

## EFICIENCIA HIDRÁULICA DE CAPTACIÓN DE LAS TOMAS COANDA EN LOS RÍOS RONQUITO, RONCO Y ANTARA

### HYDRAULIC EFFICIENCY OF THE COANDA INTAKES ON THE RONQUITO, RONCO AND ANTARA RIVERS

Galo Muñoz, María Lafuente, Marcelo Terán

*Laboratorio de Hidráulica*

*Universidad Mayor de San Simón*

marceloteran654@gmail.com

(Recibido el 31 de marzo 2024, aceptado para publicación el 12 de abril 2024)

#### RESUMEN

El propósito del presente estudio es conocer la eficiencia hidráulica de las obras de captación tipo Coanda en tres ríos de montaña del subandino de Bolivia, dichas obras forman parte de la Central Hidroeléctrica San José 1 y están ubicadas en el departamento de Cochabamba, provincia Chapare del Municipio de Villa Tunari. Para este estudio se comparó los caudales captados aforados frente a los caudales captados simulados por el programa Numerical Model of Coanda Screen Performance. Se llevaron campañas de aforo en los tres ríos durante el periodo marzo del 2018 a febrero del 2022. El número de las campañas y su frecuencia fue limitado por el advenimiento de la Pandemia COVID 19. Para la medición de los caudales se empleó el método de vadeo y utilizando correntómetros, los cuales se aforaron en diferentes puntos de cada obra de captación. Los resultados de la presente investigación permiten conocer valores del performance global para la pantalla Coanda en el río Ronquito del 80%, para Ronco del 74% y Antara del 80%. En atención a ello, las pantallas Coanda se constituyen en una buena alternativa de obras de captación de caudales en ríos de montaña, más aún si ellas reducen la necesidad a la inclusión de obras adicionales como desarenadores.

**Palabras Clave:** Coanda, Caudal, Aforo, Performance, Obra de Toma en Alta Montaña.

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to know the hydraulic efficiency of the Coanda type intake works in three mountain rivers of the sub-Andean region of Bolivia, these works are part of the San José 1 Hydroelectric Power Plant and are located in the department of Cochabamba, Chapare province of the Municipality of Villa Tunari. For this study, the gauged captured flows were compared with the captured flows simulated by the Numerical Model of Coanda Screen Performance program. Gauging campaigns were carried out in the three rivers during the period March 2018 to February 2022. The number of campaigns and their frequency was limited by the advent of Pandemic COVID 19. For the measurement of flow rates, the wading method was used and using current meters, which were gauged at different points of each catchment. The results of the present investigation show global performance values of 80% for the Coanda screen in the Ronquito river, 74% for Ronco and 80% for Antara. In view of this, the Coanda screens are a good alternative for catchment works in mountain rivers, especially if they reduce the need to include additional works such as sand traps.

**Keywords:** Coanda, Flow, Measurement, Performance, High Mountain Intake Structure.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Las centrales hidroeléctricas básicamente son una serie de obras hidráulicas que aprovechan la energía potencial del agua localizada a gran altitud, transformándola en energía cinética y luego en energía eléctrica a través del movimiento de turbinas debido al flujo. Por otra parte, se han realizado numerosas obras de aprovechamiento de aguas superficiales específicamente en ríos de montaña dentro de las cuales destacan la obra de toma tipo tirolesa y la captación con rejilla Coanda convencional. Dichas obras buscan hacer un uso racional y eficiente del agua demandada, gestión, producción y control en aprovechamientos hidroeléctricos, siendo estos temas estratégicos para el desarrollo del país [1].

Es de particular interés, para la Empresa Eléctrica ENDE CORANI S.A., el estudiar este tipo de obras de toma, ya que uno de los puntos más importantes del Plan de Desarrollo es alcanzar el cambio de la matriz energética con energías renovables no convencionales. El 2016 la Empresa ENDE CORPORACIÓN reportó una generación de 1941 MW, siendo 72% de Centrales Termoeléctricas, 25% de las Centrales Hidroeléctricas y apenas el 3% de Energías Alternativas. Para el año 2020 reportó una generación de 4571 MW, siendo el 57% de las Centrales Termoeléctricas, 30% de las Centrales Hidroeléctricas y el 13% de Energías Alternativas. Teniendo la visión para el 2025 de una generación de 14663 MW, siendo apenas del 18% de las Centrales Termoeléctricas, 78% de las Centrales Hidroeléctricas y el 4% de Energías Alternativas [2].

Una importante fracción de los aprovechamientos hídricos en el sub andino de Bolivia se efectuará a través de las captaciones de agua en ríos de alta montaña, estos ríos están caracterizados por un marcado transporte de sedimentos (desde grandes bolones hasta limos) debido a la pronunciada pendiente del terreno. Tradicionalmente, se implementaban tomas laterales y tomas tipo tirolesa para la derivación de agua hacia las respectivas obras de conducción. Sin embargo, este tipo de captación debe ir acompañada de desarenador que requieren amplio espacio para su implementación.

En alternativa, las tomas Coanda se presentan como una opción a considerar, ya que el volumen de agua que se introduce a través de los alambres de cuña, es incrementado por el efecto Coanda, que mantiene el flujo adherido a la superficie superior de cada alambre donde los alambres inclinados cortan el flujo a través de la pantalla. Otro rasgo característico es que las aberturas milimétricas limitan el ingreso de sedimento a los canales de captación ubicados debajo de la pantalla Coanda [3].

Estos dos aspectos: admisión de sedimentos finos y mecanismos para captar agua en una menor área de contacto con el flujo, hacen que esta clase de obras de toma sean atractivas de implementar en zonas montañosas, pues usualmente existe limitado espacio en las laderas de las montañas para la implementación de obras civiles [4].

Esta investigación tiene el objetivo principal de presentar el performance global de las obras de toma tipo Coanda en tres ríos de alta montaña de Bolivia.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada se puede apreciar representada en la Figura 1.

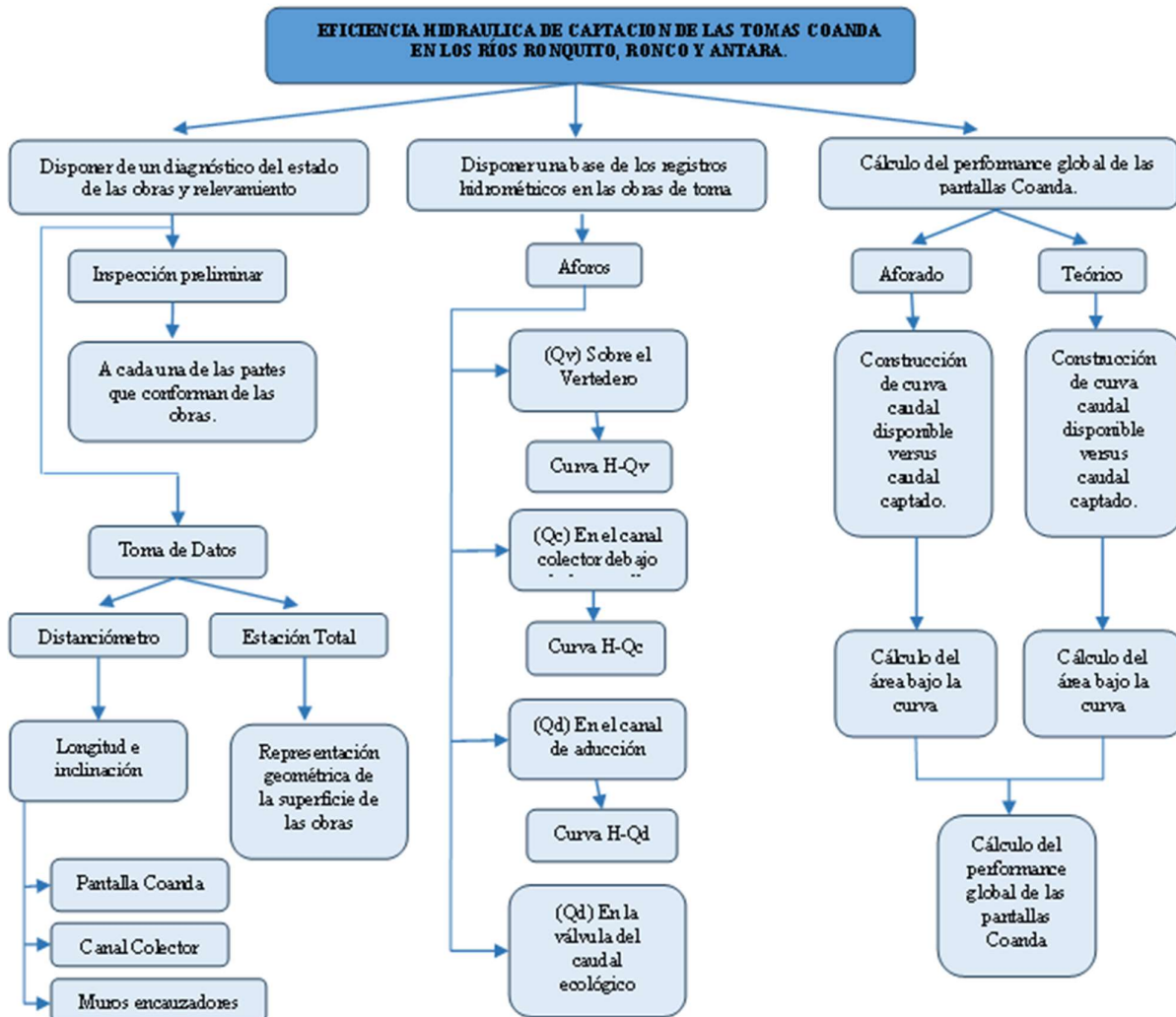
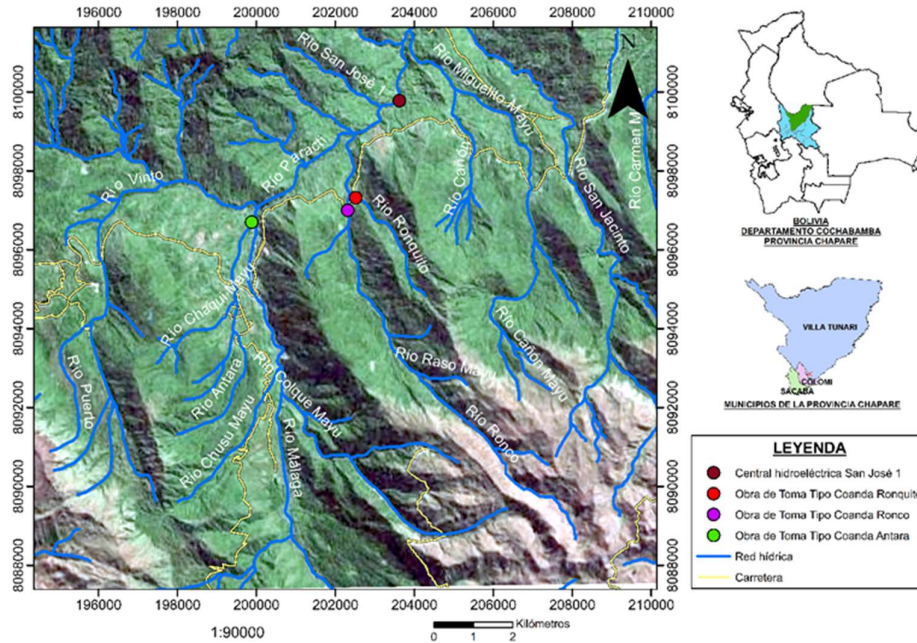


Figura 1: Flujograma de la metodología.

Fuente: Elaboración propia.

Estas obras de toma fueron instaladas por la Empresa Eléctrica ENDE CORANI S.A. entre los años 2014 al 2017, las tomas derivan caudales de los ríos hacia la Central Hidroeléctrica San José 1. La Figura 2 muestra la ubicación de las obras de toma tipo Coanda.



**Figura 2:** Ubicación de las obras de toma tipo Coanda.  
**Fuente:** Elaboración propia en Base al satélite ALOS PALSAR 12.5 m.

La Figura 3 muestra fotos de las obras de toma y sus pantallas Coanda en pleno funcionamiento.



**Figura 3:** Pantallas con efecto Coanda emplazadas en los vertederos de las obras de toma de estudio.  
**Fuente:** Elaboración propia.

La medición de los caudales fue realizada empleando el método de vadeo y utilizando los siguientes correntómetros: OTT C2 con rango de medición entre 0.02 a 5 m/s y precisión de  $\pm 2\%$ ; Gurley 622 con rango de medición entre 0.06 a 7.2 m/s y precisión del 2%; Seba M1 con rango de medición entre 0.03 a 5 m/s y finalmente Seba F1 con rango de medición entre 0.025 a 10 m/s. Los puntos de medición de los caudales fueron: (Qv) sobre el vertedero, (Qc) en el canal colector debajo de la pantalla Coanda, dicho caudal desemboca al desgravador donde se bifurca hacia la Central Hidroeléctrica a través de un canal de Aducción (Qd) y hacia el caudal ecológico (Qe) a través de una válvula de descarga. Se observa en la Figura 4 un esquema de todos los puntos de medición descritos anteriormente.

Para el diseño de las pantallas Coanda, con frecuencia se utiliza el programa Numerical Model of Coanda Screen Performance (NMCSP) de autoría Tony L. Walh conjuntamente con el U.S. Department of the Interior a partir de datos recogidos en las pruebas de laboratorio de varias configuraciones de pantallas [5].

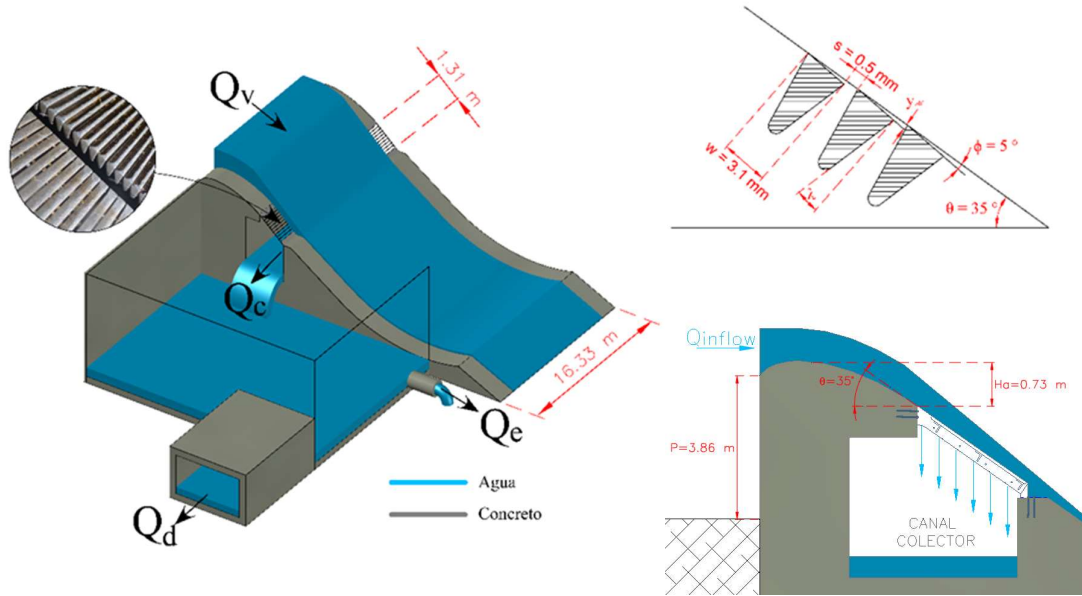


Figura 4: Esquema de los puntos de aforo de los caudales y datos relevados en campo de la obra Ronco.

Fuente: Elaboración propia.

El programa Numerical Model of Coanda Screen Performance (NMCSP) está a disposición de los usuarios siendo este de descarga libre en Internet, El (NMCSP) está escrito en el lenguaje de programación Visual Basic 4.0 para uso en todas las versiones de Microsoft y puede ser descargado desde [6].

La estructura del programa Numerical Model of Coanda Screen Performance (NMCSP) está organizado de acuerdo a los siguientes datos de entrada: geometría de la estructura del vertedero de rebose, propiedades de la placa de aceleración, propiedades de los alambres de la pantalla y por último condición de flujo a ser evaluado. Los resultados muestran la captación a lo largo de la longitud de la pantalla tipo Coanda.

La Tabla 1 visualiza el cotejamiento de los datos de diseño de las obras de tomas frente a los relevados en campo. A partir de ello se pueden detectar cambios y modificaciones durante la construcción e instalación de las pantallas Coanda.

TABLA 1 - COTEJAMIENTO DE LOS DATOS DE DISEÑO DE LAS OBRAS FRENTE A LOS RELEVADOS EN CAMPO, ORIENTADOS AL INGRESO AL PROGRAMA NUMERICAL MODEL OF COANDA SCREEN PERFORMANCE (NMCSP)

OBRAS DE TOMA	DATOS	STRUCTURE		ACCELERATOR PLATE				SCREEN			FLOW.C
		Crest Length	Screen Length	Crest Shape	Accelerator Drop (Ha)	Top of Screen Inclination ( $\theta$ )	Approach Channel Weir P-Height (P)	Screen Slot Size (s)	Screen Wire Size (w)	Screen Wire Tilt Angle Phi ( $\phi$ )	Q inflow
				Generic Crest							
Ronquito	Diseño	6.65	1.1	2.184	0.49	35	3.5	0.5	3.15	5	Q diseño
	Relevado	6.65	1.1	2.184	0.43	36	3.6	0.9	3	5	Q aforado
Ronco	Diseño	16.1	1.1	2.184	0.73	35	3.9	0.5	3.1	5	Q diseño
	Relevado	16.33	1.31	2.184	0.73	35	3.86	0.5	3.1	5	Q aforado
Antara	Diseño	6.65	1.1	1.7	0.21	40	3.48	0.5	3	5	Q diseño
	Relevado	6.65	1.1	1.7	0.46	34	3.11	1	3	5	Q aforado

Fuente: Elaboración propia.

**3. RESULTADOS**

La Tabla 2 presenta la comparación de los caudales simulados con el programa (NMSCP) con los aforados en las tomas Ronquito, Ronco y Antara. Los símbolos representan: (Qv) caudal aforado sobre la cresta del vertedero; (Qc) caudal aforado en el canal colector y que capta la pantalla Coanda; (Q'c) caudal captado por la pantalla Coanda calculado con el programa (NMSCP) considerando su factor de seguridad; CP el número identificativo de la campaña de aforo. Los resultados del programa (NMSCP) fueron calculados utilizando los datos de entrada relevados descritos en la Tabla 1.

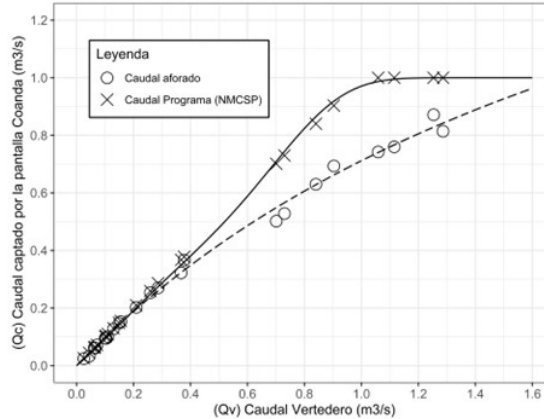
**TABLA 2 - RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFORO Y DEL PROGRAMA NMSCP**

RONQUITO				RONCO				ANTARA			
Nº	Aforos		Programa (NMSCP)	Nº	Aforos		Programa (NMSCP)	Nº	Aforos		Programa (NMSCP)
CP	Qv (m³/s)	Qc(m³/s)	Q'c(m³/s)	CP	Qv(m³/s)	Qc(m³/s)	Q'c(m³/s)	CP	Qv(m³/s)	Qc(m³/s)	Q'c(m³/s)
1	0.130	0.127	0.130	1	0.196	0.191	0.196	1	0.030	0.029	0.030
2	0.026	0.024	0.026	2	0.203	0.192	0.203	2	0.031	0.030	0.031
3	0.101	0.096	0.101	3	0.190	0.190	0.190	3.1	0.056	0.055	0.056
4	0.072	0.072	0.072	4	0.361	0.357	0.361	3.2	0.075	0.071	0.075
5	0.104	0.095	0.104	5	0.682	0.555	0.682	4	0.038	0.037	0.038
6	0.062	0.062	0.062	6	0.554	0.550	0.554	5	0.067	0.065	0.067
7	0.065	0.060	0.065	7.1	0.535	0.508	0.535	6	0.050	0.048	0.050
8	0.149	0.147	0.149	7.2	0.535	0.532	0.535	7	0.050	0.049	0.050
9	0.110	0.101	0.110	8	0.545	0.492	0.545	8	0.052	0.051	0.052
10	1.253	0.871	1.253	9	0.491	0.485	0.491	9	0.049	0.048	0.049
11	0.840	0.630	0.840	10	0.623	0.550	0.623	10	0.052	0.048	0.052
12	1.286	0.814	1.286	11	1.759	1.391	1.759	11	0.722	0.439	0.722
13	0.903	0.693	0.903	12	3.224	1.768	3.224	12	1.376	0.714	1.376
14	0.044	0.033	0.044	13	4.763	1.866	4.763	13	2.034	0.879	1.637
15	1.115	0.760	1.115	14	5.192	1.921	4.720	14	2.226	0.960	1.668
16	0.210	0.202	0.210	15	0.270	0.258	0.270	15	0.536	0.398	0.536
17	0.155	0.153	0.155	16	0.311	0.310	0.311	16	0.948	0.546	0.948
18	0.259	0.253	0.259	17.1	0.319	0.262	0.319	17	1.278	0.698	1.278
19	0.367	0.322	0.367	17.2	0.319	0.319	0.319	18	0.690	0.407	0.690
20	1.059	0.742	1.059	18	1.137	0.946	1.137	19	0.879	0.522	0.879
21	0.286	0.270	0.286	19	0.669	0.662	0.669	20.1	0.376	0.302	0.376
22	0.378	0.367	0.378	20	0.689	0.665	0.689	20.2	0.376	0.375	0.376
23	0.730	0.528	0.730	21	0.913	0.847	0.913				
24	0.701	0.502	0.701	22	0.779	0.776	0.779				
				23	1.579	1.389	1.579				
				24	3.553	1.930	3.553				
				25	3.977	1.871	3.977				
				26	1.395	1.089	1.395				
				27	1.245	1.181	1.245				
				28	2.281	1.502	2.281				

Fuente: Elaboración propia.

En la obra de toma Coanda Ronquito se realizaron 24 campañas tal como se observa en la Tabla 2, el máximo caudal aforado sobre la cresta del vertedero fue de 1.286 m<sup>3</sup>/s. No obstante, el caudal aforado en el canal colector que recibe el aporte de la pantalla Coanda es 0.814 m<sup>3</sup>/s, exhibiendo una diferencia de 0.466 m<sup>3</sup>/s, siendo su caudal de diseño 1 m<sup>3</sup>/s.

Se observa en la Figura 5 los caudales aforados en la toma Coanda Ronquito y los caudales simulados con el programa (NMCSP). La discrepancia entre los caudales teóricos y los caudales aforados comienza a ser significativa a partir de 0.35 m<sup>3</sup>/s y caudales mayores.



**Figura 5:** Caudales aforados y simulados con el programa (NMCSP) de la toma Coanda Ronquito.

**Fuente:** Elaboración propia.

Se propone la determinación del desempeño de captación de la pantalla Coanda durante las campañas de aforo, frente a los caudales teóricos calculados por el programa (NMCSP). Ese desempeño se define como el performance global de captación, cuya expresión cuantitativa se propone como el cociente del área bajo la curva de caudales aforados versus el área bajo la curva de caudales teóricos, tal como se indica en la ecuación (1).

$$Performance = \frac{\text{Área bajo curva caudales aforados}}{\text{Área bajo curva caudales teóricos}} \quad (1)$$

En el caso de la pantalla Coanda de la toma Ronquito, se calculó el área bajo la curva de los caudales aforados y el área bajo la curva de los caudales teóricos, se indica en la ecuación (2) el performance global.

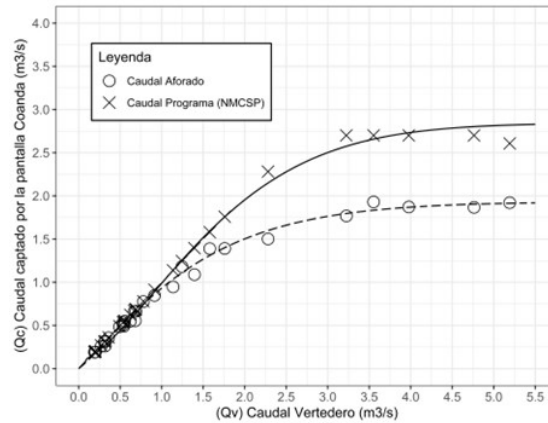
$$Performance = \frac{0.621}{0.780} = 0.8 \quad (2)$$

El resultado de la ecuación (2), indica el performance global del 80% de la pantalla Coanda para la Toma Ronquito.

En la obra de toma Coanda Ronco se realizaron 28 campañas tal como se observa en la Figura 6. A continuación, se comparó los caudales simulados con el programa (NMSCP) con los aforados de la toma Ronco. El significado de los símbolos son los mismos que la toma Ronquito, los resultados del programa (NMCSP) fueron obtenidos con los datos de entrada relevados vistos en la Tabla 1.

En las campañas 7 (7.1 y 7.2) y 17 (17.1 y 17.2) se observó hojarasca y material orgánico retenido sobre la pantalla, para esa condición se aforaron los caudales. Posteriormente, se limpió las ranuras de las pantallas utilizando cepillo de cerdas plásticas. Así mismo, se observó un resalto del flujo entre en la unión de la pantalla Coanda y el hormigón armado de la placa de aceleración, aspecto que impide entregar el flujo con la orientación adecuada a la pantalla reduciendo su capacidad de captación. Este deterioro es causado por la abrasión del sedimento arrastrado y por el impacto de grandes bolones contra el vertedero. Para solucionar el problema se colocaron rocas sobre el vertedero en zonas donde se vio esta abrasión; con esta acción se logró redireccionar el flujo hacia áreas de la pantalla Coanda en óptimas condiciones. Posteriormente, se volvieron a aforar caudales y se obtuvo un incremento favorable en los caudales captados.

Durante las 28 campañas, el caudal máximo aforado sobre el vertedero fue 5.192 m<sup>3</sup>/s. No obstante, el caudal aforado que capta la pantalla Coanda es 1.921 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal de diseño en la toma de 2.7 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 6 se observa los caudales aforados y simulados con el programa (NMCSP) de la toma Coanda Ronco.



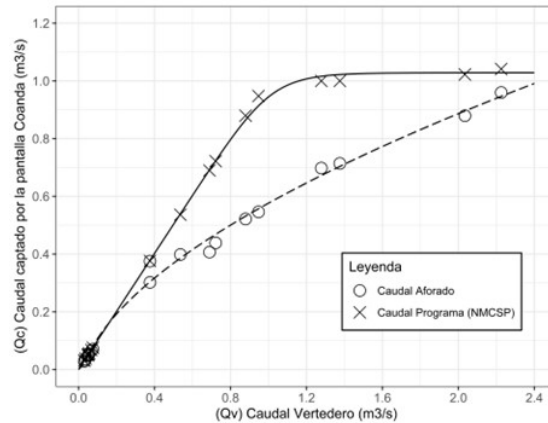
**Figura 6:** Caudales aforados y simulados con el programa (NMCSP) de la toma Ronco.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Para el cálculo de la eficiencia global de la pantalla Coanda de la toma Ronco se utilizó los criterios descritos anteriormente en la Ecuación (1). Se calculó el área bajo la curva de los caudales aforados y el área bajo la curva de los caudales teóricos, se observa en la ecuación (3) el performance global.

$$Performance = \frac{3.379}{4.233} = 0.8 \tag{3}$$

La ecuación (3) indica un *performance* global del 80% de la pantalla Coanda de la Toma Ronco.

La comparación de los caudales simulados por el programa (NMCSP) con los caudales aforados de la toma Antara se presenta en la Tabla 2. En la campaña 20, se aforó una primera vez en condiciones sin limpieza de la pantalla Coanda y un segundo aforo en condiciones de pantalla limpia, mostrando un incremento en la captación tal como se observa en la Tabla 2. Se observa en la Figura 7 los caudales aforados y simulados con el programa (NMCSP) de la toma Coanda Antara.



**Figura 7:** Caudales aforados y simulados con el programa (NMCSP) de la toma Antara.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Para el cálculo del performance global de la pantalla Coanda Antara se utilizaron los criterios descritos en la toma Ronquito. Se calculó el área bajo la curva de los caudales aforados y el área bajo la curva de los caudales teóricos, el performance global se evidencia en la ecuación (4).

$$Performance = \frac{1.291}{1.745} = 0.74 \tag{4}$$

La ecuación (4) indica un *performance* global del 74% de la pantalla Coanda de la Toma Antara.

#### 4. CONCLUSIONES

Conforme los resultados de esta investigación, se obtiene un performance global superior al 74% para las 3 obras de tomas, por lo que las pantallas Coanda constituyen una buena alternativa de captación, más aún, cuando reducen las exigencias de obras de decantación de grandes dimensiones, particularmente importante en zonas montañosas donde existe limitaciones de espacio para construir infraestructura nueva. Por otra parte, se ha comprobado la ventaja de disponer de trabajos de mantenimiento para contar con un área de captación despejada en la pantalla Coanda, tanto de sedimentos finos como de la formación de una película biológica.

El estudio permite realizar las siguientes observaciones:

La importancia de encarar trabajos de mantenimiento y dragado de la fosa de detención de sedimentos aguas arriba de la obra de captación, a fin de que la lámina vertiente de agua encima del cimacio del vertedero, se distribuya uniformemente sobre toda la pantalla Coanda, sin la formación de canales preferenciales de flujo.

La necesidad de que, durante la fase de diseño de la pantalla, la dimensión longitudinal sea incrementada más allá de lo calculado a fin de prever colmatación prematura y permitir su funcionalidad en momentos adversos de operación.

La necesidad de realizar frecuentes tareas de limpieza con cepillo plástico de la rejilla Coanda a fin de disminuir la formación de la película biológica que disminuye el área apta para la captación de agua, especialmente en la época de estiaje cuando se presentan caudales con velocidades bajas.

#### REFERENCIAS

- [1] Bureau of Reclamation, Diseño de Pequeñas Presas, Bellisco Ediciones Técnicas y Científicas, 1987.
- [2] ENDE CORPORACION S.A., «Rendición pública de cuentas final 2016-inicial 2017,» ENDE CORPORACION S.A., [En línea]. Available: <https://www.ende.bo/public/publicaciones/pdf/rendicionpublicacuentas-ende-2016-2017-final.pdf>. [Último acceso: 2016].
- [3] T. L. Wahl, «Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens,» U.S. Bureau of Reclamation, Water Resources Research Laboratory, Texas, San Antonio, 1995.
- [4] T. L. Wahl, «Hidraulic Performance of Coanda-Effect Screens, » *Journal of Hidraulic Engineering*, p. 1, 2001.
- [5] T. L. Wahl, «Design Guidance for Coanda-Effect Screens, » Bureau of Reclamation Technical Service Center Water Resources Research Laboratory Denver, CO, Denver, Colorado, 2003.
- [6] T. L. Wahl, «New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities, » Hydraulic Engineer, Bureau of Reclamation Hydraulics Laboratory, Denver, CO, USA, Denver, Colorado, 2013.