

# **MODELO FÍSICO PORTEZUELO DEL VIENTO**

## **Provincia de Mendoza**

### **Modelo Físico de las obras de descarga**



### **INFORME DE OPTIMIZACIÓN INICIAL**

### **DE LA OBRA DE ALIVIO**

**Junio de 2019**

**INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA**  
**LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

## EQUIPO DE TRABAJO

**Director del Laboratorio de Hidráulica**

Julio C. DE LIO

**Programa Hidráulica de Obras**

Jefe de Programa

Ing. Jorge D. BACCHIEGA

Asesoramiento

Ing. Claudio FATTOR

Responsable del Proyecto

Ing. Ignacio MARMONTI

Proyectista Mecánico

Ing. Tomás BERNARDO

Ingeniero Asociado

Ing. Daniel BARRIONUEVO

Ing. Jorge HASPERT

Responsable del Modelo

M.M.O. Luis BADO

---

## INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS DE LA ETAPA DE OPTIMIZACIÓN INICIAL.....	1
3. PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA DE DIAGNÓSTICO ...	2
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO ANALIZADO.....	2
3.2 PRINCIPALES RESULTADOS DE LA ETAPA DE DIAGNÓSTICO .....	5
4. OPTIMIZACIONES DE ESTRIBOS Y PILAS.....	13
4.1 ALTERNATIVA DE ESTRIBO 1: tipo elipse.....	13
4.2 ALTERNATIVA DE ESTRIBO 2: tipo compuesto.....	19
4.3 RESUMEN COMPARATIVO DE LAS VARIANTES DE ESTRIBOS ANALIZADAS	24
5. EXTENSIÓN DE MUROS INTERMEDIOS EN LA RAPIDA:.....	25
6. ESTRUCTURA DEFLECTORA FINAL.....	29
7. VERIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE EROSIÓN.....	34
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	43
ANEXO I .....	45

## 1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Hidráulica ha desarrollado un estudio integral en modelo físico del funcionamiento de la obra de alivio de la presa Portezuelo Grande. A partir del mismo se ha elaborado el informe PPdeIV-MF-INF02 en el cual se analiza en detalle el comportamiento general del vertedero, destacándose aspectos positivos del funcionamiento tanto de la obra de control propiamente dicha como de la rápida de descarga. Este análisis permitió establecer una factibilidad primaria, desde el punto de vista hidráulico, de la obra prevista en el proyecto básico.

No obstante, se pudieron detectar algunos aspectos susceptibles de ser mejorados en la estructura para completar su diseño óptimo, más allá de que pudieran considerarse otras variantes conceptuales que impliquen cambios mayores en la disposición y geometría de todas las obras de descarga con las que cuenta el aprovechamiento. En ese marco, se ha desarrollado una etapa complementaria en la cual se analizan, en forma inicial una serie de medidas de optimización para mejorar las condiciones de ingreso, conducción y descarga del vertedero de alivio.

En el informe de diagnóstico se han señalado una serie de pautas para la implementación y análisis de otras medidas de mejoramiento de mayor alcance, tales como la modificación del desarrollo de la rápida, así como el cambio en la ubicación relativa del descargador de fondo y de la obra de desvío. Estas medidas, de mayor alcance, podrán ser consideradas en una segunda etapa del estudio.

En consecuencia, en el presente informe se analizan los resultados obtenidos de modificaciones introducidas en los muros ala y pilas del vertedero, en la rápida de descarga y en el salto de esquí, manteniendo la disposición y geometría general del vertedero previsto en el proyecto ejecutivo.

## 2. OBJETIVOS DE LA ETAPA DE OPTIMIZACIÓN INICIAL

El objetivo principal de esta etapa es evaluar, mediante la ejecución de ensayos en el modelo físico de la obra, una serie de medidas complementarias para mejorar el funcionamiento general del vertedero y sus obras de descarga asociadas (rápida y salto de esquí).

En efecto, si bien se ha considerado que la obra planificada originalmente cumple con los requisitos primarios que se centran en permitir la erogación de los caudales máximos de diseño, se han detectado una serie de elementos que pueden mejorar las condiciones de ingreso y conducción y, por ende, facilitar la restitución al río que se constituye en el principal tema a analizar en etapas posteriores.

De este modo, se han evaluado una serie de medidas tendientes a:

- Optimizar las condiciones de aducción al vertedero mediante el planteo de medidas alternativas para la geometría de los muros extremos y las pilas intermedias.
- Analizar medidas de mejoramiento en la rápida tales como la división de la misma en canales independientes.



- Evaluar medias alternativas para mejorar las condiciones de restitución e impacto sobre la ladera de margen derecha.

A fin de cumplir con el objetivo planteado, se implementó el relevamiento de los principales parámetros vinculados a estos fenómenos, los cuales resultan:

- Nivel de embalse obtenido para la erogación de la crecida máxima. 2060 m<sup>3</sup>/s.
- Caudal erogado por la estructura de alivio para los niveles característicos de la obra. NAME:1631, NAOM:1630
- Niveles transversales y longitudinales sobre el perfil vertedero.
- Niveles sobre los muros cajeros de la rápida.
- Caracterización de las ondas cruzadas a lo largo de la rápida.
- Alcance del jet de descarga.

Tal como se señaló en la introducción, se excluyen de esta etapa del estudio medidas de mayor alcance, tales como el cambio en la geometría del vertedero y en la posición de los órganos de descarga complementarios. Los mismos podrán ser analizados en el mismo modelo con una serie de reformas que no se encontraban comprendidas en los alcances del presente estudio.

Se efectuará a continuación un resumen primario de las principales características de las obras representadas en el modelo físico, así como de los principales resultados obtenidos en la etapa inicial de diagnóstico.

### **3. PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA DE DIAGNÓSTICO**

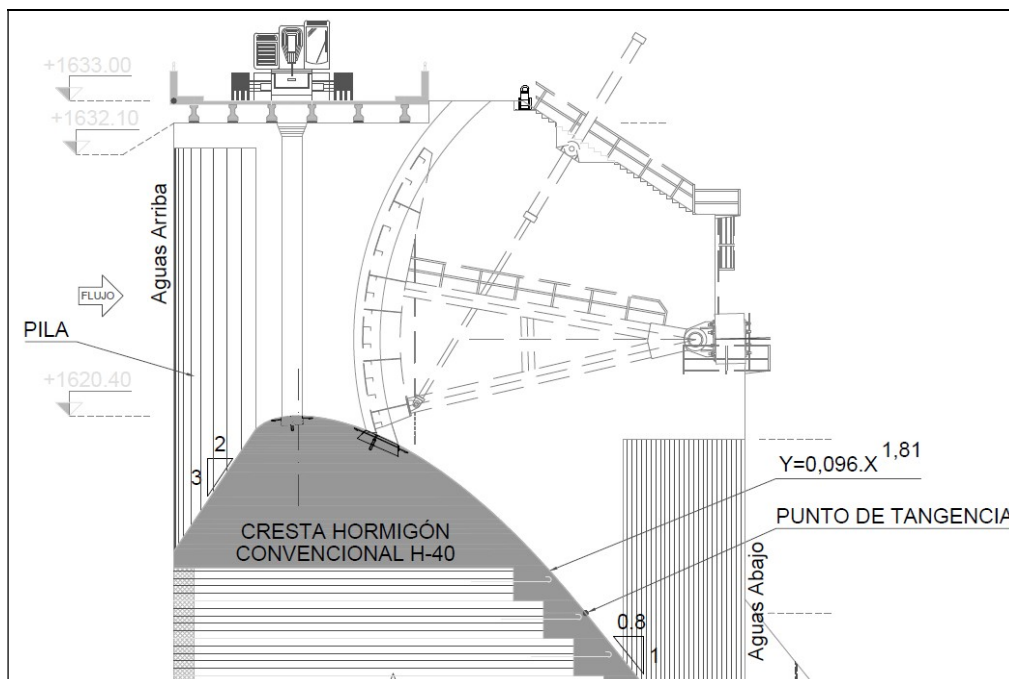
Teniendo en cuenta el tenor de las alternativas de optimización que se plantearán, se efectúa en este punto un resumen primario de las características de la obra representada en el modelo físico, tal como fue definida en el proyecto ejecutivo, así como de los principales resultados que se obtuvieron de la etapa de diagnóstico.

#### **3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO ANALIZADO**

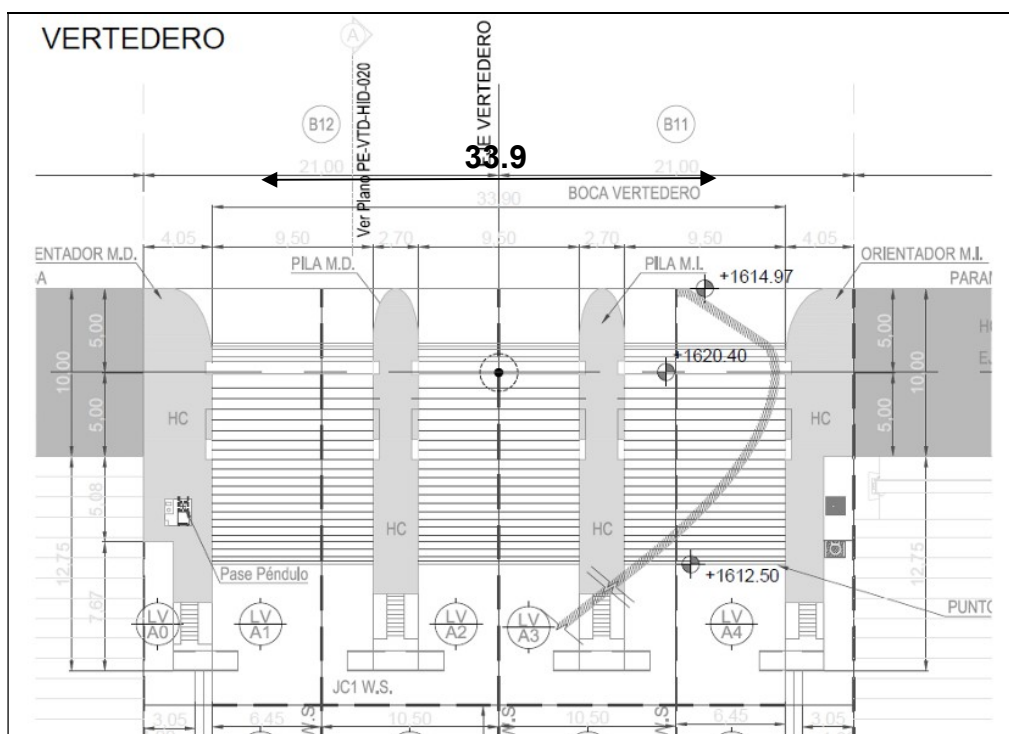
El órgano de descarga para el paso de crecidas extraordinarias está constituido por tres vanos frontales controlados por compuertas radiales. El mismo presenta un paramento aguas arriba inclinado con una pendiente 2:3, un ancho total de 33.90 m, con vanos de 9.50 m de ancho y pilas de 2.70 m de espesor. La cota de cresta del vertedero se ubica en 1620.4 msnm.

El vertedero ha sido diseñado para erogar un caudal de 2060 m<sup>3</sup>/s correspondiente a una recurrencia de 10.000 años.

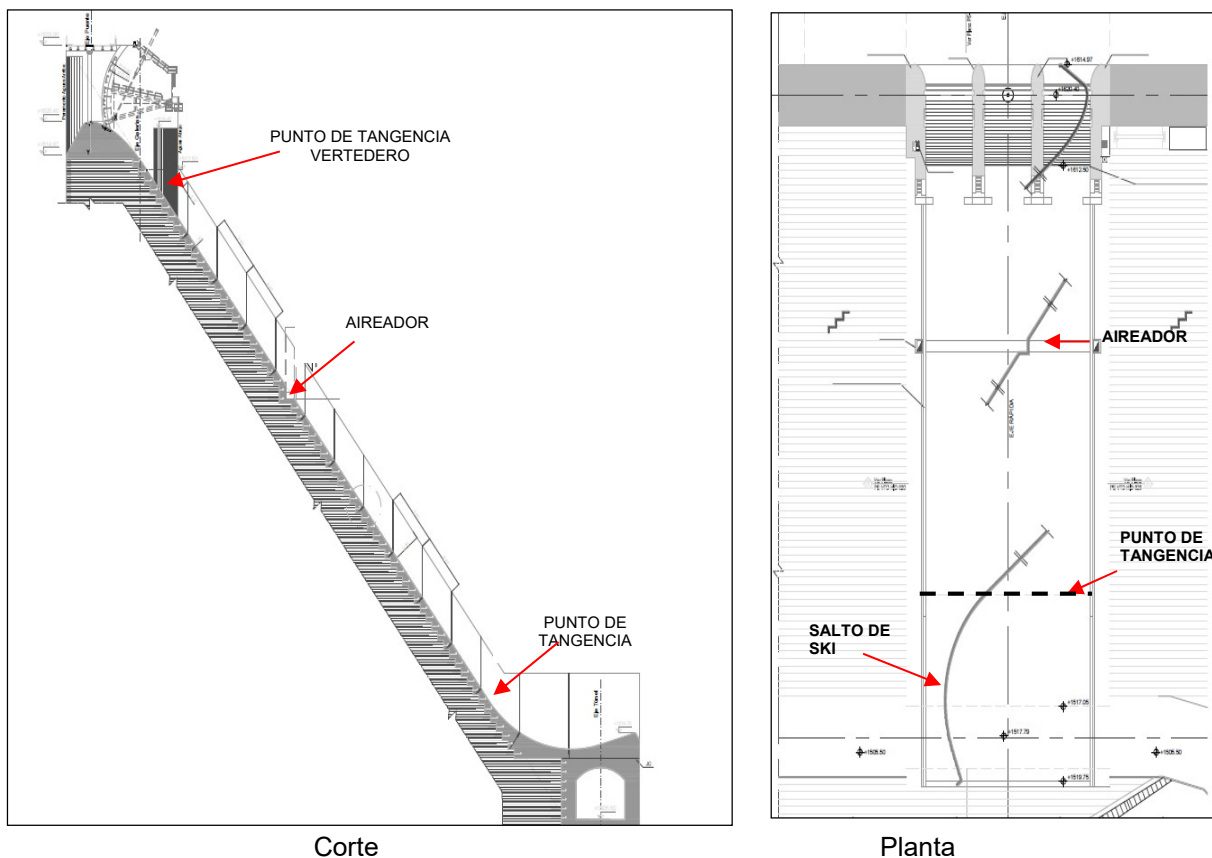
La estructura de disipación prevista está conformada por un salto de esquí continuo, común al ancho total de la obra de alivio, con cota final del trampolín de salida en 1519,75 msnm, contando con un radio de 22 metros y un ángulo de lanzamiento de 15°.



**Figura 1:** Corte del Vertedero



**Figura 2:** Planta Vertedero



**Figura 3:** Vertedero y rápida de descarga

El vertedero, con las características antes enunciadas, fue simulado en el modelo físico de la obra el cual incluye, además:

- La representación del embalse en un sector que permite garantizar las condiciones de aproximación al vertedero.
- El vertedero propiamente dicho y su rápida de descarga.
- Las salidas (no operativas) del descargador de fondo y del desvío del río.
- La descarga de la central y su canal de restitución (no operativo en esta etapa)
- Un tramo del río en la zona de impacto de la descarga del vertedero y un tramo del río aguas abajo para garantizar adecuadas condiciones de restitución.

En la siguiente imagen se muestra una vista desde aguas abajo del modelo físico representado. En el informe PPdeIV-MF-INF01 se presenta, en forma completa, todas las características del modelo y las condiciones en las que se desarrolló el proyecto del mismo.



**Fotografía 1** – Modelo físico de Portezuelo del Viento – Vista desde aguas abajo

### 3.2 PRINCIPALES RESULTADOS DE LA ETAPA DE DIAGNÓSTICO

Se resumen en este punto algunos de los resultados principales obtenidos en la etapa de diagnóstico y que dieron lugar al planteo de medidas de optimización.

#### ✓ Ley de descarga del vertedero

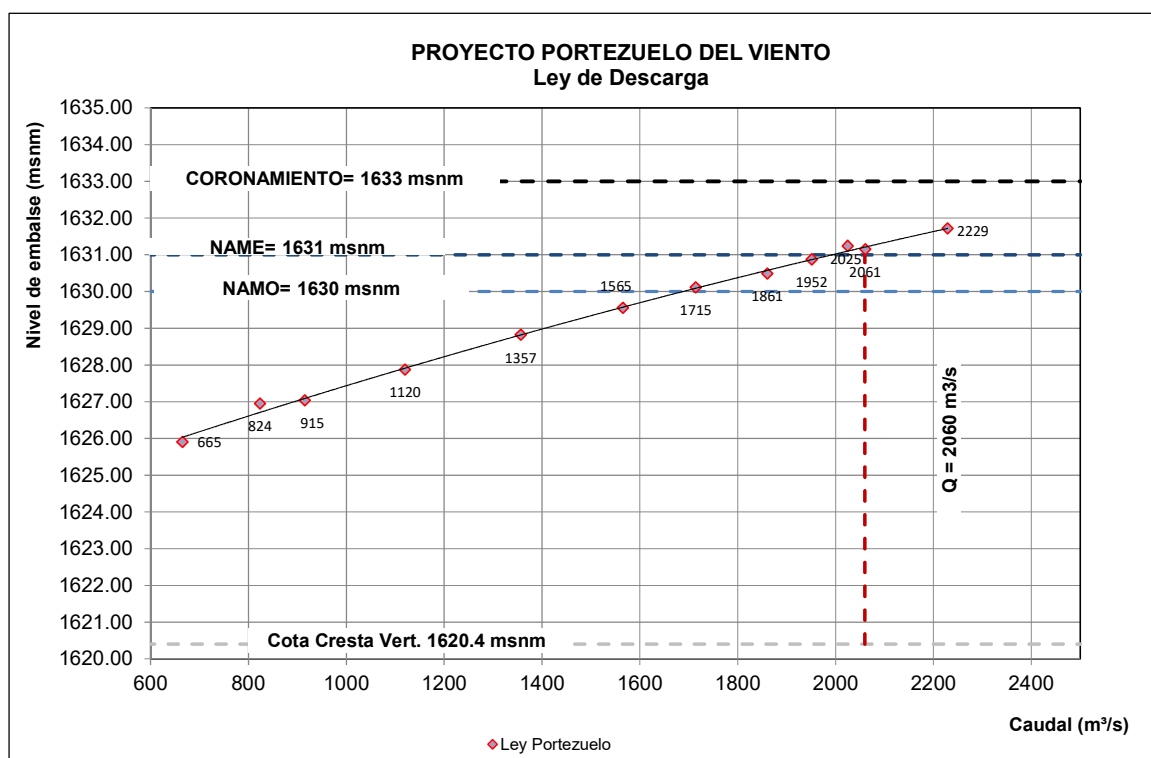
La evaluación de la capacidad de descarga del vertedero para un amplio rango de caudales determinó que para la erogación del caudal máximo de diseño se requiere un nivel de embalse de 1631,15 msnm, es decir del orden de 15 cm por encima del nivel máximo establecido en el proyecto ejecutivo.

Tabla 1– Ley NE- Q con descarga libre

NIVEL DE EMBALSE (NE) (msnm)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	CARGA SOBRE LA CRESTA (H) (m) <sup>(1)</sup>
1625.91	665	5.51
1626.95	824	6.55
1627.03	915	6.63
1627.87	1120	7.47
1628.82	1357	8.42
1629.55	1565	9.15
1630.11	1715	9.71
1630.48	1861	10.08
1630.87	1952	10.47
1631.15	2061	10.75
1631.24	2025	10.84
1631.71	2229	11.31

<sup>(1)</sup>H=NE – 1620.4 (cota cresta del vertedero)

La tabla anterior y la siguiente figura muestra la ley de descarga completa para cargas sobre la cresta variables entre 5.5 m y 11.31.



**Figura 4 – Ley H-Q con descarga libre**

Para los niveles máximos de operación, normal y extraordinario definidos en el proyecto (1630 m.s.n.m. y 1631 m.s.n.m), la obra de alivio eroga 1703 y 2003 m³/s respectivamente.

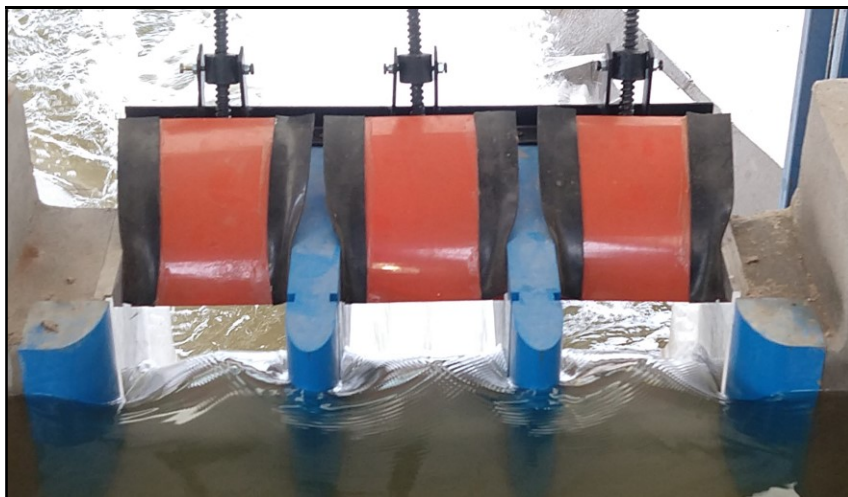
En el marco planteado, no se observan discrepancias importantes entre las previsiones establecidas en el proyecto y los resultados obtenidos en el modelo que ameriten un cambio de geometría básica del vertedero.

#### ✓ **Condiciones de aproximación y descarga.**

Si bien la capacidad de descarga del vertedero se encuentra garantizada, se pudo observar que las condiciones tridimensionales de aproximación determinan la existencia de cierta asimetría en la distribución transversal de niveles sobre la cresta del vertedero.

Las siguientes imágenes permiten apreciar el efecto que produce la estructura en las condiciones de ingreso al vertedero, donde se puede observar que, al menos a nivel superficial, las estructuras de ingreso, tanto pilas como orientadores extremos, generan efectos sobre el flujo de ingreso, dando lugar a separaciones y zonas deprimidas.





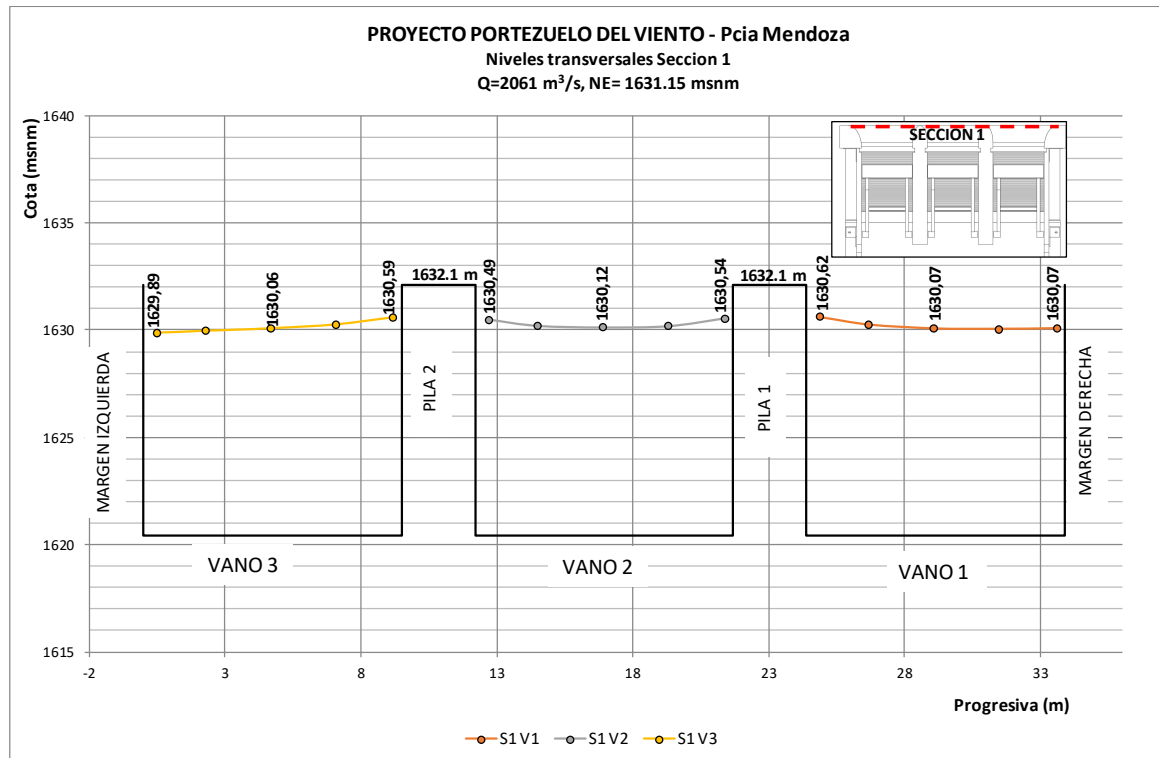
Niveles líquidos  
desde aguas  
arriba, NE  
1631.15 msnm

Fotografía 2

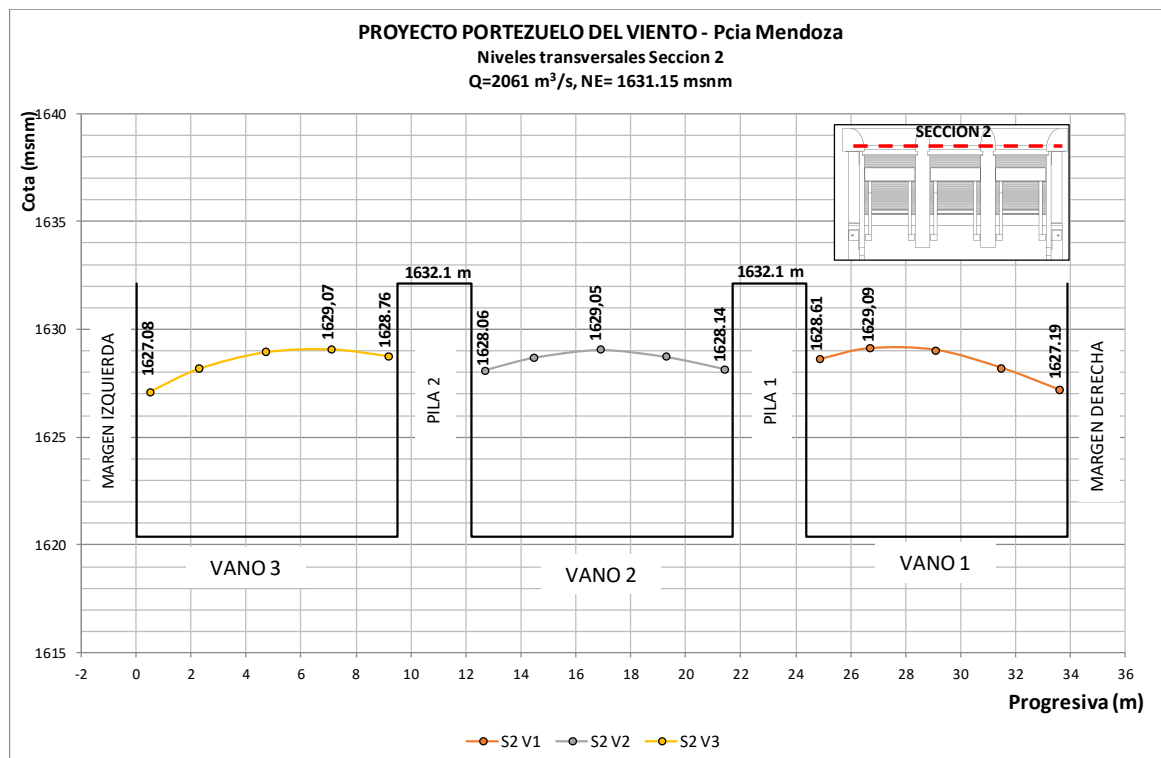


Niveles líquidos  
V1 y V2, NE  
1631.15 msnm

Fotografía 3



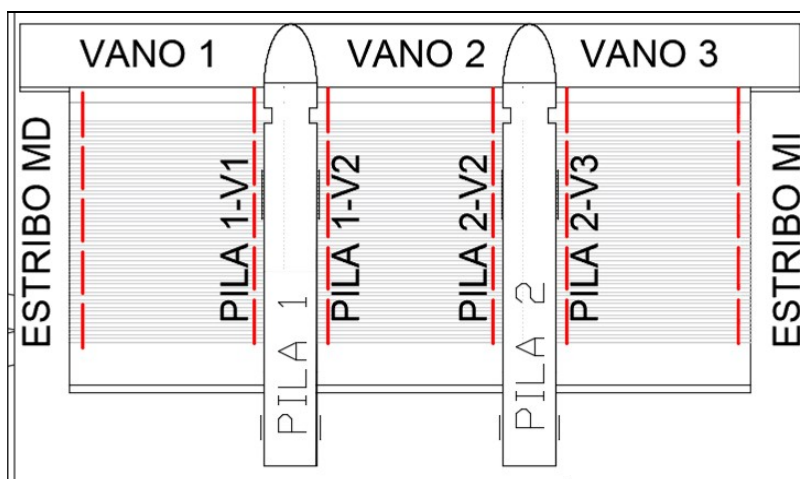
**Figura 5– Niveles Líquidos en la sección 1**



**Figura 6– Niveles Líquidos en la sección 2**

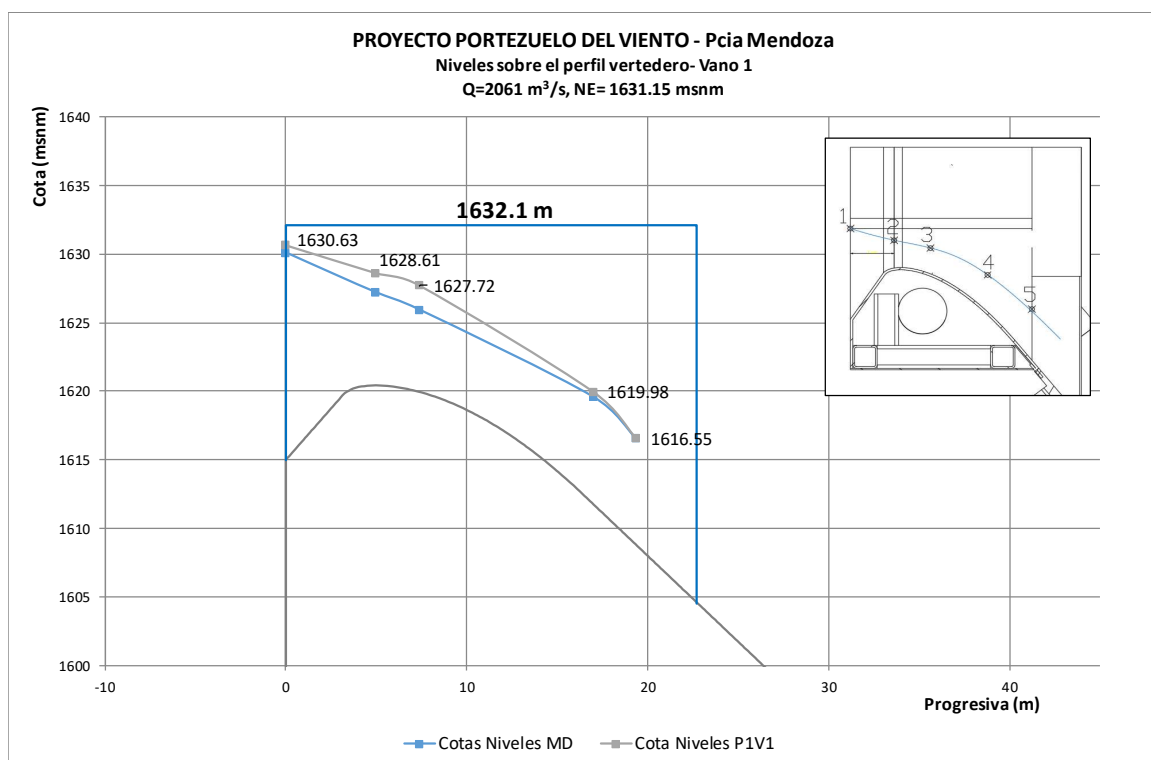
En las figuras anteriores se observan los efectos de las pilas de separación y de los orientadores extremos. En efecto, en los perfiles relevados en la Sección 2, sobre la cresta del perfil del vertedero, se pueden apreciar dos zonas donde el flujo se encuentra deprimido respecto de los niveles medios generales, observándose un desnivel de aproximadamente 2 m respecto de los sectores con máximos niveles líquidos. Esta depresión también se observa en el contacto con las pilas intermedias, aunque la variación del nivel líquido, respecto del máximo, alcanza en este caso una diferencia del orden de 1 m.

Del mismo modo, se efectuó un relevamiento de perfiles longitudinales en las siguientes secciones:



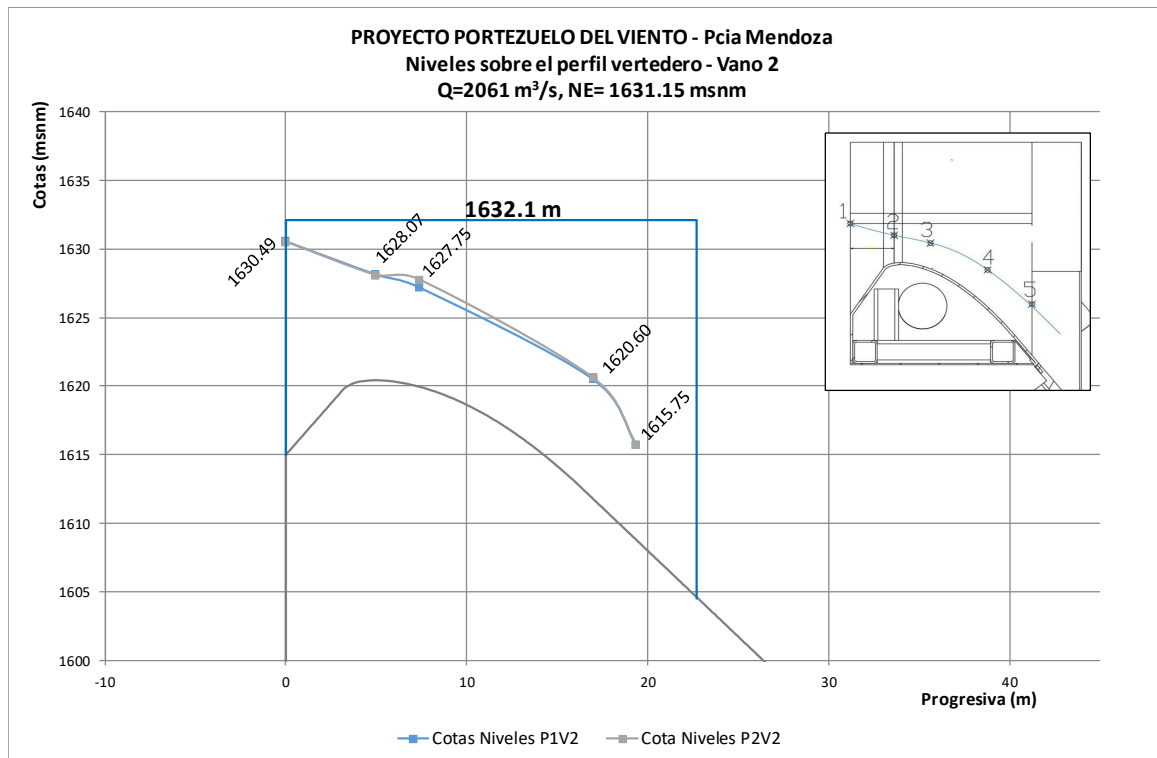
**Figura 7–** Secciones longitudinales para el relevamiento de niveles líquidos

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos en los tres vanos en los que se divide el vertedero.

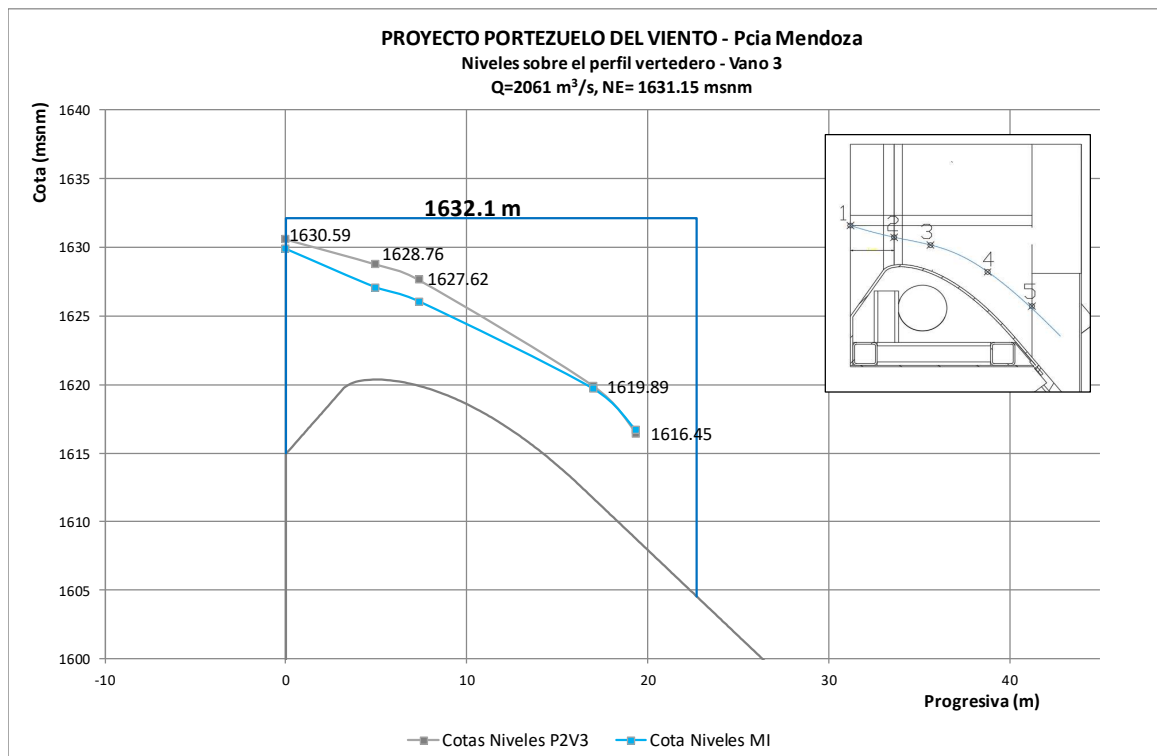


**Figura 8–** Niveles Líquidos sobre el vertedero Vano 1





**Figura 9– Niveles Líquidos sobre el vertedero Vano 2**



**Figura 10– Niveles Líquidos sobre el vertedero Vano 3**

Los niveles de los perfiles relevados en el vano central resultan relativamente uniformes, mientras que en los vanos extremos se observan niveles menores en correspondencia con los estribos.

Estos resultados determinan que la asimetría en la distribución de niveles se produce, básicamente, por la acotada extensión de los muros guía transversales y por el espesor de las pilas. Esto dio lugar al planteo de variantes que se analizarán en siguientes puntos.

✓ **Relevamiento del escurrimiento en la rápida de descarga.**

Durante la etapa de diagnostico se efectuó el relevamiento de los niveles y tirantes sobre la rápida, lo que permitió verificar la altura de los muros cajeros, de manera de evaluar el potencial riesgo de desborde del escurrimiento, indicando revanchas o sobrepasos (si existieran). Se muestran los puntos relevados en la siguiente tabla:

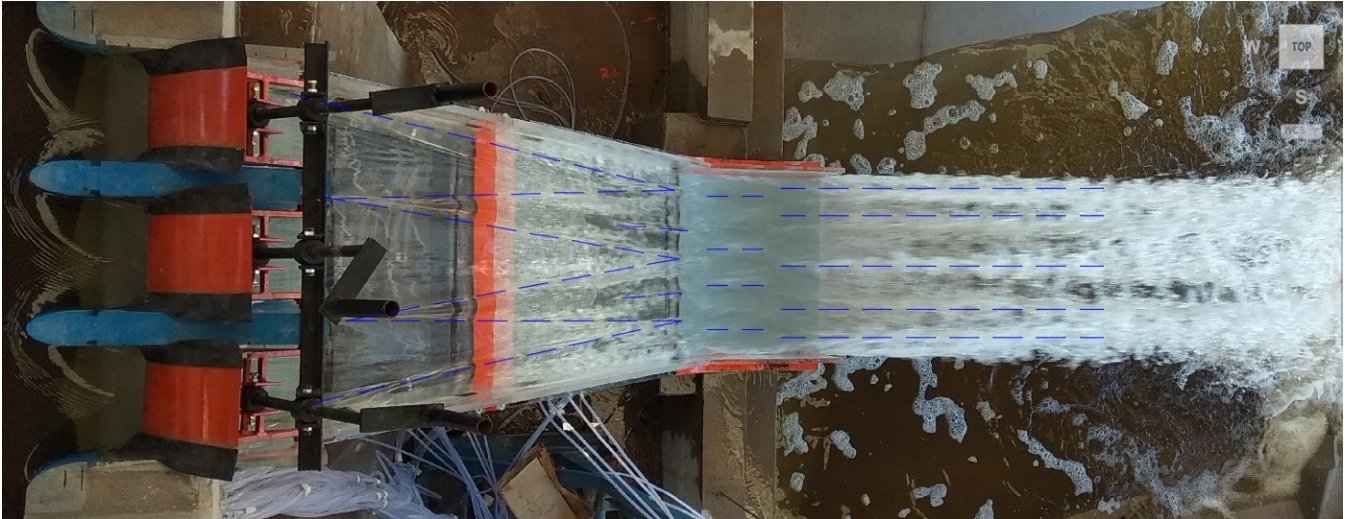
Tabla 2– Tirantes sobre la rápida

PUNTO	PROGRESIVA (m)	TIRANTE MD (m)	TIRANTE MI (m)	REVANCHA MD (m)	REVANCHA MI (m)
0	22.73	5.10	4.8	0.30	0.60
1	28.59	3.36	3.9	2.04	1.50
2	35.95	2.52	3.12	2.88	2.28
3	44.44	2.22	2.7	3.18	2.70
4	62.57	2.52	2.28	2.88	3.12
5	69.37	2.16	1.62	3.24	3.78
6	76.35	1.62	1.32	3.78	4.08
7	83.34	1.32	1.32	4.08	4.08
8	88.06	1.92	1.32	3.48	4.08

Se observó que, para el caudal de diseño, la sección de inicio de la rápida, progresiva 22.73 desde el inicio del vertedero, es la que presenta tirantes más cercano a la altura del muro proyecto, 5.4 m. En esta sección, sobre la margen derecha de la rápida, se registra la menor revancha con un valor de 0,30 m respecto de la altura del muro cajero correspondiente. Esta condición debe ser considerada en el planteo de medidas de optimización a los fines de alcanzar una condición de escurrimiento que garantice revanchas mínimas en toda la rápida.

Por otra parte, el canal que conforma la rápida de descarga posee una fuerte pendiente por lo que se produce un escurrimiento netamente supercrítico, caracterizado por la formación de ondas cruzadas característicos de los regímenes de alta velocidad, favorecidos por la influencia de las pilas intermedias.

En la siguiente fotografía se puede apreciar las características del escurrimiento sobre la rápida y el patrón de ondas generado.



**Fotografía 4**– Patrón de ondas cruzadas, NE 1631.15 msnm

Esta condición impone algunas características en el flujo de descarga que merecen ser señaladas:

- Se produce un escurrimiento no uniforme en dirección transversal a lo largo de la rápida.
- Esta no uniformidad del flujo también se pone de manifiesto sobre el escalón de aireación. Si bien el modelo no permite la valoración de la cantidad de aire incorporado, resulta posible que la asimetría del flujo también se traduzca en un funcionamiento asimétrico del aireador en cuanto a la cantidad y distribución de aire incorporado.
- Esta asimetría, con la concentración específica del flujo en la posición de las crestas de las ondas observadas, se mantiene hasta la sección de descarga y, aún también, aguas abajo del salto de esquí. Esta situación genera también cierta concentración de caudal específico que favorece mayores procesos erosivos.

Estas condiciones también han sido consideradas al momento de plantear alternativas de optimización preliminares, las cuales serán descritas y analizadas en el siguiente punto. Básicamente, las alternativas planteadas se centraron en:

- ▶ *Alternativas para los estribos y pilas aguas arriba del vertedero.*
- ▶ *Extensión de las pilas intermedias a lo largo de la rápida.*
- ▶ *Incorporación de deflectores a la salida del salto de esquí.*

#### 4. OPTIMIZACIONES DE ESTRIBOS Y PILAS

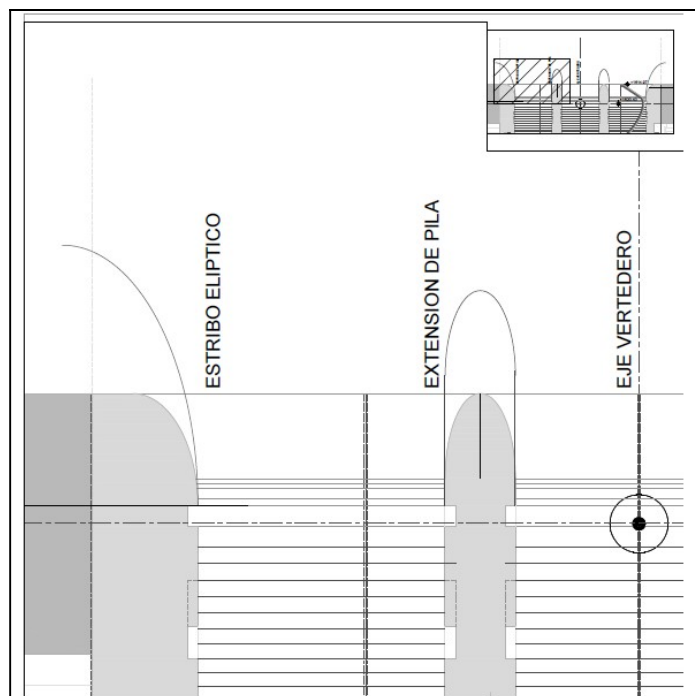
Los efectos de asimetría detectados en el ingreso al vertedero se ocasionan en la poca capacidad de “guiado” del escurrimiento por parte de los estribos laterales. La geometría prevista en el proyecto original, prevé la incorporación de estribos circulares de escaso desarrollo que no se apartan del plano vertical de la presa. Esta situación provoca un abrupto cambio de dirección de los filetes líquidos extremos, generando la asimetría observada en la sección inicial de la obra de control.

Es por ello que se plantearon una serie de variantes que incluyen una modificación de los estribos laterales y una modificación de la extensión de las pilas aguas arriba. En ese marco, se desarrollaron dos variantes posibles: i) un **estribo tipo elipse** y ii) un **estribo compuesto** por una rampa recta y una elipse de empuje con los muros laterales del vertedero.

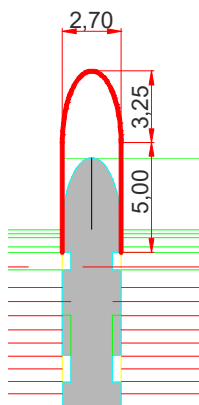
A continuación se describen las alternativas de los estribos analizados y los resultados obtenidos a partir de su implementación en el modelo físico.

##### 4.1 ALTERNATIVA DE ESTRIBO 1: tipo elipse

Esta alternativa consiste en una prolongación de los estribos hacia aguas arriba, con una geometría en planta tipo elipse, sumada a una prolongación de las pilas intermedias, también hacia aguas arriba, con un extremo elíptico. En la siguiente figura se muestra, en forma esquemática, la variante planteada:



**Figura 11**– Planta estribo tipo elipse



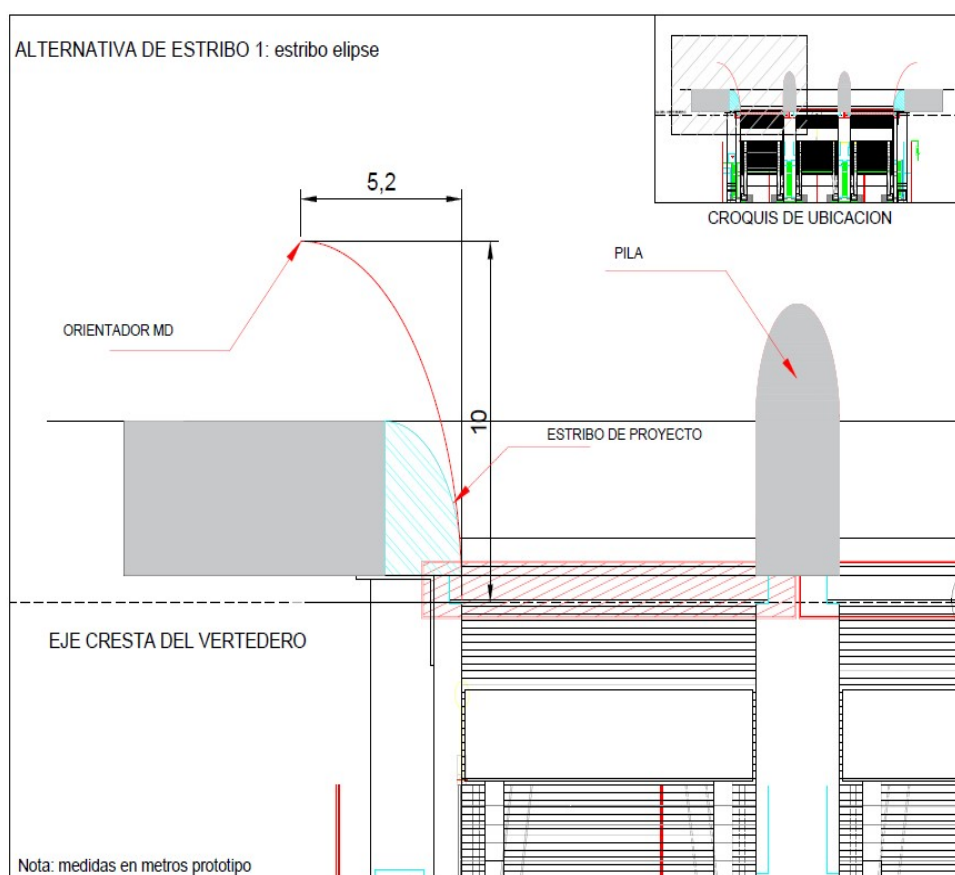
La geometría de la pila adoptada consiste en una prolongación recta hacia aguas arriba de 5,00 m de longitud, culminando con un extremo aguas arriba del tipo elíptico.

El extremo se conforma de una semi elipse de 2,70 m de diámetro menor y 3.25 m de radio mayor.

El objetivo de esta prolongación es alcanzar un mejoramiento en el guiado del flujo, principalmente en el vano central y en los dos medios vanos adyacentes.

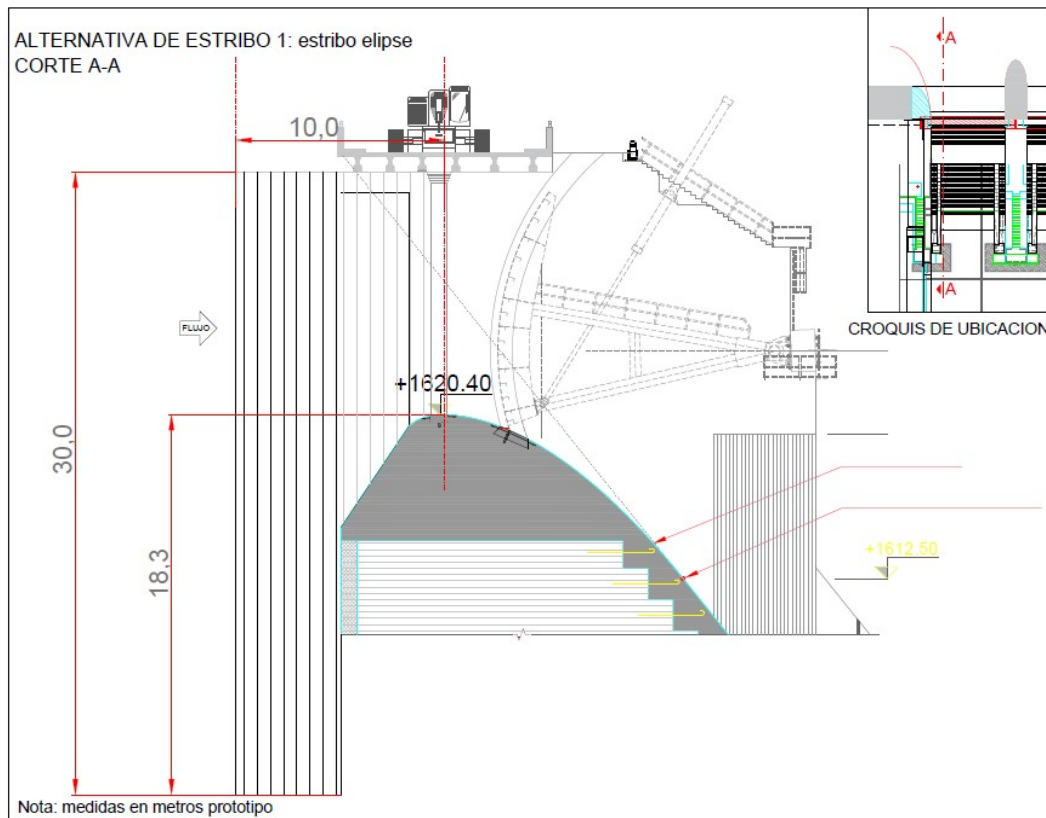
Con relación a la prolongación y modificación de los estribos laterales, se implementó una semi-elipse extendida hacia aguas arriba 10.0 m (radio mayor) respecto del eje que coincide con la cresta del vertedero, con un radio menor de 5,2 m.

En las siguientes figuras se muestran sendos plantas y cortes de la estructura modificada.



**Figura 12– Planta estribo tipo elipse**

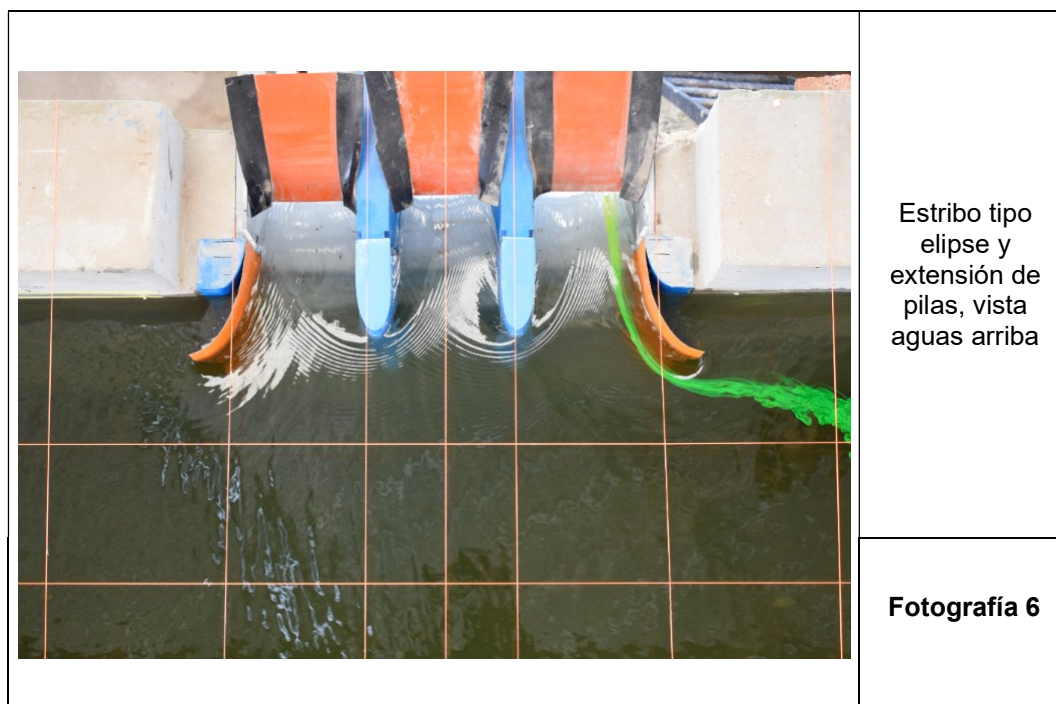




**Figura 13**– Corte longitudinal estribo tipo elipse



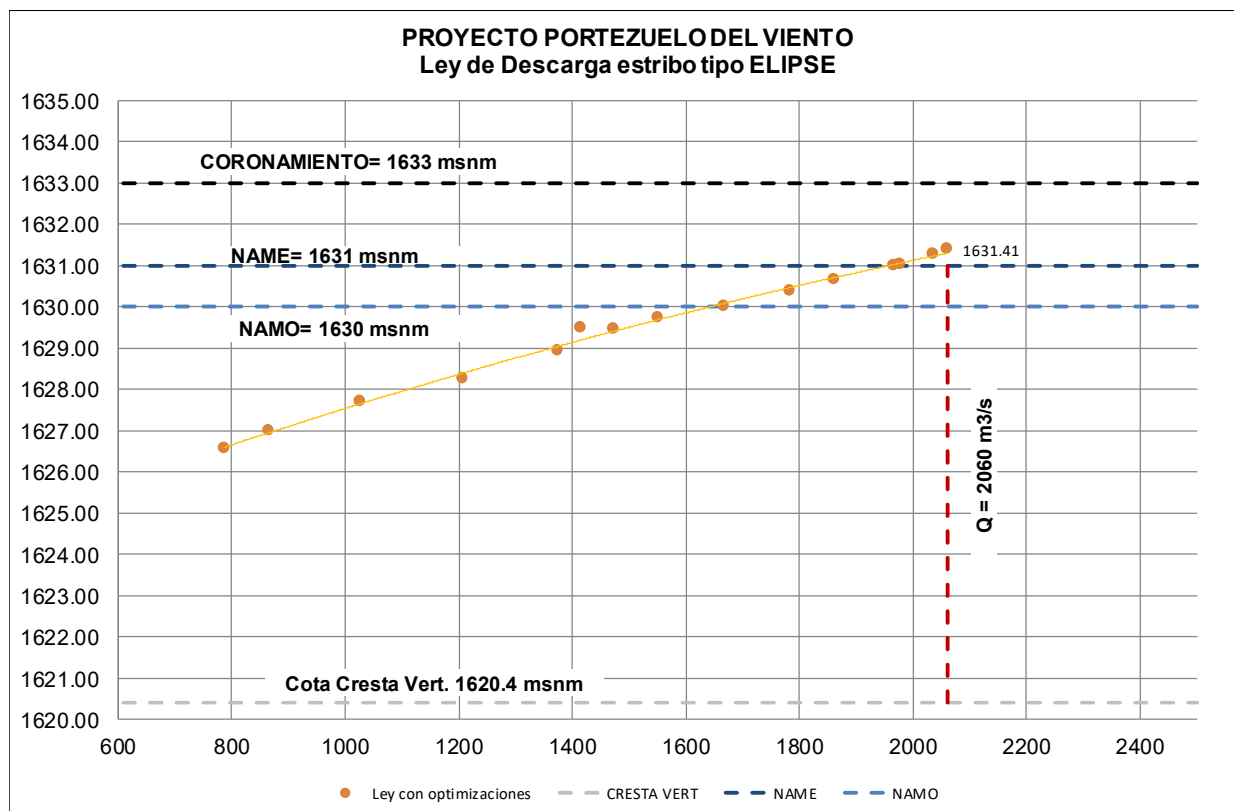
A partir de la implementación de esta alternativa en el modelo físico, se efectuaron ensayos a los fines de evaluar el comportamiento de la estructura en cuanto a la capacidad de descarga y a la configuración del flujo de aproximación y de ingreso a la obra de control. En las siguientes fotografías y figuras se observan los resultados obtenidos.



**Figura 14**–Estribo tipo elipse – Condiciones de ingreso

Tabla 3– Ley de descarga estribo tipo elipse y extensión de pilas.

Ley de descarga con optimización de la embocadura ESTRIBO ELIPSE	
NIVEL DE EMBALSE (msnm)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)
1625.77	600.33
1626.56	788.41
1626.99	866.55
1627.71	1026.92
1628.27	1208.55
1628.94	1376.11
1629.49	1415.10
1629.45	1473.29
1629.73	1551.49
1630.00	1667.20
1630.39	1783.65
1630.66	1862.92
1631.00	1966.70
1631.03	1978.36
1631.27	2037.05
1631.41	2060.70



**Figura 15**—Estribo tipo elipse – Ley de Descarga

La ley de descarga obtenida experimentalmente de la modelación física resulta:

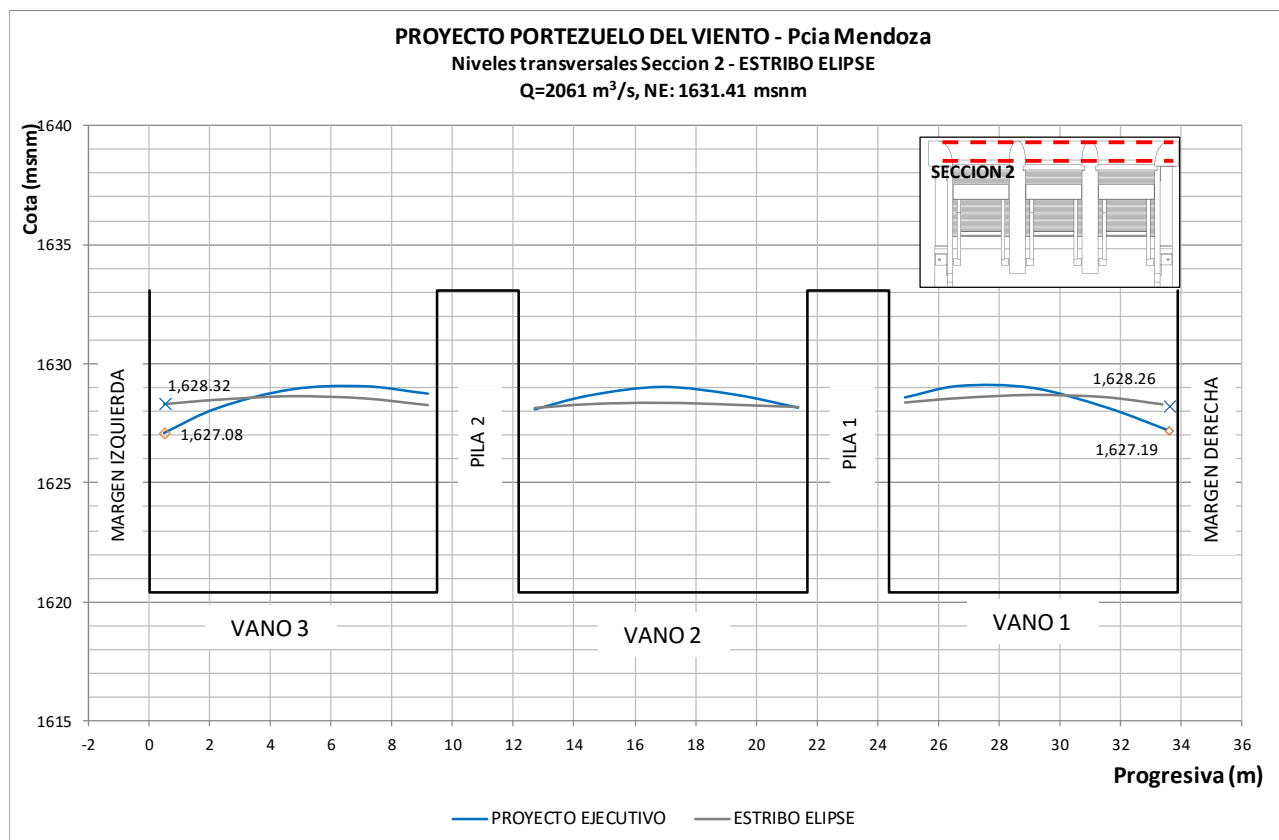
$$Ne = -0.00000069 Q^2 + 0.005654 Q + 1622.5767$$

De este análisis se observa que el nivel de embalse resultante para erogar la crecida máxima de 2060 m³/s asciende a 1631.41 msnm, 0.41 m por sobre el nivel esperado y 0.25 m sobre el nivel obtenido durante la etapa de diagnóstico para la configuración del proyecto ejecutivo (1631.15msnm).

Complementariamente se realizó el relevamiento de tirantes transversales sobre la estructura de control sobre la cresta del vertedero. En la siguiente figura se muestra la comparación del relevamiento realizado para este tipo de geometría de aducción con el del proyecto ejecutivo.

En las siguientes figuras se muestra, en forma comparativa, la condición de ingreso del flujo respecto del obtenido durante los ensayos del proyecto original.





**Figura 16**—Estribo tipo elipse – Distribución transversal de niveles

Sobre los estribos se puede observar una menor separación del flujo respecto al borde sólido lo cual se traduce en un ascenso del nivel entre 1 y 1.2 m aproximadamente respecto de la condición original.

En el vano central el perfil líquido observado es inferior al relevado para la estructura de proyecto ejecutivo, lo cual implica una mayor aceleración del flujo, por lo menos en este vano central.

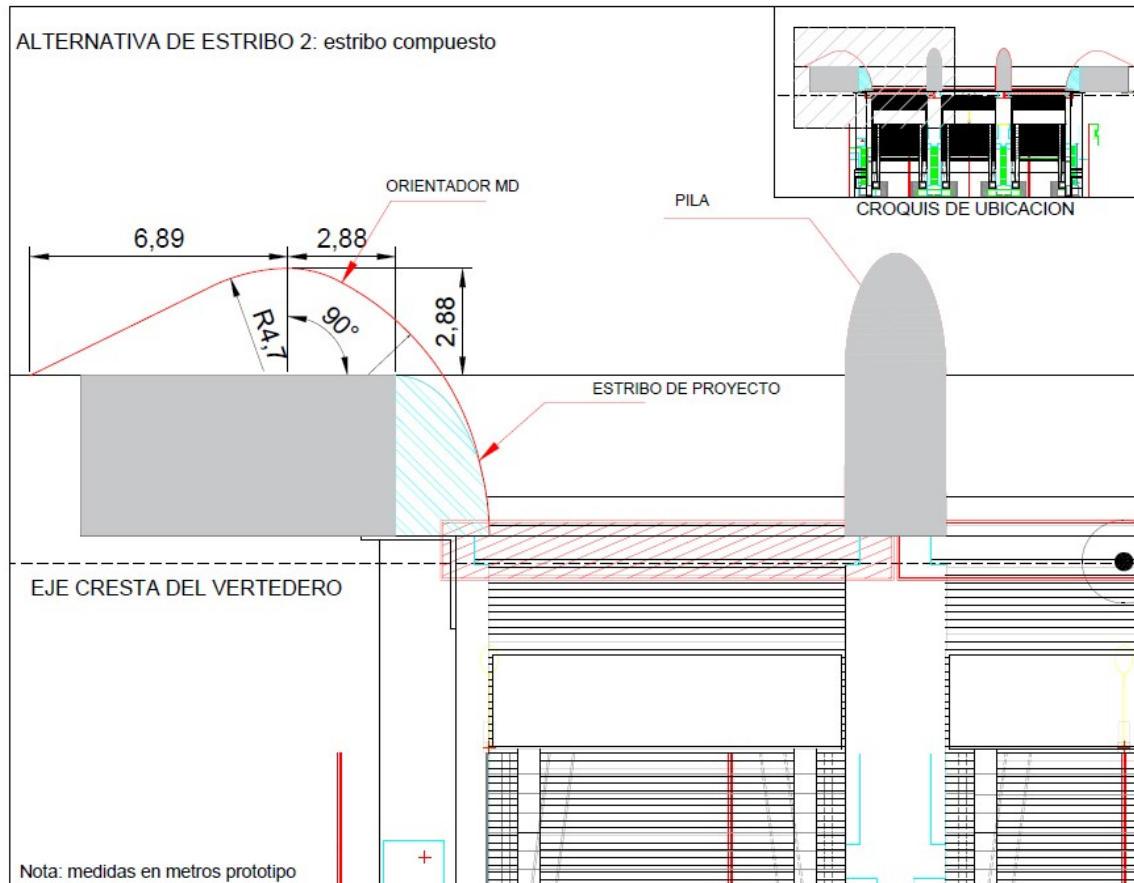
De acuerdo con lo analizado, la incorporación del estribo y de la prolongación de la pila produce un efecto positivo sobre la distribución transversal de niveles en la sección de control del vertedero, mejorándose, en cierta forma, los efectos que se propagan hacia aguas abajo.

No obstante ello, la alternativa planteada presenta una importante dimensión hacia aguas arriba que actuará como voladizo respecto del espaldón aguas arriba de la presa. Esta condición, que conlleva algunas dificultades constructivas, no se acompaña con un mejoramiento efectivo de la capacidad de descarga. En efecto, si bien en términos prácticos se observa una capacidad de descarga semejante, la incorporación del muro guía extremo produce un incremento del nivel de embalse requerido.

Es por ello que se ha planteado una nueva variante que se analizará a continuación:

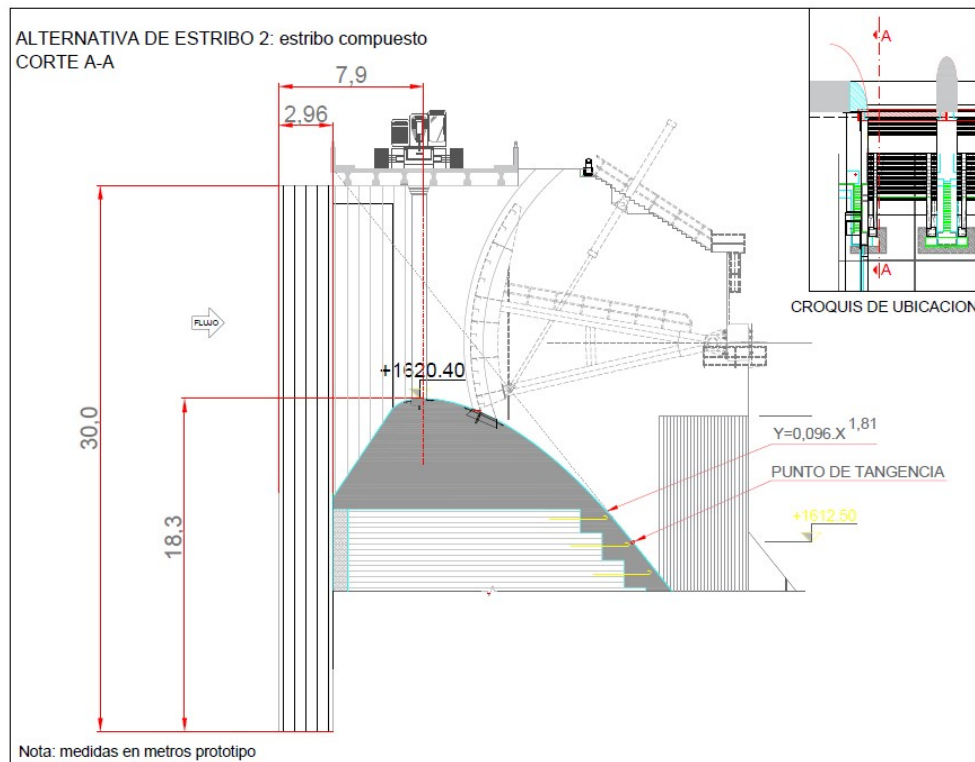
#### 4.2 ALTERNATIVA DE ESTRIBO 2: tipo compuesto

Con el objetivo de lograr una mejor incorporación del flujo que accede al vertedero por los laterales de la abertura, se ha considerado una variante a la alternativa anterior, que presenta en planta, una estructura recta inclinada respecto del paramento vertical de la presa, y una continuación con un orientador circular, tal como se muestra en la siguiente figura:

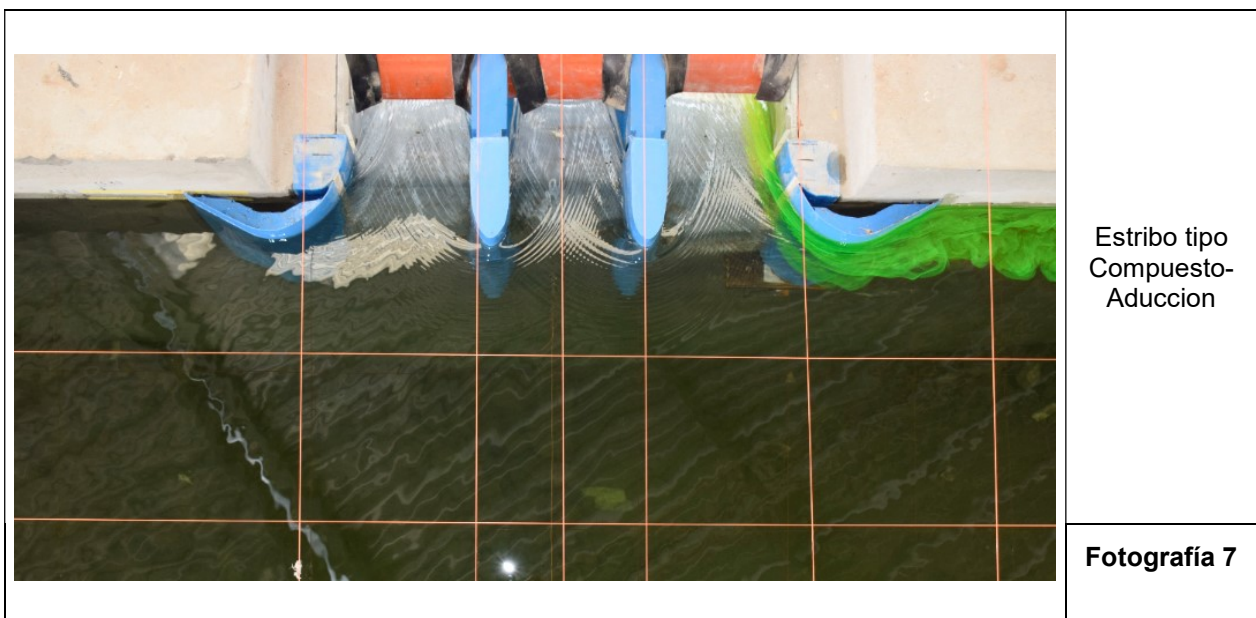


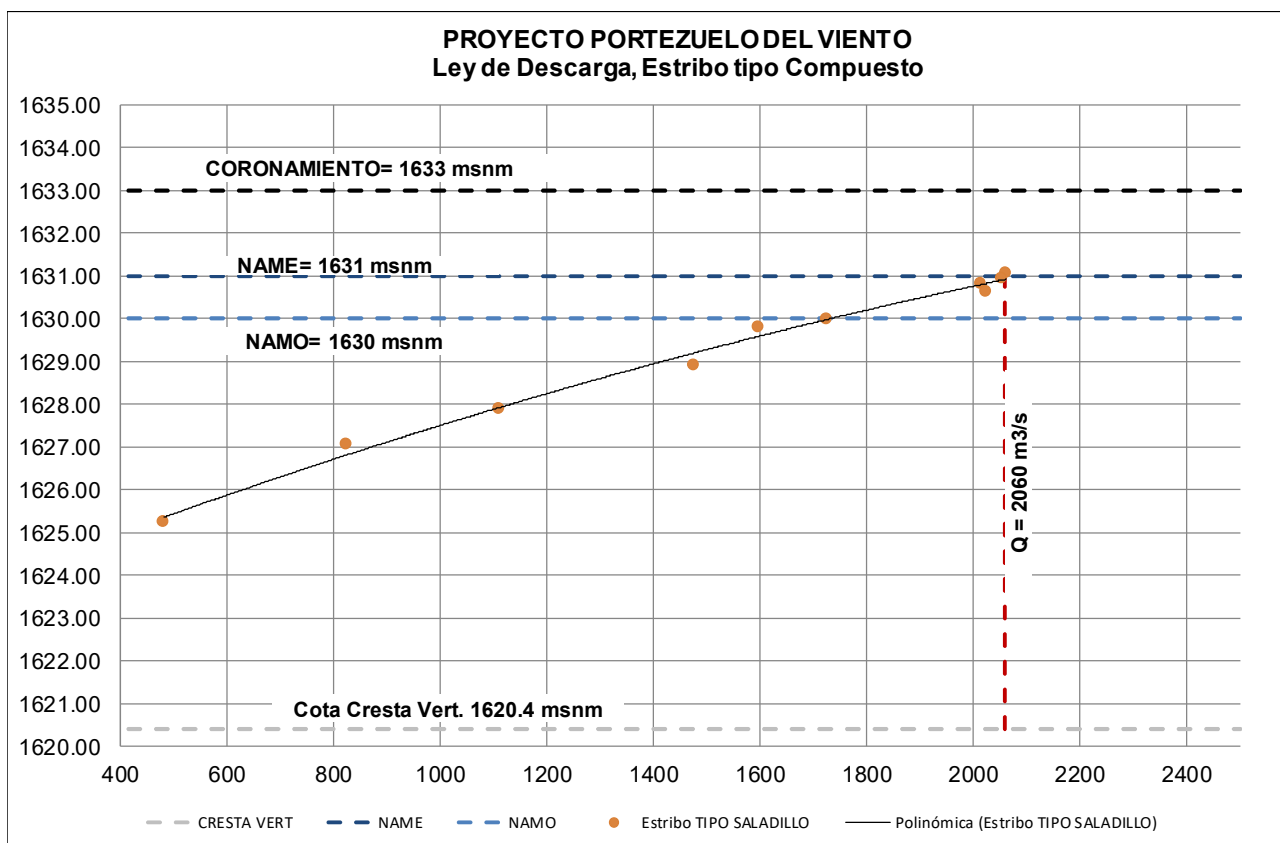
**Figura 17**–Alternativa 2 – Estribo compuesto - Planta

En la figura siguiente se aprecia un corte de la estructura propuesta, donde se puede observar un menor desarrollo del muro extremo hacia aguas arriba, manteniéndose el resto de las dimensiones verticales.



**Figura 18**–Alternativa 2 – Estribo compuesto - Corte





**Figura 19**–Alternativa 2 – Ley de Descarga

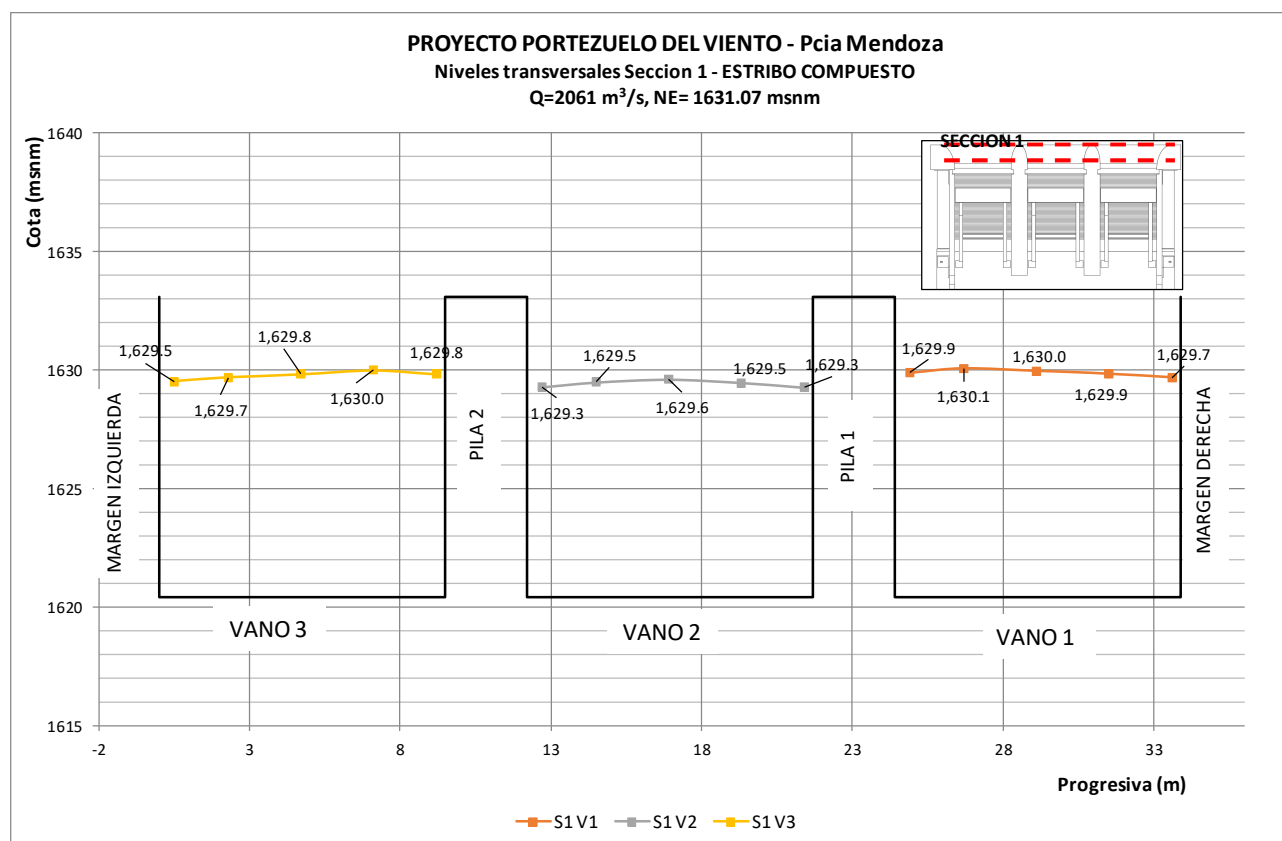
La ley de descarga obtenida experimentalmente de la modelación física resulta:

$$Ne = -0.00000058 Q^2 + 0.00499697 Q + 1623.092$$

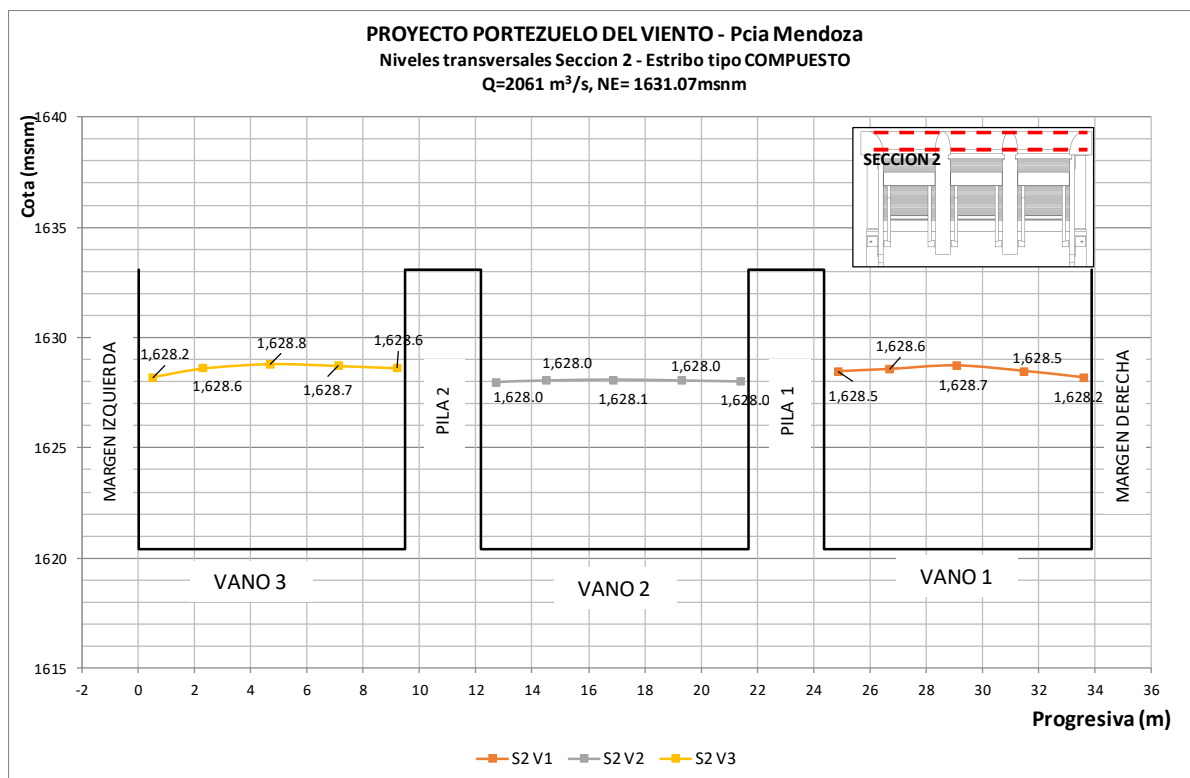
De este análisis se observa que el nivel de embalse esperado para erogar la crecida máxima de 2060 m<sup>3</sup>/s asciende a 1631.07 msnm, 0.07 m por sobre el nivel esperado y - 0.08 m sobre el nivel obtenido durante la etapa de diagnóstico para la configuración del proyecto ejecutivo (1631.15msnm).

Para los niveles 1630 y 1631 msnm la estructura permite la erogación de 1725.6 y 2013 m<sup>3</sup>/s respectivamente, aproximadamente 10 m<sup>3</sup>/s mayor a la condición de proyecto.

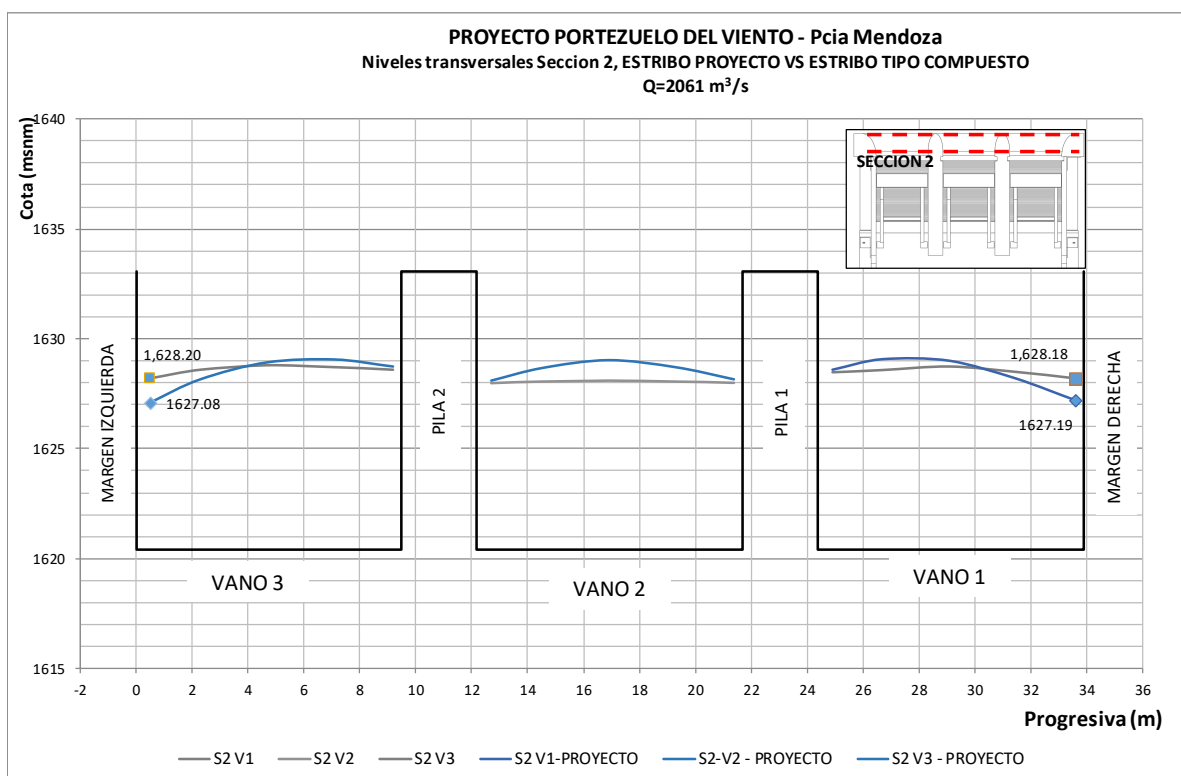
A continuación, se presenta el relevamiento de perfiles transversales sobre la estructura de vertedero, en la sección del paramento aguas arriba (sección 1) y sobre la cresta del vertedero (sección 2).



**Figura 20**–Estribo tipo Compuesto – Distribución transversal de niveles – Sección 1



**Figura 21**–Estribo tipo Compuesto – Distribución transversal de niveles – Sección 2



**Figura 22**–Estribo tipo Compuesto – Distribución transversal de niveles – Comparación





De igual forma que para el estribo de geometría elíptica, se observa en la figura anterior que los tirantes sobre las márgenes, producto de la optimización de la geometría del estribo aumentan entre 1 y 1.2 m.

Del análisis del comportamiento de la variante 2 analizada, surge que se produce un mejoramiento visible en la capacidad de descarga, la cual se aproxima, en cuanto al nivel de embalse requerido, a la prevista en el proyecto original. Del mismo modo, se aprecia una mejora en las condiciones de aducción de la estructura de control.

A continuación, se efectuará un análisis comparativo entre las variantes de estribo ensayadas.

#### 4.3 RESUMEN COMPARATIVO DE LAS VARIANTES DE ESTRIBOS ANALIZADAS

Se presenta a continuación un resumen de los valores obtenidos del relevamiento de la ley de descarga y tirantes en la rápida de las distintas alternativas de estribos presentadas anteriormente.

NIVEL DE EMBALSE (msnm)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)		
	ESTRIBO DE PROYECTO	ESTRIBO ELIPSE	ESTRIBO TIPO COMPUESTO
1630	1703	1667.20	2061
1631	2003	1966.70	2013

NIVEL DE EMBALSE (msnm)			
CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	ESTRIBO DE PROYECTO	ESTRIBO ELIPSE	ESTRIBO TIPO COMPUESTO
2060	1631.15	1631.41	1630.94

		ESTRIBO PROYECTO EJECUTIVO		ESTRIBO TIPO ELIPSE		ESTRIBO TIPO COMPUESTO	
PUNTO	PROGRESIVA (m)	REVANCHA MD (m)	REVANCHA MI (m)	REVANCHA MD (m)	REVANCHA MI (m)	REVANCHA MD (m)	REVANCHA MI (m)
0	22.73	0.20	0.50	0.92	1.04	0.92	1.10
1	28.59	1.94	1.40	1.64	1.76	1.52	1.82
2	35.95	2.78	2.18	2.42	2.42	2.60	2.60
3	44.44	3.08	2.60	2.84	2.66	2.78	2.84
4	62.57	2.78	3.02	2.78	2.78	2.90	2.90
5	69.37	3.14	3.68	3.50	3.56	3.44	3.50
6	76.35	3.68	3.98	3.56	3.56	3.62	3.62
7	83.34	3.98	3.98	3.74	3.80	3.92	4.10
8	88.06	3.38	3.98	3.92	3.98	4.10	3.86

Del análisis comparativo surgen los siguientes comentarios:

- ▶ Ambas variantes mejoran la condición de ingreso al vertedero permitiendo lograr una distribución de niveles relativamente uniforme sobre la cresta del vertedero.
- ▶ La variante elíptica genera, a pesar de su extensión hacia aguas arriba, una separación del flujo de ingreso que se traduce en un leve incremento del nivel de embalse requerido para erogar el caudal de diseño.
- ▶ La variante compuesta mejora la condición de ingreso y aumenta, aún levemente, la capacidad de descarga aproximándola a la condición teórica prevista en el proyecto.
- ▶ Las dos variantes permiten aumentar la revancha de sobre paso en la rápida alcanzando valores cercanos a 1,0 m en la zona inicial de la rápida y superiores a 1,5 en tramos aguas abajo.

De este modo, se considera factible la incorporación, como parte del proyecto ejecutivo, de un muro tipo compuesto como el presentado como Alternativa 2.

## 5. EXTENSIÓN DE MUROS INTERMEDIOS EN LA RÁPIDA:

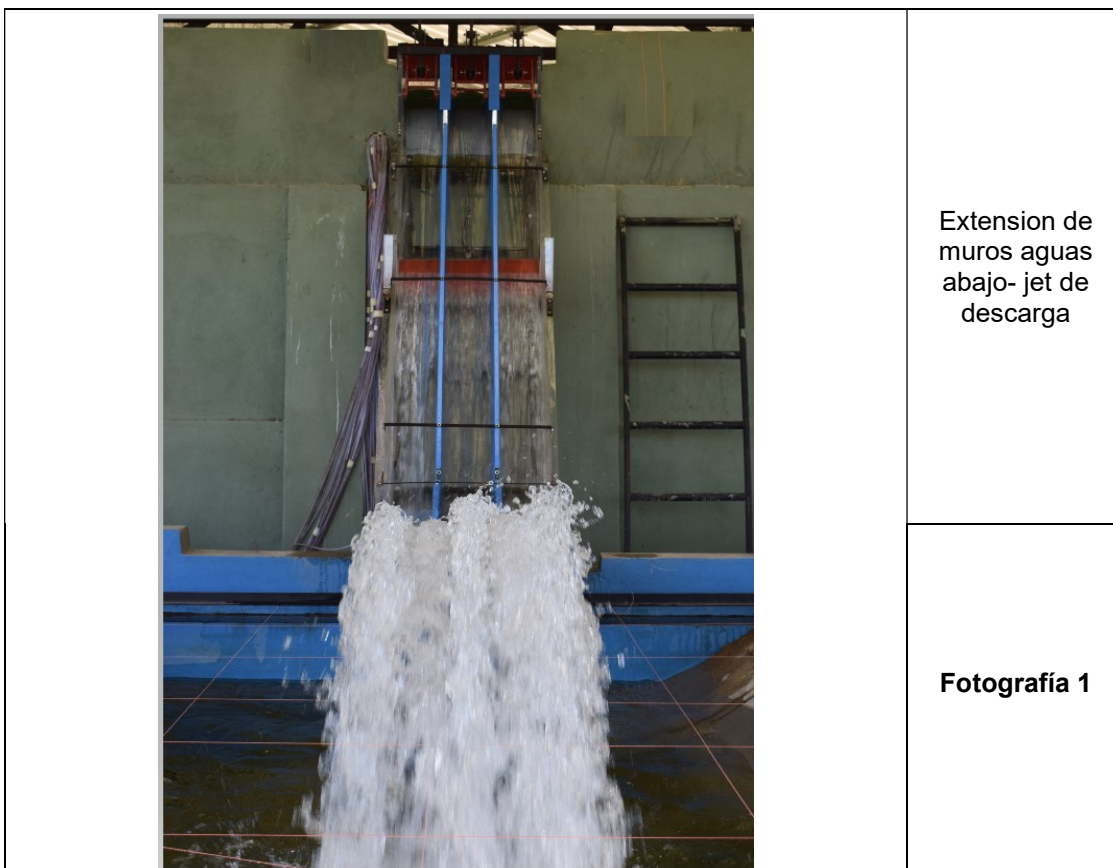
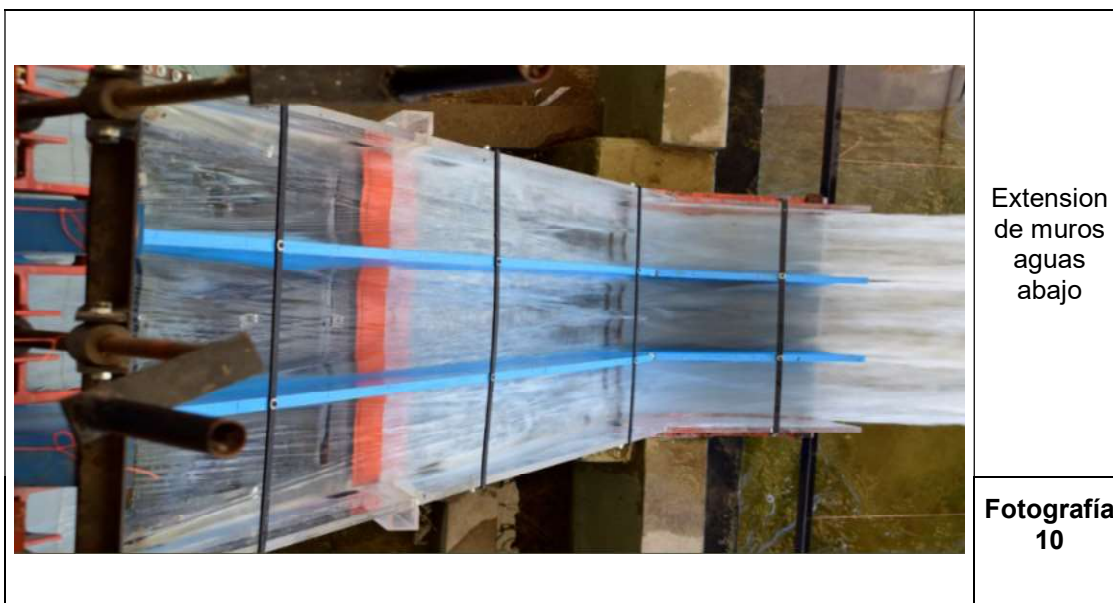
La implementación de muros intermedios permite la separación del escurrimiento en la rápida en una serie de vanos de acción independientes, pudiendo generarse mejoras asociadas a los siguientes aspectos:

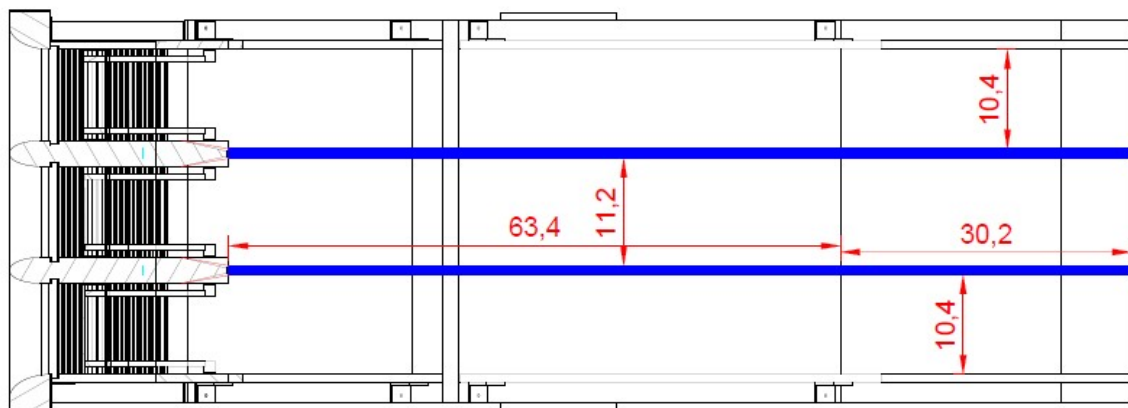
- ✓ Se generan tres canales independientes que minimizan la asimetría transversal de niveles vinculados a la formación de ondas.
- ✓ Se pueden alcanzar condiciones más uniformes en la sección de salida del salto de esquí.
- ✓ El comportamiento del aireador puede mejorar aumentando la eficiencia de la distribución transversal de aire al reducirse los tramos a abastecer por el aireador.



- ✓ La mayor uniformidad del flujo permitiría mejorar las condiciones de descarga.
- ✓ Se aumenta la eficiencia de potenciales estructuras emplazadas en la sección de descarga del salto de esquí, tendientes a desviar el jet de descarga hacia el centro del río.

En la siguiente figuras y fotografías se observa la solución implementada:





**Figura 23**—Extensión de muros intermedios en la rápida de descarga

Uno de los efectos a observar es la configuración de niveles a lo largo de los distintos canales que se conforman con la solución, designándose de acuerdo con los vanos que ocupan como V1, V2 y V3.

Se presenta a continuación el relevamiento de los tirantes sobre la rápida y se indica la diferencia con los tirantes registrados para el caso estribo tipo Saladillo y sin muros intermedios.

Tirante V1			
PUNTO	PROGRESIVA (m)	COTA MI (m)	COTA MD (m)
0	22.73	1611.10	1611.96
1	28.59	1603.34	1602.77
2	35.95	1594.52	1592.51
3	43.12	1584.52	1583.95
4	62.57	1559.30	1559.20
5	69.37	1548.85	1549.99
6	76.35	1540.53	1540.91
7	83.34	1532.46	1532.08
8	87.68	1527.38	1526.67

Tirante V2			
PUNTO	PROGRESIVA (m)	COTA MI (m)	COTA MD (m)
0	22.73	1610.72	1602.10
1	28.59	1602.29	1593.18
2	35.95	1593.37	1583.56
3	43.12	1583.47	1559.30
4	62.57	1559.30	1549.32
5	69.37	1549.23	1541.00
6	76.35	1541.00	1532.94
7	83.34	1532.94	1527.68
8	87.68	1527.68	1523.37

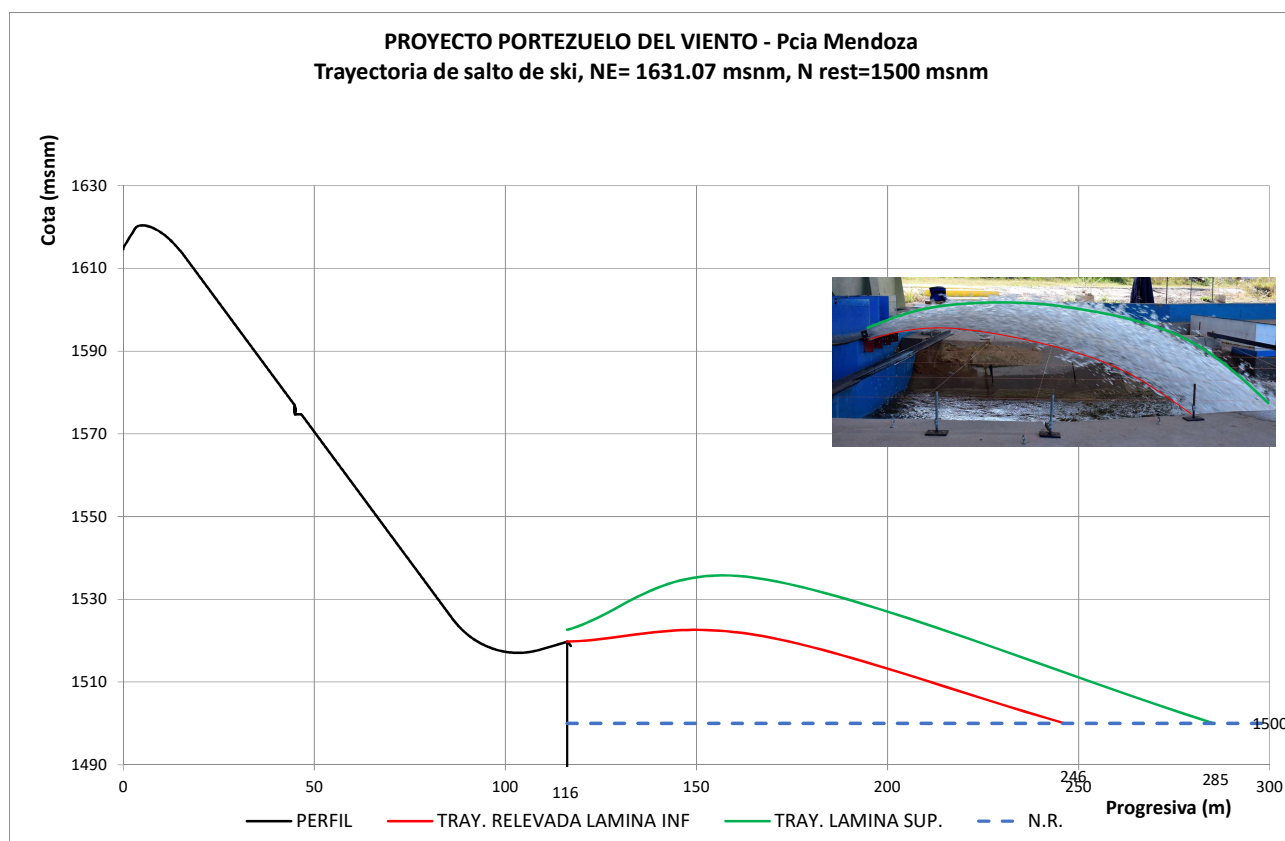
Tirante V3			
PUNTO	PROGRESIVA (m)	COTA MI (m)	COTA MD (m)
0	22.73	1611.29	1611.96
1	28.59	1603.05	1603.34
2	35.95	1593.56	1592.99
3	43.12	1583.56	1583.37
4	62.57	1558.82	1558.92
5	69.37	1549.32	1549.80
6	76.35	1540.53	1540.62
7	83.34	1532.46	1531.89
8	87.68	1527.68	1526.67

Del análisis de los resultados obtenidos se efectuó la comparación de cotas registradas en los muros cajeros laterales en los escenarios conformados por la implementación de los muros de separación y sin la presencia de los mismos.

DIFERENCIA CON SOLO ESTRIBO	DIFERENCIA CON SOLO ESTRIBO
MURO MD	MURO MI
0.19	0.38
-0.57	0.19
-0.29	0.19
0.86	0.00
0.29	0.00
0.76	0.67
0.57	0.29
0.57	0.48
0.67	0.76
1.24	1.14
1.05	0.95
0.48	-0.10

Se observa que para la progresiva 22.73 m todavía se tiene suficiente revancha, ya que si bien con los muros intermedios el tirante aumenta 0.19 y 0.38, todavía se dispone de revanchas de 0.7 m aproximadamente.

Finalmente, en la siguiente figura se muestra la trayectoria obtenida con la implementación de los muros de separación.



**Figura 24**– Trayectoria salto de esquí con muros en la rápida

## 6. ESTRUCTURA DEFLECTORA FINAL

La implementación de los muros intermedios descritos en el punto anterior otorga la posibilidad de incorporar en el extremo inferior de la rápida deflectores laterales de modo de redireccionar el flujo hacia el cauce del río.

Este tipo de soluciones se ha incorporado en diversas obras de vertederos y, principalmente, en deflectores de fondo. En el caso de Argentina, una solución semejante se encuentra emplazada en el descargador de fondo de la Presa de Piedra del Aguila, situada en el curso del río Limay, aguas arriba de la presa de El Chocón.

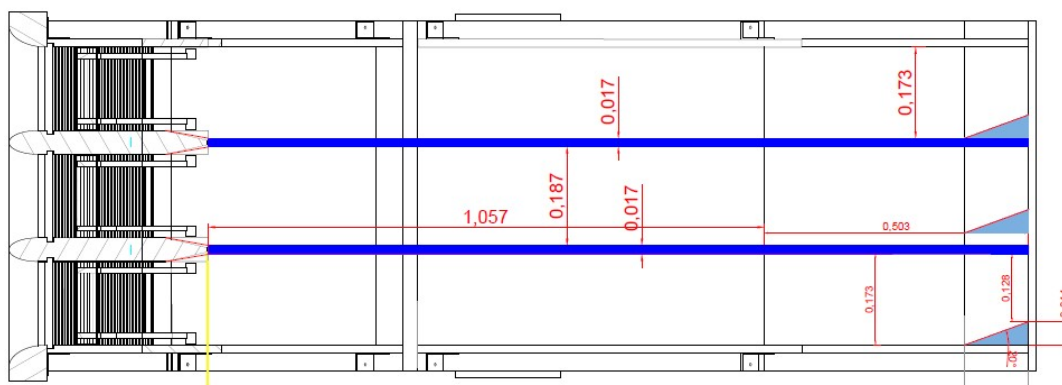
Tal como se observa en la siguiente imagen, una solución de este tipo permite la deflexión del chorro de descarga hacia un lateral, evitándose, como en este caso, el impacto directo sobre la margen derecha.



En el marco antes planteado, se han implementado tres deflectores laterales (uno por cada vano en los que se subdividió la rápida Tal como se observa en la siguiente imagen, una solución de este tipo permite la defección del chorro de descarga hacia un lateral, evitándose, como en este caso, el impacto directo sobre la margen derecha.

Los deflectores analizados se conforman por cuñas triangulares de 7.30 m de desarrollo longitudinal que se emplazan sobre la estructura del salto de esquí, generando una reducción del ancho de pasaje del flujo por el vano correspondiente, de 2.65 m. Esta circunstancia deja un ancho libre de pasaje de 7.70 m aproximadamente.

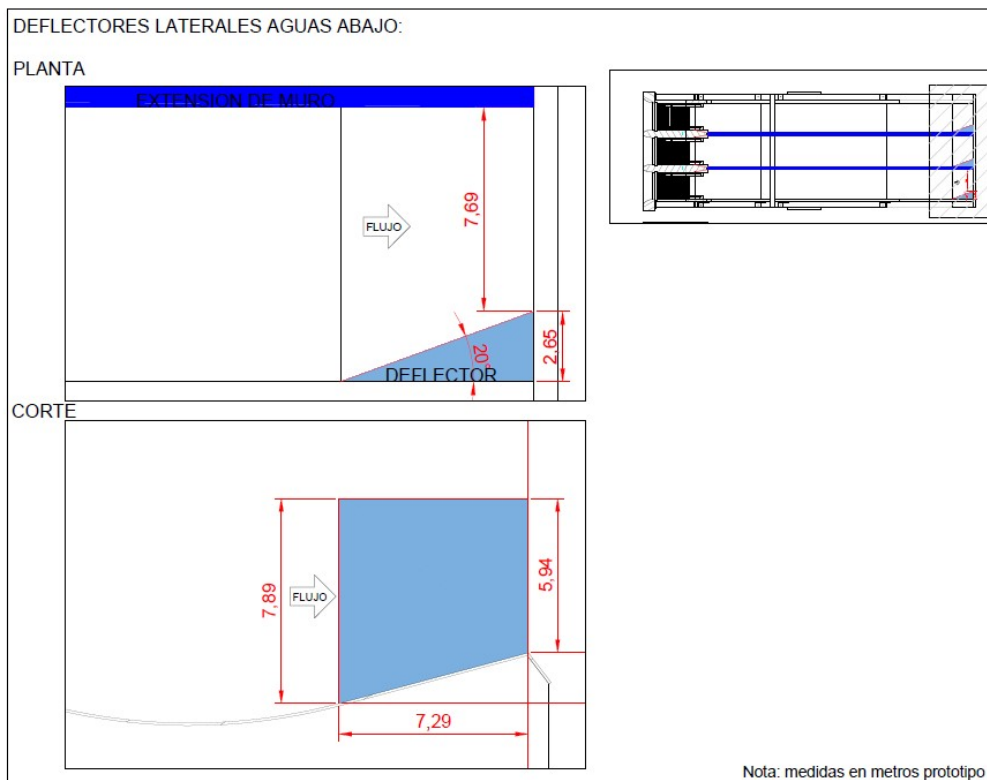
En la siguiente figura se muestra un esquema en planta (dimensiones en modelo), con la posición relativa de los deflectores considerados.



**Figura 25**– Deflector lateral propuesta Portezuelo

Asimismo, en la siguiente figura se muestra un detalle de la estructura deflectora, en corte y planta, con las dimensiones en prototipo.





**Figura 26– Deflector lateral propuesta Portezuelo - Detalle**

En la siguiente fotografía se observa la disposición de los deflectores en el modelo físico.



A su vez, en las fotografías 14 y 15 se observa el cambio de dirección del flujo a partir de la implementación de los deflectores laterales.



Jet de  
descarga  
sin  
deflector  
lateral

**Fotografía  
14**



Jet de  
descarga  
con  
deflector  
lateral

**Fotografía  
15**



Jet de  
descarga  
con  
deflector  
lateral,  
vista hacia  
aguas  
abajo

**Fotografía  
16**



Además del cambio de dirección en planta, se observa una rotación del flujo inmediatamente aguas abajo del jet, lo que podría traducirse en una mayor disipación de energía en contacto con el aire.



Del análisis de los ensayos con la implementación de los muros de separación y de las estructuras deflectoras, se puede concluir que existen efectos positivos en cuanto de generar una rotación del flujo hacia la izquierda reduciendo los impactos directos sobre la margen derecha.

Se produce además una redistribución de la extensión de la zona de impacto, con una disminución del caudal específico que alcanza el curso natural, con una esperable reducción de los efectos erosivos.

Dado que la eficiencia de la incorporación de los muros separadores y de los deflectores laterales se traduciría en la verificación de menores o mayores niveles de erosión e




impacto aguas abajo, resulto necesario efectuar una verificación de las erosiones y configuración del flujo registrada en la descarga. Los resultados obtenidos se resumen a continuación.

## 7. VERIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE EROSIÓN

Tal como se señaló, la eficiencia en la incorporación de las medias analizadas, principalmente en el comportamiento de la estructura de disipación, deben ser analizadas a partir de los efectos que las misma produce en la descarga. Es por ello que se planificó efectuar unos ensayos de erosión con la incorporación de las medidas de optimización.

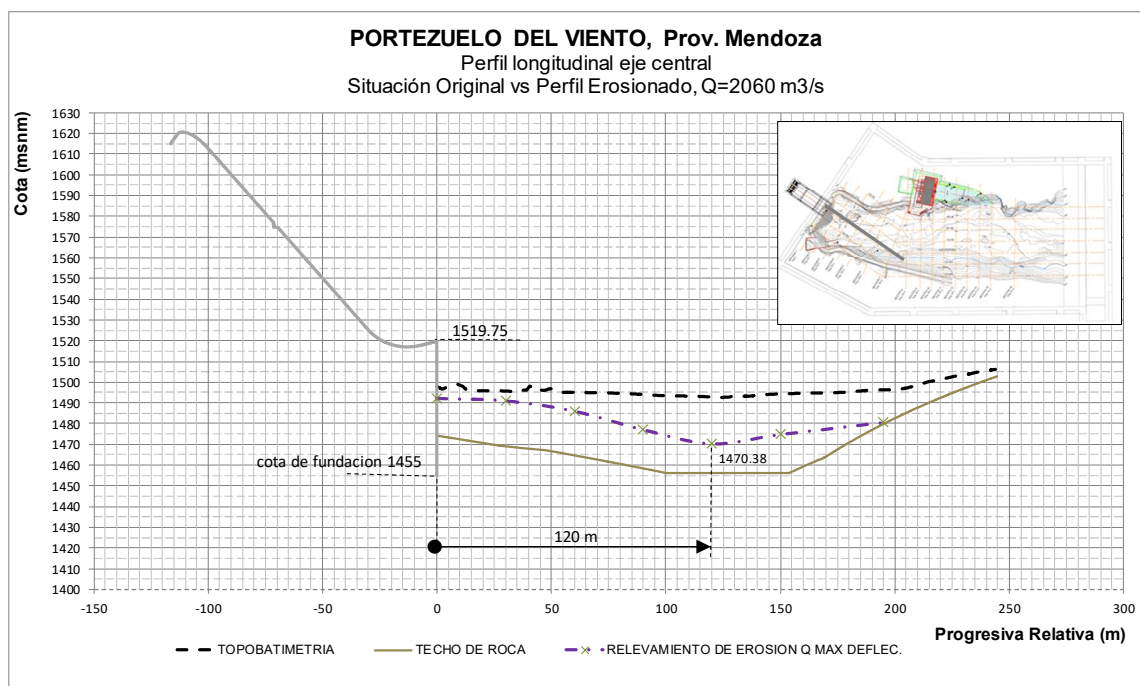
Considerando que el proyecto prevé la incorporación de un salto de esquí para disipar energía, se efectuó un ensayo similar con la incorporación de los deflectores antes descritos. A continuación, se presentan fotografías de la erosión final generada para el proyecto ejecutivo en etapa de diagnóstico (sin deflectores laterales) y con deflector lateral sobre el salto de esquí del vertedero. Vale aclarar que para el primero de los casos además no fue considerados los muros intermedios sobre la rápida.

	<p>Erosion fondo movil con muros y deflector lateral</p> <p><b>Fotografía 19</b></p>
---	--

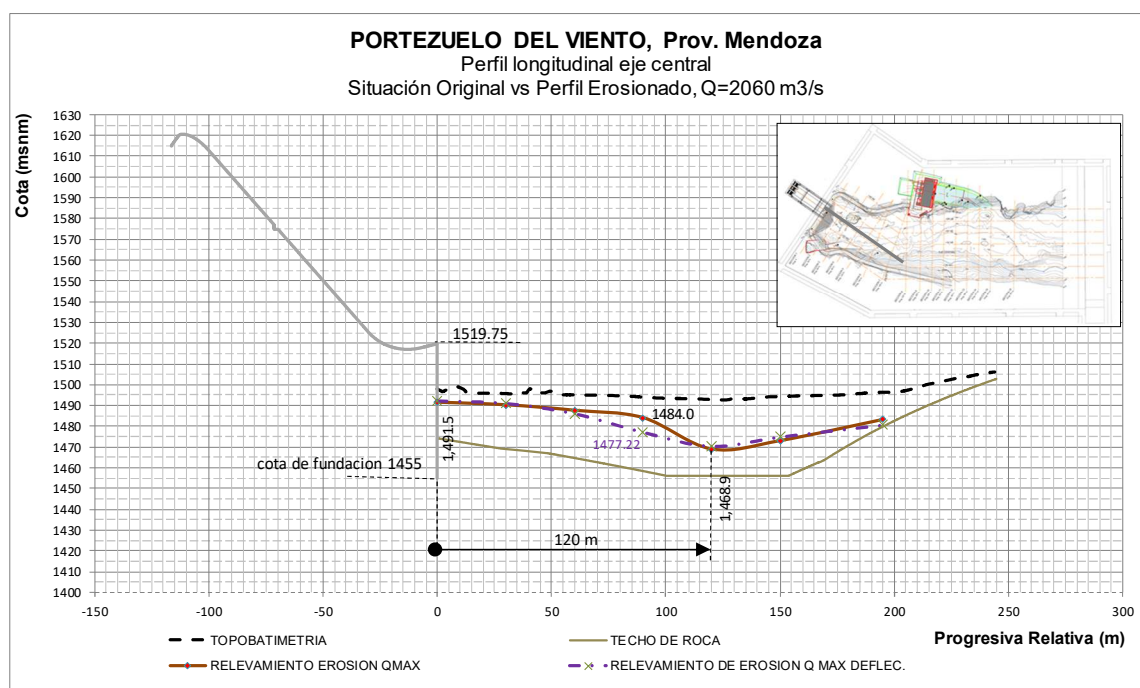
	<p>Erosion fondo movil sin muros ni deflector</p> <p><b>Fotografía 20</b></p>
--	---

Se observa que, si bien se reducen los impactos directos sobre la ladera derecha, la configuración del patrón de erosiones no cambia significativamente. Debe destacarse que la conformación del techo de roca está todavía en proceso de análisis detallado, razón por la cual se podrían obtener, respecto de la erosión, resultados con ciertas modificaciones respecto de lo que se muestra en las fotografías anteriores.

A continuación, se muestran una serie de perfiles de erosión longitudinales relevados luego de los ensayos.



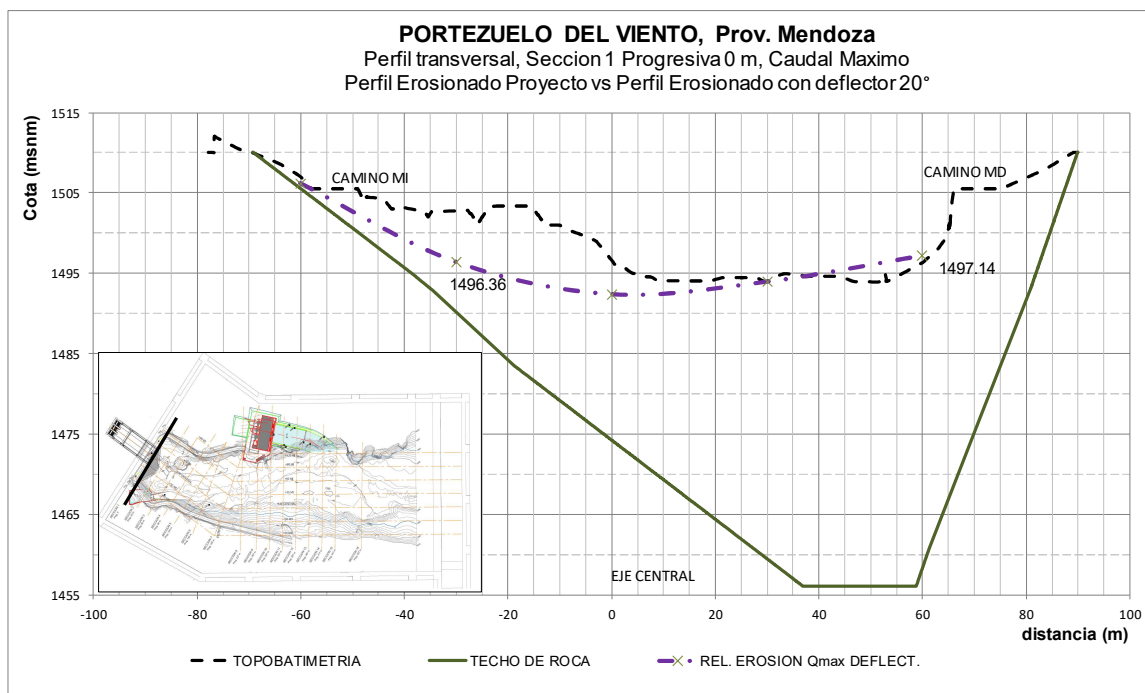
**Figura 27**– Perfil longitudinal sobre el eje central, erosión final con deflectores laterales



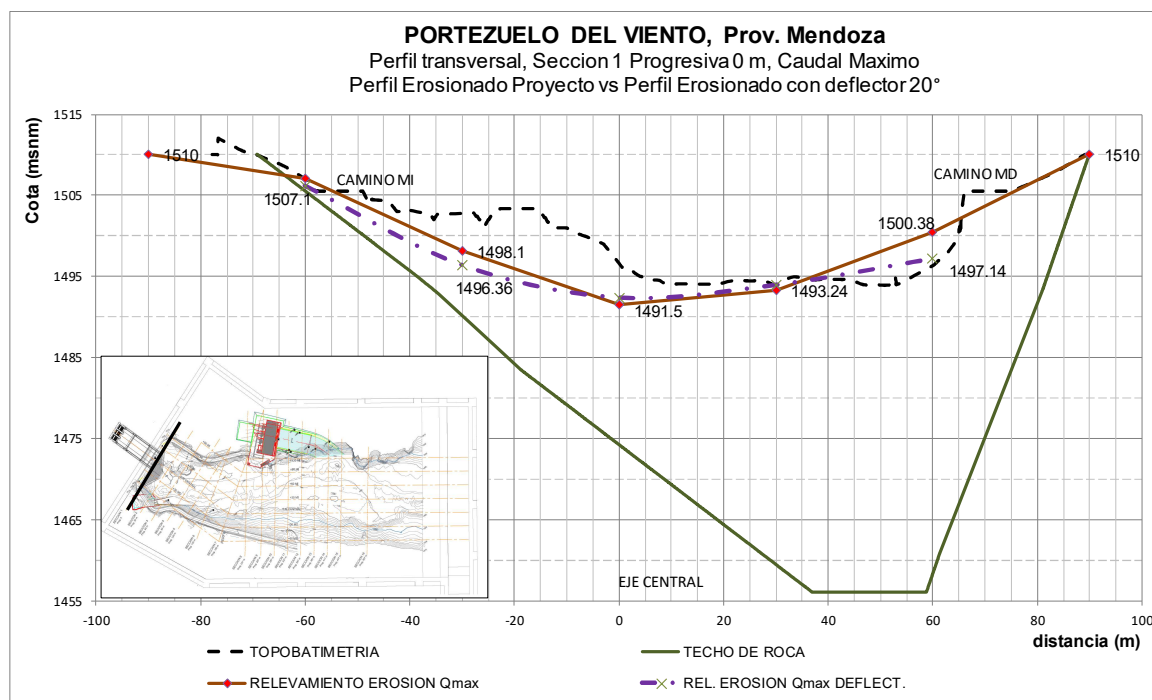
**Figura 28**– Perfil longitudinal eje central comparativo con y sin deflectores laterales.

Se puede observar que, si bien hay algunas diferencias, básicamente los perfiles de erosión registrados no presentan variaciones significativas. Se comprueba que, aún con la incorporación de los deflectores, no se incrementa la erosión máxima ni se producen erosiones retrógradas que pongan en riesgo la fundación de la presa.

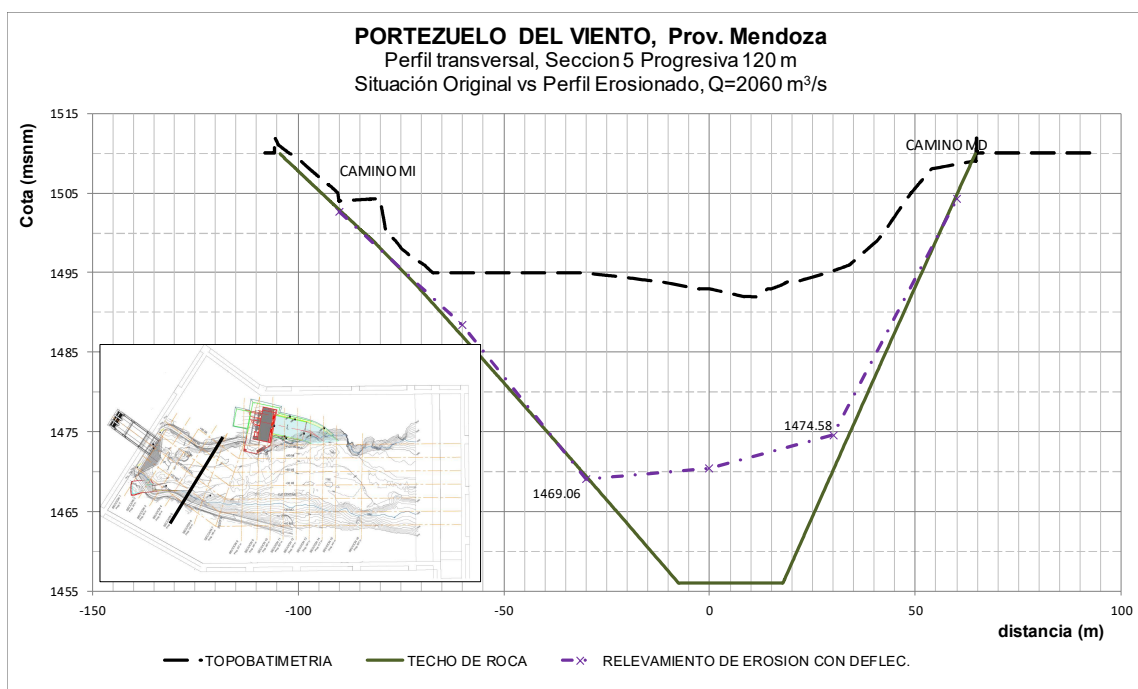
Se muestran a continuación una serie de perfiles transversales a los fines de corroborar los efectos sobre las márgenes del río.



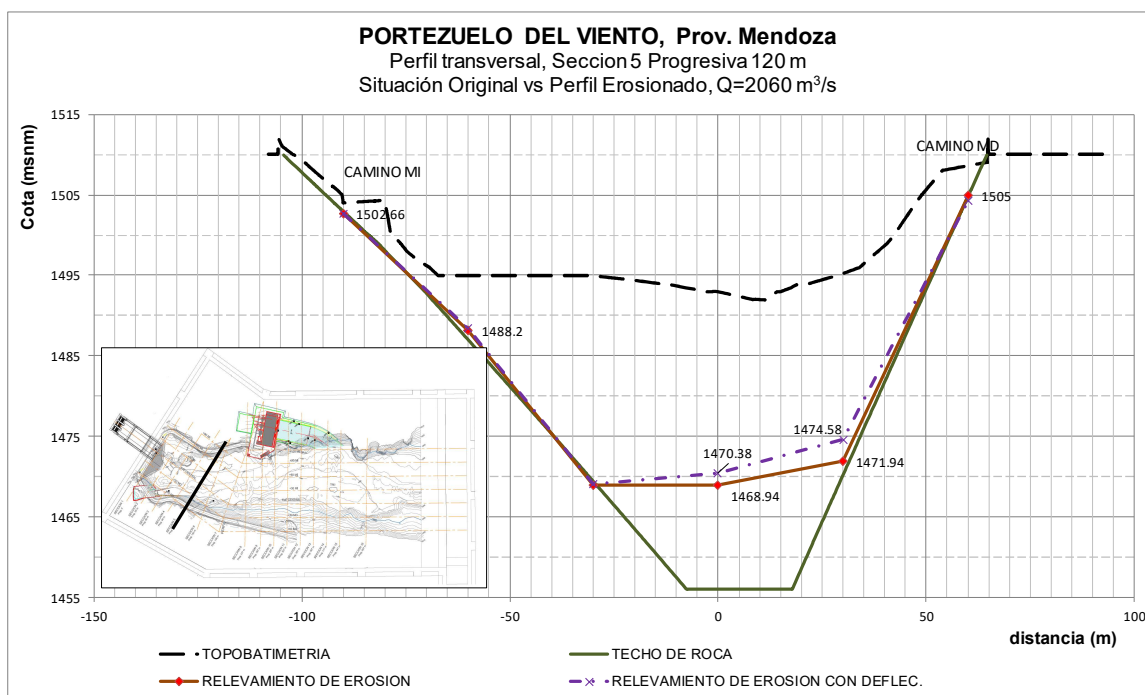
**Figura 29**– Perfil transversal sección 1, erosión final con deflectores laterales sobre el salto de esquí



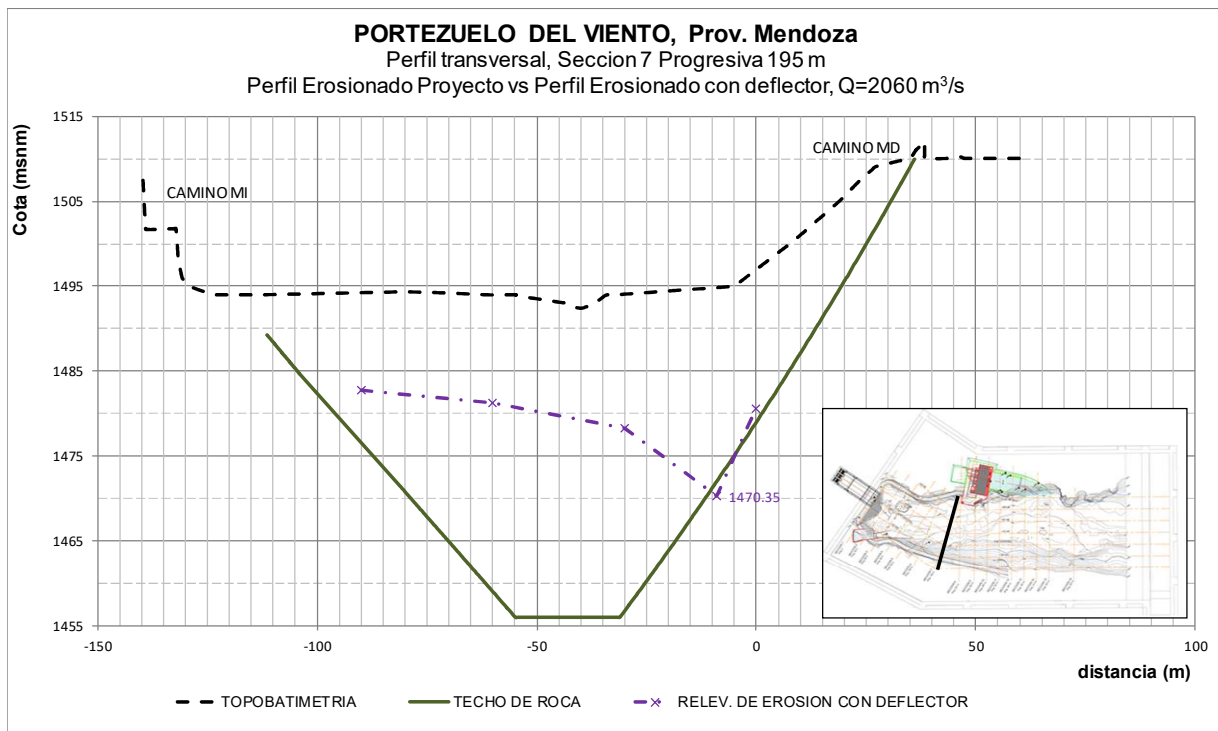
**Figura 30**– Perfil transversal sección 1, comparación con y sin deflector lateral sobre el salto de esquí.



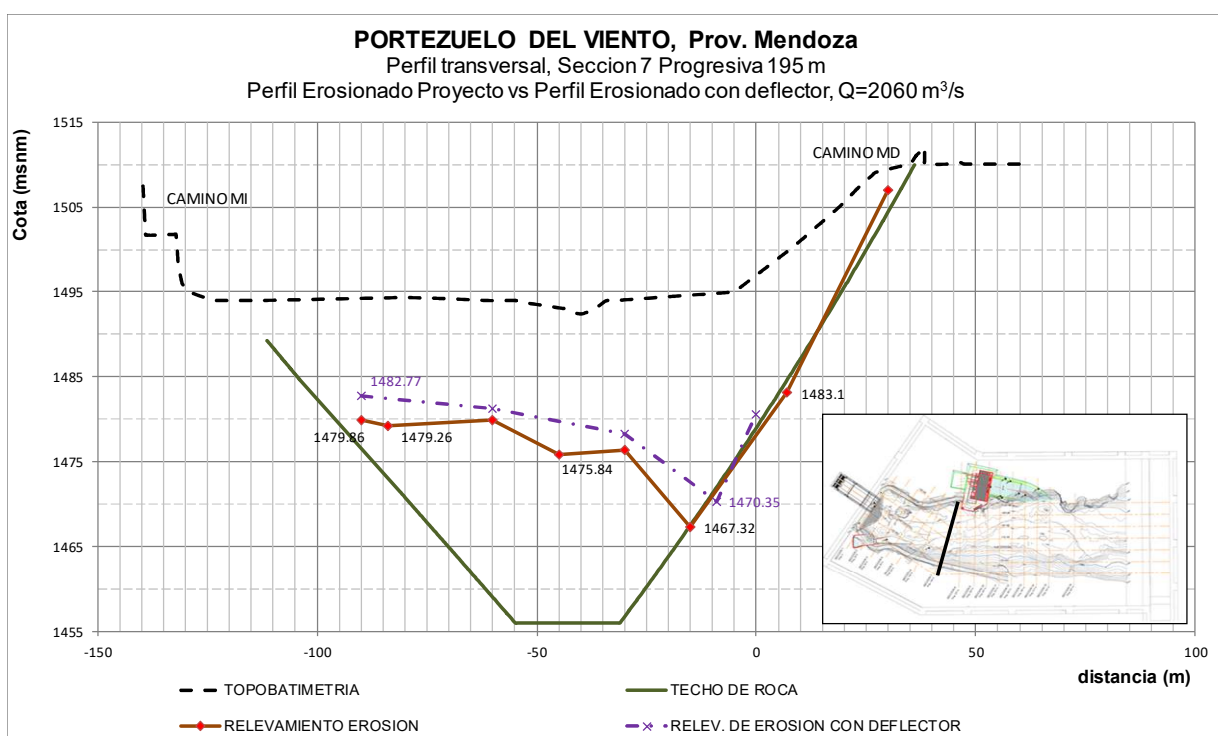
**Figura 31**– Perfil transversal sección 5, erosión final con deflectores laterales sobre el salto de esquí



**Figura 32**– Perfil transversal sección 5, comparación con y sin deflector lateral sobre el salto de esquí.

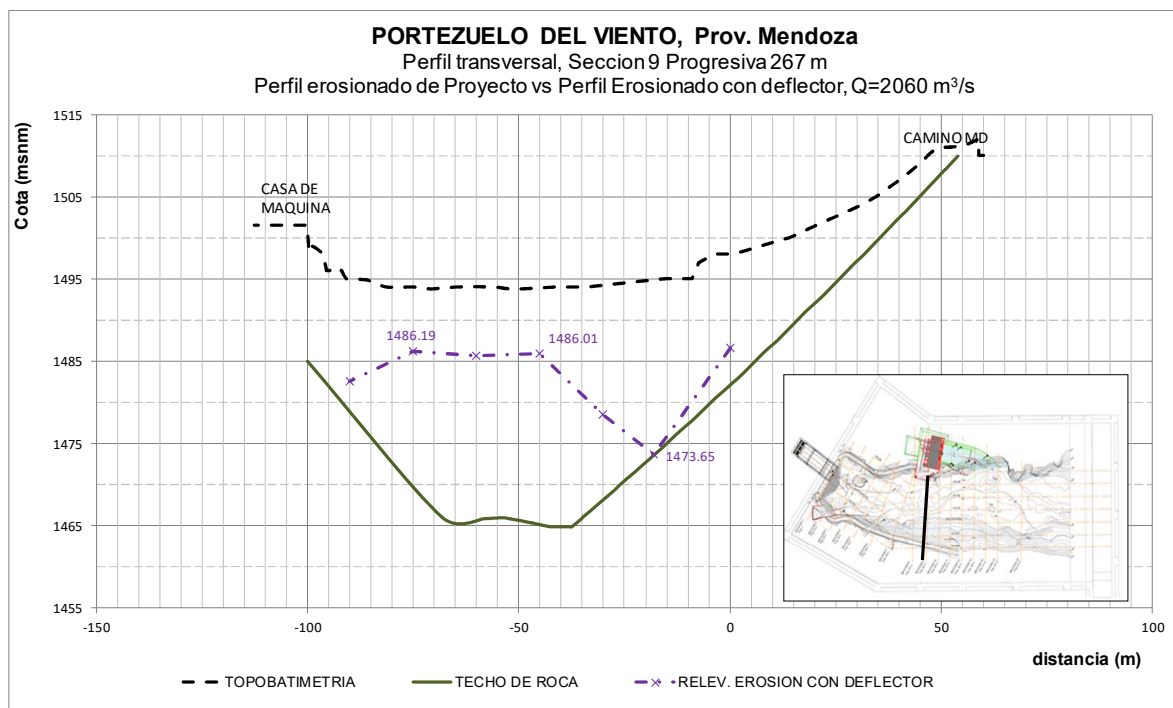


**Figura 33**– Perfil transversal sección 7, erosión final con deflectores laterales sobre el salto de esquí.

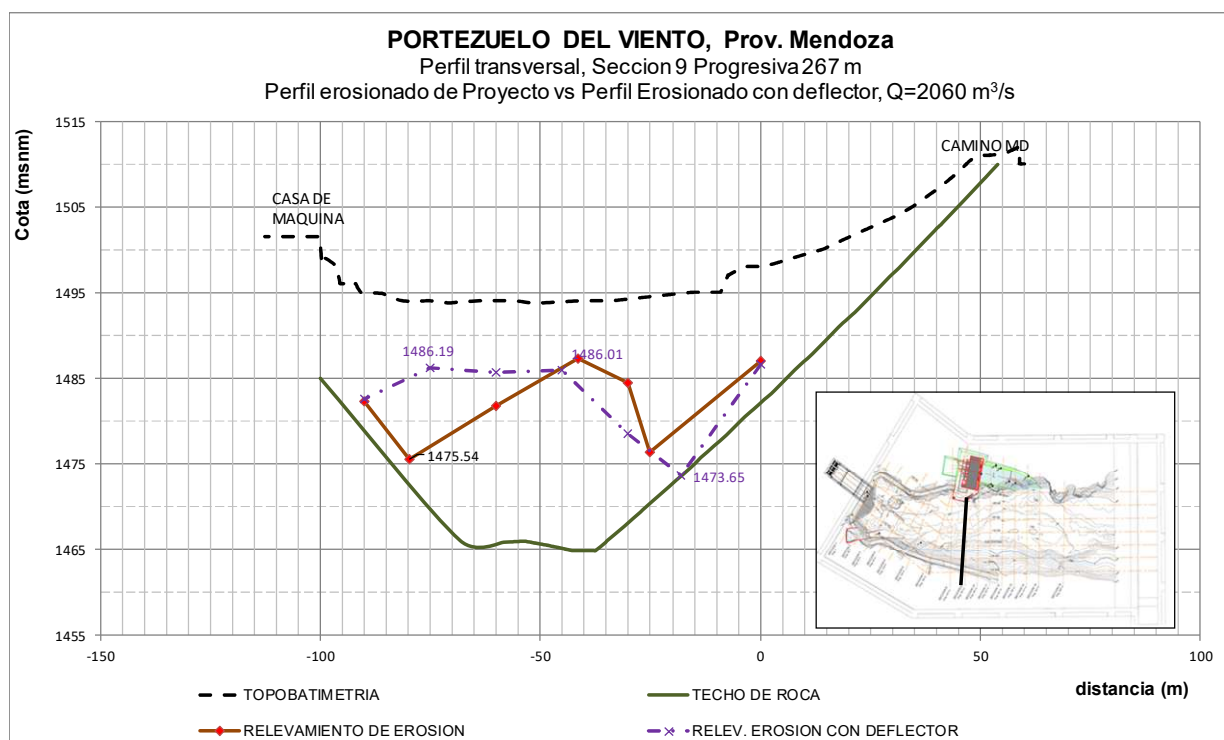


**Figura 34**– Perfil transversal sección 7, comparación con y sin deflector lateral sobre el salto de esquí.





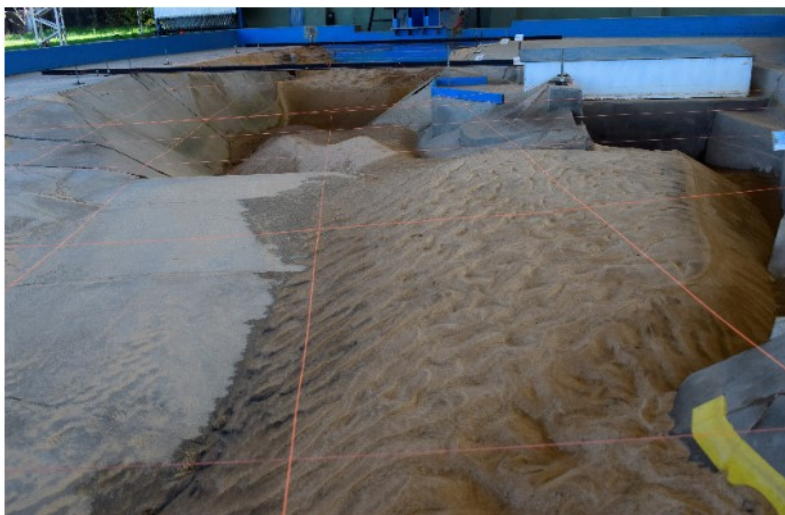
**Figura 35**– Perfil transversal sección 9, erosión final con deflectores laterales sobre el salto de esquí.



**Figura 36**– Perfil transversal sección 9, comparación con y sin deflector lateral sobre el salto de esquí.

Se puede observar que no se registran modificaciones significativas en el patrón de erosión, destacándose que existe una redistribución de las zonas erosionadas, principalmente en el perfil 9 sobre la margen de la central donde se disminuyen las profundidades de erosión.





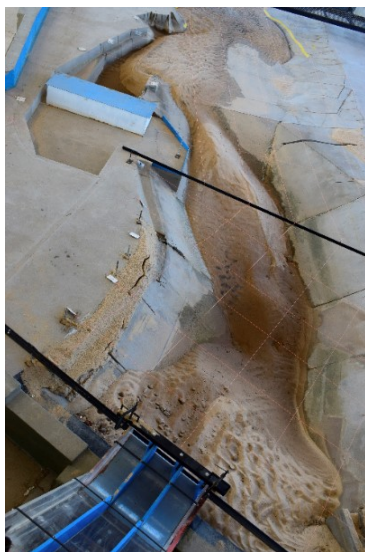
Erosion con  
muros y  
deflector -  
material en la  
salida de la  
central

**Fotografía 21**



Erosion sin  
muros y  
deflector -  
material en la  
salida de la  
central

**Fotografía 22**



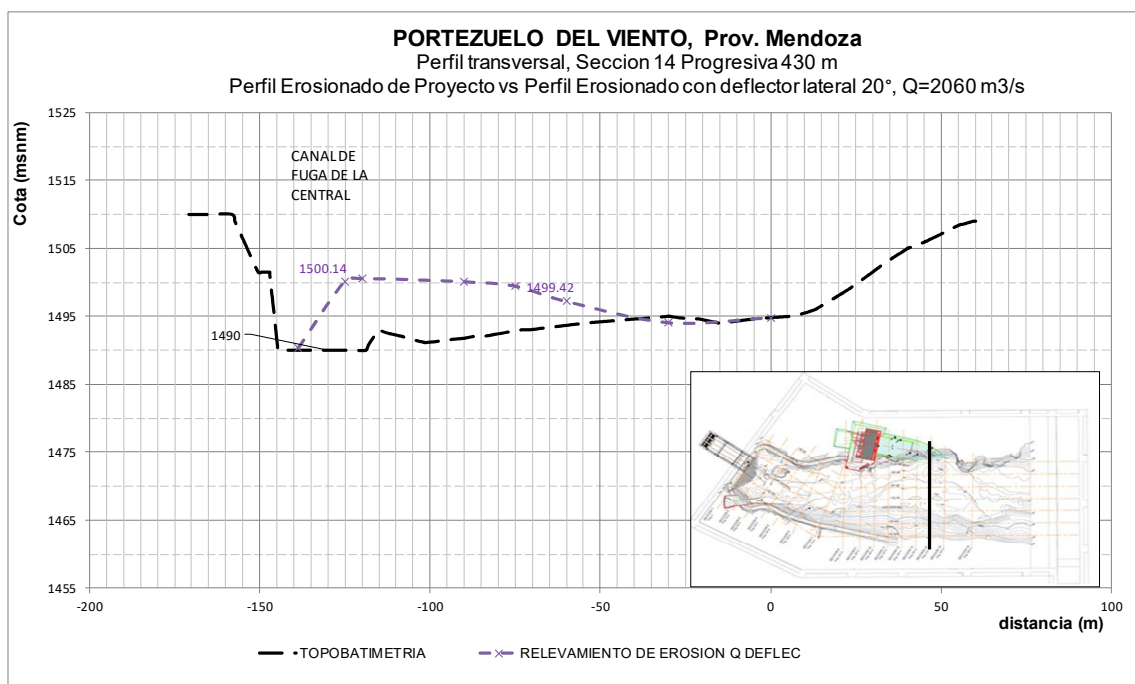
Erosion con muros  
y deflector -  
material en la  
salida de la central

**Fotografía 23**

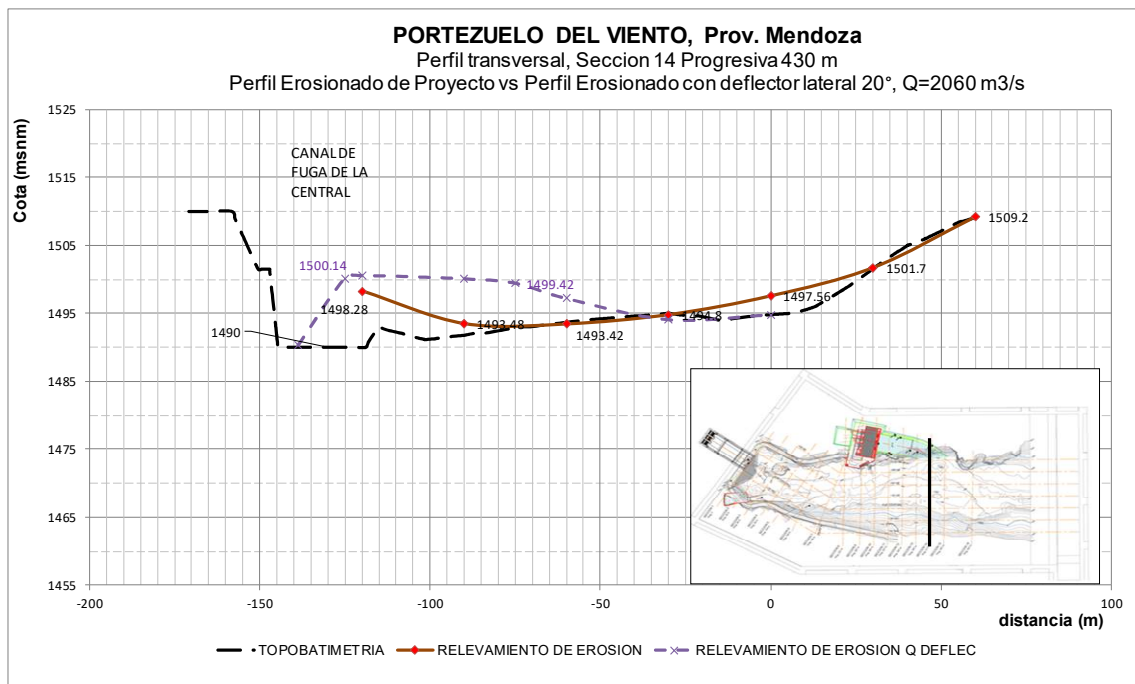


En las fotografías anteriores se muestra la acumulación de material sobre la margen izquierda en correspondencia con la salida del canal de restitución de la central. Asimismo, en los siguientes gráficos se muestran perfiles transversales comparativos obtenidos en la sección de salida antes mencionada.

Tal como se observa, la deflexión que se produce a partir de la colocación de los deflectores, genera un mayor arrastre y deposición de material sobre la margen derecha, particularmente a la salida de la central, donde se aprecian los niveles de depósito más elevados.



**Figura 37**– Perfil transversal sección 14, deposición final con deflectores laterales sobre el salto de esquí.



**Figura 38**– Perfil transversal sección 14, deposición con y sin deflector lateral sobre el salto de esquí.

Del análisis de los ensayos de erosión, con la incorporación de los muros separadores y las estructuras deflectoras, se pueden efectuar los siguientes comentarios:

- ✓ Los efectos de los deflectores al final de la rápida ponen de manifiesto un corrimiento de la zona de impacto, alejándola de la ladera de margen derecha. Si bien este efecto no es sumamente significativo, se puede apreciar a partir de una configuración de la lámina de descarga del salto de esquí, diferente a la que se obtuvo con el proyecto básico.
- ✓ Si bien se observa una tendencia a un menor impacto sobre la margen derecha, el patrón general de erosiones no se modifica sustancialmente. De este modo no se registran cambios en las profundidades de erosión máximas y en la mayoría de los perfiles transversales relevados.
- ✓ Se aprecia una mayor acumulación de material sobre la margen izquierda. Esto puede ser un indicador primario de la eficiencia de la deflexión, dando lugar a un menor proceso de erosión sobre dicha margen y, por ende, en la zona de emplazamiento de la central.
- ✓ Asimismo, y en el mismo sentido señalado, se aprecia que se acumula una mayor cantidad de material sobre la zona de salida de la central, generando una barra de despótico de mayor magnitud.

Más allá de estos comentarios, debe destacarse que la configuración final de la roca resistente podría modificar estos resultados. No obstante, los ensayos y las principales conclusiones arribadas permiten considerar a la incorporación de muros y deflectores laterales, como una medida complementaria factible de ser implementada para minimizar los efectos de impacto sobre la ladera.

En el anexo I se muestran el patrón de erosiones obtenido con la presencia del deflector y sin la misma.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del estudio de diagnóstico realizado sobre el proyecto ejecutivo básico de la presa de Portezuelo, se procedió a analizar una serie de medidas complementarias que permitieran optimizar el funcionamiento general de la estructura, sin detrimento de que se puedan analizar en el futuro, otras medidas de mayor envergadura que pudieran involucrar cambios en la geometría general de la obra de alivio y en la disposición de las otras estructuras.

En ese contexto, si bien se pudo establecer la factibilidad primaria de la obra como órgano de evacuación de crecidas, se detectaron algunos aspectos que podrían ser mejorados mediante medidas de optimización. Estos aspectos se centraron en:

- i. Condiciones de ingreso y distribución de niveles en la estructura de control.
- ii. Formación de ondas sobre la rápida con la consecuente concentración de flujo en la descarga.
- iii. Impacto directo y fuertes corrientes de recirculación como consecuencia de la acción disipativa del jet de descarga sobre el lecho y las laderas, principalmente la de margen derecha.

En ese marco, se plantearon una serie de alternativas tendientes ha:

- Mejorar las condiciones de ingreso mediante la modificación de la geometría de los estribos del vertedero y la prolongación de las pilas intermedias.
- Se probaron dos variantes de muros guía, uno conformado por una planta elíptica y otro con un muro compuesto de un tramo recto y una curva de aproximación circular. Este último dio un resultado satisfactorio ya que se redujo el nivel de embalse requerido al tiempo que se mejoró y uniformizó la distribución de niveles transversales sobre la cresta del vertedero.
- Se incorporaron muros intermedios, prolongados hasta la salida del salto de esquí. Estos muros mejoraron parcialmente la distribución de niveles sobre la rápida de descarga mejorando el patrón de ondas generado.
- Finalmente se analizaron los efectos de la incorporación de estructuras deflectoras al final del salto de esquí, observándose resultados positivos sobre la conformación del flujo en la descarga y el alejamiento del mismo sobre la margen derecha.

En base a lo expuesto, se recomienda:

- Implementar, como medida de optimización viable y conveniente, la modificación de los muros extremos de aproximación, adaptándolos a la geometría propuesta como alternativa 2: muro compuesto.

- Considerar, en el proceso de una ingeniería de detalle y, en el caso que se mantenga la geometría general de la obra de alivio, la incorporación de muros de separación en la rápida y deflectores finales.
- Evaluar la disposición final de la estructura de alivio a partir de la modificación del alcance del modelo aguas abajo y de la forma en que se efectuó, en el modelo, el empalme entre la zona erosionable de la resistente a la acción hidrodinámica.
- Establecer una etapa complementaria a los fines de evaluar con mayor detalle, la factibilidad y conveniencia de adoptar medidas de mayor alcance como la modificación de la estructura de desvío, la ubicación y forma del descargador de fondo y los efectos finales de la geometría adoptada sobre el comportamiento de la descarga.

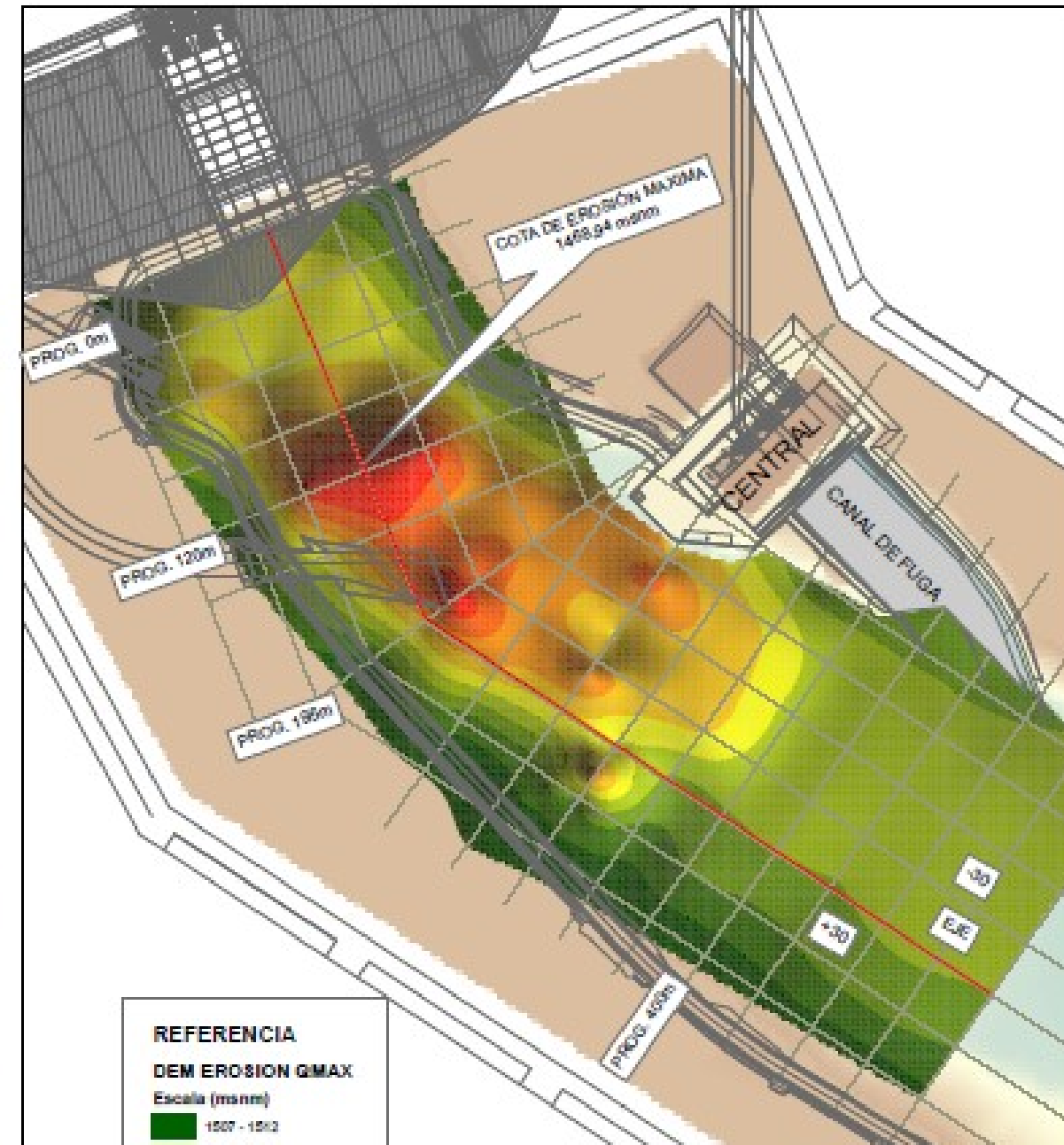
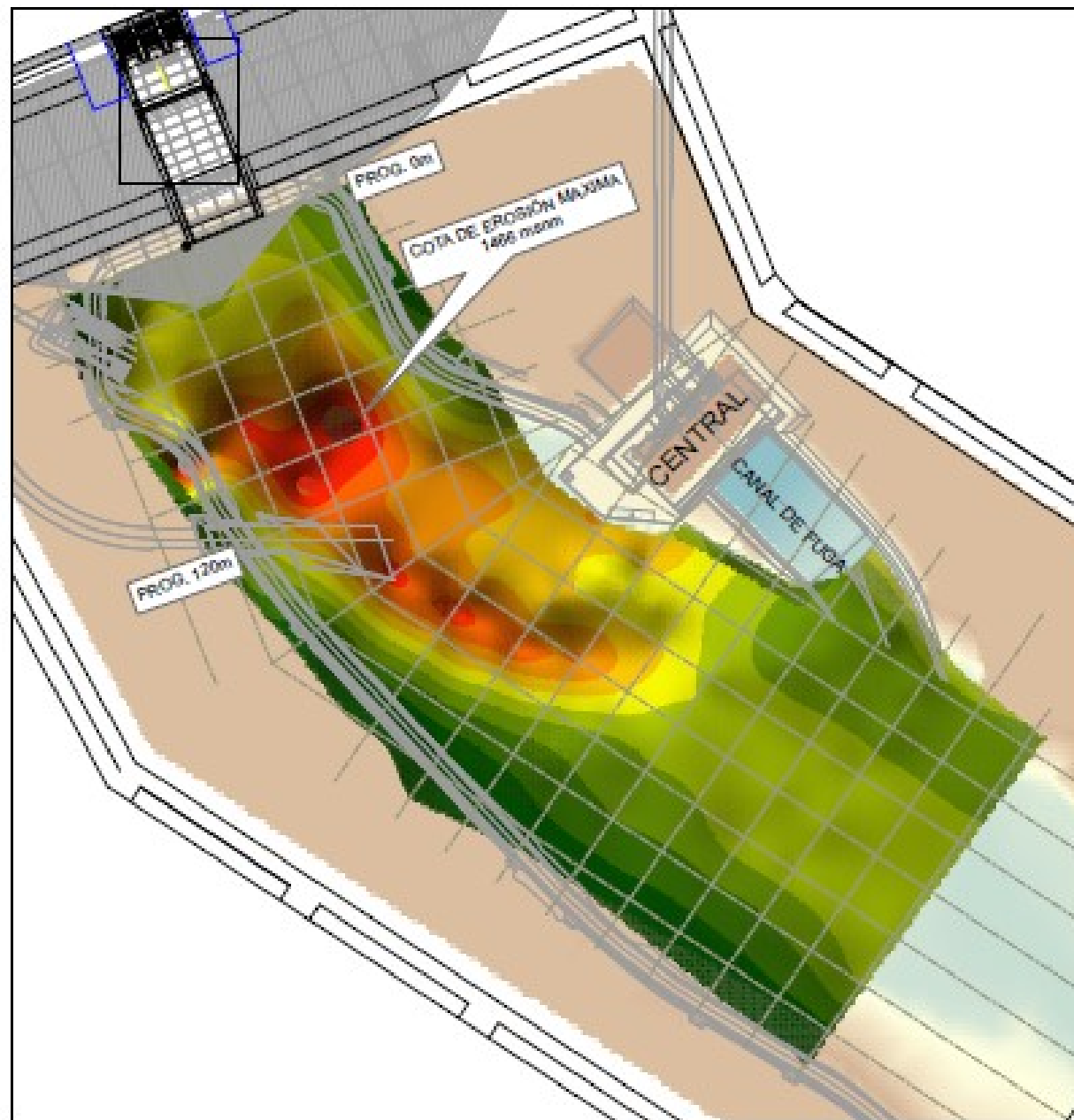
# **ANEXO I**

## **PATRON DE EROSIONES COMPARATIVO**



## ENSAYO DE EROSIÓN A FONDO MÓVIL, CAUDAL MAXIMO

### MODELO DIGITAL DEL TERRENO



REFERENCIA	
DEM EROSION GMAX	
Escala (msnm)	
1507 - 1512	
1502 - 1507	
1497 - 1502	
1492 - 1497	
1487 - 1492	
1482 - 1487	
1477 - 1482	
1472 - 1477	
1468 - 1472	

PORTEZUELO DEL VIENTO

PROYECTO MODELO FÍSICO

ENSAYO DE EROSIÓN FONDO MÓVIL CAUDAL 2000 m³/s

JULIO 2019



