

## **ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO Y MORFOLÓGICO DEL DESVÍO DEL ARROYO CORRALES, RIVERA, URUGUAY**

**Guillermo López, Raúl López Pairet, Christian Chreties y Luis Teixeira**

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay  
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. CP 11300

E-mail: [ralonso@fing.edu.uy](mailto:ralonso@fing.edu.uy), [chreties@fing.edu.uy](mailto:chreties@fing.edu.uy), [glopez@fing.edu.uy](mailto:glopez@fing.edu.uy), [luistei@fing.edu.uy](mailto:luistei@fing.edu.uy)

Asesor de la empresa Loryser S. A. Avda. Alfredo Navarro 3196, Montevideo, Uruguay.

E-mail: [raul.lopezpairet@gmail.com](mailto:raul.lopezpairet@gmail.com)

### **RESUMEN**

La empresa Loryser S.A., explota desde el año 2003 la mina aurífera "El Arenal", sita en el departamento de Rivera (Uruguay). Con el objetivo de extender la explotación de dicha mina, en el año 2005 fue proyectada una obra de desvío y canalización de un tramo del arroyo Corrales. Dicho proyecto de desvío incluyó la construcción de dos diques de protección, situados al comienzo y final del desvío del arroyo. A los efectos de analizar la viabilidad desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica del proyecto de desvío, se realiza un estudio basado en la modelación hidrosedimentológica de un tramo del arroyo Corrales. A partir de dicha modelación, se observa que desde el punto de vista hidrosedimentológico, la nueva traza del desvío no genera consecuencias importantes. Se concluye entonces que de acuerdo a la información disponible y a los elementos técnicos manejados no existen elementos que muestren impactos significativos, desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica, como consecuencia de la implantación del desvío del arroyo Corrales propuesto.

### **ABSTRACT**

Since 2003, the Loryser SA Company operates a gold mine called "El Arenal" located in Rivera (Uruguay). In 2005 a diversion work of a stream of Corrales river was projected, in order to extend the mine operation. The diversion project included the construction of two levees located at the beginning and the end of the stream diversion. A study based on a numerical hydro-sedimentological model from a stream of Corrales river was developed, in order to analyse the feasibility of the diversion project from the viewpoint of hydraulic engineering. The results show that the diversion works does not generate significant consequences. It is concluded, that according to available information and the results of these studies there is no elements that show significant impacts, from the standpoint of hydraulic engineering, as a result of implementing the proposed diversion.

## INTRODUCCIÓN

Minera San Gregorio (LORYSER S.A., empresa perteneciente al Grupo UME), comenzó a explotar la mina Arenal en Fase 1, en el mes de octubre de 2004, con un horizonte de explotación hasta fines del año 2007. La mina se encuentra localizada en la margen izquierda del arroyo Corrales, en la 5ta. Sección Judicial del departamento de Rivera (Uruguay). En la Figura 1 se presenta un croquis de ubicación de la mina Arenal en su Fase 1. Las nuevas exploraciones geológicas, permitieron detectar un cuerpo de mineral explotable que requiere la ampliación de la mina Arenal (Fase 2), lo que permitirá operar hasta el año 2010. A los efectos de extender la explotación actual de la mina se propone una obra de desvío y canalización de un tramo del arroyo Corrales al oeste de dicha cantera, como lo indica la Figura 2. Para ello la empresa ha proyectado dos diques de protección, situados al comienzo y final del desvío del arroyo, de sección heterogénea: núcleo de suelo arcilloso compactado y faldones de material granular estéril (sin mineral). La excavación del nuevo cauce se realiza en roca, con una longitud aproximada de 1250 m, sección trapezoidal de 40 m de ancho de fondo y una pendiente de 0.19 %; previéndose trayectos curvos en varios sitios.

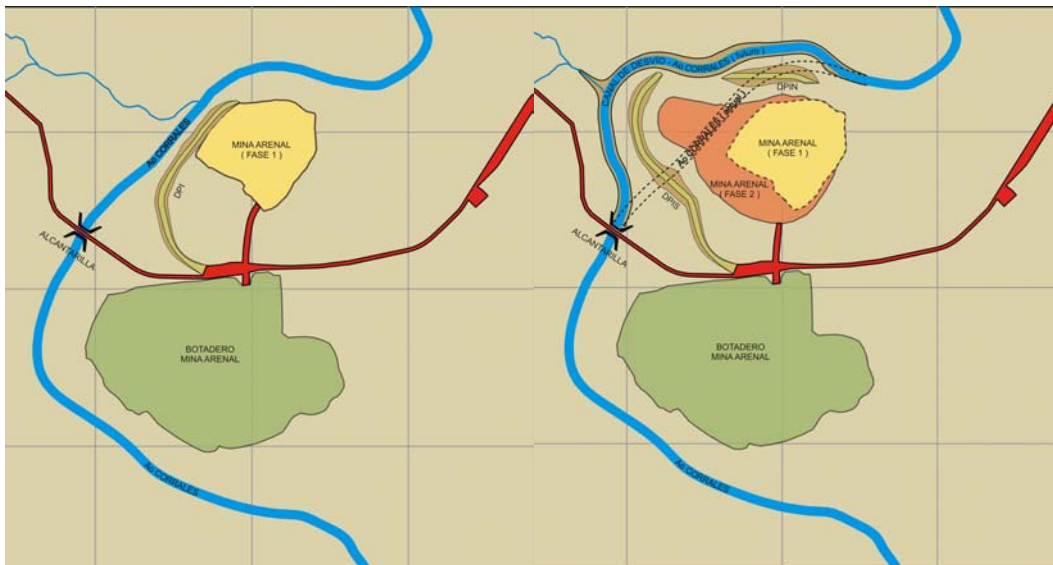


Figura 1.- Esquema de la cantera previo al desvío.

Figura 2.- Esquema del desvío propuesto.

A solicitud de la empresa se realizó un estudio orientado al análisis de la viabilidad desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica del proyecto del desvío y a la identificación de las acciones requeridas para asegurar la estabilidad del nuevo cauce.

En este artículo se presentan la metodología y resultados del análisis realizado en cuanto a la hidrodinámica del arroyo y la obra del desvío. Entre los resultados se destaca la caracterización hidrodinámica de las situaciones con obras y sin obras y las modificaciones realizadas al proyecto original, a partir del desarrollo del estudio, para minimizar las diferencias entre ambas situaciones.

## METODOLOGÍA

Metodológicamente el estudio se basa en la modelación numérica sedimentológica del mismo tramo del arroyo y el análisis de la estabilidad fluvial del nuevo trazado propuesto a partir de

la caracterización geomorfológico del tramo de arroyo incluyendo el desvío proyectado.

La modelación hidro-sedimentológica del arroyo Corrales se realizó para eventos extremos de caudal, buscando determinar posibles variaciones en el régimen sedimentológico de alguna zona del arroyo como consecuencia de las obras de desvío propuestas. Para ello, se implementó la topografía del lecho y planicie de inundación del tramo a modelar del arroyo, así como las características granulométricas del arroyo. Estas últimas fueron determinadas a partir de un relevamiento del arroyo que se llevó a cabo en el marco de este convenio, donde se colectaron 14 muestras de material de fondo del cauce tomadas en las zonas de interés. Una vez analizadas las muestras en el laboratorio, se definieron los parámetros  $d_{50}$  y desviación del sedimento en cada sección a modelar.

La modelación hidro-sedimentológica se llevó adelante utilizando los módulos hidrodinámico y de transporte de sedimentos del software MIKE 11 del DHI, el cual permite resolver las ecuaciones del flujo transitorio unidimensional a superficie libre (Saint-Venant) acopladas con la ecuación de balance de masa de sedimentos y una ecuación de transporte de sedimentos.

Se simuló el transporte de sedimento para el evento de abril de 2002 (máximo registrado) fijando como condición de borde en la represa de OSE caudal sólido nulo. Se determinó en cada sección la evolución temporal del fondo del cauce y el transporte de sedimentos. Se repitió la simulación en el caso de la nueva traza del arroyo y se compararon los resultados para el fondo del cauce y transporte de sedimentos, observando que desde el punto de vista sedimentológico no existen impactos significativos por la construcción de las obras proyectadas.

Por otra parte, se estudió el comportamiento fluvial de la traza del desvío del arroyo propuesto por la empresa, analizando las características naturales del mismo y las condiciones de estabilidad del nuevo trazado.

## **RESULTADOS**

A efectos de determinar el impacto que tendrán las obras sobre el comportamiento sedimentológico del arroyo se determinan las zonas de erosión y deposición del arroyo en la situación actual, así como el transporte de sedimento que se produce para un evento extremo.

Luego de determinado el comportamiento sedimentológico del arroyo para las condiciones actuales, se determinan los posibles cambios que introducen las obras a efectos de valorar si los mismos son significativos.

### **Descripción granulométrica del tramo en estudio**

El transporte de sedimentos, así como la erosión y sedimentación del mismo depende tanto de las características hidrodinámicas como de la granulometría del lecho. Se caracteriza granulométricamente el lecho del tramo del arroyo en estudio a partir del análisis de muestras

del mismo.

En la Figura 3 se presentan los puntos donde se tomaron muestras granulométricas del lecho del arroyo, donde se indica además un tramo cuyo lecho presenta afloramiento rocosos. La caracterización granulométrica de las muestras se presenta en la Tabla 1.

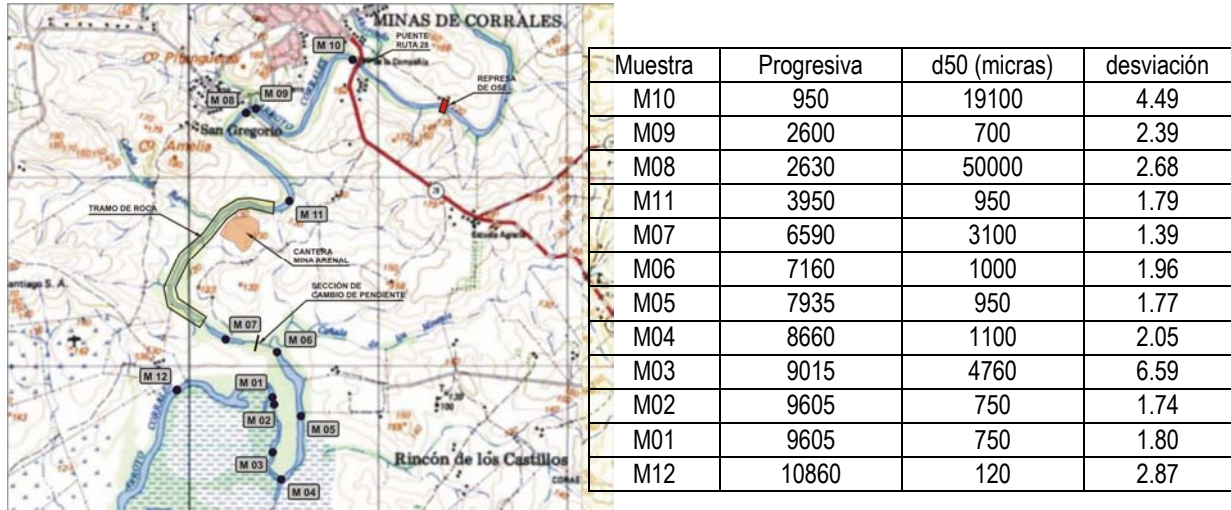


Figura 3.- Ubicación de los puntos de muestreo muestras

Tabla 1.- Caracterización granulométricas de las

A grandes rasgos se puede decir que en el tramo que va desde el puente de la ruta 28 hasta donde comienza el tramo que presenta los afloramientos rocosos se tiene arena gruesa y grava y aguas abajo del tramo rocoso arena fina. Si se tiene en cuenta que las pendientes de los 2 tramos mencionados son 0.0013 (aguas arriba del afloramiento rocoso) y 0.0001 (aguas abajo del afloramiento rocoso), la descripción granulométrica anterior, resulta coherente con las pendientes respectivas que presentan esos tramos. En la Figura 4 se presenta un perfil longitudinal del arroyo Corrales donde se distinguen las pendientes mencionadas.

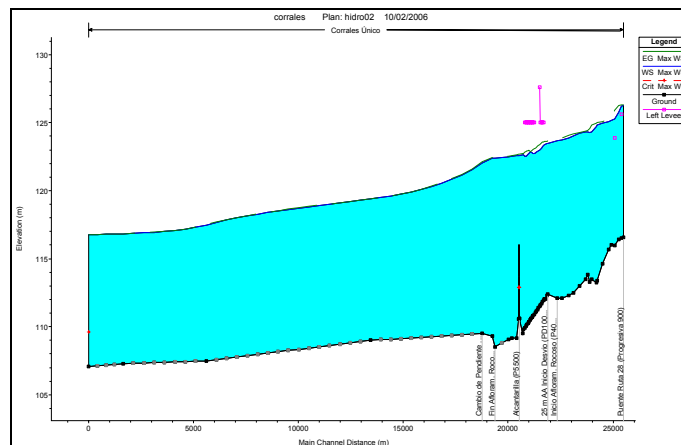


Figura 4.- Perfil longitudinal del arroyo Corrales. La línea superior corresponde al perfil de la superficie libre en el máximo de la crecida de abril de 2002.

## **Modelación sedimentológica**

La modelación se llevó a cabo mediante el código numérico MIKE 11 del DHI, en la modalidad “morfológica”, esto significa que se determinó el transporte de sedimento, así como la evolución del fondo y la erosión y sedimentación en cada sección a partir de la resolución acoplada de las ecuaciones del flujo hidrodinámico con las ecuaciones de transporte de sedimento.

Para la resolución se imponen condiciones de borde hidrodinámicas y sedimentológicas. En cuanto a las primeras se mantienen las mismas que para el modelo hidrodinámico, y para el caso sedimentológico se tomó como condición de borde que el transporte de sedimento en la represa de OSE ubicada 900m aguas arriba del puente de la ruta 28 es nulo.

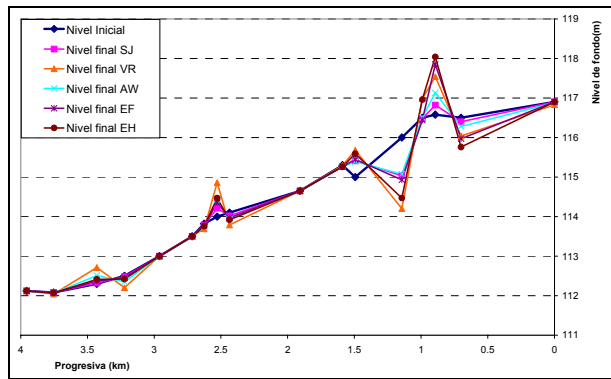
Existen diversas formulaciones empíricas para el transporte de sedimento, de las cuales 5 están incorporadas al MIKE 11. Ellas son: Van Rijn (VR); Engelund-Fredsoe (EF); Engelund-Hansen (EH); Acker-White (AW) y Smart-Jaeggi (SJ).

En este caso se utilizan todos los modelos propuestos y se comparan los resultados. Las 2 primeras consideran por separado el transporte de fondo y el suspendido, y las 3 restantes consideran el transporte integrado.

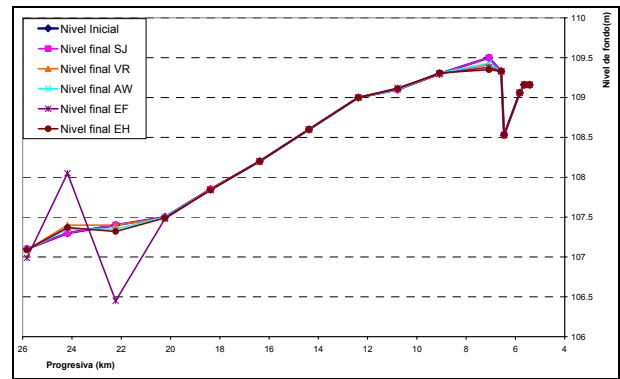
No se cuentan con mediciones que permitan la calibración y verificación del modelo sedimentológico, por lo que la metodología de trabajo es comparar los resultados obtenidos para la situación con y sin las obras proyectadas, a fin de determinar el efecto de estas últimas. Los resultados obtenidos con las distintas formulaciones, presentan la dispersión usual en la cuantificación de transporte de sedimentos.

No obstante, como se expresa en el punto 9 del presente informe, una vez realizados los muestreos de transporte de sedimentos allí indicados, se recomienda verificar que los resultados del modelo sedimentológico se corresponden con lo observado en los muestreos.

Se comparan los resultados para el arroyo en las condiciones sin obras. En primera instancia se presenta el perfil longitudinal del lecho resultante de la aplicación de los 5 modelos de transporte para el evento extremo de abril de 2002, en la zona aguas arriba y aguas abajo del desvío proyectado. Se incluye también el nivel del lecho inicial a los efectos de visualizar los cambios. (Figuras 5 y 6).



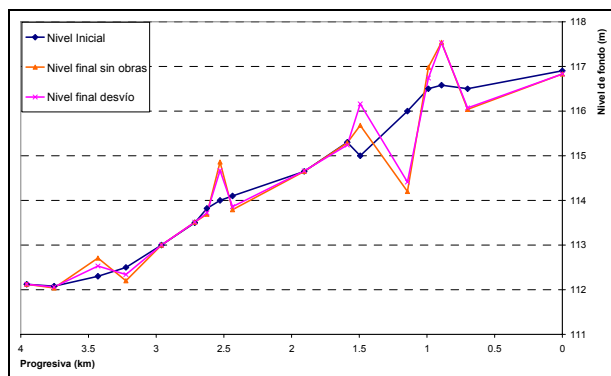
**Figura 5.-** Comparación de los niveles de lecho resultantes y nivel del lecho inicial. Tramo aguas arriba del desvío



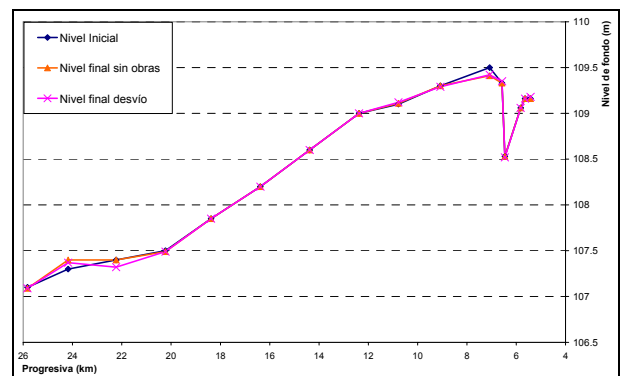
**Figura 6.-** Comparación de los niveles de lecho resultantes y nivel del lecho inicial. Tramo aguas abajo del desvío

Como se puede observar, el tipo de modelo utilizado influye poco en los resultados obtenidos. Además, este resultado de escasa influencia del modelo a utilizar, es también observado en el caso de transporte de sedimento. La conclusión entonces a la que se puede arribar es que, tomar cualquiera de los modelos representara en forma aproximada el comportamiento sedimentológico del arroyo.

Para realizar la comparación de la situación con obras y sin obras se tomó como modelo de transporte de sedimento el propuesto por Van Rijn. En las Figuras 7 y 8 se presenta la evolución del fondo (situación final e inicial del lecho) con y sin obras aguas arriba y aguas abajo del desvío.



**Figura 7-** Comparación de los niveles de lecho resultantes con y sin obras para el evento extremo de abril 2002. Tramo aguas arriba del desvío.

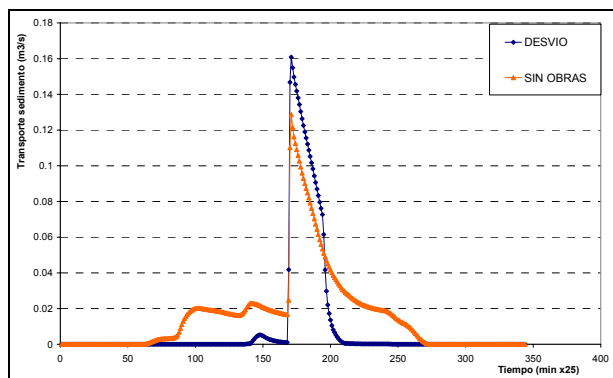


**Figura 8-** Comparación de los niveles de lecho resultantes con y sin obras para el evento extremo de abril 2002. Tramo aguas abajo del desvío.

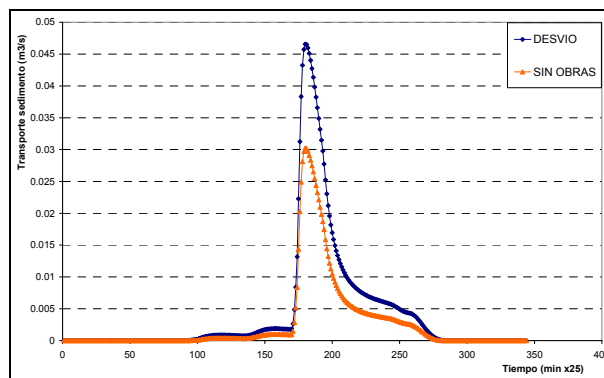
Las diferencias en uno y otro caso son muy pequeñas, el movimiento del fondo es mayor aguas arriba, mientras que aguas abajo es prácticamente inexistente.

La diferencia máxima en la situación final del lecho con y sin obras es aproximadamente 20 cm, lo que se entiende es menor a la precisión de la modelación hidrosedimentológica realizada. Por tal motivo, se puede concluir que respecto a la evolución del fondo no habrá cambios significativos introducidos por la obra.

En cuanto al transporte de sedimento se presentan en las Figuras 9 y 10, los resultados para una sección transversal aguas arriba y una aguas abajo, de manera de caracterizar ambos tramos.



**Figura 9-** Comparación del transporte de sedimentos resultante en la situación con y sin obras para el evento extremo de abril 2002. Progresiva km. 9.280.



**Figura 10-** Comparación del transporte de sedimentos resultante en la situación con y sin obras para el evento extremo de abril 2002. Progresiva km. 1.130.

Nuevamente se puede apreciar que en uno y otro caso la diferencia es prácticamente insignificante.

En la zona de afloramiento rocoso no existe erosión por las características del material del lecho. Además los resultados del modelo muestran que no se produce deposición de sedimento en dicho tramo, lo que es razonable considerando la fuerte pendiente de fondo que este presenta.

Como conclusión general se puede afirmar que las obras proyectadas del desvío del arroyo Corrales no afectan el comportamiento sedimentológico del mismo.

### Caracterización geomorfológica

El tramo del arroyo Corrales en el cual se establecerá el desvío pertenece a su tramo medio inferior, en esta zona el arroyo presenta una pendiente media de 0.0013, aproximadamente a 2km aguas abajo de la finalización del desvío la pendiente media disminuye notoriamente adquiriendo el valor 0.0001. De acuerdo al criterio de Schumm (Schumm, 1977, 1994) se trata de la zona de transferencia del arroyo (Schumm distingue entre cuenca de recepción donde los ríos reciben su carga líquida y sedimentológica, zona de transferencia, donde si el cauce es estable las entradas de sedimentos igualan a las salidas, y zona de depósito, en la cual el río pierde su capacidad de transporte).

Se trata de un arroyo aluvial, si bien aguas arriba de la zona de desvío y en esta misma, hay tramos en que el lecho y las márgenes están encajadas en la roca.

En lo que refiere a la geometría en planta se trata de un curso meandriforme. Posee cauce y canal único y se desarrolla en una llanura fluvial de inundación. Tanto la zona donde se encuentra el desvío como la zona de aguas abajo son meandriformes.

El criterio de Leopold y Wolman (1957, 1964), fija el valor umbral de la pendiente por encima de la cual el curso pasa de ser meandriforme a ser ramificado:

$$S = 0.013 Q^{-0.44}$$

siendo  $Q$  el caudal formativo en metros cúbicos por segundo y  $S$  la pendiente.

En el caso del arroyo Corrales el caudal formativo (el caudal que llena el lecho del arroyo) puede ser estimado, de acuerdo con la modelación hidrodinámica efectuada, en aproximadamente 180 m<sup>3</sup>/s, con lo cual el valor límite de la pendiente es 0.0013, que coincide con el valor de la pendiente del tramo donde se ubica el desvío y es claramente superior a la del tramo de aguas abajo. Sin embargo, el tramo se mantiene con un cauce único por transcurrir sobre un suelo rocoso.

Por su parte el criterio de Lane (1957) establece para el mismo concepto de valor umbral de la pendiente que separa los ríos meandriformes de los ramificados la siguiente fórmula:

$$S = 0.007 Q_m^{-0.25}$$

siendo  $Q_m$  el caudal medio diario en metros cúbicos por segundo.

En el caso del arroyo Corrales ese caudal medio, obtenido mediante la serie de datos de nivel disponible y la modelación hidrodinámica del tramo, es de aproximadamente 27 m<sup>3</sup>/s por lo que el criterio se cumple para las dos pendientes mencionadas.

Si bien un curso meandriforme desde el punto de vista geológico implica una situación no estacionaria, desde el punto de vista ingenieril, con una escala de tiempo menor, es una situación de comportamiento estable porque por un lado baja la pendiente y la capacidad de transporte del cauce y por otro lado la existencia de corrientes secundarias (en el plano perpendicular al eje del curso) tiende a mantener el cauce despejado.

### **Estudio del comportamiento fluvial de la traza del desvío propuesta**

El desvío propuesto consiste en la sustitución de un tramo de 0.9km. por una traza aproximadamente paralela, situada hacia la margen derecha del cauce original, con longitud de 1.25km. La mayor parte del desvío se hace excavando en roca mediante voladura, el nuevo cauce.

El efecto hidrodinámico del desvío, así como el efecto sedimentológico operado en el arroyo fueron estudiados mediante modelos numéricos unidimensionales, tal como se expone en los correspondientes informes preliminares y en este mismo informe.

En términos generales puede decirse que desde el punto de vista morfodinámico el desvío no implicará modificaciones importantes, tanto en las zonas situadas aguas abajo como aguas arriba del mismo. En efecto, el cambio de pendiente general introducido por el desvío es mínimo. Por otra parte la estabilidad morfológica del propio desvío parece asegurada por el hecho de estar excavado en roca y por haberse previsto una adecuada protección de márgenes con enrocamiento en las zonas donde aquellas están conformadas en terreno no rocoso.

También debe notarse que la disminución de la pendiente que determinará el desvío hace que la misma se mantenga por debajo del valor umbral, asegurando que el curso mantendrá su tendencia a ser meandriforme.



## CONCLUSIONES

A los efectos de analizar la viabilidad desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica del proyecto de desvío, se realiza el presente estudio, basado en la modelación numérica hidrosedimentológica del tramo del arroyo Corrales.

La traza finalmente propuesta para el desvío del arroyo Corrales, obtenida luego de ajustes propuestos, es en términos generales aceptable, no previéndose alteraciones significativas en el comportamiento sedimentológico del arroyo respecto a su situación actual, aguas arriba o aguas abajo del desvío.

Desde el punto de vista hidro-sedimentológico, no se aprecian alteraciones significativas en el régimen del transporte de sedimentos ni en el lecho del cauce en relación a la situación del arroyo sin obras.

Desde el punto de vista de la estabilidad, considerando que para los eventos extremos estudiados el flujo en el tramo del desvío es subcrítico, lo que asegura la estabilidad hidrodinámica; y el canal es proyectado en roca en toda su longitud, lo que asegura la estabilidad fluvial, no se prevén a mediano plazo alteraciones significativas de la nueva traza.

Se concluye entonces que de acuerdo a la información disponible y a los elementos técnicos manejados en este documento, no existen elementos que muestren impactos significativos, desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica, como consecuencia de la implantación del desvío del arroyo Corrales propuesto por la empresa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**IMFIA** (2008). Estudio de las Actuaciones de Ingeniería Propuestas para el Desvío del Arroyo Corrales. Convenio: LORYSER S.A. – IMFIA (UdelaR-FI), Informe final.

**Julián, P. Y.** (2002). River Mechanics. Cambridge University Press.

**Kundu, Pijush K.** (1990). Fluid Mechanics. Academia Press, Inc.

**Lane E.W.** (1957). A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material, Omaha: US Army Engineer Division, Missouri River.

**Leopold, L. Wolman, M.** (1957). River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. U.S. Service Geological Service, Professional Paper N° 282-B.

**Leopold, L., Wolman M. and Millar J.** (1964). Fluvial Processes in Geomorphology, Dover, New York.

**Schumm, S.A.** (1977). *The Fluvial System*, John Wiley.

**Schumm, S. and Winkley, B.** (1994). *The variability of large alluvial rivers*. ASCE, New Cork.

**Van Rijn, L.C.** (1986). *Sediment Transport Measurements*, Delft Hydraulics Laboratory.

**Van Rijn, Leo C.** (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications.

**Yalin, M. S.** (1977). *Mechanics of Sediment Transportation*, Pergamon Press, 2nd edition, Oxford, England.