



# Geología aplicada a la detección de la fuente de filtraciones en la Boca II del túnel de aducción del complejo hidroeléctrico Futaleufú, provincia de Chubut

## Geology applied to the detection of seepage source at Boca II, adduction tunnel of Futaleufú hydroelectric complex, Chubut

Celli, Alejandro E. <sup>1</sup> ✉ - Reynal, Héctor R. <sup>2</sup>

Recibido: 24 de junio de 2018 • Aceptado: 11 de diciembre de 2018

### Resumen

*Ubicada en el Parque Nacional Los Alerces, Futaleufú es una presa de materiales sueltos con núcleo arcilloso de 120 m de altura, cuyos principales objetivos son la generación hidroeléctrica y la regulación de crecidas. Una de las más notables particularidades de este conjunto de obras, es el puente tubería, de 8,50 m de diámetro, que atraviesa un valle glaciario de unos 450 m de extensión, conectando la Boca II con la Boca III de la tubería de aducción, que transporta el agua a presión desde la obra de toma, en el embalse, hasta la central hidroeléctrica, ubicada a unos 2000 m aguas abajo, con un desnivel vertical de unos 120 m (Figura 1).*

*Como en toda obra hidráulica, es frecuente la existencia de pequeñas filtraciones, debido a la imposibilidad práctica de alcanzar un sistema perfectamente estanco.*

*En el sector de la Boca II, las filtraciones observadas sobre la ladera que conecta el túnel con el puente tubería, fueron registrando un leve, pero sostenido incremento durante una década, sin tener certezas sobre la procedencia del agua infiltrada.*

*Hacia fines de 2013, se comenzaron a analizar diferentes hipótesis, determinando tres posibles alternativas: a) las filtraciones provenían de las precipitaciones, percolando localmente a través de las fisuras del macizo rocoso; b) provenían del embalse, atravesando, a lo largo de unos 600 m, el tortuoso sistema de discontinuidades del macizo rocoso, compuesto por tobos y andesitas brechosas; o c) filtraba a través del túnel de aducción, revestido con 40 cm de hormigón, y en parte blindado con la tubería de acero del puente acueducto.*

*Para dilucidar la incógnita sobre el área de aporte, se contó con distintos elementos de auscultación, que brindaron datos sobre: niveles de embalse; precipitaciones; 4 puntos de aforo de las filtraciones; análisis de calidad de aguas en el embalse y en uno de los aflujos (Pujol et al., 2013). A su vez, se recolectaron y analizaron antecedentes geológicos generales de la zona de*

1. Organismo Regulador de Seguridad de Presas

✉ acelli@orsep.gob.ar

2. Consultor independiente

obras, y del sector de interés en particular, provenientes de los estudios de anteproyecto, elaborados por Agua y Energía Eléctrica S.E. (Lanyi, 1972a, b). Finalmente, se llevó a cabo una visita al sitio, donde se caracterizó la configuración geológica superficial del área de interés.

A partir del análisis de las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, y sus relaciones con los factores hidrometeorológicos e hidroquímicos, se arribó a un área de aporte teórica, que pudo ser confirmada, unos meses más tarde, durante las tareas de mantenimiento generalizado programadas por la concesionaria, efectuadas en marzo de 2014. Estas tareas incluyeron la salida de servicio de la central y la reducción del embalse a su nivel mínimo, a fin de permitir el ingreso a los distintos sectores habitualmente inundados. Vale mencionar que esta operación se realiza, en promedio, cada 10 años, por lo que constituye una oportunidad invaluable para inspeccionar el estado de los diferentes sectores en forma directa.

De esta manera, se logró resolver una incógnita mantenida durante años, a partir del análisis conjunto de dos disciplinas que se complementan naturalmente: la geología aplicada y la ingeniería civil.

**Palabras clave:** Presa Futaleufú - Filtraciones - Túnel - Auscultación - Geología.

## Abstract

Located in Los Alerces National Park, Futaleufú is a 120 m height embankment dam, whose main objectives are hydropower and flood regulation. One of the most remarkable features of this set of works, is the pipeline bridge, with a diameter of 8.5 m, which crosses a glacial valley of about 450 m in length, connecting Boca II with Boca III of the adduction pipeline, transporting water under pressure, from the intake located in the reservoir, to the hydroelectric plant, located about 2000 m downstream, with a vertical drop of about 120 m (Figure 1).

As in every hydraulic work, the existence of minor seepage is frequent, due to the practical impossibility of reaching a perfectly watertight system.

At the Boca II sector, on the slope that connects the tunnel with the pipe bridge, the observed seepage has been registering a slight, but sustained increase during a decade, without certainties about the origin of the leaked water.

At the end of 2013, different hypotheses began to be analyzed, defining three possible alternatives: a) the filtrations came from the precipitations, percolating locally through the rock mass joints; b) they came from the reservoir, crossing through the 600 m length tortuous system of discontinuities that integrate the tuff and brecciated andesite rock mass; or c) the water percolated through the adduction tunnel, covered with 40 cm of concrete, and partly blinded with the steel pipe of the aqueduct bridge.

To elucidate the unknown on the contribution area, different auscultation elements were considered, providing data on: reservoir levels; precipitations; 4 points of seepage gauging measures; water quality analysis from the reservoir and from one of the gauges (Pujol et al., 2013). Additionally, general geological backgrounds of the area of works, and particularly of the sector of interest were gathered and analyzed, from the studies of Agua y Energía Eléctrica S.E. (Lanyi, 1972a, b). Finally, a visit to the site was carried out, where the surface geological configuration of the area of interest was characterized.

Based on the analysis of the geological, geotechnical and hydrogeological conditions, added to their relationships with hydrometeorological and hydrochemical factors, it has been arrived at a theoretical contribution area, which could be confirmed, a few months later, during the generalized maintenance tasks programmed by the concessionaire, carried out in March 2014. These tasks included the power plant shutdown and the reduction of the reservoir to its minimum level, in order to allow entry to the different sectors usually flooded. It is worth mentioning that this operation is performed, on average, every 10 years, which implies an invaluable opportunity to inspect the operation of the different sectors directly.

From this analysis, it was possible to solve an unknown maintained for years, from the joint analysis of two disciplines that complement each other naturally: applied geology and civil engineering.

**Keywords:** Futaleufú Dam - Seepage - Tunnel - Auscultation - Geology.

## INTRODUCCIÓN

La presa General San Martín, más conocida como Futaleufú, nombre del complejo hidroeléctrico del que forma parte, se emplaza sobre la cuenca del río Futaleufú, de 300 m<sup>3</sup>/s de caudal módulo y vertiente pacífica, en su paso por el Parque Nacional Los Alerces, a unos 20 km de la localidad de Trevelin, en la provincia de Chubut. Se trata de una presa de materiales sueltos con núcleo arcilloso, de 120 m de altura y 600 m de longitud de coronamiento, con una capacidad de embalse de 5400 Hm<sup>3</sup>. El complejo fue construido en la década de 1970,

con el objetivo de generar energía y a la vez proteger de las recurrentes crecidas del río a las localidades emplazadas aguas abajo.

La central hidroeléctrica se encuentra ubicada a unos 2.000 m de la obra de toma, con un resalto topográfico de 120 m. El sistema de aducción, que conecta ambas estructuras, presenta un particular diseño, representado por un túnel interrumpido por un valle de origen glaciario, que es salvado por un puente tubería colgante de 8,50 m de diámetro y unos 450 m de longitud (Figura 1). Esta estructura descansa sobre una



## EVOLUCIÓN DE LAS FILTRACIONES

Las filtraciones detectadas en la zona de la Boca II, han sido medidas semanalmente por personal de la concesionaria, a partir de los aforadores de paso denominados 1, 2, 3 y 6 (Figura 4). Para el análisis de su evolución, se cuenta con datos confiables de los tres primeros aforadores, en el intervalo del 1º de febrero de 2007 hasta el 26 de septiembre de 2013; mientras que para el aforador 6, se dispone de mediciones desde el 1º de junio de 2011, hasta la misma fecha. A su vez, se cuenta con mediciones del nivel del embalse para el intervalo completo, y de precipitaciones, a partir del 22 de enero de 2009.



Figura 4. Detalle del Aforador 2, ubicado en el sector sur de la Capilla.

En la Figura 5 se presentan los datos correspondientes a las mediciones obtenidas en el intervalo temporal febrero 2007 - septiembre 2013. A fin de facilitar la comparación entre los datos, se expresa el nivel del embalse con un plano de referencia de 470 msnm. Por igual motivo, se presentan los datos de precipitaciones como 5 veces los valores medidos, sobre la media del período considerado.

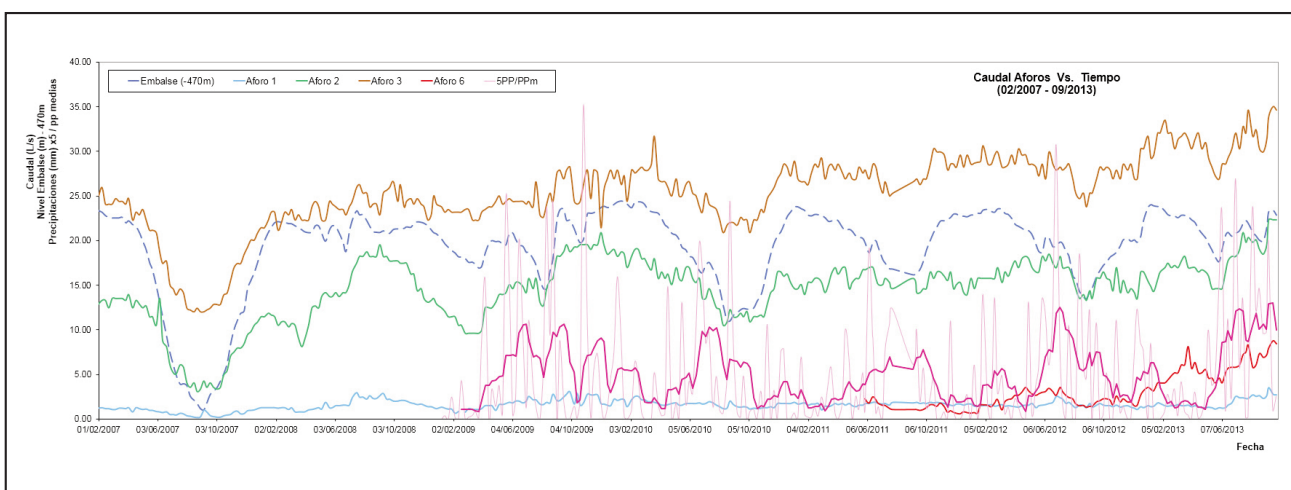


Figura 5. Registro de caudales aforados en relación con el nivel de embalse y las precipitaciones, desde el 01/02/2007 hasta el 26/09/2013, con frecuencia de medición semanal. En línea cortada de color azul, el nivel del embalse, en metros [el 0 corresponde a 470 msnm]. En celeste, los caudales registrados en el Aforador 1, en litros sobre segundo. En verde, los mismos datos provenientes del Aforador 2. En marrón, el Aforador 3. En rojo, el Aforador 6, operando desde el 01/06/2011. En rosa, los datos de precipitaciones. Para una mejor visualización, se ha considerado una relación de 5 veces respecto de la precipitación media del período considerado; y en trazo más grueso, la media móvil.

Del análisis de la Figura 5, se desprende que los niveles del embalse y las precipitaciones presentan variaciones cíclicas, no coincidentes en el tiempo. Esto se debe fundamentalmente al criterio de operación del embalse.

Se observa a su vez, que los caudales medidos en el aforador 1 parecen mantenerse aproximadamente constantes. Este instrumento capta mayormente las filtraciones provenientes de la compuerta de acceso al túnel de inspección.

Por su parte, los caudales registrados en los aforadores 2, 3 y 6, parecen guardar una correspondencia instantánea con los niveles del embalse, con leves variaciones, que podrían ser asignadas a las precipitaciones, con un cierto desfasaje en el tiempo, que podría adjudicarse a la baja conductividad hidráulica del macizo rocoso.

Si bien es apreciable la dependencia, se evidencia también una tendencia al incremento de los caudales medidos en los aforadores 2, 3 y 6.

En la Figura 6, se representa el grado de correlación entre el nivel del embalse y los caudales registrados en los aforadores. Como puede visualizarse, no parece haber una influencia sensible del nivel del embalse en los registros del aforador 1. Sin embargo, se aprecia una tendencia a la linealidad positiva en los aforadores 2, 3 y 6, con un cierto grado de dispersión, que podría corresponderse a la influencia de las precipitaciones, o bien al incremento de las filtraciones en el tiempo.

A fin de delimitar ambas influencias en los valores registrados, se exponen en la Figura 7, por un lado, las relaciones entre los caudales aforados y el nivel del embalse, en función del tiempo; y por otra parte, los valores de precipitaciones en relación con la media, expresados como la centésima parte, a fin de establecer una mejor visualización.

De esta manera, se confirma por un lado la tendencia al incremento en las filtraciones captadas por los aforadores 2, 3 y 6 en relación con el nivel del embalse. La relación con las precipitaciones no parece tan clara, y se estima que podría ser responsable de variaciones menores.

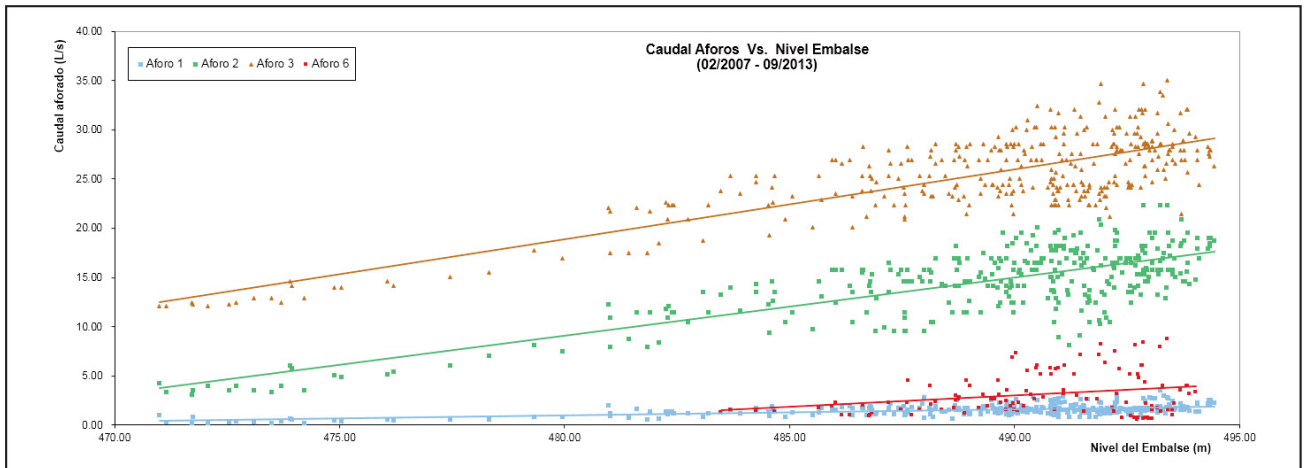


Figura 6. Relación entre los caudales medidos en los aforadores 1, 2, 3 y 6, y el nivel del embalse, para el período 02/2007 a 09/2013.

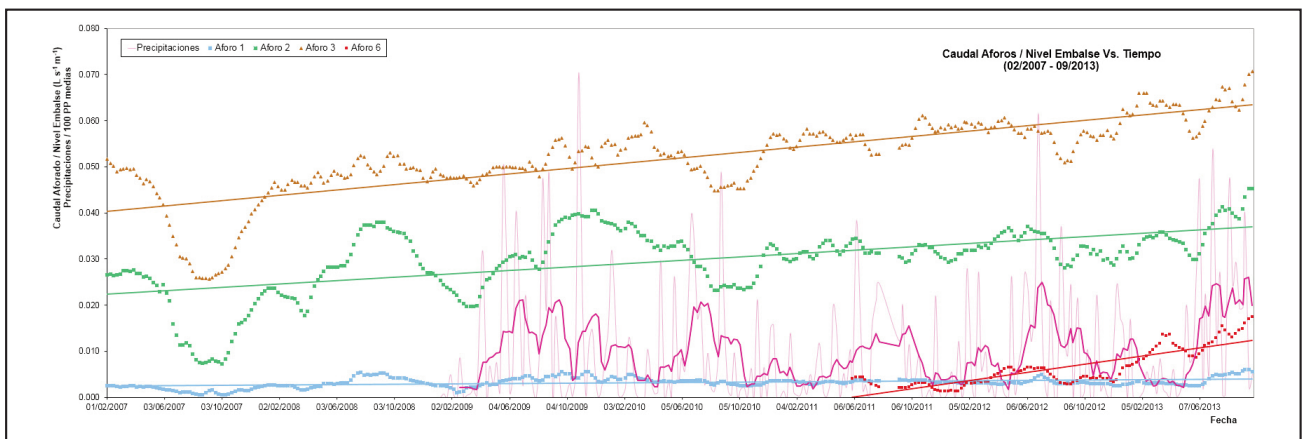


Figura 7. Relación temporal entre los caudales aforados y el nivel del embalse. En rosa, las precipitaciones, expresadas como la centésima parte de su relación con la media del período analizado; y en trazo más grueso, la media móvil.

Para el caso del aforador 1, la tendencia general es a mantener un caudal de filtraciones constante. Cabe recordar que este aforador toma las filtraciones provenientes casi exclusivamente de la compuerta de acceso al túnel de inspección.

En las figuras 8, 9 y 10, se lleva a cabo el mismo análisis, pero aumentando el grado de detalle en el intervalo de los últimos 2 años, desde el 22/09/2011 al 26/09/2013, en el cual se dispone de datos de todos los instrumentos contemplados.

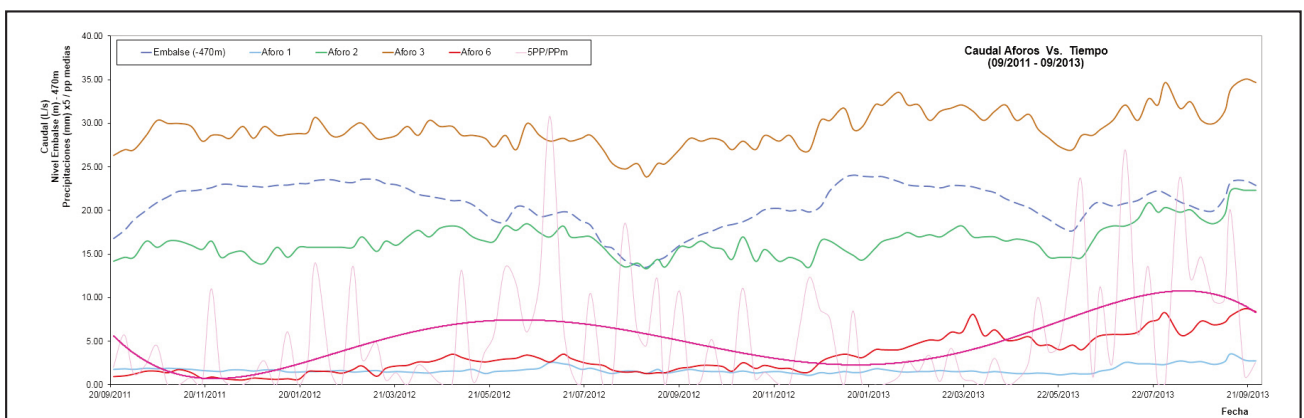


Figura 8. Caudales captados por los aforos en relación con el nivel de embalse y las precipitaciones, desde el 22/09/2011 hasta el 26/09/2013, con frecuencia de medición semanal. En línea discontinua azul, el nivel del embalse, en metros (el 0 corresponde a 470 msnm). En celeste, los caudales registrados en el aforador 1, en litros sobre segundo. En verde, los mismos datos provenientes del Aforador 2. En marrón, el Aforador 3. En rojo, el Aforador 6. En rosa, los datos de precipitaciones. Para una mejor visualización, se ha considerado una relación de 5 veces respecto de la precipitación media del período considerado; y en trazo más grueso, su regresión polinómica.

Se puede constatar que, salvo para el aforador 1, que se mantiene constante, en los últimos dos años analizados, las filtraciones se han incrementado en forma lenta, pero sostenida, a una tasa marcada por la pendiente de las rectas de aproximadamente  $10^{-5}$ .

Confirmado el incremento sostenido de las filtraciones en la Boca II, y con la evidencia de una dependencia con el nivel del embalse, y una relación no muy clara con las precipitaciones, se buscaron otras herramientas que posibiliten la determinación de las causas de tales incrementos.

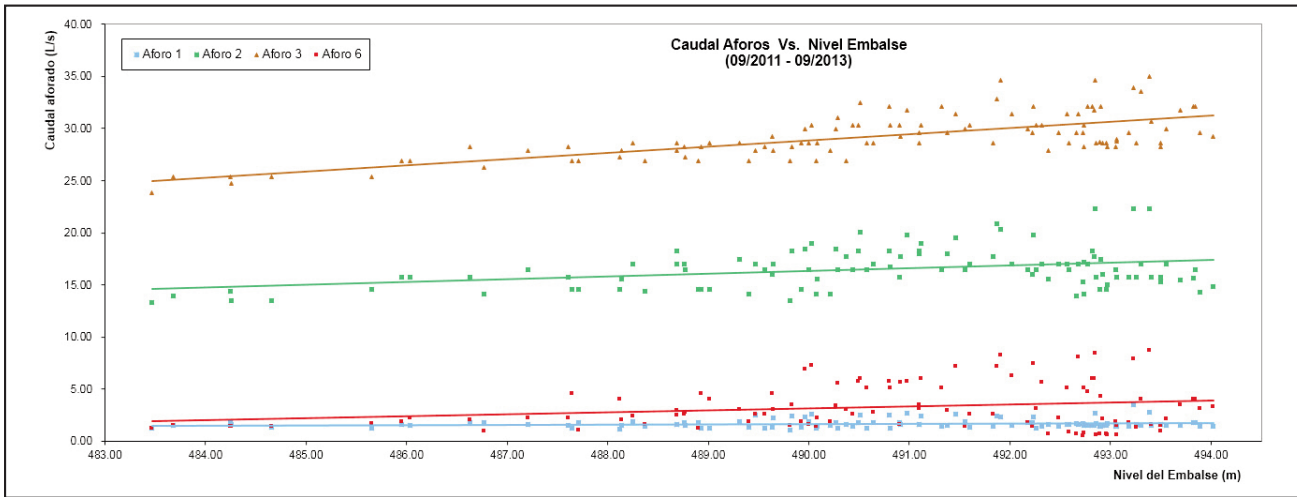


Figura 9. Relación entre los caudales medidos en los aforadores 1, 2, 3 y 6, y el nivel del embalse, para el período 09/2011 a 09/2013.

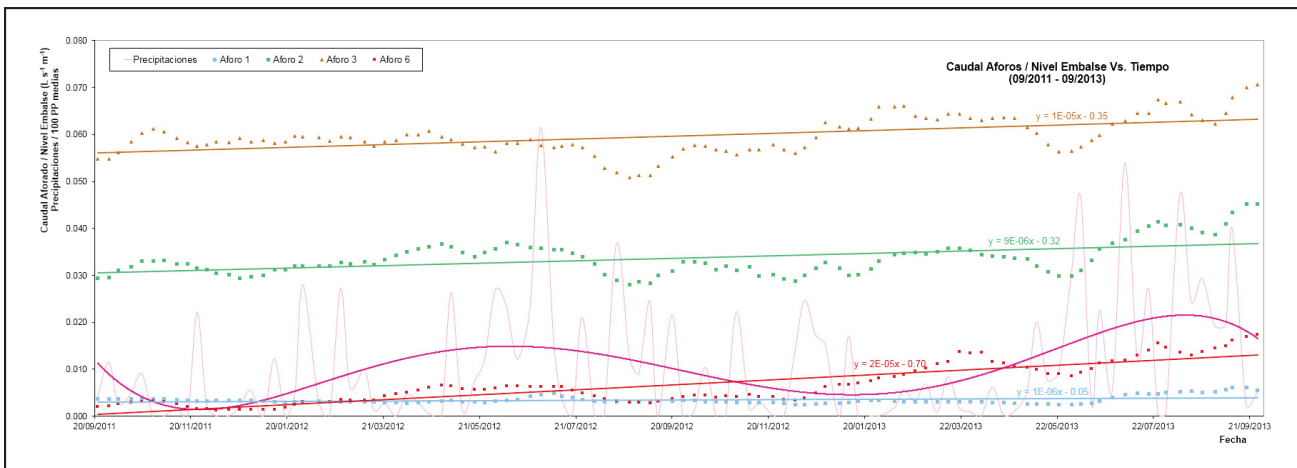


Figura 10. Relación temporal entre los caudales aforados y el nivel del embalse. En rosa, las precipitaciones, expresadas como la centésima parte de su relación con la media del período analizado; y en trazo más grueso, su regresión polinómica. Período analizado: 09/2011 a 09/2013.

### HIDROQUÍMICA

A fin de arrojar luz sobre la procedencia de las filtraciones, se colectaron muestras de agua del aforador 2 y del embalse, contrastando los valores obtenidos.

En la Tabla 1, se observan los resultados de los análisis hidroquímicos efectuados sobre 7 muestras de cada fuente, obtenidas con una frecuencia de unos 6 meses. Como puede apreciarse, se evidencia una similitud en los valores del agua colectada en ambas fuentes.

Se estima que estas similitudes no serían tan marcadas, en el caso de que el agua del aforador 2 tuviese que atravesar el macizo rocoso desde el embalse hasta la Boca II, con el consecuente incremento en los valores de parámetros tales como la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales.

A partir de este análisis, se descarta la hipótesis de aporte directo desde el embalse, atravesando los 600 metros de macizo rocoso fisurado. Los datos hidroquímicos refuerzan el hecho de que no existe un desfase temporal entre los cambios en el nivel del embalse y las variaciones en los caudales filtrados (figuras 5 y 8). Este hecho solo sería posible con una permeabilidad extremadamente elevada del macizo rocoso.

Considerando además que la relación de los caudales aforados con el nivel del embalse parece ser de mayor importancia que la de las precipitaciones, al menos para el último período analizado (figuras 9 y 10), es razonable suponer que la hipótesis de fisuras en el túnel de aducción sería la de mayor sustento.

Por su parte, la relación instantánea con el nivel del embalse, induce a pensar en una mínima percolación a través del macizo rocoso.

Tabla 1. Análisis hidroquímicos efectuados a partir de muestras colectadas en el embalse y en el aforador 2. Extraído de Pujol et al. (2013).

Embalse Presa		23/06/2009	07/12/2009	03/01/2011	21/06/2001	12/12/2011	28/06/2012	26/12/2012	Unidades
Parámetros	Temperatura	8	7	12	7	10	6	11	°C
	pH	6.9	7.8	8.1	8.2	7.7	8.3	7.4	-
	Conductividad Eléctrica	45	56	46	52	41	68	44	( $\mu$ S/cm)
	Sólidos Disueltos Totales	35	47	35	41	33	50	28	(mg/l)
	Alcalinidad Total	15	19	10	13	13	15	10	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Carbonatos	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Bicarbonatos	15	19	10	13	13	15	10	(mgCaCo3/l)
	Dureza	14	15	12	25	7	27	21	(mgCaCo3/l)
	Cloruros	<1	<1	13	<1	2	10	5	(mg/l)
	Sulfatos	<1	4	8	<1	<1	4	2	(mg/l)
	Hierro	0.01	0.01	<0.01	0.02	0.03	0.02	<0.01	(mg/l)
	Amonio	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)
	Nitritos	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)

Puente Tubería Boca II - Aforo 2		23/06/2009	04/12/2009	03/01/2011	21/06/2001	12/12/2011	28/06/2012	26/12/2012	Unidades
Parámetros	Temperatura	8	9	9	7	8	7	12	°C
	pH	6.7	7.8	8.0	8.1	7.8	8.4	7.5	-
	Conductividad Eléctrica	50	52	47	51	45	53	48	( $\mu$ S/cm)
	Sólidos Disueltos Totales	50	40	42	42	38	50	30	(mg/l)
	Alcalinidad Total	16	19	12	24	14	16	13	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Carbonatos	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Bicarbonatos	16	19	12	24	14	16	13	(mgCaCo3/l)
	Dureza	22	18	15	19	10	23	19	(mgCaCo3/l)
	Cloruros	<1	<1	15	<1	<1	8	5	(mg/l)
	Sulfatos	<1	5	6	<1	<1	4	2	(mg/l)
	Hierro	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.03	<0.01	(mg/l)
	Amonio	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)
	Nitritos	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)

Por lo tanto, todo pareciera indicar que las filtraciones provienen de una fisuración en el túnel de aducción, próxima a la Boca II.

Para intentar establecer posibles puntos débiles del túnel, se acudió a los mapas geológicos de proyecto, localizados en el Archivo Técnico de la Secretaría de Energía de la Nación, donde se resguarda una importante colección de documentos pertenecientes a la ex Agua y Energía Eléctrica S.E.

### GEOLOGÍA DE LA BOCA II

La geología de este sector ha sido estudiada en detalle por los geólogos de Agua y Energía Eléctrica, particularmente por el Dr. Ladislao Lanyi (1972a, b), durante la ejecución del túnel de aducción.

El macizo rocoso donde se implanta la Boca II está comprendido por tobas y andesitas brechosas de la Formación

Futaleufú, con diverso grado de fracturación, con intrusiones de diques basandesíticos altamente fallados.

El rumbo general de la estructuración es Noroeste, con una suave inclinación de unos 10 a 12° hacia el Sudoeste. Todo el conjunto presenta por sectores una marcada erosión de origen glaciario.

Entre las progresivas 552 y 566 del túnel de aducción (ver Figura 11), Lanyi (1972b) describe la presencia de fallas de hasta 70 cm de espesor, con brechas y jaboncillo, en conjunto con una serie de diques andesíticos paralelos entre sí. Refiere a su vez, la existencia de un dique principal, con un espesor de 14 metros, orientado según un azimut de 15°, y una inclinación de 79° a 85° hacia el Este.

Hacia la progresiva 576, en la solera, describe un dique de unos 2 metros de espesor, de azimut 20°, e inclinación 72° al Este, con el contacto fallado y una zona brechada de 10 a 20

cm de espesor, con jaboncillo. Hacia la bóveda del túnel, este sector ha sido excavado y retirado.

A continuación, se transcribe el párrafo final de uno de los informes de Lanyi (1972b), que resume las condiciones geotécnicas del sitio:

“Considerando cuál zona del túnel es la más apropiada para fundar el apoyo del puente acueducto, se desprende que la más conveniente sería la comprendida hacia el oeste de la progresiva 550

dado que allí la roca es maciza y compacta, ya que la zona del dique está fallada y con importante zona brechada con arcilla, la cual podría sufrir desplazamientos en caso de sismos, lo que atentaría contra la estabilidad del puente.”

La Figura 11 corresponde a un perfil geológico de la salida del túnel de aducción en la zona de la Boca 2, con vista hacia el Norte, elaborado por Lanyi (1972b), en el cual se ha resaltado la zona del dique principal, anteriormente mencionado.

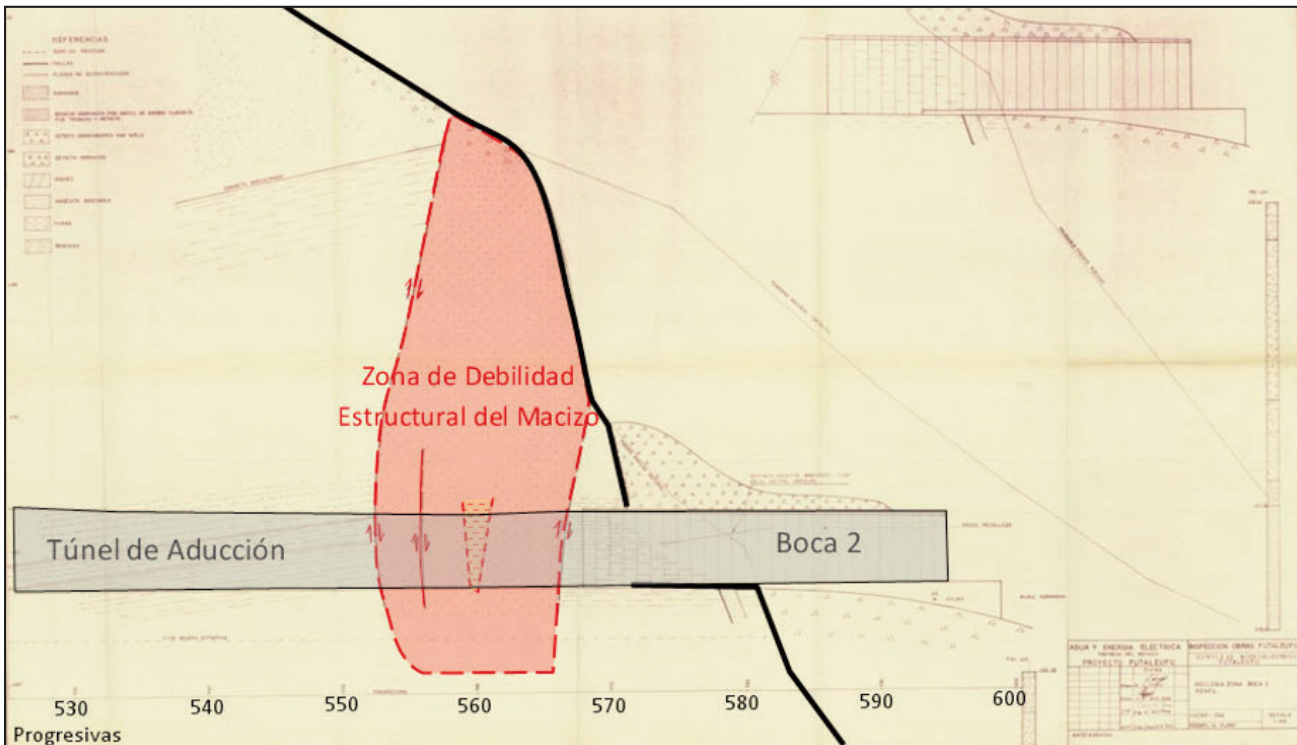


Figura 11. Perfil geológico de la zona de la Boca II (modificado de Lanyi, 1972b).

Considerando las observaciones de Lanyi sobre la configuración geológico - estructural de la zona de la Boca II, sumadas a los indicios previamente asumidos, en los cuales se ha considerado que los aportes a las filtraciones debían de provenir de una zona del túnel cercana a la Boca II, todo pareciera indicar que el problema radicaría en algún punto al este de la progresiva 550 m.

Si a esto se le suma el hecho de que las recomendaciones del Dr. Lanyi no habrían sido tenidas en cuenta al momento de la construcción, como así lo evidencian los probables planos conforme a obra, como el de la Figura 12, y el de la misma Figura 11, prácticamente no quedan dudas de que este sector es el comprometido. Solo resta identificar si se corresponde con un área puntual, o una zona de mayores dimensiones.

Ante la imposibilidad de ingresar al túnel de aducción con la central en servicio, se llevó a cabo una primera visita al sitio, a fin de observar desde la superficie, la configuración geológica del talud excavado. En las figuras 13, 14 y 15, se puede apreciar el estado general de fracturación y meteorización del macizo rocoso en el entorno de la Boca II. A su vez, se resaltan una serie de fallas, que podrían corresponderse con la zona identificada por Lanyi en la Figura 11.

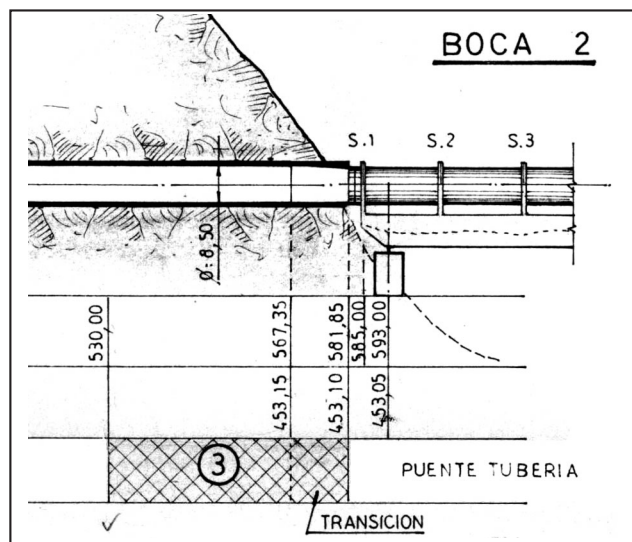


Figura 12. Detalle de la transición entre el túnel y el puente tubería, en la Boca II (extraído de Sander, 1973). Se observa que el puente comienza en la progresiva 581,85, existiendo una transición previa, desde la progresiva 567,35, un metro al este del límite de la zona de falla, la cual queda desprovista del blindaje de acero de la tubería.





Figura 13. Talud excavado, correspondiente a la Boca II del túnel de aducción. En líneas roja, se indican tres zonas de falla.



Figura 14. Detalle de la falla inferior, indicada en la Figura 13, sobre el acceso a la galería de inspección.



Figura 15. Sector norte de la Boca II. Se observa el elevado grado de fracturación y meteorización del macizo rocoso.

## INSPECCIÓN DEL TÚNEL DE ADUCCIÓN

Habiendo analizado los datos hidrológicos, hidroquímicos y geológicos, y luego de llevar a cabo un relevamiento expeditivo sobre el estado general del macizo rocoso, todo apuntaba a que el agua que circula a presión a través del túnel de aducción había generado una o más fisuras en el hormigón de 40 cm de espesor que lo reviste, en algún punto cercano a la Boca II. Este hecho, muy probablemente habría ocurrido en el tramo entre las progresivas 552 y 566, donde el macizo rocoso presenta una baja calidad geotécnica, y quizás el sostenimiento podría no haber sido ejecutado con la resistencia y ductilidad adecuada.

Aunque gozaba de un nutrido sustento técnico, esta hipótesis se mantuvo en el terreno de las especulaciones por algunos meses hasta que, en marzo de 2014, se dio un hecho de recurrencia decenaria: llegó el momento de las tareas de mantenimiento generalizado, programadas por la Concesionaria, las cuales incluyen la salida de servicio de la central, la reducción del nivel del embalse a su nivel mínimo, y la revisión de los sectores habitualmente inundados e inaccesibles.

El programa no tenía previsto realizar reparaciones específicamente dentro del túnel, aunque sí se había dispuesto sellar una serie de fisuras en las proximidades de la compuerta de acceso a la galería de inspección, que generaban las filtraciones colectadas por el aforador 1.

Independientemente de ello, era una oportunidad única para acceder al túnel de aducción, y así se hizo. Los autores del presente trabajo, en representación del ORSEP, suponían que las presuntas fisuras debían poder ser individualizadas a simple vista. Se sabía, sin embargo, que una cuestión física podría atentar contra su identificación, y es el hecho que al entrar en carga, el túnel tiende a expandirse radialmente, y las fisuras se abren; mientras que al vaciarse, tienden a cerrarse, pudiendo quedar ocultas a la vista.

Un primer hecho ocurrido al poco tiempo de deprimir al mínimo el nivel del embalse y vaciar el túnel, fue que desaparecieron las filtraciones; despejando así cualquier duda sobre su dependencia directa, y despreciando cualquier relación que pudiese haber con las precipitaciones o algún aporte freático local.

Cuando finalmente se logró acceder a este tramo del túnel, se constató un aspecto general muy bueno, con algunas fisuras menores en el hormigón. Sin embargo, llamó la atención el estado del revestimiento en el contacto con la tubería de acero, que conforma la transición hacia el puente tubería. Según el plano de la Figura 12, este punto correspondería a la progresiva 567, si bien existen dudas respecto de que aquel plano sea conforme a obra, por lo que podrían existir pequeñas diferencias, que podrían hacerlo coincidir en forma más o menos exacta con la zona de debilidad estructural descrita por Lanyi (1972b).

La Figura 16 presenta la fisura hallada, y en la Figura 17, se aprecia un detalle de la misma. El hecho de que la fisura se haya generado en el contacto hormigón - acero, podría guardar relación con un comportamiento diferencial entre ambos materiales, con deformabilidades y resistencias disímiles, actuando sobre un macizo rocoso de baja calidad geotécnica.



Figura 16. Contacto entre el revestimiento de hormigón del túnel de aducción, y el comienzo de la tubería de acero, en transición al puente tubería.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El incremento lento, pero sostenido, de las filtraciones detectadas en la Boca II del túnel de aducción del Complejo Hidroeléctrico Futaleufú, motivó el estudio, por parte del ORSEP, de sus posibles fuentes de aporte, a fin de determinar el grado de afectación a la seguridad del conjunto de las obras.

De un primer análisis de alternativas, sin mayores herramientas, se plantearon 3 escenarios posibles, en función del origen de las filtraciones:

a) procedencia de las precipitaciones, o de algún acuífero local, percolando una corta distancia, a través de las fisuras del macizo rocoso; b) origen en el embalse, atravesando un extenso tramo del macizo de tobas y andesitas brechosas; o c) filtraciones a través del túnel de aducción, revestido en 40 cm de hormigón, y en parte blindado con la tubería de acero del puente acueducto.

A partir del análisis hidrológico, se hizo evidente la relación instantánea entre los niveles de embalse y los caudales captados por los aforadores. Esto prácticamente descartó la posibilidad de que el agua recorriese 600 metros a través del macizo rocoso fisurado, por más carga hidráulica que actuara, ya que su permeabilidad debería ser inusualmente elevada. No se descartó, sin embargo, la influencia de las precipitaciones, aunque con una incidencia menor.

Se cotejaron posteriormente los parámetros hidroquímicos del agua del embalse con la captada por el aforador 2, dando cuenta de una similitud en todos los valores. La escasa alteración hidroquímica respecto del embalse, no sería compatible con un largo recorrido a través del macizo rocoso fisurado, reforzando la hipótesis de procedencia cercana a la Boca II, compatible con el escenario c).

Seguidamente, a partir de la recopilación y análisis de documentación de proyecto de índole geológica, geotécnica e ingenieril, se detectó la existencia de una zona de baja calidad geotécnica, muy próxima a la Boca II, en coincidencia con el comienzo de la tubería de acero. Las características de este sector, puesto de manifiesto en la etapa de proyecto como un punto crítico del sistema (Lanyi, 1972b), parecieran no haberse tenido en consideración al momento de diseñar el empotramiento del puente tubería.



Figura 17. Detalle de la fisura localizada en el contacto hormigón-acero, en el túnel de aducción, próximo a la Boca II.

Una visita expeditiva al sitio, reveló la presencia de fallas sobre el talud de excavación de la Boca II, que podrían responder a una expresión externa de la zona de debilidad detectada durante la etapa de proyecto.

Finalmente, durante una parada de mantenimiento programado, se redujo el nivel del embalse a su cota mínima, vaciando el túnel de aducción. Este hecho significó la interrupción de las filtraciones, y la confirmación fehaciente de su dependencia directa, dejando relegado el posible aporte de las precipitaciones a la dispersión en los datos relevados.

Al acceder al túnel de aducción y observar en forma directa el estado general del mismo, los autores del presente trabajo localizaron una fisura en el hormigón, sobre el contacto con la tubería de acero, de mayor espesor que otras presentes en el túnel. Esta singularidad se corresponde con la zona de debilidad estructural identificada por Lanyi (1972b), y observada desde el exterior, sobre el talud excavado.

Debido a su localización, en el contacto entre dos materiales con diferente comportamiento ante los esfuerzos provocados por la carga hidráulica, este sector representa en sí mismo un punto débil del sistema. La fisura detectada presenta, sobre la superficie del túnel, un área de desprendimiento del hormigón de unos 50 cm de longitud por un ancho de unos 5 a 7 cm. Si bien a primera vista parece cerrarse hacia el interior del macizo rocoso (Figura 17), se presupone que, al entrar el túnel en carga, podría expandirse, constituyendo una vía de filtración del agua. Si se consideran las observaciones de Lanyi, quien describió algunas de las discontinuidades como rellenas de arcilla, podría suponerse que este material es factible de ser arrastrado por el paso del agua, con la posible generación de cavidades de diverso tamaño, y el consecuente deterioro del revestimiento del túnel.

Cabe destacar que debido a que no fue considerado en el plan de mantenimiento de marzo de 2014, en dicha oportunidad no se llevó a cabo un tratamiento adecuado de las fisuras identificadas por los autores, por lo que al reiniciarse la carga del túnel reaparecieron las filtraciones.

Actualmente se monitorea sistemáticamente la evolución de los caudales, que continúan ascendiendo lentamente.

Los autores recomiendan la elaboración de un modelado geomecánico de estabilidad del talud, junto a la instalación de piezómetros horizontales en el frente, a fin de determinar la

presión ejercida por el agua y evaluar la necesidad de ejecución de drenes horizontales, así como otros métodos de sostenimiento.

En función de los resultados arrojados por el modelo, y de no registrarse aceleraciones en el proceso, los autores recomiendan planificar, para la próxima parada de mantenimiento general, las reparaciones necesarias, que podrían implicar un tratamiento localizado de inyecciones con lechada cementicia y/u otras soluciones, desde el túnel hacia el interior del macizo rocoso, a fin de sellar posibles vías de escape.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

LANYI, L. P., 1972a.

Perfil Geológico. Toma, Conducción y Central. Plano Geotécnico 598. Escala 1:2.000.  
*Departamento de Estudios y Proyectos. Agua y Energía Eléctrica S.E. Inédito.*

LANYI, L. P., 1972b.

Geología Zona Boca 2. Apoyo del puente Acueducto - Planos IOCHF 245-246-247.  
*Comisión Geotécnica Futaleufú. Agua y Energía Eléctrica S.E. 4 pp., 3 planos. Inédito.*

PUJOL, L., PUJOL, A. Y CABALLERO, C., 2013.

Informe Anual de Auscultación Mayo 2012 - Abril 2013  
*Volumen II. Aprovechamiento Hidroeléctrico Futaleufú. RED Ingeniería SRL. 158 pp. Inédito.*

SANDER, W., 1973.

Túnel de Conducción. Revestimiento y Juntas. Plano N° 8163c. Escala 1:5.000.  
*Departamento de Estudios y Proyectos. Agua y Energía Eléctrica S.E. Inédito.*