el último tramo aguas abajo en las secciones 560 hasta 600 m.

El material predominante en el fenómeno de erosión en el primer tramo corresponde a arenas finas (FS) y arenas de tamaño medio (MS); para las siguientes secciones el proceso de depositación se lleva igualmente en función de estas clases de sedimentos; mientras que el siguiente tramo, sometido a erosión general, se desarrolla con base al material arena muy fina (VFS). La erosión presentada para este tiempo de retorno

entregó como resultado una predominancia en el material removido conocido como arenas muy finas (VFS); sin embargo, en las primeras secciones del tramo de estudio se observó la remoción de las clases: arenas finas (FS) y arenas medias (MS); el proceso de deposición se miró influenciado por la presencia de materiales arena fina y arena, principalmente arenas medias.

La sección 40 fue donde se encontraron los mayores valores de erosión general en el fondo del canal, con un valor de material removido de 201 toneladas de sedimentos, conformado principalmente por un total de 41.5 toneladas de arenas finas y 50.5 toneladas de arenas medias, completando entre las dos clases 92 toneladas, equivalentes a un 46 % del total de material distribuido en las clases pertinentes; alcanzando un descenso en el lecho del canal de 5.24 m, para un flujo constante por 24 horas de magnitud $61\text{m}^3/\text{s}$.

Erosión general para un periodo de retorno de 8 años

Para este periodo de retorno, cuyo caudal circulante sobre el canal es de $65.5\text{m}^3/\text{s}$, se pudo evidenciar la presencia del fenómeno de erosión general para las primeras secciones entre los 20 y 120 m, continuando con el fenómeno de depositación correspondiente a las secciones 140 y 240; de ahí se presentó, en gran parte del tramo de estudio, el fenómeno de erosión en las secciones 260 hasta 540 y, finalmente, en la última zona se evidenció depositación sobre el canal.

El material predominante tanto para el fenómeno de erosión como depositación corresponde a arenas finas, arenas medias y arenas muy finas. En cuanto a la distribución de las clases y el comportamiento general de los fenómenos de erosión y depositación sobre el canal, donde se identificó la predominancia de las clases de arena fina, arena media y arena muy fina para cada etapa del monitoreo, se encontró cuatro momentos con respecto a la representación de los fenómenos.

De esta manera, se identificó que la sección 40 resultó ser la sección con más alteración en las condiciones geométricas del canal con un total de material removido de 210 toneladas, que representa una variación en el fondo del canal de 5.572 m. De la erosión de esta sección, 44 toneladas corresponden arenas finas (FS) y 54 corresponden a arenas medias (MS), si se suma estos dos valores se tiene un total de 98 toneladas, equivalente a un 47 % del total de material removido en la sección transversal.

Finalmente, el análisis de los resultados se precisan con base en los reportes para el caudal de diseño de $35\text{m}^3/\text{s}$, correspondiente a un periodo de retorno de 1.5 años, puesto que la metodología de Rosgen (1996) empleada para la caracterización geomorfológica e hidrodinámica de la zona de estudio propone que la erosión general se debe evaluar para periodos de retorno bajos con alta probabilidad de ocurrencia, esto en función de que este fenómeno está continuamente representándose, siempre que haya un caudal fluyendo sobre el canal.

Es importante tener en cuenta que, las secciones iniciales son las secciones con mayor dinámica fluvial, donde se representan los mayores cambios en el canal y mayor cantidad de material removido, resaltando que son las secciones en las cuales la urbanización se encuentra vulnerando a gran escala la ronda hídrica del río, dato que se evidenció en la visita técnica al lugar, donde se pudo notar incluso muros de las construcciones cercanas levantadas sobre el talud del río, lo cual hace que se alteren las condiciones normales del canal.

A razón de ello, es válido anotar que, la sección que sufrió más alteración en las condiciones geométricas del canal fue la sección 40, ubicada aguas arriba del tramo de estudio, con una variación en el lecho del canal de 3.507 m para el caudal proyectado, con un total de material erosionado de 248.8 toneladas, concentración de sedimentos circulante sobre la sección de 2.960 mg/l, con una profundidad efectiva de 1.48 m y velocidad de flujo de 3.2 m/s.

Esta sección experimenta sobre el fondo y sobre el talud un esfuerzo cortante de 10.1 Pa; por su parte, la sinuosidad o divagación del talud permite la formación de pozos a lado y lado del cauce, estos pozos están localizados en los extremos de las curvas del talud; los pozos o remansos son, en la práctica, sitios donde la ocurrencia de corrientes secundarias facilita la erosión lateral del cauce.

Los resultados con respecto a las condiciones hidráulicas de la zona permiten justificar las altas tasas de erosión y alteración en gran medida de la geometría del cauce; según un estudio realizado por Acosta (2016):

La naturaleza y extensión de los procesos de erosión depende de la energía cinética de la corriente, y ésta, a su vez, depende de la cantidad de agua, de la forma y tipo de cauce y del gradiente de la corriente. (p. 31)

Una corriente con alto grado de energía cinética presenta mayor probabilidad de presentar erosión general, tanto de fondo como en las bancas de los ríos, permitiendo así remover incluso material cohesivo.

El material cohesivo está formado de partículas muy pequeñas que ofrecen resistencia al flujo de agua. Se necesitan velocidades de corriente más altas para erosionar partículas más pequeñas del tamaño de arcilla y limo, ya que la fuerza de cohesión que impide el transporte de las partículas por una corriente es considerablemente mayor que el peso de la partícula, pero una vez que esta fuerza es vencida, la partícula se puede comportar como si fuera granular y es transportada fácilmente en suspensión debido a su peso y tamaño reducidos. (Felipe-Matías, 2016, p. 26)

Al respecto, en la zona de estudio se identificó que existe una relación de erosión/depositación de 14.1: 1, esto significa que por cada 14.1 toneladas de material erosionadas en secciones transversales aguas arriba, 1 de ellas es depositada aguas

abajo; con un total de material erosionado de 647.3 toneladas para un periodo de retorno de 1.5 años, mientras que existe una depositación de 46.04 toneladas para la misma simulación.

De ello, 137.9 toneladas corresponden a arenas finas (FS) y 138.4 toneladas corresponden a arenas de tamaño medio (MS), mientras que 371 toneladas del material erosionado se distribuyen entre las 10 clases de materiales identificados en la granulometría. Por su parte, la depositación presenta unas tasas que corresponden a 6.5 toneladas para arenas muy finas (VFS), 4.01 toneladas corresponden a arenas finas (FS) y 17.83 toneladas de arenas de tamaño medio (MS), mientras que 17.65 toneladas están distribuidas igualmente entre las 10 clases de sedimentos restantes.

Por tal motivo, al encontrar presencia de material principalmente no cohesivo, de acuerdo con el tamaño de las partículas predominantes (arenas muy finas, finas y medias), varios autores afirman que la carga de material de lecho del cauce puede ser transportada sobre el fondo del río o en suspensión en toda la columna de agua.

De igual forma, puede contener carga lavada correspondiente a material más fino, que lo hace más susceptible a sufrir procesos de erosión general y desgaste en gran escala del talud del río, presentando una alimentación positiva en carga de sedimentos desde la parte alta de la zona de descargue hasta algún punto crítico, como el caso de los meandros, toda esta carga debe ser depositada y, por ende, muy posiblemente se representen avalanchas, crecidas o inundaciones, que implican serias problemáticas de carácter ambiental, social y económico.

De tal manera que si se analizan las condiciones a lo largo del tramo, se puede identificar que para todo el canal existe representación de alguno de los dos fenómenos, erosión general o depositación de sedimentos, que si bien es cierto son en menor medida que la sección anteriormente especificada, resultan ser muy importantes y muy representativos al momento de analizar la influencia de estos frente a eventualidades de crecidas o inundación sobre los vecindarios del cauce fluvial del río Pasto, puesto que el proceso de desbordamiento en la zona de estudio es muy frecuente para las secciones aguas abajo, donde se vulnera la franja marginal del canal y se empieza a apoderar de la planicie de inundación.

Para las secciones 360, 420 y 520, el caudal sobrepasa los niveles de la banca (Bank Sta), esto evidencia que el flujo con la carga de sedimentos se ha apoderado de la planicie de inundación y puede repercutir fuertemente sobre la zona, puesto que a la altura de la sección 360 hasta la sección 600 existen sobre la margen derecha del cauce en sentido del flujo algunos predios dedicados al pastoreo de animales, muy frecuentemente poblados de estos; por su parte, en las inmediaciones de la sección 520, se encuentran viviendas muy circunvecinas al cauce del río Pasto, las cuales entrarían en contacto directo con los materiales acarreados desde aguas arriba con las razones de alimentación de sedimentos ya anteriormente expresados, lo cual, por su puesto, puede repercutir en las condiciones normales de los residentes. Finalmente,

en síntesis, de la información correspondiente al proceso de erosión y deposición presente en la zona de Meandro sector Morasurco cuenca media del río Pasto, se presenta una ilustración clara acerca de las zonas en cada sección transversal y a lo largo del cauce, que experimentan en mayor medida cada uno de los fenómenos ya descritos, esquematizando de manera vectorial las zonas de influencia y representación de los fenómenos de erosión y deposición.

Lo anterior se fundamenta en el estudio realizado por González et al. (2018), quienes identificaron que bajo condiciones de erosión, depositación, además de las características geomorfológicas similares al caso de estudio, el perfil longitudinal de un río presenta alteraciones principalmente por erosión y sedimentación; los perfiles longitudinales de los ríos tienen una forma cóncava, que disminuye desde las zonas de máxima erosión en la parte alta del río a las de depositación en la parte baja.

Adicionalmente, la realidad actual hace que las características de las concentraciones de sedimento en los ríos dependan, casi exclusivamente, de las actividades humanas (manejo de la tierra) a nivel de cuencas hidrográficas (García-Chevesich, 2008). El uso de la tierra es lejos el factor más importante dentro del conjunto de los factores que afectan la erosión y la sedimentación. Durante los últimos años se ha construido y urbanizado más terrenos que la suma de todas las áreas urbanas de los siglos anteriores (Terrence et al., 2002). Los sitios en construcción representan la actividad humana más devastadora, en términos erosivos, debido a la agresividad espacial y temporal asociada a éstos. (García-Chevesich, 2010, p. 18)

También se puede afirmar que los daños específicos motivados por estos procesos de erosión, conjuntamente con los de sedimentación, son los siguientes: reducción de la productividad del suelo, pérdida y degradación de la tierra, descenso del nivel freático, depósitos infértiles, sedimentación en embalses, sedimentación en zanjas de drenaje y canales de riego y daños a la navegación fluvial (estos últimos fuera de la cuenca).

Finalmente y como síntesis de la información presentada con respecto a los procesos de erosión presentes en la zona de Meandro sector Morasurco cuenca media de río Pasto, se abordó la caracterización para la descripción de la degradación de suelos y niveles de intensidad por erosión hídrica propuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), adaptado por (Roma, 2009), con el fin de puntualizar, según estándares normativos, las condiciones en que se encuentra el cauce.

En cumplimiento a ello, la caracterización parte de la determinación de un cauce con evidente erosión hídrica y depositación, como se ha expresado en apartados anteriores, con un total de área afectada por procesos de erosión y depositación del 100 %, puesto que ninguna sección en el tramo analizado presenta un equilibrio total frente a los procesos; con grado de erosión moderado, caracterizado por la evidencia clara de remoción de los horizontes superficiales del suelo.

Las funciones bióticas originales se encuentran parcialmente destruidas (este último se evidencia en la zona de estudio, puesto que existe algunas zonas donde anteriormente existía vegetación riberena y producto de una crecida esta zona fue destruida) y según el periodo de actividad de la erosión se cataloga como activa actualmente, ya que es notorio el continuo proceso de erosión en el cauce.

Conclusiones

Con respecto a la hipótesis planteada en la presente investigación, se puede identificar que es aceptada, puesto que los procesos de erosión a los que se encuentra sometido principalmente el lecho del canal es superior al 20 % de la lámina del flujo, para un caudal de diseño de $35\text{m}^3/\text{s}$, correspondiente a un periodo de retorno de 1.5 años.

Los procesos de erosión general sobre cauces naturales están en constante representación, por lo cual, el estudio, obedeciendo a la metodología propuesta, lo evalúa en función de flujos con periodos de retorno bajo, pero con alta probabilidad de ocurrencia, puesto que el fenómeno no es atribuible únicamente a eventualidades de crecida con altas tasas de caudal.

Los procesos de erosión general y desbordamiento en la zona de Meandro sector Morasurco cuenca media del río Pasto deben ser evaluados y tenidos en cuenta para los procesos de planificación urbanística, puesto que el estudio entrega resultados alarmantes en cuanto a estos fenómenos que pueden repercutir en la calidad de vida de la población cercana al cauce del río, al momento de presentarse una crecida, generando inundaciones o desbordamiento del cauce, daños materiales, ambientales y sociales; todo esto en función de las características geomorfológicas e hidrodinámicas de la zona de estudio.

La selección del modelo para la simulación de la erosión general resulta de un ítem muy importante, ya que este debe contar con la facilidad de ajuste de la información que se tiene, incluyendo el mayor número de variables que permitan representar en la mejor manera posible las condiciones de la cuenca de estudio y el objetivo para el cual se desarrolla la simulación, por ello, es pertinente, además de la caracterización geomorfológica e hidrodinámica, estudiar a profundidad la vegetación, las variables meteorológicas, como el viento, que puede tener influencia en los resultados, tasas de evapotranspiración e incluso estudios edafológicos que pueden ayudar a comprender la dinámica que presenta el lecho con el flujo del cauce y puede influir también en la alteración de las características geométricas del cauce.

Las tasas de erosión, las condiciones geomorfológicas e hidrodinámicas presentes en la zona de estudio son un indicador clave en cuanto a la comprensión de procesos de desbordamiento e inundaciones que pueden sufrir los asentamientos cercanos al cauce.

Referencias

- Acosta, D. (2016). *Evaluación del impacto ambiental sobre la morfología del cauce del río Porce, por retención de sedimentos en los embalses Porce II y Porce III, en el tramo comprendido entre el sitio de presa y el río Nechí* (tesis de pregrado, Universidad de la Salle). Archivo Digital. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1404&context=ing_ambiental_sanitaria
- Barbosa, S. (2013). *Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas)* (tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Archivo Digital. <https://core.ac.uk/download/pdf/19485255.pdf>
- Felipe-Matías, E. (2016). *Socavación producida por el río Huallaga al puente colpa alta en la provincia de Huánuco, utilizando los métodos de Artamanov, Straub y Maza, en el Hec-Ras* (tesis de maestría, Universidad de Piura). PIRHUA. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2627/MAS_ICIV-L_035.pdf
- García-Chevesich, P. (2010). Factores que afectan la erosión y la sedimentación. En J. Brea, F. Balocchi (Eds.), *Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas* (pp. 9-21). Unesco. http://eias.utralca.cl/isi/publicaciones/erosion_y_sedimentacion_vol1.pdf
- González, J., Comino, J., Martínez, J. y Ruiz, J. (2018). Análisis de perfiles longitudinales de ríos para la detección de anomalías geomorfológicas. Aplicación a un sector de la costa septentrional del mar de Alborán (España). *Anales de geografía*, 38(1), 161-194.
- López, R. (2005). Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (II). *Cimbra*, 362, 36-39. <https://repositori.udl.cat/handle/10459.1/46509>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2003). Aplicación de la clasificación de Rosgen al río Gállego y protocolo para su aplicación a los ríos de la cuenca del Ebro. <file:///D:/Biblio7eca/Downloads/memoria.pdf>
- Olivares, E. (2016). *Parones de cambio morfológico y meándrico de 13 ríos pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Amazonas* (tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú). Archivo Digital. file:///D:/Biblio7eca/Downloads/OLIVARES_EFRA%20DN_CUENCAS_HIDROGR%20FICAS.pdf
- Ollero, A. (2011). Los cauces fluviales como indicadores de cambio global: Propuesta metodológica. *Zubia monográfico*, 23, 187-200.
- Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X. y Valencia, N. (2015). Análisis de la sacavación en cauces naturales. *Revista politécnica*, 35(3), 1-11.