

ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD MORFOLÓGICA DEL RÍO PILCOMAYO MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA

ANALYSIS OF THE MORPHOLOGICAL ACTIVITY OF THE PILCOMAYO RIVER BY MEANS OF NUMERICAL MODELING

Marcelo Heredia Gómez, Solange Rocha Boggero

*Laboratorio de Hidráulica,
Universidad Mayor de San Simón
m.heredia@umss.edu*

(Recibido el 15 de noviembre 2023, aceptado para publicación el 11 de abril 2024)

RESUMEN

El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón en Bolivia (LHUMSS) ha iniciado el estudio de la actividad morfológica del río Pilcomayo mediante la ejecución de trabajos de modelación física y numérica. La modelación numérica se ejecuta mediante la aplicación del modelo computacional Delft3D. En este proceso, el modelo computacional ha sido calibrado para la reproducción de las variables hidrodinámicas. El río Pilcomayo es un río morfológicamente activo, con cambios constantes en la forma del lecho debido al flujo y a las elevadas tasas de transporte de sedimentos en suspensión. El presente trabajo de investigación detalla la continuación en los trabajos de modelación numérica sobre el río. Se presenta la calibración sedimentológica, donde se reproduce el transporte de sedimentos observado en la Estación Villamontes, calibración refrendada con el respectivo análisis estadístico para la cuantificación de los errores residuales entre los valores observados y calculados por el modelo obteniéndose resultados calificados como “muy buenos” y “buenos” según la literatura existente. A partir de la calibración se ha efectuado la modelación de escenarios morfológicos de “largo plazo” y “corto plazo”, donde los resultados muestran la actividad morfológica de la zona de estudio.

Palabras Clave: Modelación Morfológica, Transporte de Sedimentos, Río Pilcomayo, Modelo Computacional Delft3D.

ABSTRACT

The Hydraulic Laboratory of the Universidad Mayor de San Simón in Bolivia (LHUMSS) has begun studying the morphological activity of the Pilcomayo River through the execution of physical and numerical modeling work. Numerical modeling is carried out using the Delft3D computational model. In this process, the computational model has been calibrated for the reproduction of hydrodynamic variables. The Pilcomayo River is morphologically active, with constant changes in the bed shape due to flow and high rates of suspended sediment transport. The present research work details the continuation of numerical modeling efforts on the river. The sedimentological calibration is presented, where the sediment transport observed at the Villamontes Station is reproduced, with the calibration supported by the respective statistical analysis for quantifying the residual errors between the observed and calculated values by the model, obtaining results rated as "very good" and "good" according to existing literature. Based on the calibration, the modeling of "long-term" and "short-term" morphological scenarios has been carried out, where the results show the morphological activity of the study area.

Keywords: Morphological Modeling, Sediment Transport, Pilcomayo River, Delft3D Computational Model.

1. INTRODUCCIÓN

El río Pilcomayo se caracteriza por ser uno de los ríos con mayor tasa de transporte de sedimentos, no solamente en Bolivia, sino en el mundo [1], presentando una intensa actividad morfológica [2], el cual se ensancha justo después de las cadenas montañosas de la Cordillera del Aguargüe, formando una configuración trezada de alto dinamismo [1]. El año 2021, el consorcio EPTISA-Campo D'Agua-RIMAC comisiona al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón en Bolivia (LHUMSS) la ejecución de estudios de modelación física y numérica del río Pilcomayo para la optimización de obras de toma para riego a la altura de la población de Villamontes, las cuales deben funcionar de forma acorde a la actividad morfológica de la zona. En ese sentido, la modelación numérica se orienta al estudio de la actividad morfológica del río. La modelación numérica se realiza mediante la aplicación del modelo computacional Delft3D.

En una primera etapa, se realiza la calibración hidrodinámica del modelo computacional, la cual representa un reto en sí misma, debido a que el río Pilcomayo, en la zona de estudio, es un río morfológicamente activo. Adicionalmente, el proceso de modelación numérica se complica aún más, debido a la poca disponibilidad de información topo batimétrica, hidrométrica y sedimento métrico. El proceso de calibración efectuado en el LHUMSS se presenta con mayor detalle en [3]. La segunda etapa de la modelación numérica se detalla en la presente publicación, la cual incluye la calibración del

transporte de sedimentos y la modelación de la morfología de corto y largo plazo del río. La calibración del transporte de sedimentos tiene como objetivo el de reproducir de manera aceptable las concentraciones de sedimentos en suspensión en el río observadas en la Estación Villamontes. La modelación morfológica de “largo plazo” se realiza utilizando caudales medios, mientras que la modelación de “corto plazo” se realiza aplicando caudales de eventos extremos.

El presente documento está compuesto por 4 capítulos. El Capítulo 1 corresponde a la introducción del presente documento. El Capítulo 2 presenta la Metodología donde se describe la zona de estudio y los datos colectados, así como los fundamentos teóricos sobre modelación morfológica. El Capítulo 3 presenta los resultados de la calibración sedimentológica y de la modelación morfológica. El Capítulo 4 presenta las conclusiones y recomendaciones arribadas en el estudio.

2. METODOLOGÍA

La zona de estudio se ubica en el río Pilcomayo a la altura de la población de Villamontes, en el Departamento de Tarija, al sur de Bolivia. El área de estudio comprende desde el Puente Ustarez hasta el Puente Ferroviario, con una longitud aproximada de 6 km. La zona de estudio pertenece al inicio de las llanuras del Chaco, al Este de la cordillera del Aguaragüe, donde termina la región montañosa del subandino [4]. El río Pilcomayo nace a más de 4.000 m.s.n.m. en la cordillera de los Frailes en Bolivia y desciende hasta Ibibobo con una altura inferior a 350 m.s.n.m., correspondiendo a la parte alta de la cuenca [5]. El río fluye en dirección sudeste, hacia las llanuras del Chaco en la región fronteriza entre Bolivia, Paraguay y Argentina [6]. La Figura 1 muestra la imagen satelital de la zona de estudio en el río Pilcomayo, apreciándose que la zona de estudio corresponde a un río de tipo “braseado” con actividad morfológica significativa [2].

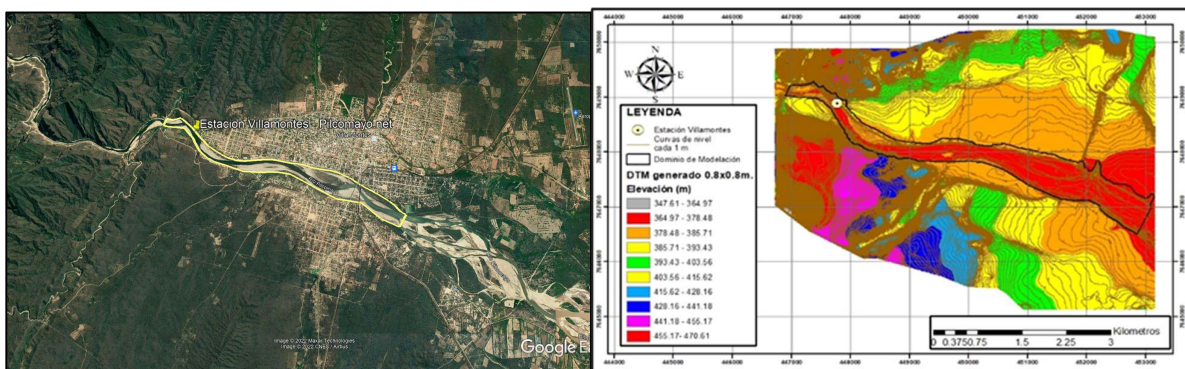


Figura 1: Ubicación y topobatemetría de la zona de estudio en el río Pilcomayo y de la Estación Villamontes.
Fuente: Elaboración propia.

La topobatemetría fue provista por el consorcio EPTISA-Campo D'Agua-RIMAC en fecha del 5 de noviembre de 2021, esta consta de puntos relevados en la zona del canal principal del río, los cuales han sido utilizados para la implementación de la batimetría en el modelo y la calibración hidrodinámica reportada en [3]. Sin embargo, para la implementación de los escenarios con caudales extremos, la topobatemetría inicial resulta insuficiente. Por este motivo, en fecha del 16 de febrero de 2022, el consorcio provee información topo batimétrica adicional (ver Figura 1).

La información hidrométrica fue obtenida de la Estación Villamontes, donde las mediciones se encuentran disponibles en la plataforma www.pilcomayo.net/hidrometria, implementada por la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo. A partir de los registros de caudales y alturas de flujo, [7] y [8] componen la curva de descarga H-Q para la estación Villamontes. Sin embargo, este tipo de curvas teóricas pueden verse afectadas por la actividad morfológica. En consecuencia, estas curvas deben actualizarse, según recomienda [7].

La información de transporte de fondo en el río Pilcomayo es escasa [9], los únicos datos colectados se refieren únicamente a la Estación Talula, a más de 300 km aguas arriba. [9] indica que el transporte de fondo alcanza al 12% del transporte total de sedimentos. De manera similar, otros estudios efectuados por [10], mencionan que el transporte de fondo en ríos de la zona Andina de Bolivia alcanza al 10% del total y en el río Pilcomayo alcanzaría hasta un 12% del total transportado. Los diámetros característicos reportados en la zona de estudio se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1 – DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MATERIAL COLECTADO DEL LECHO EN INMEDIACIONES DE ESTACIÓN VILLAMONTES

| Origen del material | D ₁₀ (mm) | D ₅₀ (mm) | D ₆₅ (mm) | D ₉₀ (mm) |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Material del lecho aguas abajo del Puente Ferroviario | 0,15 | 50 | - | 120 |
| Banco de sedimento fino en Estación Villamontes | 0,023 | 0,15 | 0,184 | 0,238 |
| Banco de sedimento grueso en Estación Villamontes | 34,00 | 65,00 | 85,00 | 120,00 |

Fuente: Elaboración propia.

Existe una mayor cantidad de mediciones para el transporte de sedimentos en suspensión. [9] presenta una compilación de las concentraciones de sedimentos en suspensión en la Estación Villamontes, con un valor de concentración media diaria de 7.549,7 mg/l. En julio de 2007, el laboratorio de sedimentología EVARSA publica los resultados de laboratorio de 12 muestras de material en suspensión en la Estación Villamontes. Estas muestras fueron colectadas en campo entre el 10/03/2007 y el 15/04/2007, con concentraciones que varían entre 773.55 y 36155.48 mg/L. Estos valores son acordes a lo reportado por [9]. Estos datos han sido complementados con la información recolectada de la página web de Pilcomayo.net, con registros desde el año 2011 hasta el año 2021, Figura 2.

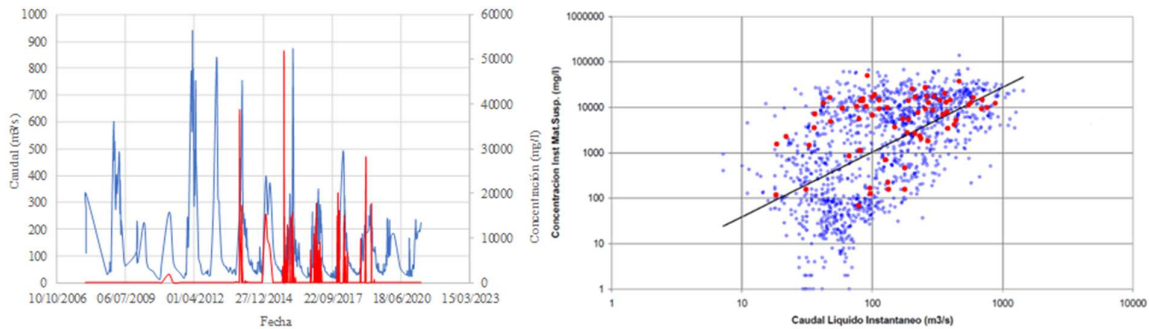


Figura 2: Concentraciones de sedimentos en suspensión para la Estación Villamontes período 2011-2021 (línea azul: caudal líquido; línea roja concentración sedimentos) y la relación caudal líquido vs. Concentración de sedimentos.

Fuente: Elaboración propia.

La relación existente entre el caudal líquido y la concentración de sedimentos en suspensión en sistemas fluviales es evidente, por lo que establecer una ecuación matemática que traduzca esta relación es usual en estudios de sedimentología. La relación se obtiene mediante un ajuste de regresión estadística, aplicando el método de los mínimos cuadrados, donde lo usual en el caso del caudal y la concentración de los sedimentos en suspensión, es utilizar una regresión de tipo potencial [12], dada por la siguiente ecuación:

$$C_s = aQ^b \tag{1}$$

donde C_s es la concentración de los sedimentos en suspensión, Q es el caudal líquido, a y b son coeficientes de la ecuación de regresión potencial. Esta relación es inicialmente propuesta por [9]; sin embargo, el comportamiento de las concentraciones de sedimentos con respecto a los caudales líquidos en la Estación tiene un carácter especial, debido a la presencia del fenómeno de histéresis, por esta razón la relación de concentración vs. caudal líquido no es unívoca, donde para un valor de caudal líquido se puede estimar dos valores distintos de la concentración de sedimentos en suspensión, uno para la época de estiaje y otro para la época lluviosa, lo cual muestra claramente la incidencia de la producción de sedimentos en la cuenca. La naturaleza temporal de la histéresis se puede evidenciar en la Figura 2, donde se muestra la relación discretizada en colores a nivel mensual y se intenta proponer dos ecuaciones de regresión para la relación.

El flujo del agua, conjuntamente con el transporte de sedimentos, conlleva a la ocurrencia de cambios morfológicos en los ríos, lo cual se evidencia en el caso del río Pilcomayo, Un análisis completo de la variación de la sección de medición en la Estación Villamontes se presenta en [13], donde se menciona que la sección de medición puede presentar variaciones en la profundidad de hasta 7 metros durante la ocurrencia de eventos extremos.

La modelación numérica se ha desarrollado mediante la aplicación del modelo computacional Delft3D suite 4, modelo disponible en código abierto. Este modelo resuelve las ecuaciones de flujo altura-promedio para la determinación de alturas y velocidades de flujo según se presenta en [14]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [hU]}{\partial x} + \frac{\partial [hV]}{\partial y} = S \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{w}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - f = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{w}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - fU = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma}) \quad (4)$$

donde las presiones P_x y P_y son dadas por aproximaciones Boussinesq, M_x y M_y representan las contribuciones de momentum debido a agentes externos (fuerzas externas debido a estructuras hidráulicas, descargas olas, etc.), F_x y F_y son determinadas usando el concepto de (Eddy viscosity) y por último la U , V y W representan las velocidades unitarias en las direcciones x , y y σ respectivamente, donde σ corresponde a la coordenada vertical. Adicionalmente, el módulo Delft3D-FLOW permite realizar simulaciones morfológicas a partir de los resultados de una simulación hidrodinámica, para ello hace uso de ecuaciones de transporte de sedimentos y la ecuación de Exner para el cálculo de la evolución morfológica, ecuación dada por [15]:

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial S_{b,x}}{\partial x} - \frac{\partial S_{b,y}}{\partial y} - E + D \quad (5)$$

donde λ_p es Porosidad del lecho (MPa), z_b denota la elevación del lecho (m), $S_{b,x}$ y $S_{b,y}$ son los componentes del transporte de sedimentos, D es la Tasa de deposición (m²/s) y E es la Tasa de erosión (m²/s). La elevación del lecho es actualizada dinámicamente a cada paso de tiempo computacional mediante el cálculo del cambio de masa de sedimento en el fondo. Este cambio de masa se convierte en la elevación del lecho como se muestra en la Ecuación (5), de esta manera se pueden simular procesos de erosión y deposición de sedimentos en el lecho.

La actividad morfológica en un río se clasifica en dos tipos: actividad morfológica a “corto plazo”, como resultados de un evento extremo de corta duración, y actividad morfológica a “largo plazo” como resultado de procesos hidrodinámicos y de transporte que se dan en un período de meses a años. Las simulaciones morfológicas a “largo plazo” requieren de un mayor tiempo de cómputo y por ende, un mayor esfuerzo computacional. Por esta razón se utiliza un "factor de escala de tiempo morfológico" (MorFac), mediante el cual, se pueden lograr simulaciones morfológicas largas utilizando simulaciones hidrodinámicas de solo una fracción de la duración requerida según [14] y [15]. Dicho factor funciona multiplicando los cambios en los sedimentos del lecho por un factor constante.

$$\Delta t_{morfológico} = f_{MOR} \Delta t_{hidrodinámico} \quad (6)$$

El valor del factor de escala morfológico es elegido en base a un buen juicio, experiencia, pruebas de sensibilidad y/o estudios previos. De acuerdo a lo definido por [15], las pruebas han demostrado que incluso con factores MorFac superiores a 1000 los cálculos permanecen moderadamente estables.

3. RESULTADOS

Una vez que el modelo ha sido calibrado hidrodinámicamente en [3], se procede a la segunda etapa del estudio que consiste en la calibración sedimentológica, donde el objetivo es el de utilizar los valores de rugosidad del lecho ya calibrados; y de esa manera poder reproducir las concentraciones de sedimentos en suspensión observadas en la Estación Villamontes, para lo cual se seleccionaron 6 eventos para la calibración sedimentológica. Los parámetros de calibración utilizados comúnmente en simulaciones sedimentológicas con el modelo computacional Delft3D se presentan en la Tabla 2. De esta manera, el proceso de calibración se ha realizado mediante el ajuste de estos parámetros de calibración y la comparación de las concentraciones observadas vs. calculadas para la Estación Villamontes.

TABLA 2 – LISTA DE PARÁMETROS DE SEDIMENTOS UTILIZADOS EN LA CALIBRACIÓN SEDIMENTOLÓGICA

| Parámetro de Sedimentos | Valor | Unidad |
|--|-------|-------------------|
| Densidad de las partículas de sedimentos | 2650 | kg/m ³ |
| Diámetro medio de la partícula d ₅₀ | 0,15 | mm |
| Espesor de la capa inicial de sedimentos | 5 | m |
| Factor de referencia de altura de Van Rijn | 1 | - |
| Espesor de sedimentos umbral | 0,05 | m |
| Factor de erosión de celdas adyacentes | 0 | - |

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar, se requiere la especificación de las condiciones de borde para el transporte de sedimentos, el cual es definido a partir de la relación existente entre el caudal líquido y la concentración de sedimentos en suspensión definido para la Estación Villamontes. Esta relación presenta una elevada histéresis, donde se observa que para un mismo caudal líquido se generan 2 concentraciones de sedimentos en suspensión. Sin embargo, para la especificación de las condiciones de borde se debe seleccionar la concentración que corresponde al período de ocurrencia del evento a simular. La calibración sedimentológica se realiza mediante la comparación de las concentraciones de sedimentos en suspensión observadas y calculadas en la Estación Villamontes, Tabla 3.

TABLA 3 – RESUMEN DE LAS CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN CALIBRADAS Y DE LOS INDICADORES ESTADÍSTICOS

| Evento | Concentración Observada (g/L) | Concentración Calculada (g/L) | RMSE | MAE | BIAS |
|--------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| E1 | 1,89 | 1,95 | 0,06 | 0,06 | 0,002 |
| E2 | 38,75 | 20,0 | 18,75 | 18,75 | 9,073 |
| E3 | 9,70 | 9,50 | 0,20 | 0,20 | 0,004 |
| E4 | 9,61 | 9,40 | 0,21 | 0,21 | 0,005 |
| E5 | 12,73 | 10,10 | 2,63 | 2,63 | 3,660 |
| E6 | 8,94 | 9,50 | 0,56 | 0,56 | 0,035 |

Fuente: Elaboración propia.

En los eventos 1, 3, 4, 5 y 6, los indicadores estadísticos presentan un grado de aproximación de los valores calculados calificado como “muy bueno” según se define en [16], mientras que en el caso de la Calibración 2, la cual presenta el valor más elevado de la concentración de sedimentos en suspensión, i.e. 38,75 g/L, la aproximación de los valores calculados, a pesar de presentar errores mayores al resto de las calibraciones, se pueden calificar de “buenos” según los mismos estándares mencionados por [16]. En todos los casos, la calibración efectuada ha permitido reproducir lo observado, por lo que es posible establecer que el modelo sería capaz de modelar escenarios de transporte de sedimentos de manera adecuada.

En el escenario de modelación morfológica a “largo plazo”, lo cual implica modelar procesos morfológicos que se puedan dar en un lapso de tiempo de “años”, según la metodología propuesta por [17], este tipo de modelación requiere de la aplicación de caudales medios, por ser los caudales más persistentes en el tiempo, además de ser los responsables de los cambios morfológicos a largo plazo. Para lo cual, se ha establecido un tiempo de modelación de 30 años. Por lo que, inicialmente, se ha generado una nueva malla computacional malla numérica más “gruesa” (diferente de la utilizada en el proceso de calibración), lo cual requiere de un paso de tiempo mayor, reduciendo el tiempo de cómputo, esta malla está compuesta por 25.620 celdas, con dimensiones aproximadas de 5 a 10 metros.

Adicionalmente, la modelación morfológica a largo plazo puede ser acelerada mediante el uso del Factor Morfológico, conocido como MorFac. Mediante este factor se pueden lograr simulaciones morfológicas largas utilizando simulaciones hidrodinámicas de solo una fracción de la duración requerida según mencionan [14] y [15]. El valor del factor de escala morfológico es elegido en base a un buen juicio, experiencia, pruebas de sensibilidad y/o estudios previos. De acuerdo a lo definido por [15], las pruebas han demostrado que incluso con factores MorFac superiores a 1000 los cálculos permanecen moderadamente estables. En el presente caso, el tiempo de modelación se ha definido en 7 días, y se ha asignado un valor de 1560 para el factor morfológico MorFac, valor que multiplica al tiempo de simulación produciendo un tiempo morfológico de 30 años.

Para este escenario se ha definido el caudal medio de 213,4 m³/s como condición de borde para el ingreso de flujo al dominio. Para la condición de borde de salida, se ha utilizado la curva de descarga previamente definida en el proceso de calibración del modelo. Adicionalmente, los parámetros para el transporte de sedimentos son los mismos definidos en el proceso de calibración sedimentológica del modelo. El resumen de los datos prescritos para los escenarios de modelación morfológica a largo plazo se presenta en la Tabla 4.

TABLA 4 – RESUMEN DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LOS ESCENARIOS MORFOLÓGICOS DE LARGO Y CORTO PLAZO

| Datos | Valores Largo Plazo | Valores Corto Plazo | Descripción |
|--|-------------------------|------------------------|---|
| Tiempo de cómputo | 7 días | 4 días | |
| Paso de tiempo Δt | 3 seg. | 0.12 seg. | |
| Caudal ingreso | 213,4 m ³ /s | Hidrograma | |
| Cond de borde salida | Curva HQ | Curva HQ | Curva de descarga |
| Concentración sedimentos entrada | - | 10 kg/m ³ | El modelo asume la condición de equilibrio |
| Coeficiente de rugosidad | 0,07 | 0,032 | Coef. de Manning obtenido de curva teórica |
| Viscosidad turbulencia | 1 m ² /s | 1 m ² /s | Valor obtenido de calibración hidrodinámica |
| Difusividad de turbulencia | 2 m ² /s | 2 m ² /s | Valor obtenido de calibración sedimentológica |
| Factor morfológico MorFac | 1560 | - | Para modelación de 30 años |
| Densidad de los sedimentos | 2650 kg/m ³ | 2650 kg/m ³ | Material de tipo arena |
| Diámetro de sedimentos D ₅₀ | 0.15 mm | 18 mm | Valor obtenido de [9] |

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la modelación morfológica a largo plazo, muestran la formación de un canal único como resultado de la erosión del lecho y el efecto persistente del caudal de flujo prescrito en el modelo. Adicionalmente, se observa la desaparición del canal de desvío que alimenta a la obra de toma de la margen derecha, lo cual sugiere que en esta zona debe realizarse trabajos de mantenimiento periódicos con el objetivo de mantener el flujo en el canal de desvío.

La Figura 3 presenta la evolución de la morfología de la zona de estudio. El proceso morfológico es continuo, con deposiciones a lo largo del canal principal de hasta 1 metro, y erosión en el canal principal del río de hasta 4 metros, consolidándose un único canal principal, el que aparentemente habría alcanzado un equilibrio, ya que no se evidencia erosión ya a partir de los 10 años. Sin embargo, este aspecto debe ser refrendado con un monitoreo del transporte de sedimentos y de la morfología del lecho para poder implementar un modelo numérico más completo.

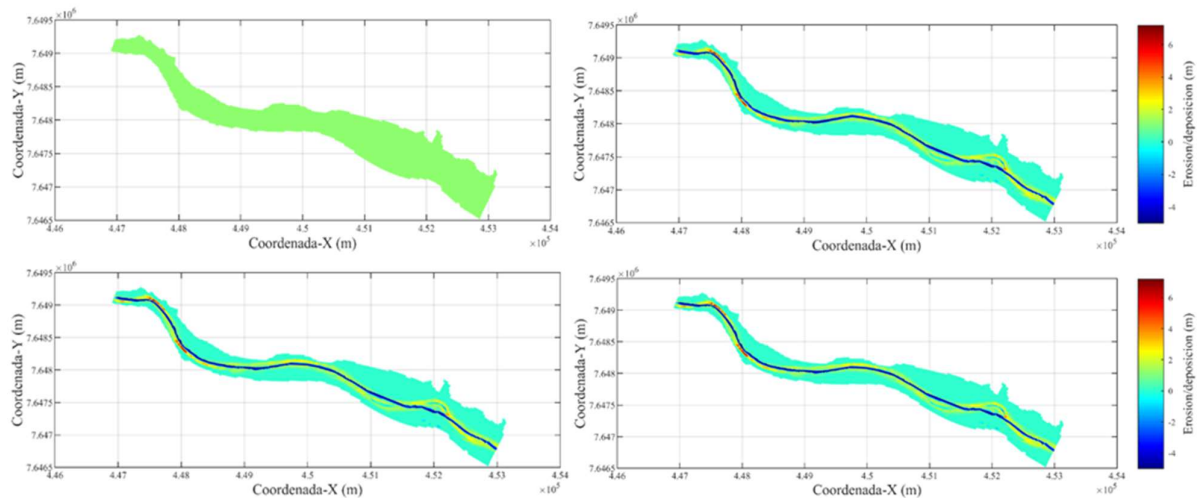


Figura 3: Resultados para la erosión y sedimentación calculadas en la modelación morfológica de “largo plazo”.

Fuente: Elaboración propia.

En el escenario de modelación morfológica a “corto plazo”, lo cual implica modelar la zona de estudio para procesos que se puedan dar en un lapso de tiempo de “días”, se requiere modelar un evento extremo, requiriéndose un hidrograma de crecida, estableciendo como tiempo de modelación, al mismo tiempo de duración del evento extremo. Para este escenario, se ha generado una nueva malla computacional (diferente de la utilizada en el proceso de calibración), la cual está compuesta por 11.882 celdas, con dimensiones aproximadas de 8 a 15 metros.

En el presente caso no se requiere del uso del factor morfológico, debido a que la duración de la modelación es de “días” únicamente. Para la prescripción de las condiciones de borde, se ha hecho uso del hidrograma de crecida correspondiente al período de retorno de 100 años, este hidrograma se ha definido únicamente para un tiempo de duración de 96 horas, partiendo de un caudal base de aproximadamente 200 m³/s, y terminando en un caudal de 3858 m³/s. Para la condición de borde de salida, se ha utilizado la curva de descarga previamente definida en el proceso de calibración del modelo. Adicionalmente, los parámetros para el transporte de sedimentos son los mismos definidos en el proceso de calibración sedimentológica del modelo. El resumen de los datos se presenta en la Tabla 4.

Los resultados de la modelación morfológica a corto plazo, muestran de manera ilustrativa la dinámica morfológica de la zona de estudio durante la ocurrencia de un evento extremo. El río Pilcomayo, en el tramo de la zona de estudio, se cataloga como un río del tipo “braceado”, donde el curso principal cambia continuamente de dirección, además de presentar divisiones y uniones en su curso, y todo en un lapso de tiempo corto, i.e. días. La Figura 4 presenta la evolución de la erosión y sedimentación. El proceso morfológico es continuo, con deposiciones a lo largo del canal principal de hasta 20 metros, y erosión de hasta 10 metros. Este comportamiento que ocurre durante una crecida, fue ya observado y comentado por [13], observándose una erosión de hasta 7 metros en Estación Villamontes.

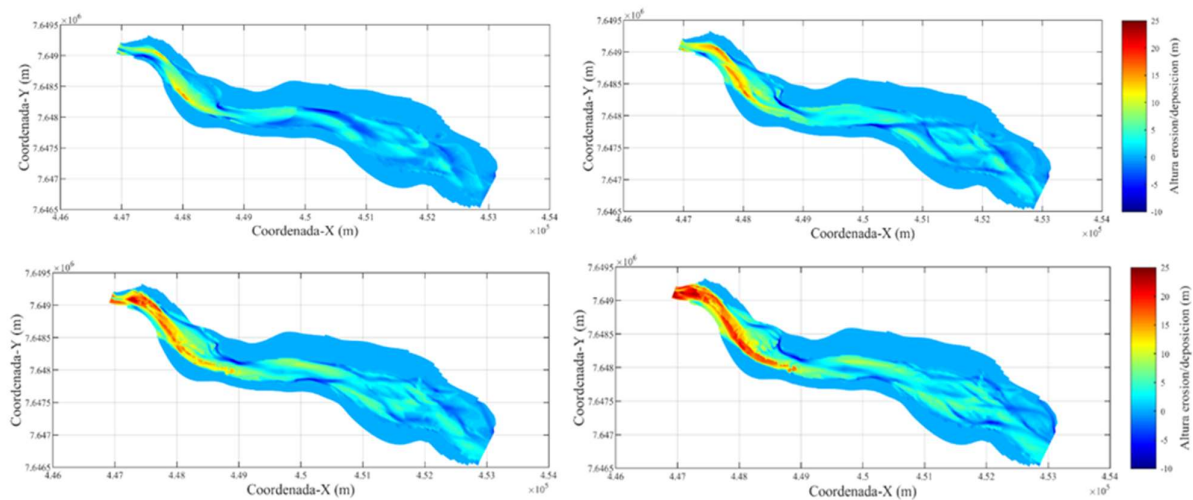


Figura 4: Resultados para la erosión y sedimentación calculadas en la modelación morfológica de “corto plazo”

Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El modelo numérico ha sido implementado y calibrado sedimentológicamente. Durante el proceso de calibración se ha aplicado una serie de indicadores estadísticos que han permitido determinar el grado de bondad del modelo computacional en la reproducción de eventos observados, pudiéndose observar que el desempeño del modelo numérico puede ser calificado de “bueno” a “muy bueno”.

En la modelación morfológica a largo plazo, los resultados sugieren que el canal principal del río experimentaría un proceso de erosión sostenido en los primeros 10 años para luego estabilizarse, dando lugar a un proceso de sedimentación en las orillas. Sin embargo, este análisis morfológico a “largo plazo” no toma en cuenta la ocurrencia de eventos extremos, los cuales son los principales responsables de los cambios morfológicos que ocurren en la zona de estudio. Estos eventos, principalmente, se caracterizan por la erosión del material presente en el río, lo cual ocurre en lapsos de tiempo cortos según se sugiere en [13]. Mientras que los resultados de la modelación morfológica a corto plazo sugieren que el río Pilcomayo, en la zona de estudio, experimentaría una intensa actividad morfológica, lo cual es acorde con el comportamiento que presentan los ríos “braceados”, donde el curso principal del río se desplaza de forma continua, dando lugar a diversos brazos en un mismo tramo. Adicionalmente, los resultados de la modelación muestran que el

lecho del río experimentaría un intenso proceso erosivo en las primeras horas del evento, dando lugar luego a un proceso de sedimentación continua, comportamiento que es acorde a lo reportado por [13].

Es imprescindible ganar comprensión de la dinámica del río Pilcomayo cuando está saliendo de la montaña y está ingresando a la llanura. Por lo tanto, es necesario considerar la instalación de una estación hidrométrica en el río (aparte de la estación Villamontes), aprovechando la estructura del puente ferroviario existente. Adicionalmente, parece pertinente batimetrías periódicas en la zona de estudio para poder determinar de mejor manera la evolución morfológica del río.

REFERENCIAS

- [1] J. D. Brea y P. Spalletti, «Avances, retrocesos y estancamientos sobre el conocimiento de los procesos fluviales del Río Pilcomayo», en *5to Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Santiago del Estero, Argentina, 2011.
- [2] J. T. Martín-Vide, M. Amarilla, y F. J. Zárate, «Collapse of the Pilcomayo River», *Geomorphology*, vol. 205, pp. 155-163, 2014.
- [3] M. Heredia, M. Romero, y G. Muñoz, «Desafíos en la modelación numérica hidrodinámica de ríos morfológicamente activos: Caso de estudio del río Pilcomayo en Bolivia», en *XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IAHR Publishing, 2022, ISBN 978-90-832612-4-9.
- [4] J. Molina y D. Espinoza, «Balance hídrico superficial de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo», *Informe Final*, Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA, La Paz, Bolivia, 2006.
- [5] INA, «Determinación de la Producción de Sedimentos por Erosión Superficial en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo», *Informe de Avance N°1-LHA 01-628-07*, Ezeiza, 2007.
- [6] J. P. Martín-Vide, S. Capape, y C. Ferrer-Boix, «Transient scour and fill. The case of the Pilcomayo River», *Journal of Hydrology*, vol. 576, pp. 356-369, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.041>.
- [7] P. Vauchel, A. Malbrunot, y R. Aguilar, «Análisis, crítica y tratamiento de los datos hidrométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo disponibles aguas arriba de Misión La Paz (Argentina)», *Proyecto Pilcomayo - SENAMHI – IRD – IHH – PV, AM, IAR*, 2006.
- [8] P. Ribstein y J. Peña, «Estudio Hidrológico para la Protección contra las Inundaciones de Villamontes», *Informe Técnico*, 1990.
- [9] A. Malbrunot, «Sedimentology of the upper part of Pilcomayo Basin», *Informe de Estudio*, Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, 2006.
- [10] G. Palenque, «Análisis de las Ecuaciones para el Transporte de la Carga de Fondo», *Tesis de Grado*, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 1981.
- [11] EVARSA, «Análisis Granulométrico y determinación de la concentración del material en suspensión de muestras líquidas extraídas en la zona de divagación del río Pilcomayo», *Informe de Resultados de Laboratorio*, 2007.
- [12] N. Asselman, «Fitting and interpretation of sediment rating curves», *Journal of Hydrology*, vol. 234, pp. 228-241, 2000.
- [13] A. Testa Tacchino, «Caracterización hidráulica de los procesos de crecida del río Pilcomayo en la Cuenca Baja Superior», *Tesis Doctoral*, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2017.
- [14] G. R. Lesser, J. A. Roelvink, J. A. T. M. van Kester, y G. S. Stelling, «Development and validation of a three-dimensional morphological model», *Coastal Engineering*, vol. 51, no. 8–9, pp. 883–915, 2004.
- [15] Deltares, *User Manual Delft3D-Flow, Simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments*, Delft, The Netherlands, 2022.
- [16] A. Donigian, «Calibration and Verification Issues», *HSPF Training Workshop Handbook*, Washington DC, 2000.
- [17] M. F. Yossef, H. R. A. Jagers, S. Van Vuren, y J. Sieben, «Innovative techniques in modelling large-scale river morphology», en *River Flow 2008*, Cesme, Izmir, Turkey, pp. 1065-1074, 2008.