

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SANTIAGO, CHILE, AGOSTO 2014**

**HIDRÁULICA DEL RÍO PILCOMAYO EN EL TRAMO ENTRE
VILLAMONTES Y MISIÓN LA PAZ: CARACTERIZACIÓN Y
RESTRICCIONES**

***Alejo J. S. Testa Tacchino^{1,2,3,4}, Érica B. Díaz^{1,2,3}, C. Marcelo Baldissone^{2,3,5},
M. Alejandra Cristanchi⁶, Mariana Pagot^{2,3}, Leticia Tarrab^{2,3}, Horacio Herrero^{1,2,3},
Mariano Corral^{2,3}, Claudio Laboranti⁶, Andrés Rodríguez^{1,2,3}.***

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ²Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Cs. Exactas Físicas y Naturales (FCEFYN) –Univ. Nacional de Córdoba (UNC), ³Centro de Estudios y Tecnología del Agua, FCEFYN – UNC, ⁴Instituto Superior de Estudios Ambientales ISEA–UNC ⁵CIRSA–INA, ⁶Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.

País: Argentina alejotestat@gmail.com

RESUMEN:

El río Pilcomayo es estratégico para el desarrollo del Norte Argentino, en particular para las Provincias de Jujuy, Salta y Formosa. La mayor parte de la cuenca activa se encuentra en Bolivia y luego es límite entre Argentina y Paraguay hasta la zona de Embocadura donde las aguas son distribuidas entre ambos países, siguiendo aguas abajo cursos naturales como el Bañado La Estrella y Río Monte Lindo.

La estación de Aforos de Villamontes (VM) nos proporciona los caudales de ingreso a Argentina/Paraguay y la de Misión la Paz (MLP) los que continúan hacia el Sistema Distribuidor que divide las aguas entre Argentina y Paraguay.

Son diversas las complejidades de este río que imponen restricciones a su análisis hidráulico. Una de ellas es que todavía falta calibrar las curvas H-Q para caudales elevados, debido a no contar con registros de aforos en época de crecida, y la gran variabilidad de la sección de MLP que demanda aforos y cálculos de las curvas H-Q para cada evento. Además, en el tramo se producen numerosos desbordes que dificultan la estimación de los caudales erogados hacia Argentina y Paraguay. Este último, tema de preocupación bilateral manifestado en diversos acuerdos con el fin último de conseguir una equitativa distribución del recurso.

Se presenta una modelación hidráulica unidimensional del tramo contemplando los desbordes con una muy buena aproximación a lo medido, representando la crecida de Enero-Febrero de 2103, además se analiza el movimiento del fondo durante esta crecida y un análisis de excedencia de caudales, que sumado a trabajos previos con imágenes satelitales permite abordar por diferentes metodologías el estudio de los caudales para los que se activan los desbordes. Además se actualiza el análisis con imágenes incorporando las del año 2014, que nos permite en este caso, estimar la velocidad del frente de avance del desborde El Chañaral un día después de producido el desborde.

ABSTRACT:

The Pilcomayo River is a strategic watercourse for northern Argentina, particularly the provinces of Jujuy, Salta and Formosa. Most of its active basin is located in Bolivia, and further southeast the river becomes the limit between Argentina and Paraguay up to the region of “La Embocadura”, where the water is artificially distributed between both countries, and then flows downstream to natural courses like “Bañado la Estrella” and “Río Monte Lindo”.

The gauge station in Villamontes (VM) give us flow values entering Argentina/Paraguay, and the one in Misión la Paz (MLP) offer us the flow into the distribution system between Argentina and Paraguay.

The major hydraulic problems encountered in the basin are the need to calibrate the H-Q curves and the high variability of MLP section that demands gauging and H-Q curves for each event. The reach has many overflows, which make the measurement of the flows into Argentina and Paraguay a difficult task. This is a concerning bilateral problem expressed in many agreements in order to achieve a fair distribution of this resource.

A One-Dimensional hydraulic flood routing of the reach is modelled including the overflows with accurate estimates in relation to the gauged values, representing the flood of January-February 2013. Moreover, a river bed movement and a flow exceedance analyses were carried out. Together with previous studies using satellite imagery, these two methodologies are used to look into the flows activating the overflows. In addition, the imagery analysis is updated with those obtained for 2014, which in this case, allow us to estimate the speed of the advancing front of the overflow named "El Chañaral".

PALABRAS CLAVES: *Río Pilcomayo, Modelación Hidráulica, Desbordes, Imágenes Satelitales.*

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Pilcomayo abarca una superficie de 288.360 km² y es parte integrante de la gran Cuenca del Plata. Su cuenca se divide en dos, la cuenca alta de montaña con cota hasta 5700 msnm y la cuenca baja de llanura con cota desde 400 msnm hasta 50 msnm. El área de estudio está comprendida entre Villamontes, Tarija, Bolivia (21°15' S; 63°28' O) a 407 msnm y Misión La Paz, Salta, Argentina (22°35' S; 62°23' O) a 230 msnm (Halcrow & Serman, 2007). La ciudad de Villamontes es considerada el punto de salida de la cuenca alta, y su importancia reside en proporcionar los caudales líquidos y sólidos de entrada a la cuenca baja.

Son conocidas las numerosas particularidades de este río que presenta un transporte medio anual de sedimentos de 140 millones de toneladas (Martín Vide, Amarilla, Gamarra, & Zárate, 2006) y caudales que oscilan entre 37 m³/s y 6500 m³/s en la localidad de Villamontes. Entre los problemas que caracterizan este río podemos encontrar numerosas zonas de desbordes, el más importante de ellos, denominado El Chañaral, anega áreas de hasta 180 km². Además, el río presenta una extinción del cauce 220 km aguas abajo de Villamontes (Pool & Van Duijne, 1996). El río no desemboca en el río Paraguay, como se esperaría, sino que pierde su cauce y llega por medio de bañados y riachos, sin una conexión superficial entre lo que se conoce como Pilcomayo Superior e Inferior, subdivisiones de la cuenca baja.

En trabajos previos (Testa Tacchino & Baldissone, 2013) se han caracterizado los desbordes que ocurren en el tramo comprendido entre Villamontes (VM) y Misión la Paz (MLP), y se ha encontrado que la mayor dificultad reside en la obtención de las curvas Altura-Caudal (H-Q) en MLP consecuencia de la movilidad de esta sección y el impedimento de medir velocidades con técnicas convencionales (molinetes) por encima de la lectura de escala de 4,5 m. El objetivo que se plantea este trabajo es analizar características hidráulicas de este tramo como su capacidad de conducción, zonas de desbordes, rugosidades y curvas H-Q en sus extremos (MLP y VM) y variabilidad de las mismas.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para este trabajo se ha procesado información de imágenes satelitales, series de aforos hidrométricos provenientes de estaciones claves en el río, e información topográfica. Se han utilizado herramientas de SIG, CAD y de modelación hidráulica. Se han recolectado imágenes Landsat 5, 7 y 8 disponibles en fechas cercanas a crecidas importantes del río Pilcomayo, de acuerdo a caudales

registrados en las estaciones de las ciudades Villamontes (VM) y Misión la Paz (MLP). En la Figura 1 se observan cuatro zonas de desbordes denominadas: El Chañaral, La Gracia, La Puerta y Pozo Hondo.

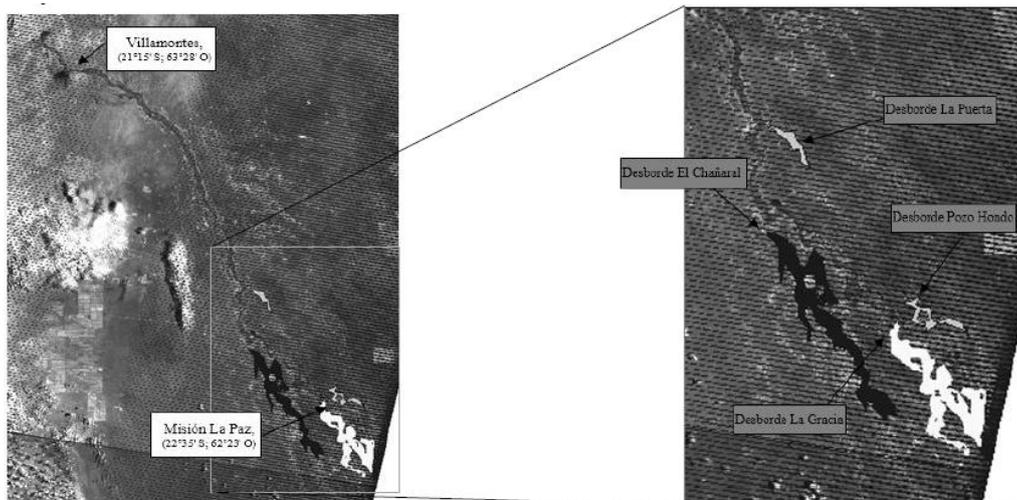


Figura 1.- Estaciones del tramo en estudio y zonas de desbordes. Imágenes Landsat 7, 25 de Enero 2013.

Tanto la sección de Villamontes como la de Misión la paz no son constantes durante la crecida. En particular la de MLP requiere que se calcule una curva H-Q para cada evento. No existe, por el momento, una única curva H-Q válida para distintas condiciones hidrológicas. Las imágenes (procesadas en falso color) fueron obtenidas del USGS para el periodo 1982-2014, y se seleccionaron aquellas en las cuales se observaron manchas de agua en zonas que ya han sido determinadas como de posibles desbordes en trabajos previos realizados en el LH-CETA.

Para los años seleccionados (1999, 2005, 2006, 2008 y 2013) se procedió a la interpretación de las imágenes, identificando los contornos de los espejos de agua para luego calcular sus áreas y longitud máxima. En trabajos previos, en los que se trabajó con imágenes de hasta el año 2013 se concluyó que:

Los desbordes El Chañaral y La Gracia están activos para caudales de 2700 m³/s, siendo el caudal requerido para que desborde La Gracia superior al de El Chañaral. Todos los desbordes se activan para caudales en VM de 3500 m³/s.

Así mismo se ha evaluado el efecto de los desbordes en MLP que regulan el caudal que llega a esta ciudad, que para el periodo en estudio, no supera los 3000 m³/s incluso si el caudal en VM es cercano a los 7000 m³/s.

Se ha determinado que para una diferencia de volúmenes de 495 hm³ entre VM y MLP, en el año 2008, en 8 días se logra evacuar toda el agua de las zonas inundadas por los desbordes.

Se ha establecido que se podría hablar de una tasa de reducción de área inundada de 1,9 a 4,5 km²/día para El Chañaral y de 7,5 a 9 km²/día para La Gracia.

Se pudo observar una relación lineal entre la longitud de la mancha de inundación (l en km) y su área (A en km²).

$$A = 3,0 \cdot l - 10,6 \quad [1]$$

Análisis de imágenes satelitales para la crecida de 2014

Aquí se presentan las imágenes del año 2014 (Figura 2), que permiten, además de verificar que las predicciones hechas en trabajos anteriores son válidas, calcular la velocidad del frente de avance. Se poseen para este caso una imagen de la zona de desborde del día 5 de Febrero a las 21:48 hs (Q= 995 m³/s en VM y 921 m³/s en MLP) y otra del día 6 de Febrero a las 11:00 hs (Q=876 m³/s en VM y 624 m³/s en MLP). El área inundada para el día 5 de febrero fue de 114,19 km² con una longitud de 47,78 km y para el día 6 de febrero de 116 km² de superficie y 48,51 km de longitud. El pico de caudal fue de 5073 m³/s el 2 de febrero en VM y de 2458 m³/s el día 3 de Febrero en MLP. Los caudales mencionados precedentemente fueron obtenidos a partir de curvas H-Q.

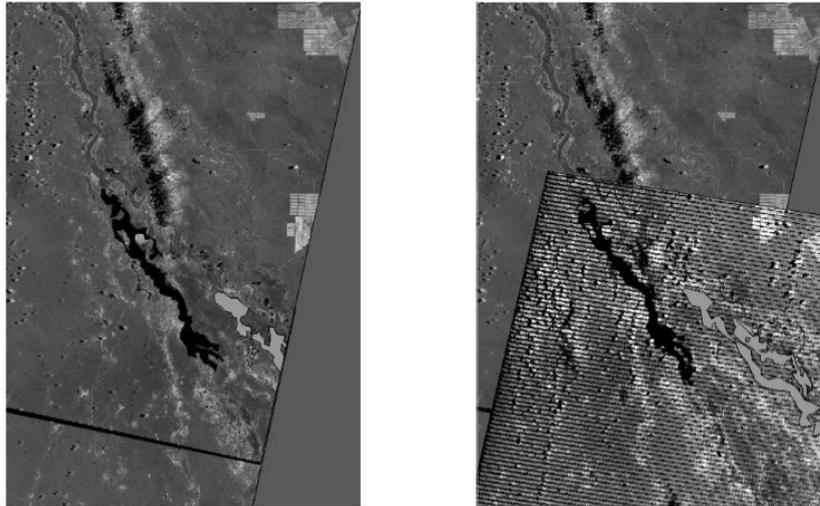


Figura 2.- Delimitación de Desbordes, **Izq.)** Imagen Landsat 8, 5 de Febrero de 2014 **Der.)** Imagen Landsat 7, 6 de Febrero de 2014.

En las imágenes se observa el avance del frente del desborde El Chañaral que totaliza 3740 m en cerca de 14 hs, resultando en una velocidad de avance de 6,80 km/día. Se calculó en el trabajo citado que en el año 2006 el frente avanzó 7,2 km en 8 días (tiempo entre dos imágenes disponibles) o una velocidad de avance media de 900 m/día.

Modelación unidimensional del tramo para la crecida de 2013

Se realizó un modelo unidimensional con HEC-RAS (USACE, 2010). Se realizaron dos modelaciones digitales de terreno (MDT), una a partir de la misión SRTM (USGM, 2006) y otra a partir de imágenes ASTER-GDEM (NASA LP DAAC, 2008) (Figura 3). La imagen ASTER es el resultado de la combinación de varias imágenes que cubren el área para lograr una conexión más suave con las áreas colindantes, como consecuencia no se puede determinar la fecha de adquisición. La imagen del SRTM fue obtenida por un sistema de radar modificado, que viajó a bordo de un taxi espacial, en una misión de 11 días entre el 11 y el 22 de febrero de 2000. En este mes las aguas del Pilcomayo son altas, no obstante para este periodo de tiempo se registraron caudales entre 200 m³/s y 300 m³/s en la estación de MLP.

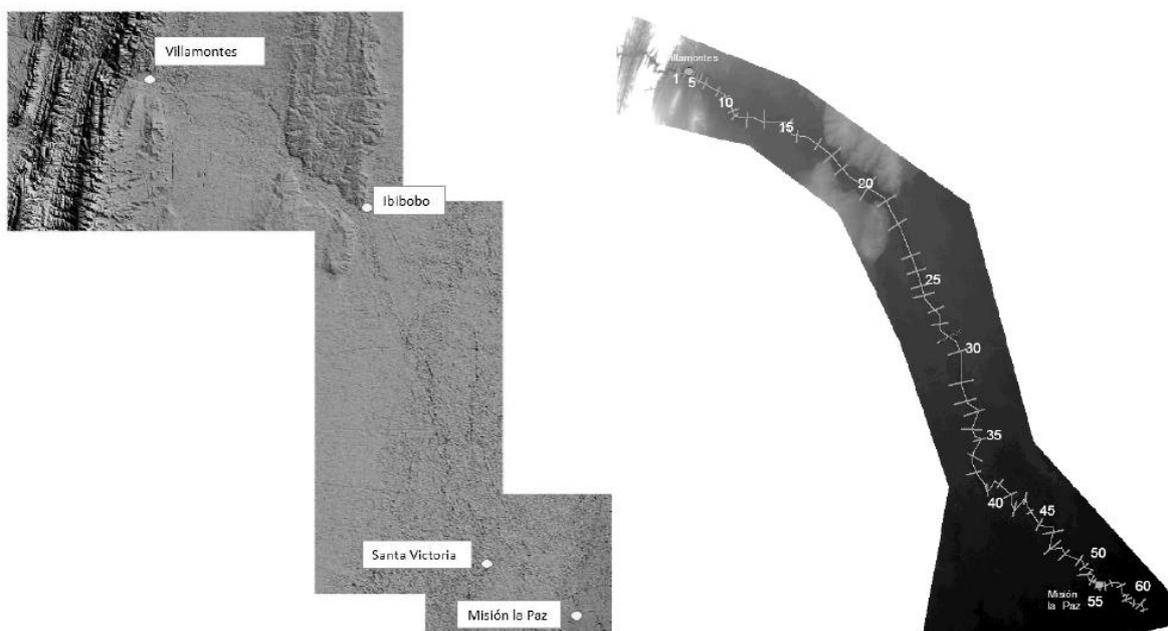


Figura 3.- **Izq.)** Imagen ASTER con localidades de referencia, **Der.)** Imagen SRTM con traza longitudinal del río y secciones transversales modeladas.

En este trabajo se presenta la modelación 1D de la crecida del año 2013. Se tomaron 62 secciones transversales comprendiendo el tramo ente VM y MLP (Figura 3). Estas secciones se tomaron con el criterio de mantener la pendiente media, evitando ruidos locales. Se toma como progresiva 0 m la sección 62. Las secciones de aforo de Villamontes y Misión la Paz coinciden con la Sección 3 (progresiva 209634,5 m) y la Sección 54 (progresiva 16006 m), respectivamente.

Se compararon los perfiles longitudinales obtenidos mediante ASTER y SRTM (Figura 4), observándose que el SRTM tiene pendientes suaves, mientras el ASTER presenta mayor variabilidad.

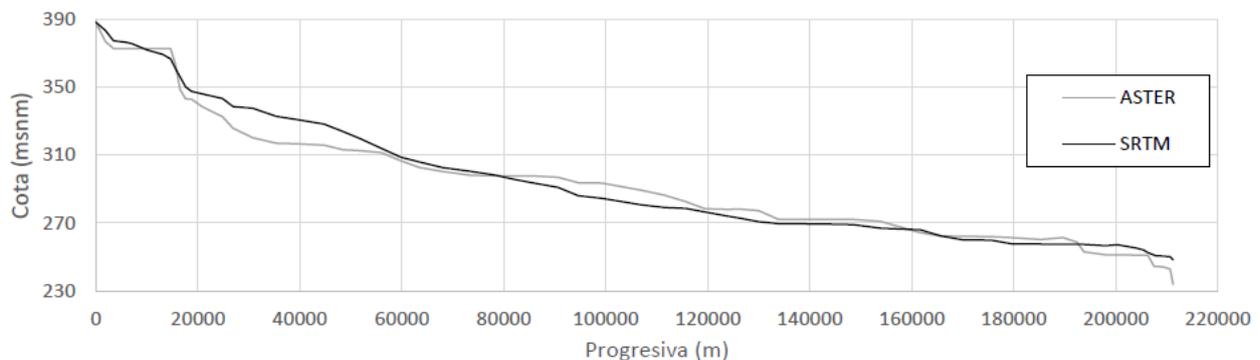


Figura 4.- Perfiles Longitudinales por el fondo del río MDT ASTER y SRTM.

Además se comparó el relieve entre de las márgenes con datos del IGM de Bolivia. En la Figura 5 se comparan las cotas de la margen derecha del MDT SRTM y ASTER con las cotas de terreno proporcionados por el IGM Bolivia. La imagen ASTER presenta mucho ruido.

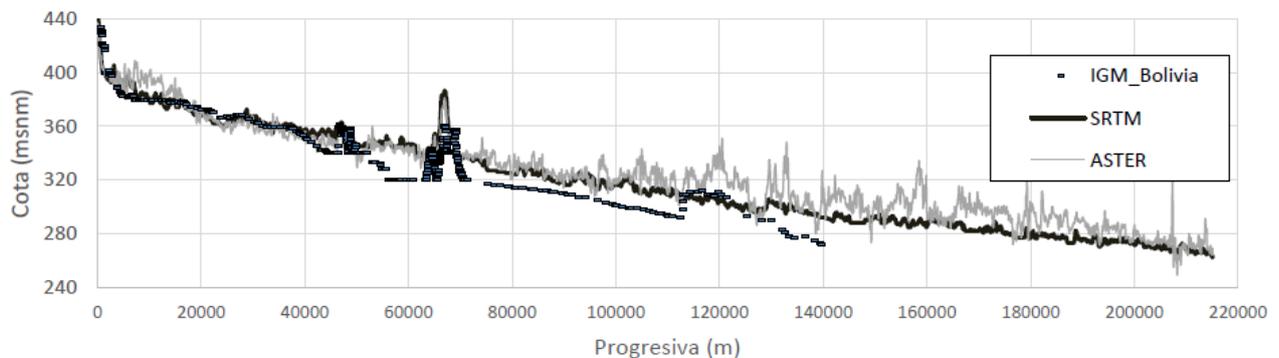


Figura 5.- Perfiles longitudinales por margen derecha a partir de ASTER, SRTM y cartografía IGM-Bolivia.

Para la crecida del 2013 se poseen 2 aforos en Villamontes y 15 en Misión la Paz. Se compararon las secciones de los aforos en VM con las proporcionadas por los modelos digitales de terreno SRTM y ASTER. Se desplazaron las secciones de SRTM y ASTER hasta hacer que coincidiera el ancho de la superficie de agua de los aforos con las márgenes de los MDT para estimar los tirantes en el momento de las imágenes (Figura 6). También se observa que la sección de Villamontes varía para la crecida con un desplazamiento del fondo del cauce.

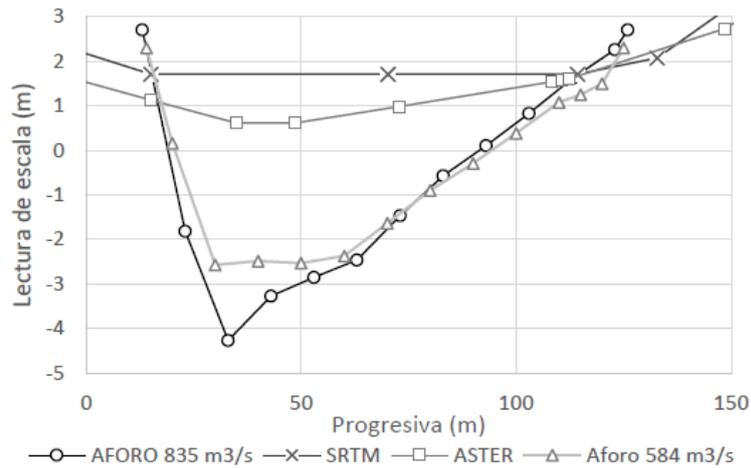


Figura 6.- Sección de VM según ASTER, SRTM y dos aforos con 835 m³/s y 584 m³/s de caudal.

Se observó así, que el SRTM presenta, en el punto correspondiente al talweg, un nivel de superficie de agua de 1,30 m por encima del ASTER, y 4,30 m con el nivel de la superficie de agua del aforo del día 24 de febrero de 2013 (Q= 584 m³/s). Para una lectura de escala de 1,7 m, según la curva H-Q de Villamontes, corresponde un caudal de 230 m³/s en el caso del SRTM. Para el ASTER, tomando una lectura de escala de 0,80 m y 1,00 m el caudal correspondiente sería 33 m³/s y 48 m³/s respectivamente.

A partir del ancho superficial medido sobre imágenes satelitales se desciende el fondo del cauce para que pueda transportar estos caudales sin consumir sección del MDT, con la ventaja, además, que ayuda a la estabilidad de la modelación.

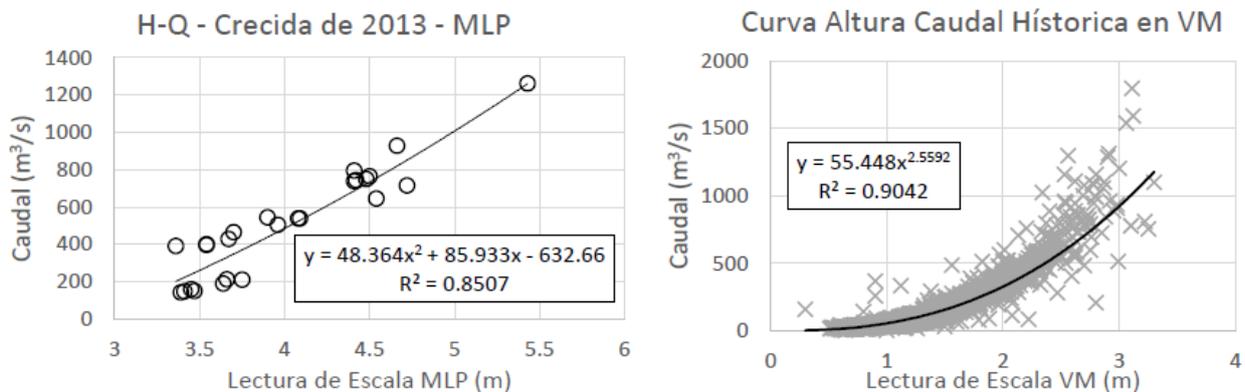


Figura 7.- Curvas Altura vs Caudal de las secciones **Izq.)** MLP (2013) **Der.)** VM (1973-2013).

Como ya se ha referido se poseen aforos en VM y MLP, en la Figura 7, se presentan las curvas H-Q. Recordemos que la sección de MLP es muy inestable, por lo que la curva se calculó a partir de aforos durante la crecida. Otra de las restricciones es que no se poseen aforos para caudales elevados en ninguna de las dos estaciones. En este caso para Villamontes se utiliza la curva H-Q histórica, pero se reconoce que los caudales que proporciona para lecturas de escalas altas son muy elevados. Actualmente no se puede establecer con certeza cuales son los caudales máximos alcanzados en VM. Otra particularidad es que en el tramo VM-MLP ocurren diversos desbordes que regulan el caudal que arriba a MLP. Estos desbordes se modelaron con un vertedero lateral en la progresiva de la zona de desborde de El Chañaral (progresiva 70260 m), que produce el efecto de eliminar caudal del sistema (Figura 8). El volumen desbordado según los hidrogramas medidos es de 921 hm³ y según el modelo de 770 hm³

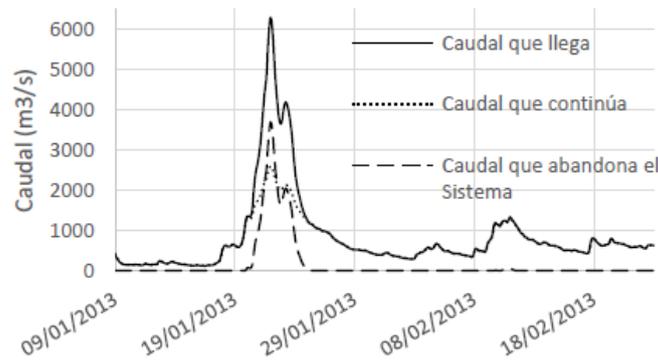


Figura 8.- Efecto del vertedero lateral en la modelación 1D.

Se poseen las lecturas de escala horarias para VM y MLP. A partir de estas lecturas en VM se obtiene el hidrograma de entrada al modelo utilizando la curva H-Q y el hidrograma de MLP se utiliza para observar la calidad de los resultados. Se trabajó con ambos MDT con un coeficiente de manning $n=0.019$ que dio resultados más próximos a los medidos. Se presentan también en la Figura 9 los resultados sin vertedero lateral, situación que podría pensarse posible en el caso hipotético de que no hubieran desbordes aguas arriba de MLP.

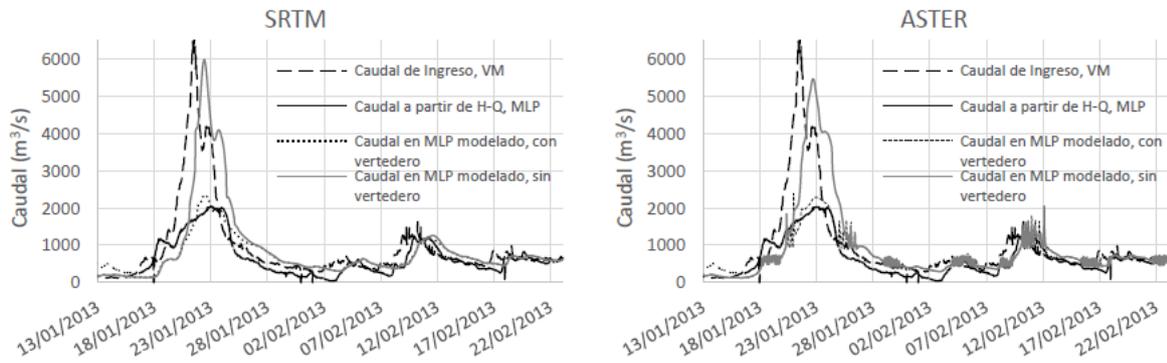


Figura 9.- Resultados de la modelación con y sin vertedero lateral y valores a partir de la curva H-Q para MLP. Izq.) MDT SRTM Der.) MDT ASTER

La Figura 10 compara solamente los valores con vertedero, se observa que los resultados de ambos modelos son muy similares entre sí y que el modelo con MDT de ASTER presenta mayor ruido. Al comparar con los caudales medidos, se observa que hay un despegue de los resultados del modelo en la rama ascendente del hidrograma y después del punto de inflexión de la rama descendente. No obstante el volumen de agua debajo de la curva es similar.

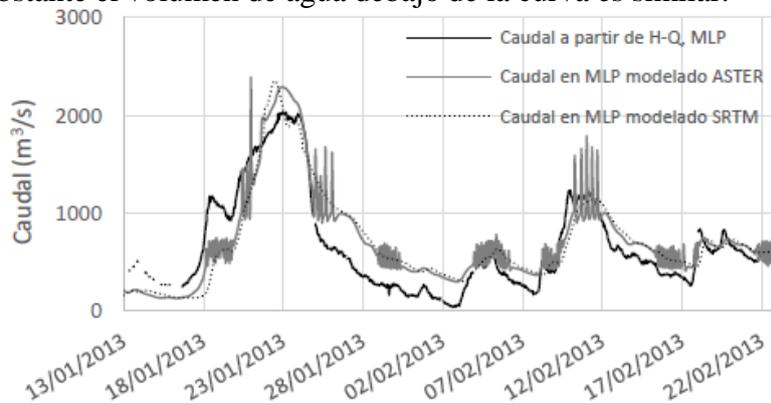


Figura 10.- Resultados de la modelación con MDT SRTM y ASTER con vertedero lateral y valores a partir de la curva H-Q para MLP.

La Figura 11 presenta la correlación entre los valores medidos y los modelados, en este caso se presenta para MDT de SRTM, pero ambas son muy similares. Se observa que los caudales

modelados, con MDT SRTM, son menores que los medidos para caudales bajos y mayores para caudales altos.

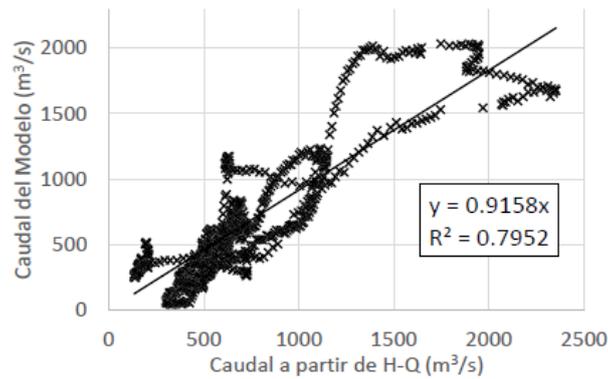


Figura 11.- Correlación entre caudales obtenidos a partir de H-Q los resultados de la modelación con vertedero lateral, MDT de SRTM.

Curva de excedencia de caudales

Se realizó un análisis de frecuencia considerando los últimos 35 años de caudales líquidos medios diarios en VM y MLP (Figura 2.b). Se observa una diferencia constante de 15 m³/s para valores con una probabilidad de excedencia mayor a 0,02, que se podrían considerar las pérdidas por evapotranspiración e infiltración en el tramo. Las primeras pérdidas por desbordes de moderada magnitud ocurren para caudales de 2551 m³/s en VM y de 2100 m³/s en MLP. Caudales de 3817 m³/s en VM y 2613 m³/s en MLP, con una probabilidad de excedencia de 2 %, producen grandes desbordes de aproximadamente 800 m³/s. Estos valores son congruentes con los que se observaron a partir de las imágenes satelitales cuando están activos los cuatro desbordes mencionados. Para caudales de 5400 m³/s en VM y 3200 m³/s en MLP, se acrecentaría notablemente el caudal desbordado.

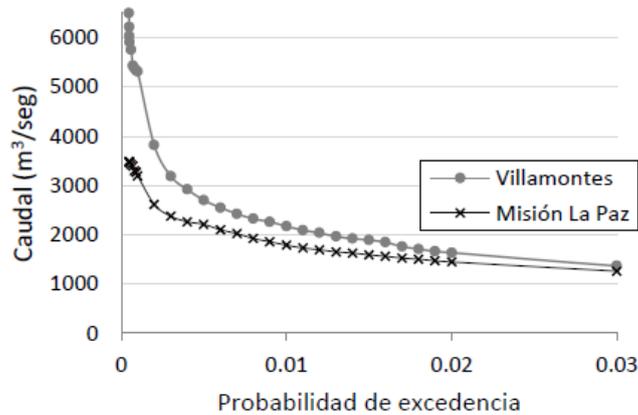


Figura 12.- Curvas de excedencia de caudales para VM y MLP.

Movimiento del fondo

También se analizó el movimiento del fondo para la crecida del año 2013 en MLP a partir de aforos (Figura 13) llegando a una variación de 4 m de cota de fondo. Teniendo en cuenta mediciones de áreas, velocidad y pendiente de la superficie del agua.

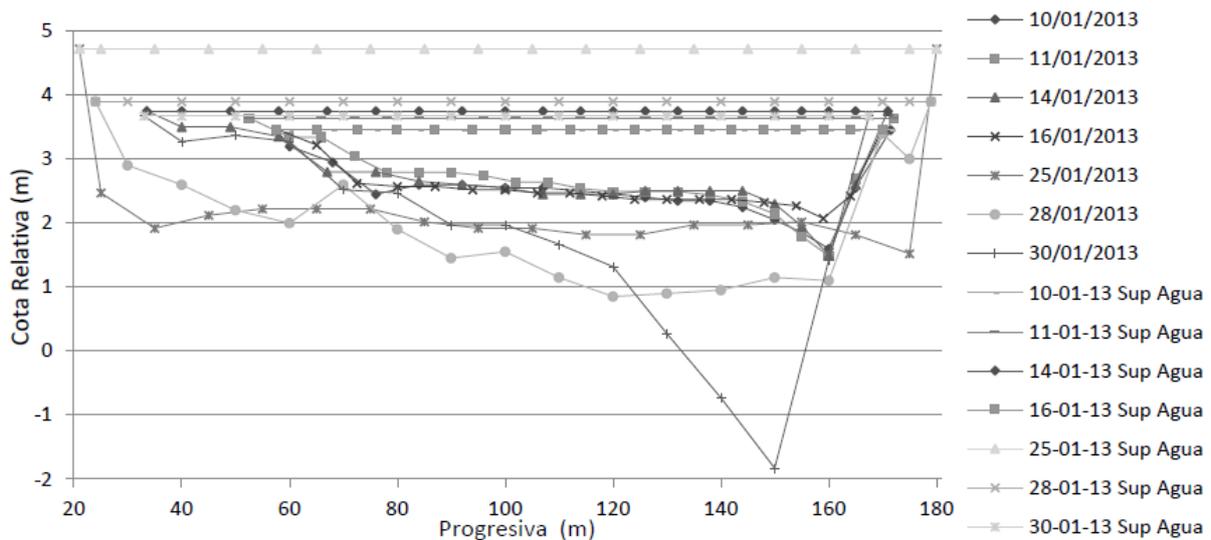


Figura 13.- Movimiento del fondo para la crecida de Enero 2013 a partir de Aforos.

Se buscó una función que vincule los caudales aforados y los caudales específicos, encontrándose una muy buena relación lineal (Figura 14).

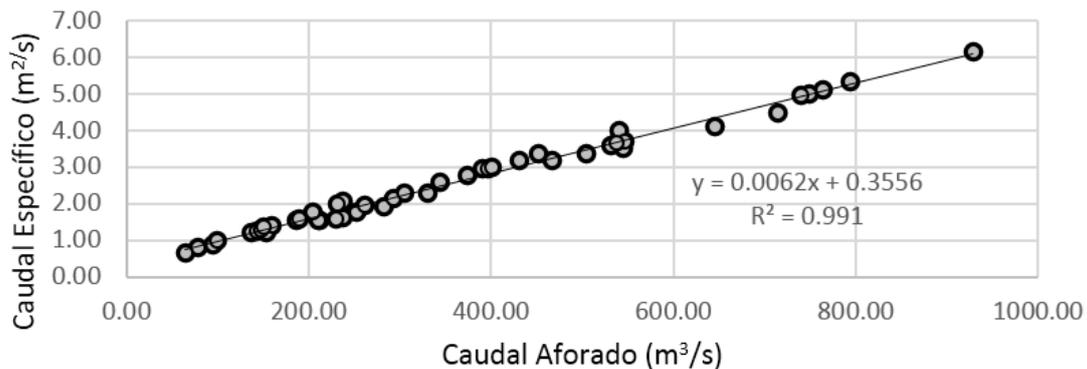


Figura 14.- Caudal específico (q) en función del Caudal Aforado (Q_a).

Hay diferentes formulaciones empíricas que se utilizan para determinar la erosión generalizada transitoria en el lecho de ríos como son las propuestas por Lischtvan–Lebediev (1959), Laursen (1960), Blench (1969), Mazza–Echeverría (1973) y Kopaliani y Giorogievsky (1993). Ninguna de estas formulaciones se aproxima a los valores aforados.

Se ajustó una curva potencial que se aproxime con suficiente precisión teniendo en cuenta varias crecidas del río.

$$h = 1,7287 \cdot q^{0,5138} \quad [2]$$

Donde h es el tirante y q el caudal específico. El fondo se calcula restandole a la lectura de escala el tirante obtenido.

Por otro lado, se dividió el hidrograma en rama ascendente y descendente para la crecida del año 2013 y se obtuvieron dos expresiones para calcular el tirante a partir del caudal específico. En la rama ascendente del hidrograma se obtuvieron buenos resultados, mientras que en la rama descendente se aplicó una corrección.

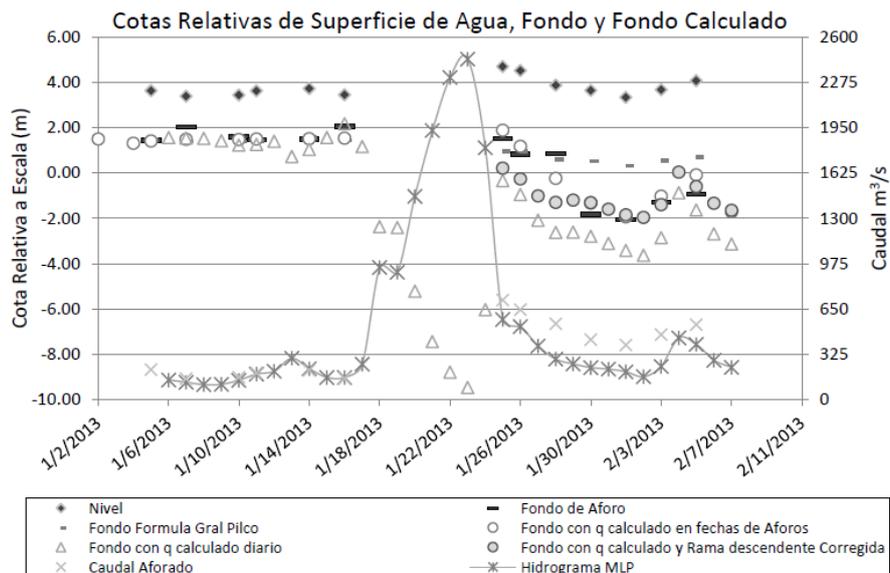


Figura 15.- Cotas relativas a la Escala de Superficie de Agua, Fondo y Fondo Calculado.

CONCLUSIONES

En este trabajo se caracterizó el tramo del río Pilcomayo comprendido entre Villamontes y Misión La Paz mediante el análisis de datos de aforos líquidos, sólidos, batimetrías, curvas H-Q, imágenes satelitales y análisis de probabilidades de excedencia de caudales, para series históricas medidas durante más de 35 años en VM y 50 años en MLP.

Se analizaron las principales restricciones que surgen al estudiar el tramo: la variabilidad de la sección en MLP, el movimiento del fondo, la necesidad de una curva H-Q para cada evento, la imposibilidad de aforar durante las crecidas en tiempos próximos al pico por resguardo del personal, así como tampoco se pueden hacer aforos con flotadores por la falta de batimetría que permita sacar un área próxima al paso de crecida.

Mediante el análisis de imágenes satelitales y datos hidrométricos, se caracterizaron los desbordes (velocidad de avance y pérdidas) como insumos necesarios para un adecuado manejo de agua y sedimentos y diseño de defensas en la planicie de inundación correspondiente a la zona de estudio, y extendiendo el alcance del estudio hacia aguas abajo de MLP.

Los resultados en relación a desbordes en el tramo, obtenidos a partir de hidrogramas e imágenes satelitales, se contrastaron con una modelación hidrodinámica unidimensional del tramo. Utilizando un vertedero lateral en la modelación se pudo evacuar caudales simulando los desbordes para tener una información acabada de lo que verdaderamente ocurre en el tramo y el caudal que arriba a MLP.

REFERENCIAS

- Halcrow and Serman.** (2007). *Línea Base Ambiental y Socioeconómica de la Cuenca del Río Pilcomayo*. Tarija, Bolivia.
- Martín Vide, J. P., Amarilla, M., Gamarra, M. and Zárate, F.** (2006). Problema de sedimentación en el río Pilcomayo.
- NASA LP DAAC.** (2008). *ASTER - GDEM*. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center.
- Pool, M. and Van Duijne, J.** (1996). *Informe final de la tercera misión de asistencia técnica enviada por la comisión de la UE a la zona del Pilcomayo*. Bruselas, Bélgica.
- Testa Tacchino, A. and Baldissone, M.** (2013). *Análisis de los desbordes del río Pilcomayo entre Villamontes y Misión la Paz*. XXIV° Congreso Nacional del Agua.
- USACE.** (2010). *HEC-RAS River Analysis System, V 4.1*.
- USGM.** (2006). *Shuttle Radar Topography Mission. 1 Arc Second Scene SRTM*.