

Disipación de energía aguas abajo del salto de esquí de la presa Cónдор Cliff

Federico Romero¹, Claudio A. Fattor¹, Jorge D. Bacchiega¹ y Santiago A. Arrigoni¹.

¹ Instituto Nacional del Agua – Laboratorio de Hidráulica – Programa Hidráulica de Obras.

E-mail: federico.romerob@gmail.com

dbacchiega@gmail.com

RESUMEN:

El Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA), a partir de la firma del convenio con la UTE Represas Patagonia, desarrolló el proyecto y construcción de un modelo físico en escala 1:50 para llevar adelante el estudio de la disipación de energía aguas abajo del salto de esquí de la presa Condor Cliff, sobre el río Santa Cruz, Argentina.

El artículo tiene por finalidad presentar los resultados más relevantes obtenidos en las distintas etapas de estudios sobre las condiciones de disipación aguas abajo del salto de esquí.

DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

El proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico de la presa de Cónдор Cliff se encuentra ubicado a 130 kilómetros de la localidad de El Calafate. Prevé la construcción de una presa del tipo CFRD, materiales sueltos con pantalla de hormigón; un desvío temporal del río, que posteriormente mediante la adecuada adaptación funcionará como descargador de fondo; vertedero conformado por cuatro vanos controlados por compuertas radiales; rápida con pendiente de 5%; salto de esquí y cuenco pre-excavado como disipador de la energía del flujo; escala de peces; cierres con muro de hormigón y una central hidroeléctrica, tal como se muestra en la figura 1.

La central estará compuesta por cinco turbinas Francis con una generación anual de 3380 GW/h y una altura de 73 metros. La presa tendrá una longitud de 2000 metros y la superficie del embalse de 250 kilómetros cuadrados.

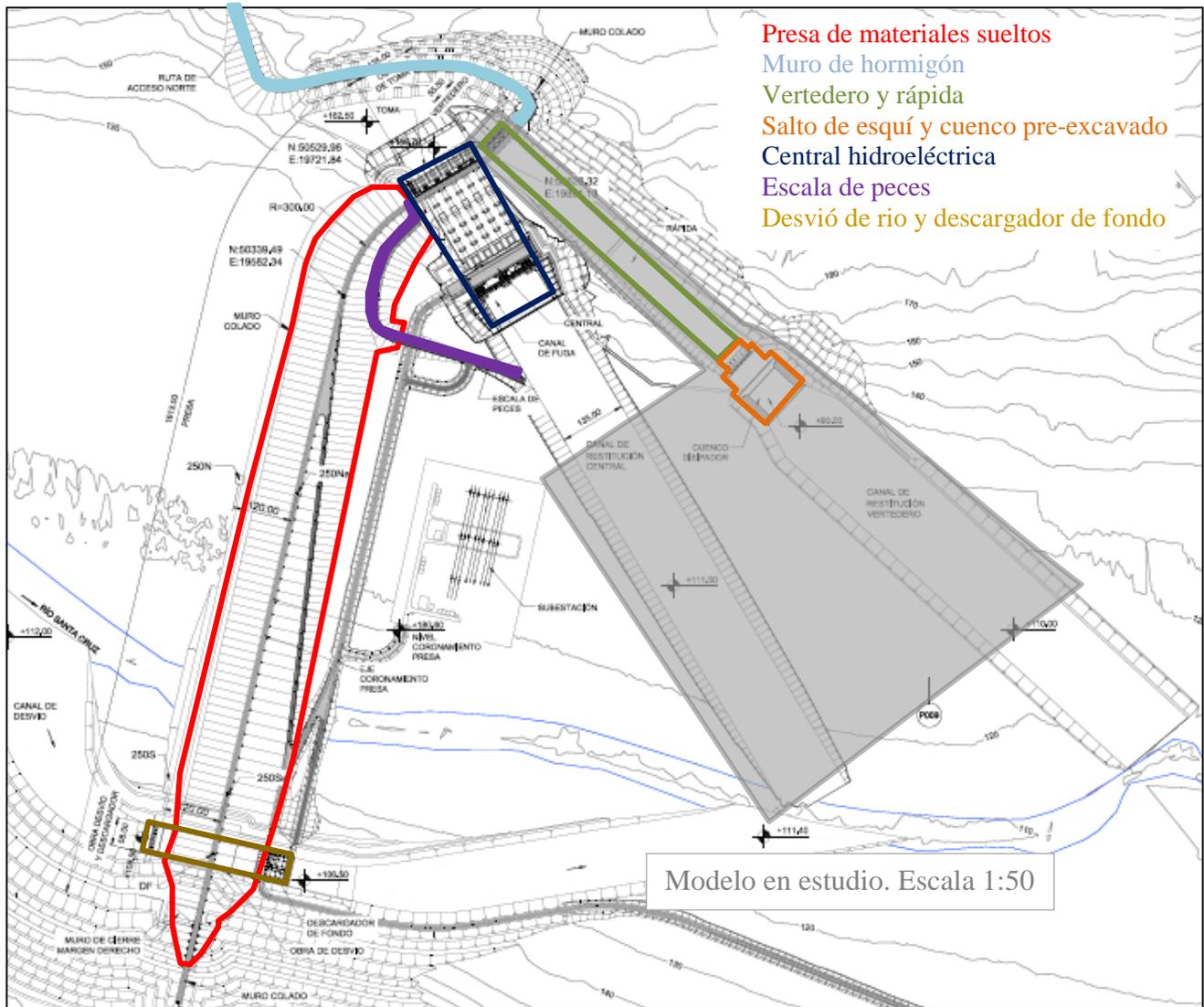


Figura 1.- Planta General del proyecto de Condor Cliff.

Como se observa de la figura precedente, el modelo representado contempla las obras de descarga por vertedero, rápida, salto de esquí, cuenco pre-excavado y los canales de restitución tanto del vertedero como de la central hidroeléctrica, con las siguientes particularidades:

- La zona de emplazamiento de la obra presenta una ladera a margen izquierda, donde la topografía crece considerablemente, constituida por un material de dudosa estabilidad frente a la conformación de los taludes pertinentes y los procesos erosivos sobre esta margen. Esta condición de estabilidad se verificará durante la excavación en obra de dicha zona y los estudios complementarios que surjan de la misma.
- Vertedero con diseño para un caudal máximo de 4100 m³/s.
- Diseño del salto de esquí con el dentado curvo.
- Foso pre-excavado con cota mínima de 90 m. IGN, implicando una diferencia respecto al diente del salto de esquí de 33,5 metros.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El presente artículo tiene como objetivo mostrar el comportamiento hidrodinámico, frente al funcionamiento del aliviador, de las obras de disipación de energía.

Para la determinación de los parámetros que son de interés de estudio se plantearon las siguientes etapas de análisis:

- Etapa 1: Considera la evaluación del funcionamiento del salto de esquí y su descarga en el foso pre-excavado sin erosión en el modelo. En esta etapa se determinan las presiones medias y las fuerzas fluctuantes sobre las paredes del modelo y en el fondo del cuenco pre-excavado.

Este estudio se desarrolla sobre un fondo fijo en el cual, al no permitir la disipación de energía en la erosión del foso y sus alrededores, da como resultado las mayores fluctuaciones de presión y velocidades. A partir de estos resultados se puede definir a priori el tipo de material capaz de resistir la erosión, los índices máximos de turbulencia, y a su vez se poseen los resultados pertinentes en caso de ser necesario en obra la necesidad de generar un cuenco pre-excavado de hormigón.

En esta etapa se analiza:

- Alcance y trayectoria del jet de descarga.
 - Condiciones de disipación aguas abajo del salto de esquí.
 - Comportamiento general del foso pre-excavado y configuración del flujo en la descarga.
 - Evaluación de la energía residual aguas abajo.
 - Determinación de las presiones y fuerzas fluctuantes sobre las paredes y fondo del cuenco pre-excavado.
- Etapa 2: Evaluación de la descarga para un fondo mixto, manteniendo fijos la margen izquierda y el pie del salto de esquí, y simulando con un fondo móvil el resto de la zona de impacto, el foso pre-excavado y los canales de restitución de la central y del propio vertedero. El planteo del fondo móvil se debe, como se mencionó previamente a la incertidumbre acerca del material rocoso hacia la margen izquierda de la obra, planteando entonces como una primera condición, la generación de paredes y taludes conformados por hormigón en la obra, además, de una zona fija de protección en el talud del salto de esquí.

Esta condición de fondo móvil fue analizada considerando dos granulometrías diferentes, surgidas a partir de las inseguridades del comportamiento que presenta la roca subyacente frente a la acción directa de corrientes de elevada velocidad y a los efectos de disipación macroturbulenta producidos por la descarga del salto de esquí.

- Hipótesis 1: Lecho móvil conformado con arena fina (D_{50} modelo igual a 0,3 mm), lo que corresponde a un material aluvional de aproximadamente 15 mm de diámetro medio.
- Hipótesis 2: Lecho móvil conformado con gravilla (D_{50} modelo igual a 4,1 mm), representando un material de aproximadamente 205 mm de diámetro medio.

En esta etapa se analiza:

- Condiciones de disipación aguas abajo del salto de esquí.
- Comportamiento general del foso pre-excavado.
- Evaluación de los procesos erosivos y alcance de las erosiones laterales y frontales, en el entorno del foso pre-excavado.
- Evaluación de la posible interacción de los procesos erosivos sobre el canal de fuga de la central.
- Evaluación de la necesidad de aplicación de medidas de optimización y mitigación requeridas.

RESULTADOS

Etapa 1

Trayectorias a la salida del salto de esquí

Se evaluaron las trayectorias de la lámina de alta velocidad deflectada por el salto de esquí, lo que se ve reflejado en las Figura 2 a Figura 4, las últimas dos para un caudal $4100 \text{ m}^3/\text{s}$, y en la Tabla 1.

El mínimo caudal informado refleja la condición de inicio de despegue de la lámina, de modo que caudales inferiores no logran ser lanzados e interactuarán con la losa de protección al pie.

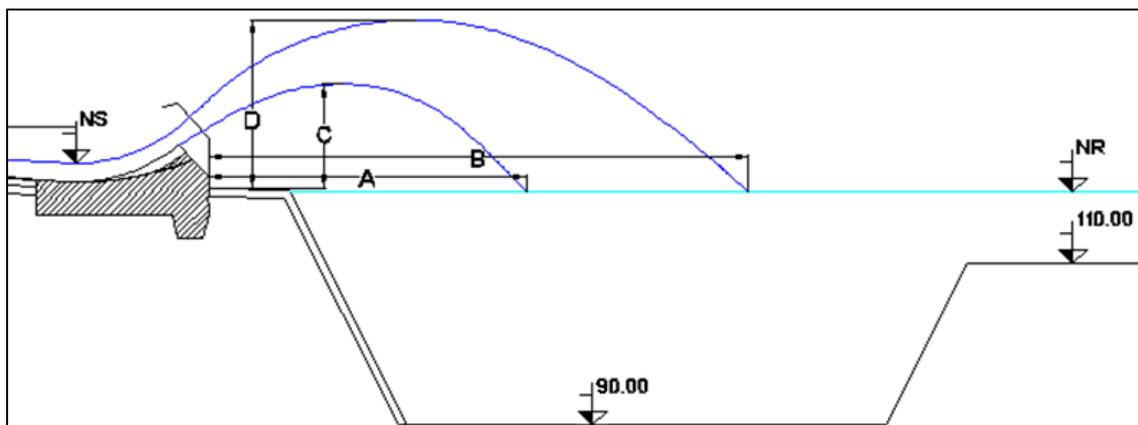


Figura 2.- Esquemización de las trayectorias.

Tabla 1.– Relevamiento de las trayectorias.

Caudal (m ³ /s)	Evolucion de la lámina de despegue del salto de esquí								Ancho (m)
	Margen Izquierda				Margen Derecha				
	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	
623	1.00	8.75	2.50	6.50	1.50	9.50	3.25	7.50	57.00
717	3.63	11.75	2.00	6.75	4.13	13.25	2.63	8.00	57.00
814	4.13	13.50	3.00	7.88	4.25	12.88	3.13	7.50	57.50
909	6.13	17.25	3.13	9.00	6.00	17.25	2.75	8.50	58.50
1039	7.38	25.13	3.25	9.63	7.00	26.50	3.75	9.50	59.50
1093	8.88	28.25	3.63	10.00	8.75	26.75	3.88	9.50	60.00
1215	10.13	31.38	3.63	10.00	10.88	30.00	3.88	9.13	62.50
1314	11.25	32.75	4.00	11.00	11.50	31.75	4.00	11.25	64.00
1399	13.38	36.25	4.50	11.75	14.00	36.00	4.63	12.50	65.00
1517	13.75	38.25	4.88	12.25	14.50	38.50	4.75	11.75	67.50
2090	23.25	52.50	5.00	12.88	23.63	53.88	4.75	13.50	68.00
4083	31.50	65.00	5.75	17.13	28.38	79.38	6.00	15.63	73.50

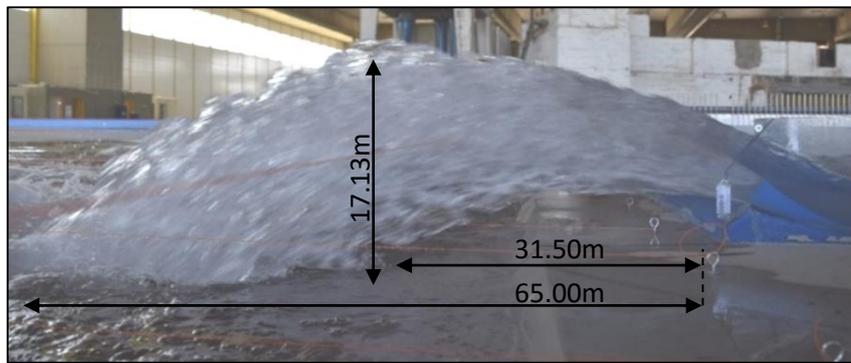


Figura 3.- Vista desde margen izquierda de la condición de lanzamiento - $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

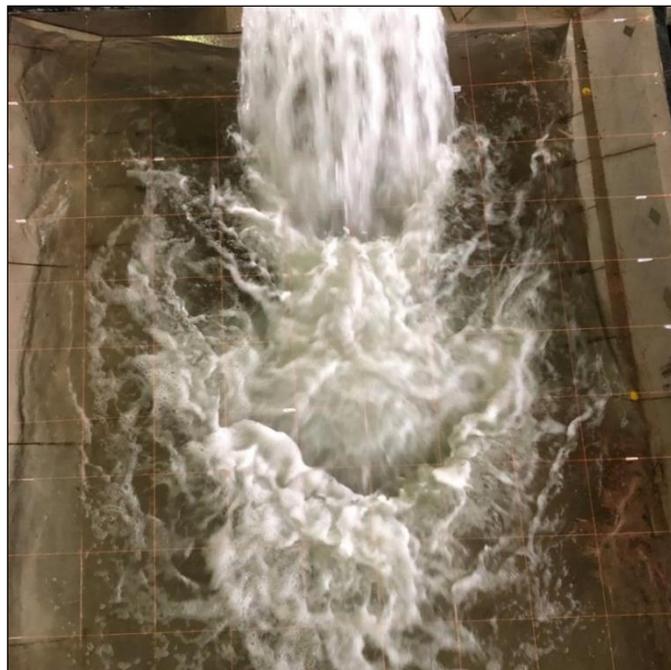


Figura 4.- Vista desde aguas abajo de la condición de lanzamiento - $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Configuración del flujo y campo de velocidades aguas abajo del salto de esquí

Se realizaron mediciones de velocidades generadas por el impacto de la lámina en la fosa pre-excavada, para la condición derivada de la erogación de un caudal de $4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 5 se observa el campo de velocidades en planta relevado a 0,6 veces el tirante, destacándose sectores con dirección de la velocidad hacia aguas arriba, lo que pone en evidencia la presencia de las zonas de recirculación. A demás se aprecia una zona sin registro de velocidades, correspondiente a la región donde se produce el impacto de la lámina lanzada, en la que prevalece una elevada macroturbulencia con importantes cambios de presión y de velocidades.

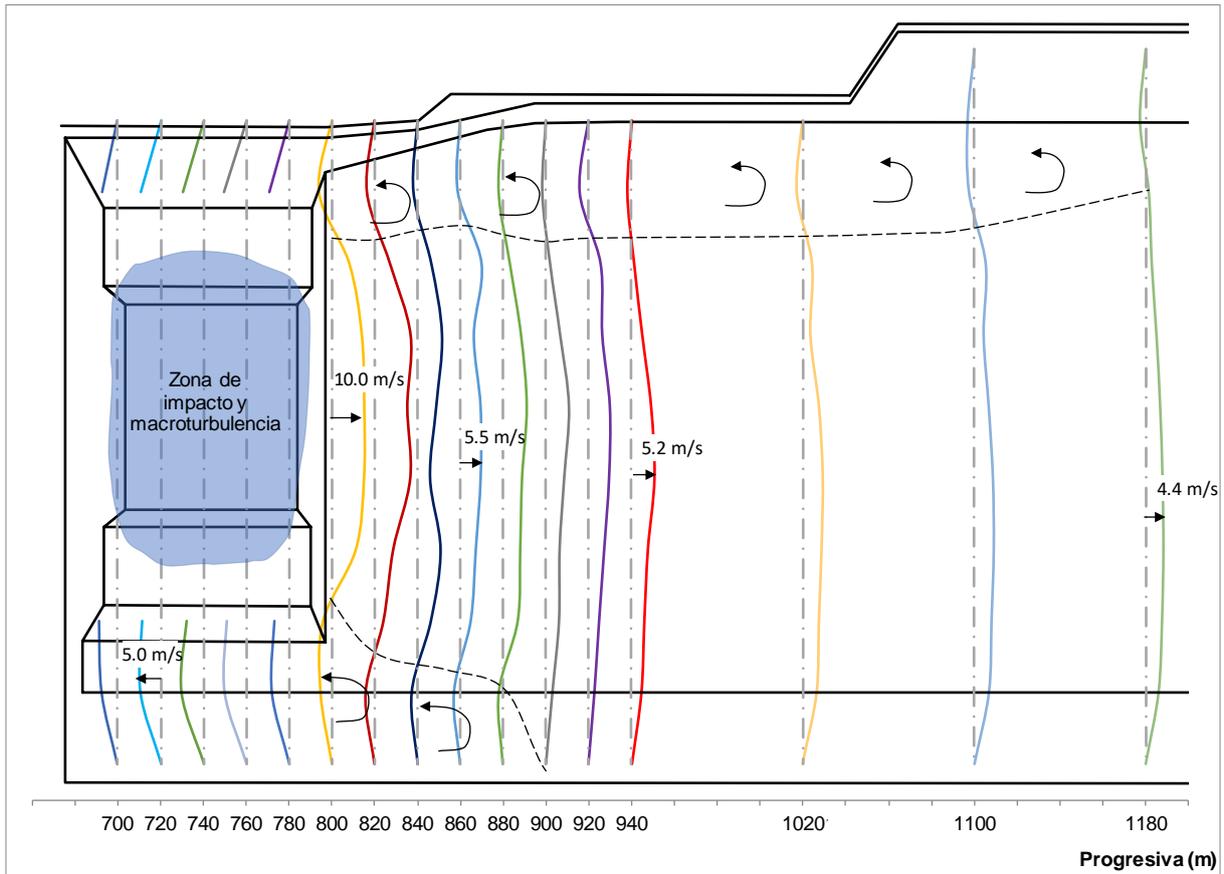


Figura 5.- Perfil de velocidades en planta a 0.6 veces el tirante - $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las velocidades consignadas muestran registros muy altos en la sección de salida de la fosa pre-excavada, en donde en el eje central longitudinal se alcanzan aproximadamente 10 m/s . Estos valores decaen hacia aguas abajo, alcanzando aproximadamente 4 m/s a 300 metros de la sección final de la fosa pre-excavada.

Asimismo, la Figura 6, permite observar la variación del perfil de velocidades sobre el eje longitudinal del canal de restitución, desde la progresiva 800 (cercana al fin del foso pre-excavado) hasta la progresiva 1180 .

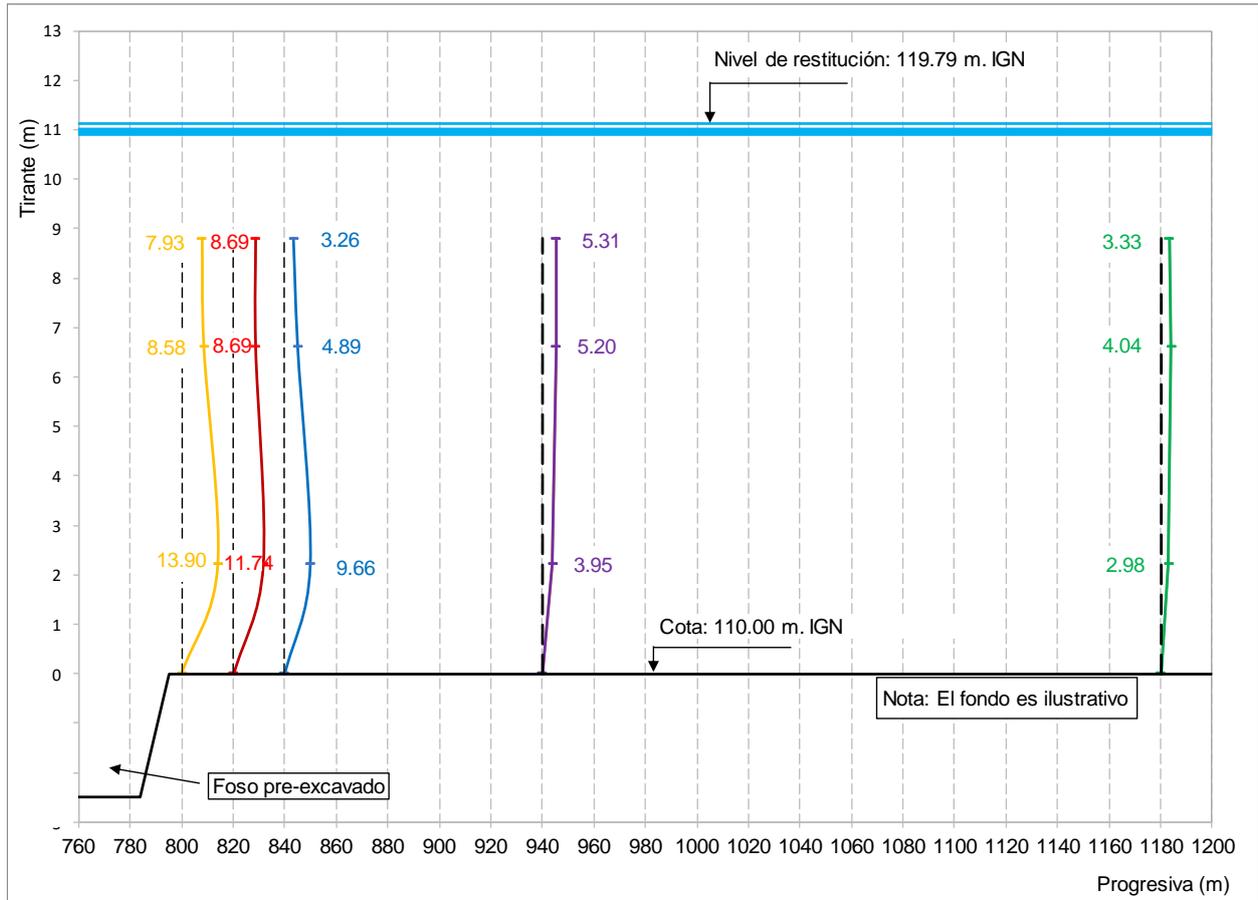


Figura 6.- Variación de la velocidad en el eje del canal de restitución – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$

Queda nuevamente en manifiesto una disminución de velocidades en el desarrollo longitudinal del canal, así como la fuerte incidencia de la descarga de la lámina sobre el foso pre-excavado. Esto último se corrobora por la magnitud de la velocidad en el entorno cercano a la salida del flujo desde el foso, así como por la forma del perfil de velocidades, que en dicha región experimenta una velocidad de fondo mayor a la correspondiente a la distribución típica.

Campo de presiones medias y fluctuantes

Se procedió al relevamiento de presiones medias y fluctuantes en la zona correspondiente al foso pre-excavado para un caudal de $4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si se analizan los valores de amplitud de fluctuación de la Figura 7, se observa que los máximos se producen fundamentalmente en la sección final del tramo de la excavación. A su vez, no se destaca particularmente una diferencia importante entre ambas márgenes.

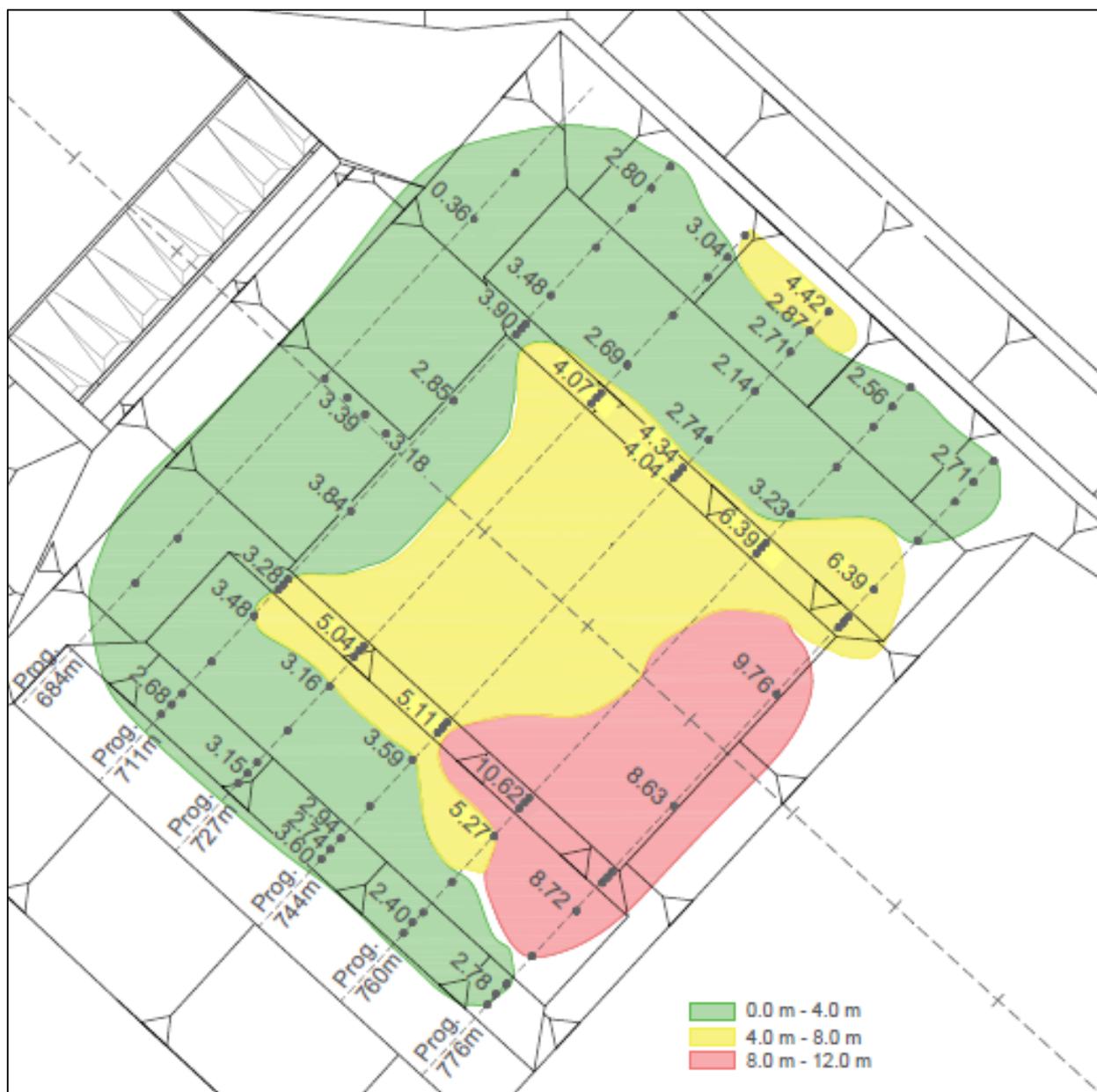


Figura 7.- Distribución de valores de amplitud de fluctuación – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

El análisis de las amplitudes de fluctuación ($p'/\gamma 99.9\% - p'/\gamma 0.1\%$) en contacto con la margen izquierda, que resulta particularmente importante en el proyecto, muestra rangos de variación desde 2.1 m a 6.4 m, lo que constituye una medida del grado de sollicitación que ejerce el flujo sobre dicha zona.

Se ha efectuado asimismo una valoración del término RMS (valor medio cuadrático), tal como se aprecia en la Figura 8.



Figura 8.- Distribución de valores de RMS – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Esta figura permite identificar las zonas con mayores valores de intensidad de turbulencia (RMS), destacándose fundamentalmente el último tramo de la solera del foso pre-excavado.

En la ladera de margen izquierda los valores de RMS varían en el entorno de 0.40 m a 0.80 m.

Conclusiones de la Etapa 1

- El salto de esquí analizado presenta un caudal de despegue del orden de $625 \text{ m}^3/\text{s}$, situación para la que el flujo es ligeramente lanzado, incidiendo en su trayectoria más corta sobre la losa de protección al pie del salto de esquí.
- El campo de velocidades denota velocidades máximas en la sección de encuentro del foso pre-excavado con el canal de restitución, de aproximadamente 12 m/s , decayendo hacia aguas abajo hasta alcanzar 4 m/s a unos 300 m de la sección final del foso.

- Las presiones fluctuantes relevadas muestran amplitudes máximas (diferencia entre p'/γ 99.9% - p'/γ 0.1%) comprendidas entre 7 y 10 m.c.a. en las secciones correspondiente a las progresiva 760 y en contacto con el fondo del foso pre-excavado, esto es donde se produce la zona de desarrollo macroturbulento del flujo.
- La amplitud de fluctuación sobre la ladera de margen izquierda muestra valores de 2.1 a 6.4 m aproximadamente, con los valores más elevados en las cotas inferiores de la ladera.
- Una evaluación pormenorizada de esta información, que será ampliada en el informe correspondiente, pone de manifiesto que un flujo con velocidades a la salida del foso con módulos comprendidos aproximadamente 12 m/s tiene un potencial erosivo importante.

Etapa 2

Condiciones de ensayo

Los estudios realizados en la presente fase del estudio han resultado los consignados en la Tabla 2.

Tabla 2.- Condiciones de ensayo etapa 2.

Ensayo	Material de fondo móvil. D ₅₀ prototipo [mm]	Tiempo de recurrencia [años]	Q [m ³ /s]	Nivel de Restitución [m. IGN]
Secuencial	15	< 25	1.500	116,54
		25	2.100	117,47
		10.000	4.100	119,83
Sin erosión previa	200-300	10.000	4.100	119,83
		10.000	4.100	119,83

La Figura 9 permite ver la representación en modelo de la conformación del lecho y de la fosa pre-excavada previo al inicio de los ensayos.

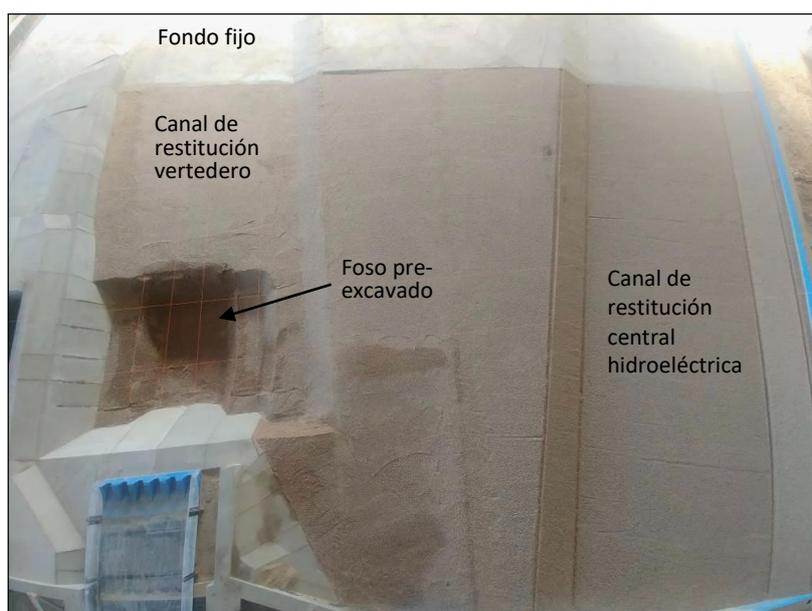


Figura 9.- Representación en modelo del lecho mixto.

Evaluación de la erosión del lecho móvil

Hipótesis 1

Se efectuó una primera evaluación de los procesos erosivos con un material del lecho móvil conformado por arena fina que representa aproximadamente el material aluvional, para caudales correspondientes a 1500 m³/s, 2100 m³/s y 4100 m³/s. Cabe destacar que la serie de ensayos se efectuó, en este caso, en forma secuencial, por lo que cada caudal tenía, como condición de borde previa la erosión generada por el caudal anterior. Se muestra en las Figura 10 a Figura 12 las condiciones de flujo aguas abajo del salto de esquí y los alcances registrados en cada caso.

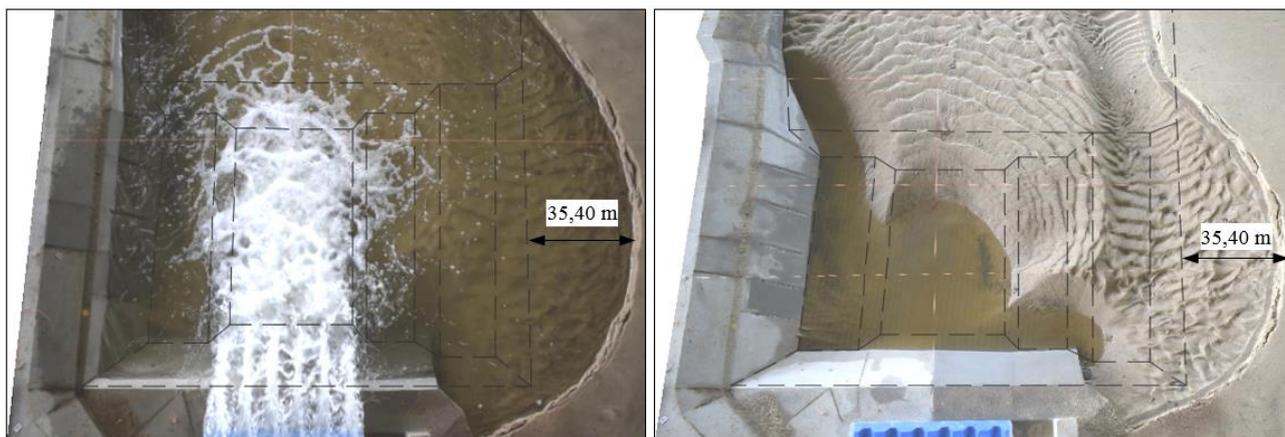


Figura 10.- Condición de flujo y erosión resultante - $Q = 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ - Tiempo modelo = 6:00 hs.

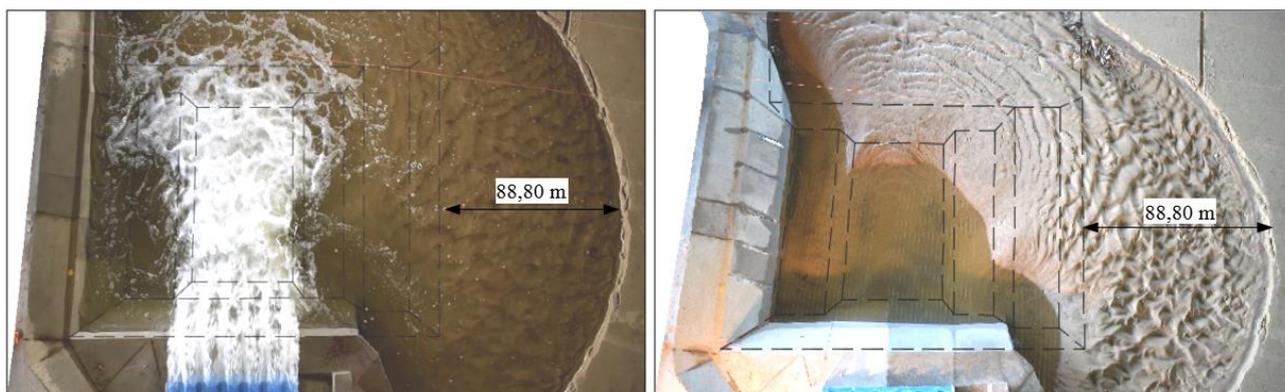


Figura 11.- Condición del flujo y erosión resultante - $Q = 2.100 \text{ m}^3/\text{s}$ - Tiempo modelo = 6:00 hs.

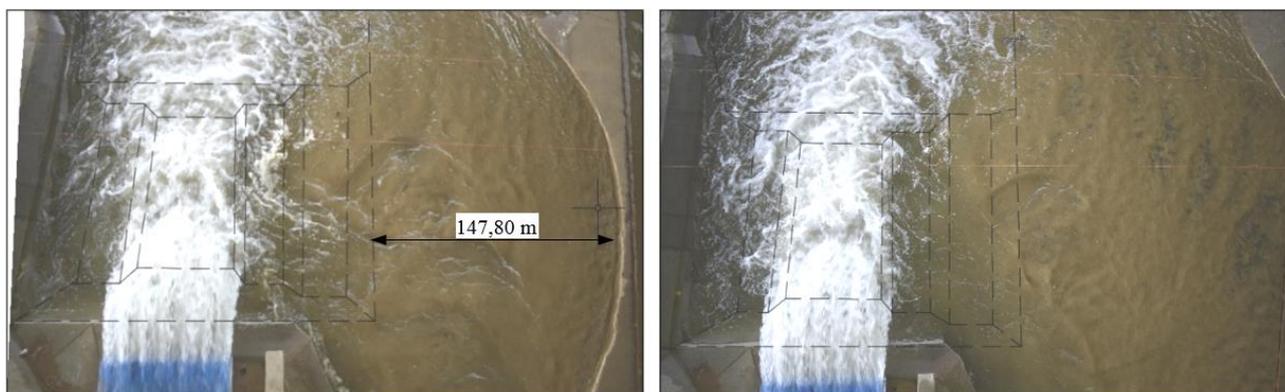


Figura 12.- Condición de flujo - $Q = 4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ - Tiempo modelo = 1:30 hs y 6:00 hs respectivamente.

De la imagen anterior se observa que, transcurrida la primer hora y media de ensayo, la erosión se encuentra muy cercana, hacia margen derecha, del canal de fuga de la central, condición que termina alcanzándose con el transcurrir del ensayo.

Como complemento en Figura 13 se muestra la erosión resultante para un caudal de 4100 m³/s, donde se aprecia la incidencia de la misma sobre el canal de fuga de la central, una importante erosión hacia la margen derecha del salto de esquí, y la formación de una barra de acumulación de 6 metros de altura máxima, aproximadamente a 300 metros aguas abajo del foso pre-excavado.

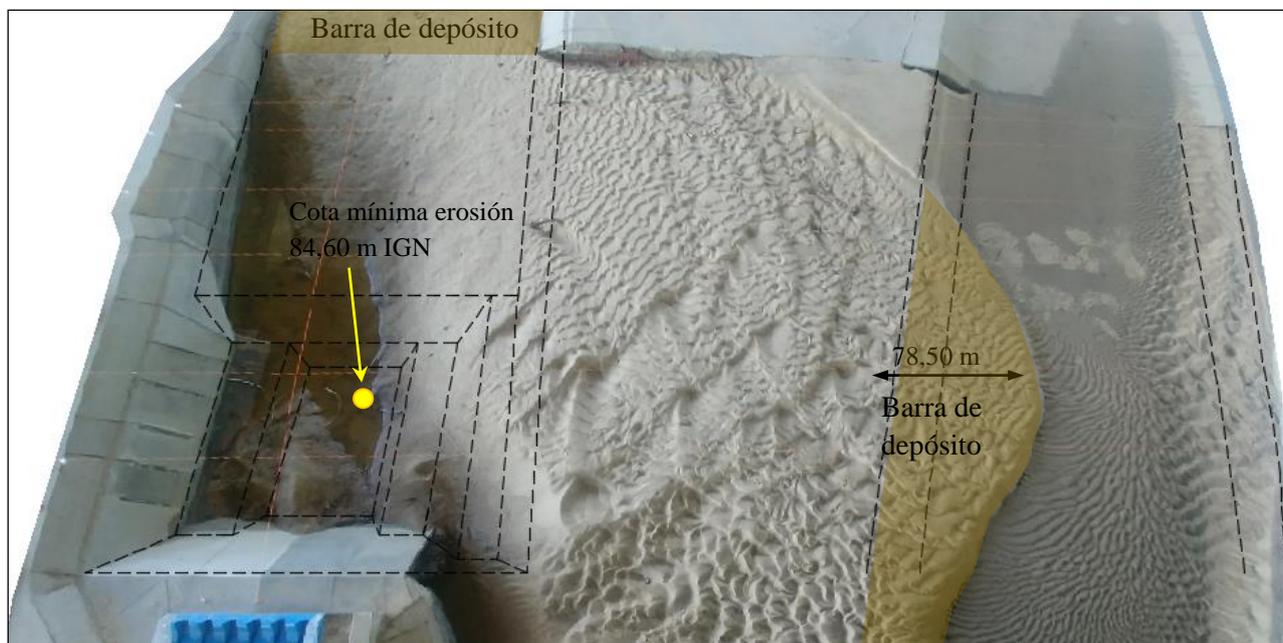


Figura 13.- Erosión resultante - $Q = 4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ - Tiempo modelo = 6:00 hs.

Hipótesis 2

Tras realizar la serie de estudios a fondo móvil con un material del lecho móvil conformado por arena, se procedió al retiro de la misma y se colocó gravilla comprendida entre 3 y 6 mm, el cual es representativo del material de la roca fracturada, tamaño estimado de los bloques (200 mm – 300 mm).

Se efectuó una evaluación de los procesos erosivos para caudales correspondientes a 2100 m³/s y 4100 m³/s, partiendo de una condición inicial del fondo móvil sin erosión previa para ambos estudios. En las Figura 14 y Figura 15 se muestran las condiciones del flujo aguas abajo del salto de esquí y los alcances de erosión registrados.

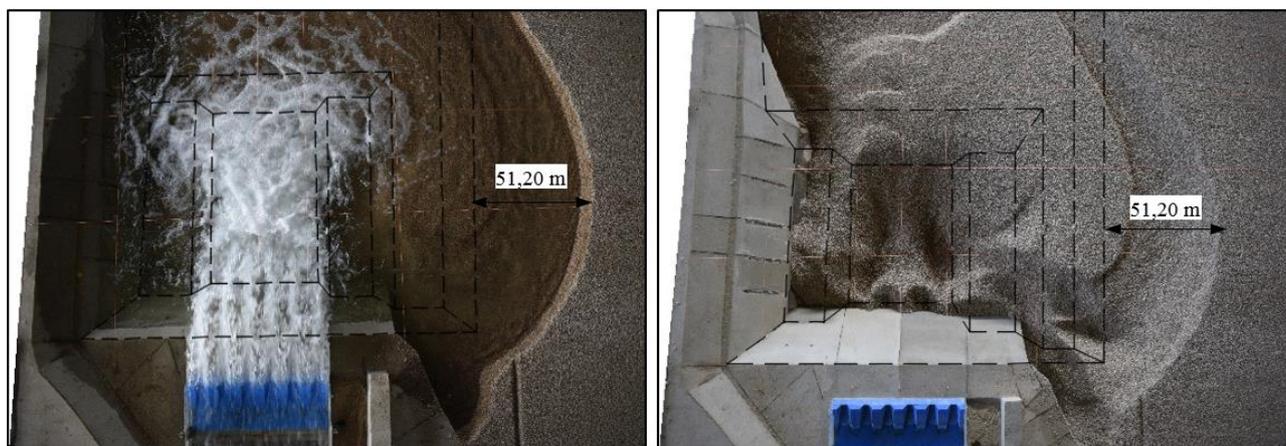


Figura 14.- Condición del flujo y erosión resultante - $Q = 2.100 \text{ m}^3/\text{s}$ - Tiempo modelo = 6:00 hs.



Figura 15.- Condición de flujo - $Q = 4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ - Tiempo modelo = 1:30 hs y 6:00 hs respectivamente.

En la Figura 16, se observa la erosión resultante para un caudal de $4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

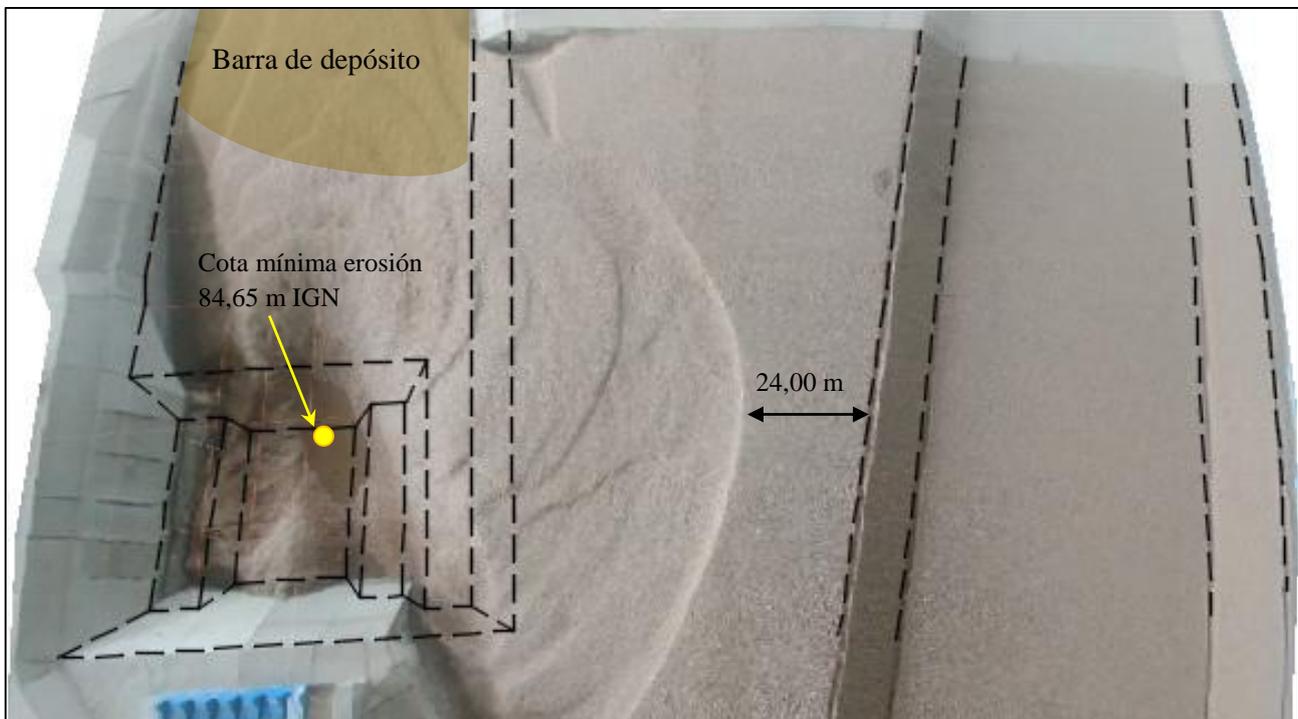


Figura 16.- Erosión resultante - $Q = 4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ y tiempo modelo = 6:00 hs.

Se concluye de la figura precedente que la erosión no tiene incidencia sobre el canal de fuga de la central hidroeléctrica, con un margen de 24,0 m. Además, continúa al igual que en el caso del fondo aluvional, una importante erosión hacia la margen derecha del salto de esquí y la formación de una barra de acumulación de material de 6 metros aproximadamente a 150 metros aguas abajo del foso pre-excavado.

Análisis de resultados de la erosión resultante

A partir de los ensayos realizados, se presenta seguidamente una comparación de los procesos finales de erosión alcanzados para $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ contemplando los dos materiales de fondo móvil evaluados.

La caracterización de la erosión resultante se efectuó a partir del relevamiento de una serie de perfiles topobatemétricos.

Estas comparaciones se ven reflejadas en las Figura 17 a Figura 19, en los perfiles longitudinales correspondientes, y las Figura 20 y Figura 21, perfiles transversales, donde permiten apreciar que la tendencia general en el desarrollo de procesos erosivos mantiene las mismas configuraciones en los distintos perfiles analizados, registrando erosiones mayores para el material aluvional.

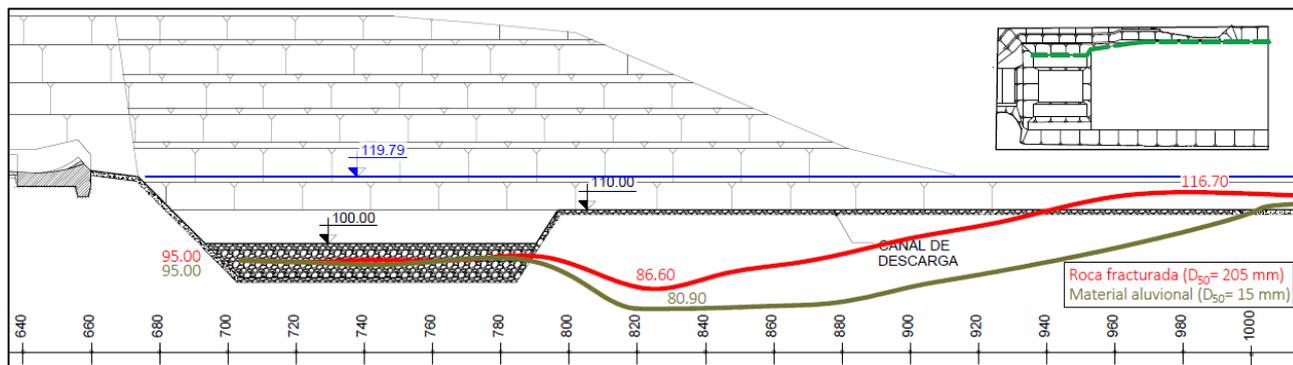


Figura 17.- Perfil longitudinal – Contacto con margen izquierda (borde fijo) – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

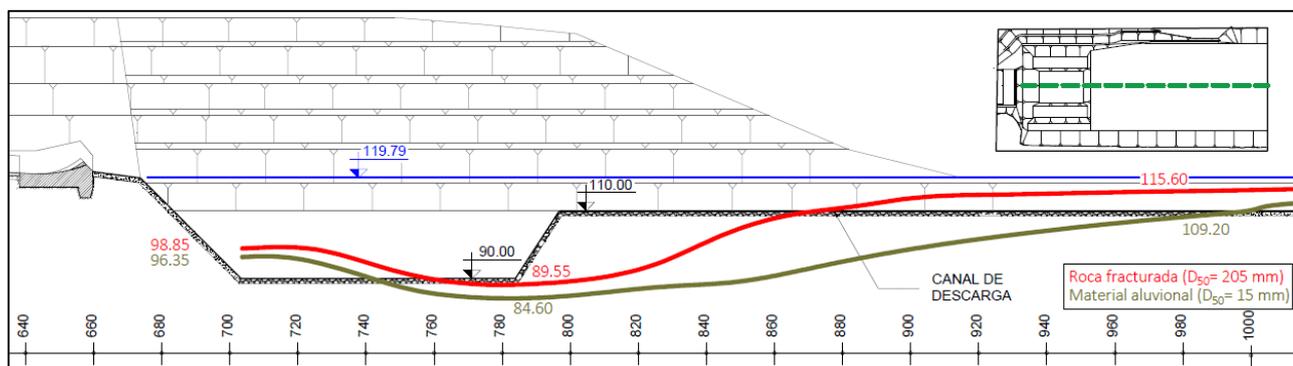


Figura 18.- Perfil longitudinal – Eje de rápida – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

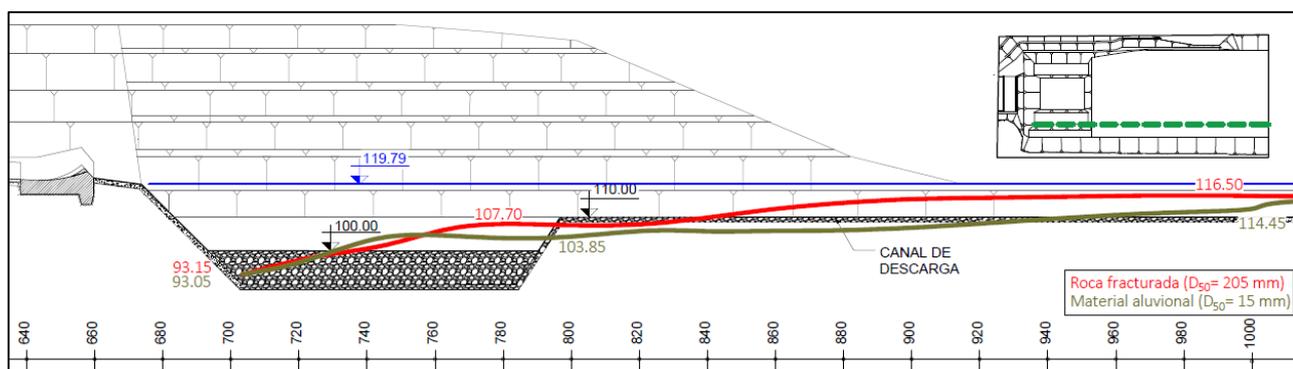


Figura 19.- Perfil longitudinal – Margen derecha – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

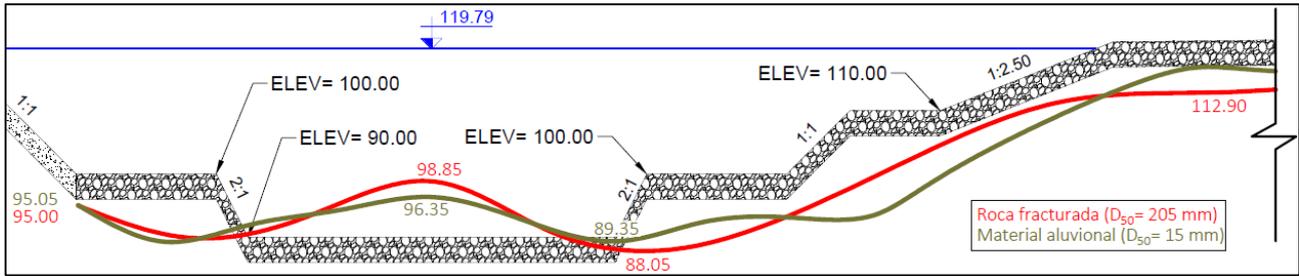


Figura 20.- Perfil transversal - Progresiva 705 m (sector fosa pre-excavada) – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

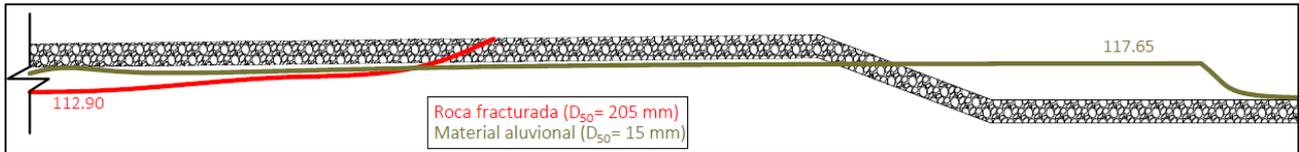


Figura 21.- Perfil transversal, Progresiva 705 m (entre canales de restitución) – $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Conclusiones etapa 2

- Las figuras permiten apreciar que la tendencia general es el desarrollo de procesos erosivos que marcan que se mantienen las mismas configuraciones de erosión en los distintos perfiles analizados. Esto determina que, si bien se registran diferencias entre ambas hipótesis de simulación, los valores de erosión mínima, tanto en el foso de erosión en general como en los contactos sobre la margen izquierda como al pie del salto de esquí son concordantes.
- Se pone de manifiesto que, en ambos casos, se registran erosiones con cotas mínimas por debajo de la cota mínima prevista en el foso pre-excavado situada en 90,00 m. Los valores registrados en el modelo como cotas mínimas de erosión fueron de 84,60 m IGN (ensayo con material fino) y 84,65 m IGN (ensayo con material representativo de la roca fracturada).
- Teniendo en cuenta la condición de caudal máximo, se aprecian procesos erosivos de mayor desarrollo con el material aluvional, aunque esta hipótesis resulta muy conservadora, motivo por el cual deberían considerarse los resultados realizados con material de la roca fracturada.
- En este último caso, se aprecia que en correspondencia con la fosa pre-excavada sólo se alcanzan cotas mínimas por debajo de 90,00 m IGN al pie del salto de esquí, con un valor mínimo de 88,05 m IGN.
- Se registran erosiones algo superiores aguas abajo, en la zona de margen izquierda del canal de restitución, pero que visiblemente pueden estar condicionadas por un efecto local del contacto entre el borde fijo y el lecho móvil simulado en el modelo, en un sector sin presencia de flujo macroturbulento.
- La erosión máxima para el caudal de $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ no llega a afectar el canal de restitución de la central, con un margen mínimo del orden de 24 metros si se considera la hipótesis de roca fracturada. Esta condición no se manifiesta con el material más fino.
- Se observan procesos erosivos que descubren la representación del macizo rocoso a margen derecha de la estructura de la rápida, lo que impone la necesidad de plantear medidas de protección para evitar potenciales riesgos en este sector.
- Asimismo, el proceso de erosión es acompañado por la formación de una barra de 6 m de acumulación de sedimentos aguas abajo. Esta situación no trae aparejados desbordes del canal de restitución del vertedero.