

# APLICACIÓN DEL MODELO TELEMACH2D PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL TREN METROPOLITANO DE LA CIUDAD DE COCHABAMBA SOBRE EL RÍO ROCHA

M. W. Heredia, E. Montenegro y M. Lourenço

Laboratorio de Hidráulica, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.  
E-mail: m.heredia@umss.edu.bo, l.montenegro@umss.edu.bo, mario.t.lourenco@gmail.com

## Introducción

El Gobierno boliviano, a través del Ministerio de Obras Públicas, ha decidido iniciar la construcción de un tren metropolitano de pasajeros para la Ciudad de Cochabamba, para solucionar los problemas de transporte inherente al crecimiento demográfico y la expansión de la mancha urbana. Este tren ha sido diseñado para cubrir las zonas de mayor demanda del transporte de pasajeros, para este efecto se han diseñado tres líneas principales: las Líneas Roja, Amarilla y Verde. Se ha concebido que la Línea Amarilla sea implementada a lo largo del Río Rocha, el cual atraviesa la Ciudad de Cochabamba, por el Norte y el Este de la misma (ver Figura 1).

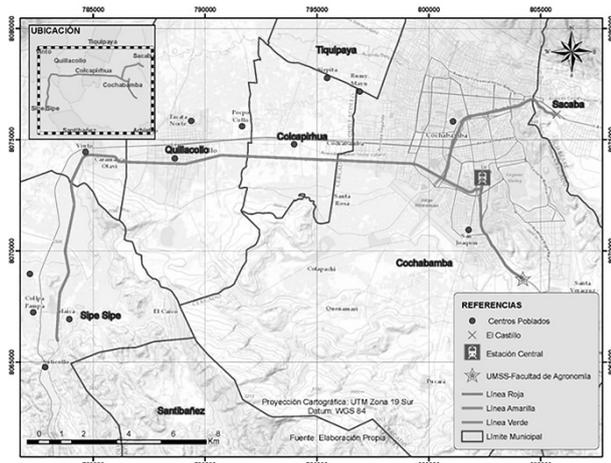


Figura 1.- Área de implementación del Tren Metropolitano.

El diseño del tren considera que las vías del tren sean emplazadas a un costado del curso del Río Rocha, reduciendo la capacidad hidráulica del mismo, con los consiguientes efectos. Por lo que se ha procedido a realizar un estudio detallado del efecto del tren mediante la aplicación del modelo computacional Telemac2D. El modelo computacional ha sido calibrado mediante la comparación de los resultados del modelo con mediciones efectuadas durante trabajos de monitoreo del Río Rocha, lo cual ha permitido implementar escenarios hipotéticos para la construcción de tren y el manejo del río.

## Caracterización de la zona de estudio

Se ha proyectado la construcción de la Línea Amarilla del Tren Metropolitano de la Ciudad de Cochabamba, a lo largo del curso del río Rocha, tal como se puede apreciar en la Figura 1.

El río Rocha atraviesa la ciudad de Cochabamba por el Norte y Este de la misma, este río se ha sido encauzado en el pasado con el objetivo de evitar inundaciones en las zonas aledañas. De acuerdo a la clasificación propuesta en Chang (1988) y Jansen et al. (1994), este río se clasifica como un río con cauce trenzado y canaliforme, presentando una configuración típica de un río de montaña. Esto debido a que el río en su parte alta, discurre en una zona de nacientes de montaña, el cual desemboca en el Valle Central de Cochabamba, presentando pendientes más bajas.

Debido a las características del régimen hidrológico de la ciudad y del Valle Central de Cochabamba, el río Rocha presenta un régimen variable a lo largo del año, con caudales elevados durante la época lluviosa (de octubre a marzo) y caudales bajos el resto del año (de abril a septiembre). Se han observado eventos extremos en el pasado, donde el Río Rocha ha presentado caudales elevados, favoreciendo la elevación de los tirantes de flujo y el arrastre de sedimentos.

Para la determinación de la ocurrencia de eventos extremos en el Valle Central de Cochabamba, se ha procedido a realizar un estudio hidrológico de la zona, para lo cual se ha colectado información hidrometeorológica del Valle Central. En base a esta información, se han determinado eventos extremos para distintos períodos de retorno (10, 20, 50, 100, 200 y 300 años), los cuales han sido utilizados para realizar una simulación hidrológica para la transformación de lluvia en caudal en las cuencas que aportan al Río Rocha, de esta manera, se determinaron los caudales extremos a ser utilizados en la modelación numérica del río con el modelo Telemac2D.

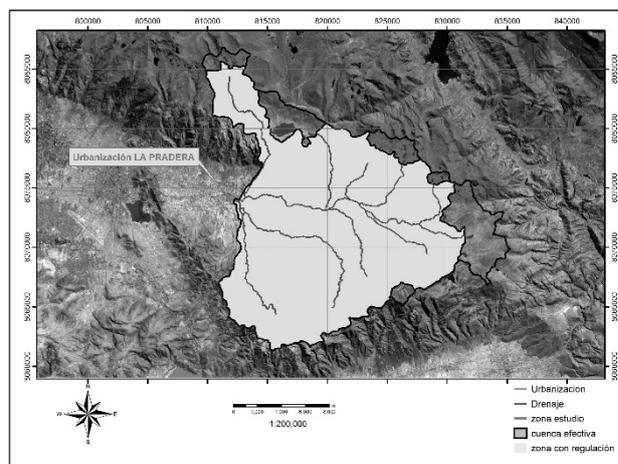


Figura 2.- Cuenca de aporte al Río Rocha

La modelación hidrológica se realizó utilizando registros de precipitación máxima diaria para el período 1950 – 2004. Los caudales máximos, de aporte al Río Rocha, obtenidos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Caudales Extremos generados con la Modelación Hidrológica.

Tr [años]	10	20	50	100	200	300
Q [m <sup>3</sup> /s]	58.4	83.0	119.9	150.5	183.5	203.7

De manera adicional, se ha procedido a realizar el relevamiento topográfico del curso del río mediante el sobrevuelo de un DRON, el cual ha permitido obtener un Modelo de Elevación Digital de la zona de estudio con una resolución de 0.25 metros. Por otro lado, se ha procedido a realizar trabajos de prospección y monitoreo del río, mediante la colección de muestras de sedimentos del lecho, la medición de caudales en el mismo y la implementación de dos estaciones automáticas de medición de tirantes de flujo.

Esta información ha sido complementada con los planos de diseño del tren metropolitano, donde las dimensiones y configuración de la infraestructura a ser construida han podido ser conceptualizadas para su implementación en los trabajos de modelación numérica.

### Implementación del modelo numérico

El estudio del impacto de la construcción del Tren Metropolitano se ha realizado mediante la aplicación del modelo computacional Telemac2D. Este modelo computacional ha sido desarrollado por EDF R&D de Francia (Hervouet, 2007). Este modelo computacional se caracteriza por el uso del Método de los Elementos Finitos y mallas numéricas no-estructuradas para la solución de las ecuaciones de Saint-Venant 2D, lo cual permite una aplicación adecuada a ríos.

El área o dominio del modelo corresponde al curso del Río Rocha. Este dominio ha sido discretizado para la composición de las mallas numéricas a ser utilizadas en la etapa de modelación; para este efecto, se han compuesto dos mallas numéricas:

- Malla numérica 1: corresponde a la situación anterior a la construcción del tren metropolitano.
- Malla numérica 2: corresponde a la situación con la presencia de la infraestructura a ser construida para el tren metropolitano.

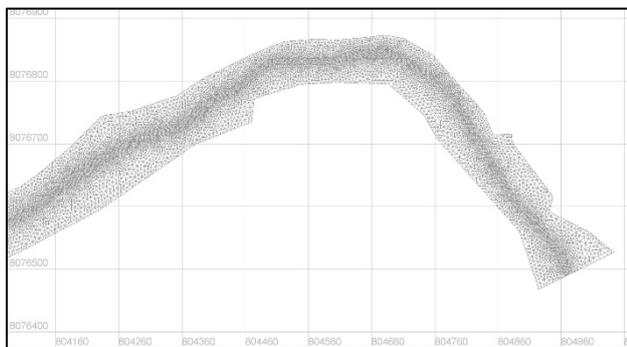


Figura 3.- Detalle de la malla numérica en el Río Rocha (aguas arriba).

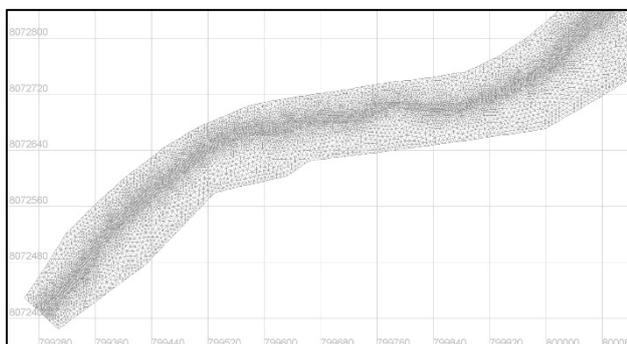


Figura 4.- Detalle de la malla numérica en el Río Rocha (aguas abajo).

Estas mallas numéricas han sido combinadas con el relevamiento topográfico del DRON y las dimensiones de la infraestructura a ser construida para la generación de las geometrías de los escenarios de la modelación numérica (ver Tabla 2).

Tabla 2.- Escenarios de la Modelación Numérica.

Escenario	Descripción	Malla numérica
Calibración	Condición actual	Malla 1
Escenario 1	Condición actual	Malla 1
Escenario 2	Con presencia del tren	Malla 2
Escenario 3	Con presencia del tren y dragado	Malla 2

Estos escenarios han sido complementados con los caudales de flujo obtenidos del estudio hidrológico para la ocurrencia de eventos extremos. Para cada escenario se han compuesto Sub-escenarios para la simulación de cada uno de los caudales extremos de la Tabla 1. Estos caudales han sido prescritos como condición de borde (aguas arriba) para el modelo computacional. Para las condiciones de borde aguas abajo, se ha utilizado el registro de alturas de flujo de una estación de medición ubicada a la salida del modelo (Estación en Puente Cajón del Aeropuerto de Cochabamba).

El modelo ha sido complementado con la información relacionada a la cobertura vegetal de las llanuras de inundación, además de la verificación de la granulometría del material del lecho del río para la determinación de la rugosidad a ser prescrita en el modelo, con coeficientes de Manning entre 0.03 y 0.08, que han sido ajustados durante el proceso de calibración del modelo.

### Resultados de la modelación numérica

De acuerdo a los resultados de la modelación del Escenario 1, se han observado inundaciones en algunos sectores con los caudales correspondientes a los periodos de retorno de 100 y 200 años. Por lo que se ha procedido a simular lo mismo en el Escenario 2 y 3, donde se ha implementado una nueva topografía considerando el dragado del cauce principal del río, además de la presencia del Tren.

Los resultados de la modelación después de la implementación del Tren Metropolitano, muestran inundaciones en algunas zonas aledañas al curso del Río (fuera de los muros de protección existentes), por lo que se procedió a realizar la simulación en el Escenario 3, donde se verifica la eficacia de los trabajos de dragado en el mantenimiento de la capacidad hidráulica del Río Rocha. Se han simulado escenarios de dragado aplicando el modelo Telemac2D, determinando el escenario más óptimo con el menor volumen de dragado que garantice la no ocurrencia de inundaciones en zonas anexas al curso del río, además de efectos indeseables sobre la infraestructura del Tren Metropolitano.

De esta manera se confirma la necesidad de efectuar trabajos de dragado en el cauce del río para garantizar la capacidad hidráulica del río durante la ocurrencia de eventos extremos.

### Conclusiones

Los resultados de la simulación de los mencionados escenarios, han permitido concluir que existe la probabilidad que la construcción del tren a lo largo del curso del Río Rocha, favorezca la ocurrencia de inundaciones en zonas aledañas al curso del río. Adicionalmente, el modelo computacional ha permitido establecer que, la implementación de trabajos de dragado a lo largo del curso del río, va a reducir la probabilidad de ocurrencia de inundaciones, facilitando la operación del tren metropolitano, para lo cual se ha recomendado la ejecución de trabajos de dragado y mantenimiento del cauce del río.

### Referencias bibliográficas

- Chang H.H. (1988). *Fluvial processes in river engineering*. John Wiley & Sons, U.S.A.
- Hervouet J.M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with the Finite Element Method*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Jansen P., van Bendegom L., van den Berg J., de Vries M., Zanen A. (1994). *Principles of River Engineering: The non-tidal alluvial river*. Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft, The Netherlands.