

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS EJES HIDRÁULICOS DE LOS RÍOS DEL PHA

**PATRICIO VALCK C.¹
FABIAN MONSALVE O.²**

RESUMEN

Debido a los requerimientos del diseño de las obras y de los estudios ambientales del Proyecto Hidroeléctrico Aysén (PHA) fue necesario modelar numéricamente los ejes hidráulico de ríos en las cuencas de los ríos Baker, Pascua y tributarios, ubicados al extremo sur de Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, donde se emplazarían las obras de este proyecto, completando más de 205 km de ríos modelados.

Ingendesa realizó para Centrales Hidroeléctricas de Aysén S.A. (hidroAysén), la modelación numérica del eje hidráulico de los ríos, desarrollando modelos precisos e intensivos en el uso de información y herramientas de modelación. Se ejecutaron en terreno más de 360 perfiles batimétricos en múltiples sectores (más de 9 ríos) y se dispuso, entre otros antecedentes, del registro de caudales de las estaciones de la Dirección General de Aguas, de aforos en los ríos no controlados y de información obtenida del levantamiento topográfico mediante láser aerotransportado, consistente en topografía de las riberas y del nivel de escurrimiento longitudinal del río. Esta última información fue utilizada para evaluar la bondad de los modelos desarrollados.

El presente trabajo muestra los antecedentes utilizados, la metodología general adoptada para la generación de los modelos geométricos, el proceso de calibración y la precisión obtenida con la simulación de los ejes hidráulicos del PHA. Adicionalmente, se presentan algunos resultados de la utilización de estos modelos.

¹Ingeniero Civil, Ingendesa. Especialidad Ingeniería Hidráulica, Proyecto Hidroeléctrico Aysén.

²Ingeniero Civil, Ingendesa. Especialidad Ingeniería Hidráulica.

1 INTRODUCCIÓN

Para cumplir con los requerimientos del diseño de las obras y de los análisis ambientales realizados en el marco del Proyecto Hidroeléctrico Aysén (PHA), fue necesario modelar numéricamente el eje hidráulico de los principales cauces de las cuencas de los ríos Baker y Pascua en donde se proyecta emplazar las obras de embalse y generación del PHA.

Los modelos numéricos de ejes hidráulicos fueron desarrollados por Ingendesa para hidroAysén y, según los requerimientos exigidos a la modelación, éstos se pueden agrupar según la zona modelada: angosturas de emplazamiento de las obras de embalse, cauces principales aguas abajo de las centrales y cauces tributarios a los ríos Baker y Pascua. Estos modelos fueron orientados principalmente a:

- Cumplir los requerimientos de los estudios ambientales desarrollados en el marco del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del PHA.
- Evaluar la respuesta que tendría el eje hidráulico de los ríos ante la operación intradiaria de las centrales del PHA.
- El estudio del desvío de los ríos Baker y Pascua para la construcción de las obras de embalse
- El diseño de las obras de embalse de las centrales del PHA.
- Presentación de antecedentes técnicos para la elaboración de Permisos Ambientales Sectoriales (PAS).

Se modeló el eje hidráulico en el software HEC-RAS desarrollado por la U.S. Army Corps of Engineers (USACE), programa ampliamente utilizado tanto en Chile como en el extranjero. La modelación consta de tres etapas principales: construcción del modelo geométrico, calibración y simulación de distintos escenarios, las que se presentan en este trabajo.

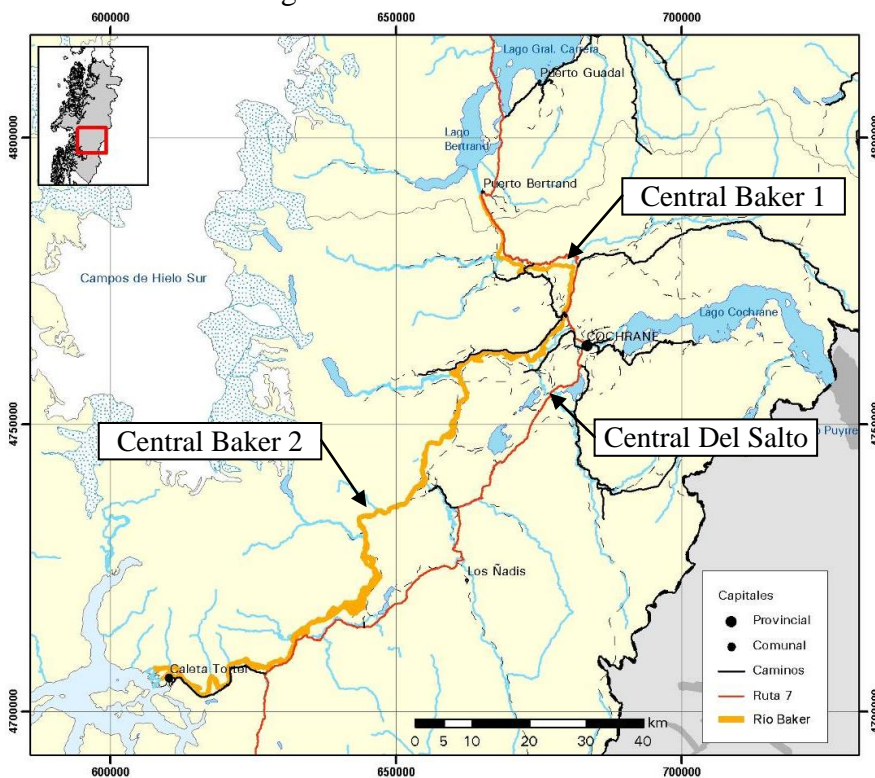
En particular, se presenta el modelo desarrollado para el río Baker desde la angostura de la central Baker 1 hasta la desembocadura del río en los fiordos australes en las cercanías de Caleta Tortel. A continuación se hace una descripción de los antecedentes y metodologías utilizadas, se muestran los resultados de la calibración y un ejemplo de la simulación en régimen impermanente.

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA HIDROGRAFÍA DEL RÍO BAKER

El río Baker (Figura 1) nace como desagüe del lago Bertrand, que es la continuación del lago binacional General Carrera / Buenos Aires el que posee una superficie aproximada de 1.893 km² y tiene como principales afluentes a los ríos Murta e Ibáñez.

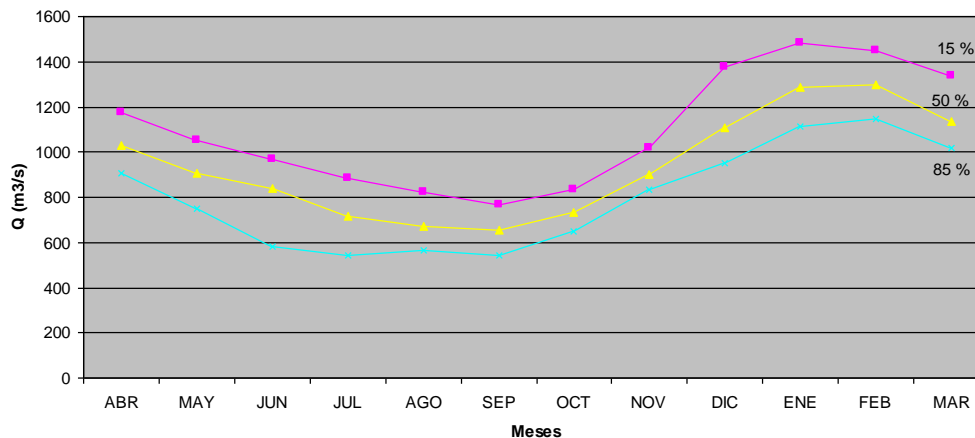
El régimen del río Baker en su nacimiento es muy uniforme debido al efecto regulador del lago General Carrera. Su caudal medio varía entre los 570 m³/s en su nacimiento (estación fluviométrica Baker en desagüe Lago Bertrand) y los 950 m³/s en la estación fluviométrica río Baker bajo Los Ñadis. El régimen hidrológico del río es nival, presentando una baja variación estacional (Figura 2).

Figura 1. Ubicación río Baker.



Fuente: Estudio de Impacto Ambiental, hidroAysén 2008 y elaboración propia.

Figura 2. Curva de variación estacional del río Baker en la zona de emplazamiento de la central Baker 2.



Fuente: Estudio de Impacto Ambiental, hidroAysén 2008.

Los primeros afluentes al río Baker son los ríos Nef y Chacabuco. Hacia aguas abajo recibe los aportes de los ríos Cochrane, que proviene del lago del mismo nombre, Del Salto, Colonia, Los Ñadis y Ventisquero.

En su recorrido al mar, el río Baker presenta todos los tipos de escurrimiento posibles, zonas de saltos de agua, zonas de escurrimiento calmos (regímenes de río), zonas de flujo crítico y de torrentes rápidos con velocidades superficiales que superan largamente los 4 m/s.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS PROYECTADAS POR PHA EN EL RÍO BAKER.

El desarrollo del PHA considera la construcción de cinco centrales las que en total tendrían una potencia total instalada de 2.750 MW correspondiente a unos 18.430 GWh de generación de energía media anual, con una superficie total inundada de unas 5.910 hectáreas.

En el curso del río Baker se proyectan dos centrales denominadas Baker 1 y Baker 2. La central Baker 1 se ubicaría en la angostura Chacabuco, unos 1.000 m aguas arriba de la confluencia de los ríos Baker y Chacabuco, y la central Baker 2 en la angostura El Saltón, unos 2 km aguas arriba de la confluencia de los ríos Baker y El Saltón. Las características de ambas centrales se indican en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características principales de las centrales del río Baker.

Centrales	Unidad	Baker 1	Baker 2
Nivel máximo de operación	m	200	93
Área de embalse	ha	710	3.600
Caudal de diseño	m ³ /s	927	1.275
Caudal mínimo de operación	m ³ /s	260	380
Potencia de la central	MW	660	360
Energía media anual	GWh	4.420	2.530

Nota: Niveles referidos al elipsoide WGS-84.

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental, hidroAysén 2008.

2 ANTECEDENTES UTILIZADOS

2.1 ANTECEDENTES GEOMÉTRICOS

Los datos requeridos para la construcción del modelo geométrico del HEC-RAS del modelo Baker entre Baker 1 desembocadura fueron obtenidos en cinco campañas en terreno, realizadas entre los años 2006 y 2008, en las que se levantaron más de 207 perfiles batimétricos en el curso principal del río. En cada perfil batimétrico se realizaron además mediciones de las riberas y del nivel de escurrimiento con fecha y hora.

Adicionalmente, se dispuso de topografía de las riberas de los ríos a escalas 1:1.000, 1:5.000 y 1:20.000, levantada mediante láser aerotransportado, lo que permitió complementar la extensión de las riberas en algunos perfiles batimétricos y generar modelos digitales de terreno.

2.2 ANTECEDENTES DE CALIBRACIÓN

Para la calibración se dispuso en cada perfil batimétrico del registro del nivel de escurrimiento con fecha y hora, lo que permitió vincularlos con el caudal registrado en las estaciones de medición de la Dirección General de Aguas (DGA). Para los ríos no controlados se realizaron aforos.

Se utilizó la cartografía desarrollada para el EIA del PHA, en particular la de uso de suelo para determinar los coeficientes de rugosidad de las riberas lo que se basó en el registro fotográfico realizado a lo largo del río y fotografías aéreas georeferenciadas.

Adicionalmente, se contó con información de terreno de niveles típicos de escurrimiento y niveles máximos observados por los habitantes de las zonas modeladas.

2.3 ANTECEDENTES DE VALIDACIÓN

Mediante el levantamiento topográfico láser aerotransportado realizado en los primeros días de marzo de 2006 en las cuencas de los ríos Baker y Pascua, se pudo medir el nivel de escurrimiento de la mayoría de los sectores modelados, lo que junto al caudal observado, fue utilizado como set de validación de los ejes hidráulicos desarrollados.

El levantamiento topográfico láser aerotransportado consiste en un barrido de toda la superficie mediante un equipo que emite y capta ondas láser y que es transportado mediante avión o helicóptero. Con la tecnología actual es posibles, además de determinar la cota del punto, discriminar entre tipos de superficies. En todo momento el aparato emisor/receptor está coordinado mediante GPS de precisión, y la información así levantada se vincula a redes geodésicas terrestres. De esta forma se obtuvo la topografía de las riberas a escalas de hasta 1:1.000, y el nivel de escurrimiento a lo largo de los ríos para un día en particular.

3 METODOLOGÍA UTILIZADA

Para el diseño y los estudios ambientales desarrollados, se creó un modelo numérico de eje hidráulico del río Baker de unos 148 km de longitud desde la angostura Chacabuco, ubicada aguas arriba de la confluencia con el río Chacabuco, y la desembocadura del río Baker al mar en las cercanías de Tortel (ver Figura 1). La metodología utilizada se divide en tres etapas, las que se analizan a continuación y que corresponden a construir el modelo geométrico HEC-RAS, calibrarlo y su utilización en la simulación de los escenarios requeridos.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA

Se utilizaron 207 perfiles batimétricos medidos en terreno entre los años 2006 y 2008, los que se concentran principalmente en los sectores de Chacabuco, Balseo del río Baker, Valle Grande y El Saltón. Adicionalmente se contó con un perfil batimétrico en las secciones de aforo de la DGA, Baker bajo Los Ñadis y Baker bajo Colonia.

Estos perfiles batimétricos fueron integrados con la topografía láser de las riberas y se generó un modelo digital de terreno de las riberas y del fondo del río. Estos modelos, tipo TIN (Triangulated Irregular Network), fueron fusionados obteniendo así un modelo completo para todo cada sector en estudio, el cual fue incorporado al software WMS (Watershed Modeling System). Adicionalmente se incorporó la cobertura de uso de suelo determinada de fotointerpretación, la que sirvió de base para determinar en forma preliminar los coeficientes de rugosidad de las riberas y del cauce.

En el software WMS se definió la mejor geometría para la modelación del eje hidráulico, la que quedó conformada por 740 secciones en total, que incluyen los perfiles batimétricos medidos en terreno. Esta geometría se exportó a HEC-RAS, en donde se realizó la calibración y la modelación.

3.2 CALIBRACIÓN

Esta se realizó en 139 secciones ajustando el coeficiente de Manning del cauce y las riberas, de forma que el nivel simulado se ajustara al nivel observado para el caudal que se registró en la estación más cercana en el momento de la medición. En caso que entre la sección y la estación fluviométrica existiese un tributario de importancia, se le adicionó el caudal medio anual de dicho tributario. La calibración se realizó para cada sección, desde aguas abajo hacia aguas arriba, y se verificó en todo momento que los resultados de la sección que se calibraba no afectara la calibración ya realizada hacia aguas abajo. En la zona de las angosturas, en general se tienen escurrimiento de supercrítico, por lo que se supuso un coeficiente de Manning constante entre zonas aisladas por condiciones de crisis.

Se exigió mayor precisión en las zonas identificadas como Áreas de Interés Ambiental (AIA) en la Línea Base Ambiental del EIA del PHA. En el río Baker existen 50 Áreas de Interés Ambiental relacionadas principalmente a requerimientos de navegación, caudal ecológico y zonas de pesca. Como condiciones de borde se consideró escurrimiento normal, con pendiente igual a la determinada en el perfil longitudinal láser del nivel de escurrimiento del río.

4 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Para la calibración se dispuso de dos set de datos: niveles y caudales para cada perfil batimétrico, correspondientes a la medición del nivel de escurrimiento (pelo de agua) en los perfiles batimétricos levantados en terreno y el nivel de escurrimiento longitudinal del río Baker determinado mediante el laser aerotransportado. Se escogió el primero como set de calibración y el segundo para la validación. Esto debido a que la medición de los perfiles batimétricos fueron realizadas en 5 campañas realizadas entre los años 2006 y 2008 en distintas épocas del año, lo que asegura una mayor heterogeneidad de la calibración y el levantamiento láser corresponde a la situación particular de un día.

Se calibró, siguiendo la metodología antes expuesta para un rango de caudales de 500 a 1.600 m³/s a lo largo del río. Como diferencia absoluta entre el nivel observado y el calibrado, en los

148 km de modelo, en promedio fue de 0,19 m. En términos de profundidad esto corresponde a 2,7 %, lo que se resume en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados globales de calibración del modelo Baker

	Diferencia absoluta entre el eje hidráulico simulado y observado			
	En nivel de escurrimiento		En profundidad máxima	
	Promedio	Varianza	Promedio	Varianza
Calibración Global	0,19 m	0,07 m	2,7 %	0,1%
Calibración AIA's	0,13 m	0,03 m	1,9 %	< 0,1%

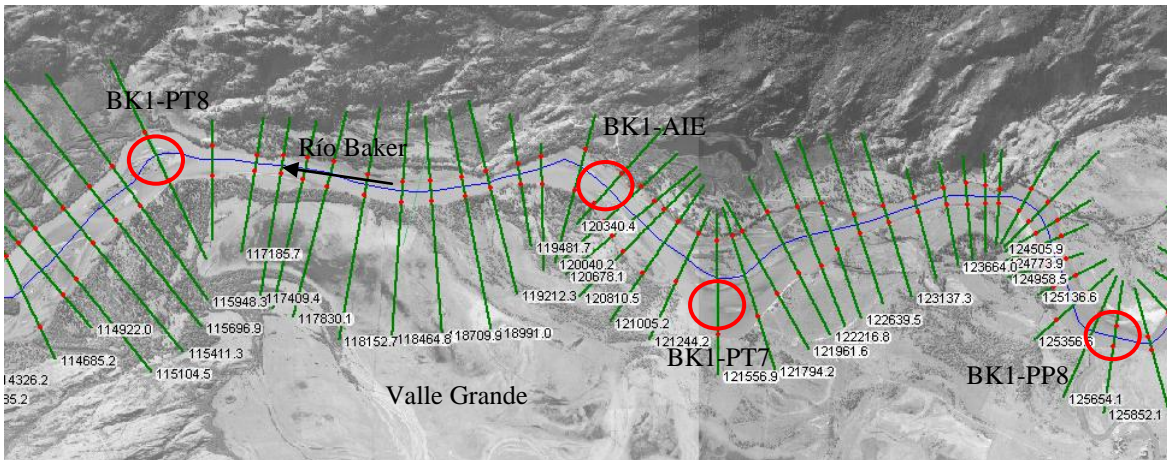
Cuadro 3. Coeficientes de rugosidad de Manning calibrados del modelo Baker.

	Mínimo	Promedio	Máximo
Cauce principal	0,026	0,031	0,041
Riberas	0,045	0,065	0,095

En los perfiles batimétricos levantados en el río Baker entre el río Del Salto y el río de La Colonia, zona denominada Valle Grande (Figura 3), la diferencia absoluta entre los niveles registrados en las secciones batimétricas y los resultados del modelo en promedio fue de 0,06 m. En particular, en las áreas de interés ambiental BK1-PP8, BK1-PT7, BK1-AIE y BK1-PT8, es levemente menor, de unos 0,05 m, lo que representa un 1,6 % en términos de la profundidad en este sector. La Figura 4 muestra la precisión de la calibración en el sector de Valle Grande, considerando un caudal del orden de los 650 m³/s.

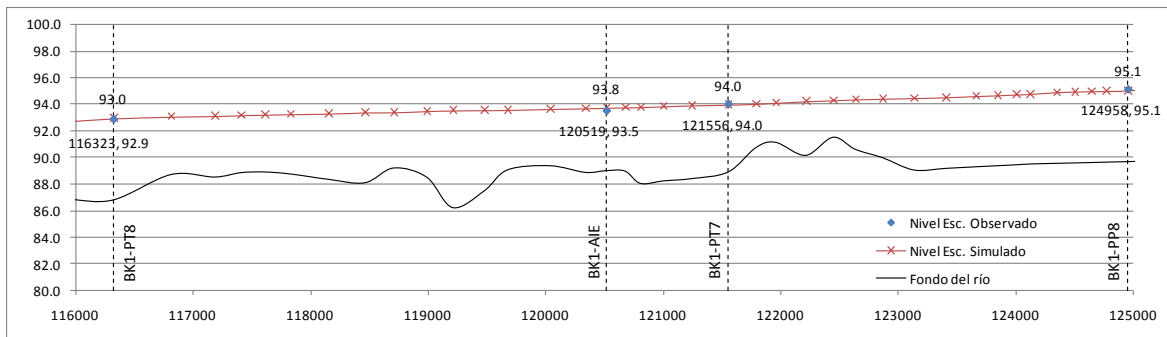
Utilizando el segundo set de datos, perfil longitudinal de escurrimiento del río Baker obtenido del levantamiento láser aerotransportado, se tiene para todas las secciones del modelo que el nivel de escurrimiento observado difiere en promedio, aproximadamente en 0,2 m con los niveles simulados del eje hidráulico para las mismas condiciones de caudal observadas al momento del levantamiento láser y correspondientes a unos 900 m³/s en el sector de Valle Grande (1 de marzo de 2006). Esto se traduce en que la diferencia absoluta entre los valores simulados y los resultados del modelo son menores al 3% en términos de la profundidad. En particular, se muestran los resultados de validación del modelo en el sector del Valle Grande en la Figura 5, donde para el AIA BK1-PT8, relacionada con requerimientos de navegación, la diferencia entre el valor observado y simulado es de 0,3 m, y en el resto del sector son menores a los 0,2 m.

Figura 3. Modelo Río Baker, sector Valle Grande (entre río Del Salto y río Colonia).



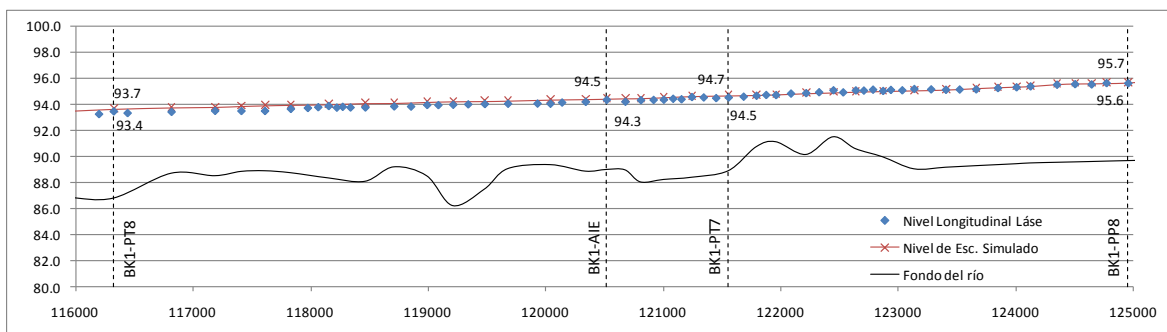
- Nota 1: Se indican las secciones del modelo y el kilometraje.
 Nota 2: Se destacan las áreas de interés ambiental donde se calibró en la zona, coincidentes con perfiles batimétricos.

Figura 4. Calibración. Perfil longitudinal del río Baker, sector Valle Grande. Nivel de escurrimiento simulado y observado.



Nota: Caudal en el sector: 650 m³/s.

Figura 5. Validación. Perfil longitudinal del río Baker, sector Valle Grande. Nivel de escurrimiento simulado y medido por láser aerotransportado.



Nota: Caudal en el sector: 900 m³/s.

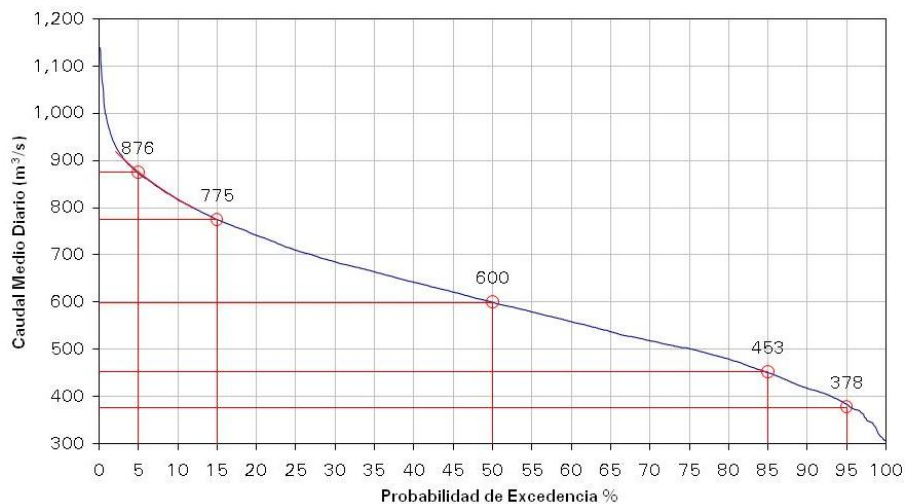
5 OPERACIÓN INTRADIARIA DE LAS CENTRALES

Sobre la base de la estadística fluviométrica y al análisis hidrológico del río Baker, se determinaron en la zona de emplazamiento de las centrales y aguas abajo de los principales tributarios, las curvas de duración del caudal medio diario.

Para distintos escenarios de caudal medio diario afluente a las centrales Baker 1 (Figura 6) y Baker 2, se determinó a nivel horario el caudal efluente ambas suponiendo un esquema de operación que maximiza la potencia generada durante 8 horas pero restringido a:

- En 24 horas el volumen afluente es igual al volumen efluente.
- El caudal efluente de la central sea siempre igual o superior al caudal mínimo operacional.
- Al inicio y al final de períodos de 24 horas el nivel del embalse es igual al máximo operacional.

Figura 6. Curva de duración de los caudales medios diarios en Baker 1.

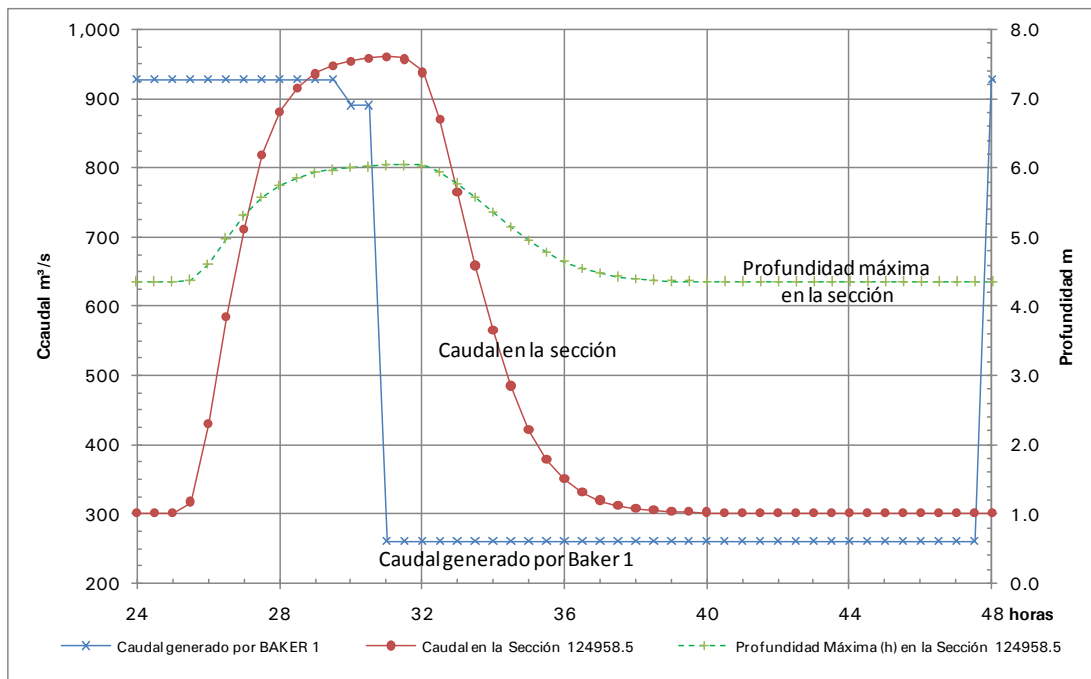


Para la central Baker 1, y en general para todas las centrales del PHA, se determinó que el escenario más restrictivo desde el punto de vista ambiental es el día con caudal medio diario afluente de probabilidad de excedencia igual a 85%. Así se incorporó como condición de borde el hidrograma de caudal efluente de la central y se simuló la respuesta del río considerando los aportes de los principales tributarios del río Baker. Utilizando el modelo ya calibrado entre la central Baker 1 y la cola del embalse de la central Baker 2 se obtuvo para el escenario mencionado, la evolución horaria del caudal, la profundidad, la velocidad media, el número de Froude, el ancho superficial y el nivel de energía a lo largo del río, variables que fueron utilizadas para los estudios ambientales incluidos en el EIA.

En particular, para el área de interés ambiental ubicada aguas abajo de la confluencia con el río Del Salto, se tiene que para el día 85% la profundidad media en el río Baker sería de unos 4,9 m, con máximos de 6,1 y mínimos de 4,4. Es decir, se produciría una oscilación de unos 1,7 m

durante dicho día, con una tasa media de cambio de profundidad de 0,32 m/h. De igual forma, el caudal medio diario en la sección sería 492 m³/s con máximos y mínimos horarios de 961 m³/s y 301 m³/s respectivamente. La evolución gráfica de ambas variables mencionadas se muestran en la Figura 7.

Figura 7. Profundidad y caudal, en río Baker aguas abajo de río Del Salto. Escenario de operación de central Baker 1 en el día 85%. (Sección del modelo 124958.5)



6 CONCLUSIONES

Considerando la importancia de disponer de una modelación numérica para el diseño de las obras y el desarrollo de los estudios ambientales desarrollados por hidroAysén en el Estudio de Impacto Ambiental del PHA, se optó por generar modelos de ejes hidráulicos precisos y fuertemente sustentados y validados con observaciones en terreno.

Si bien el software HEC-RAS es una herramienta ampliamente utilizada y aceptada para el cálculo de los ejes hidráulicos, el PHA utilizó herramientas complementarias como modelos digitales de terreno de las riberas y, sobre la base de éstos y los perfiles batimétricos, se construyó un modelo digital de terreno que incluyen el lecho del río. Este último modelo consideró las variaciones de pendiente de las riberas y del ancho del canal entre perfiles batimétricos, realizando una interpolación espacial de precisión en base de la información disponible. Todo esto permitió definir en el Software WMS, junto a cartografía y fotografías de terreno y aéreas, la mejor geometría que permitiera simular el eje hidráulico del río Baker con la precisión necesaria

para los estudios ambientales en las zonas de interés definidas en la Línea Base Ambiental del PHA.

Para la etapa de calibración, además de contar con información típicamente de terreno como son observaciones locales de los límites normales del cauce principal y de los niveles máximos de crecidas, se contó con mediciones del nivel de escurrimiento (pelo de agua) en todos los perfiles batimétricos levantados en terreno. Éstos, que en total fueron más de 207 en el río Baker, se levantaron en cinco campañas, lo que asegura una alta heterogeneidad de caudales en la calibración.

Crear un modelo de más de 148 km de longitud con los niveles de precisión obtenidos en la calibración, que resultaron en promedio de 2,7 % de la profundidad del río, constituye todo un logro para la ingeniería chilena. En general, la precisión de la modelación es similar a la que tienen las mediciones en terreno.

Sin duda alguna, la incorporación de un set de datos de validación, obtenidos mediante técnica de levantamiento láser aerotransportado, constituye una innovación en la modelación de ejes hidráulicos de cauces naturales. En este caso, la incorporación de estos datos logró definir con exactitud las condiciones de borde y, además, verificar la precisión de la calibración del modelo desarrollado en el río Baker, mostrando que los errores de calibración y validación son del mismo orden y se encuentran dentro precisión de la información base.

REFERENCIAS

USACE. 2008. HEC-RAS, River Analysis System, Hydraulic Reference Manual.

hidroAysén. 2008. Estudio de Impacto Ambiental, Proyecto Hidroeléctrico Aysén. Capítulos 1, 2.

Ingendesa para hidroAysén. Proyecto Hidroeléctrico Aysén. Estudio de Anteproyecto. Informe N° 2. Complemento del Anteproyecto. 2007.