

MODELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE MEZCLA PARA UN SEGMENTO DEL RÍO ACONCAGUA, CHILE.

Leslie Parraguez C.¹, Diego Caamaño A.², Mauricio Villagrán V.³

RESUMEN:

En este trabajo se presentan los resultados de la modelación de calidad del agua superficial de un segmento del río Aconcagua, comprendido entre el sector de río Blanco y Chacabuquito, ambos ubicados en la Primera Sección del río Aconcagua, Región de Valparaíso, Chile. La calidad del agua del río Aconcagua se encuentra fuertemente influenciada por las actividades que se desarrollan en la cuenca. Algunas de las actividades más relevantes que se desarrollan son agricultura, minería y generación de energía eléctrica (CENMA, 2015). El análisis unidimensional de la hidráulica y calidad del agua del tramo de río Aconcagua, se realizó con el Software HEC-RAS versión 5.0.3 desarrollado por el United States Army Corps of Engineers (USACE), mediante el cual se pudo simular el transporte de una sustancia conservativa para dos escenarios de modelación en condiciones de flujo estacionario. Los resultados de la variación espacial de la concentración máxima de la sustancia, son presentadas en este trabajo en forma de gráficos espaciales. Los resultados del escenario 1 criterio a) del mes de mayo, muestran para caudales mínimos, una dilución de la sustancia de 9.53% para un tiempo de 9 horas. Los resultados del escenario 1 criterio b) del mes de mayo, muestran para caudales mínimos, una dilución de la sustancia de un 6.79% para un tiempo de 13 horas y 40 minutos. Los resultados del escenario 2, del mes junio del año 2011, muestran para caudales medios mensuales bajos, una dilución de la sustancia de un 5.46% para un tiempo de 9 horas y 20 minutos.

PALABRAS CLAVES: Río Aconcagua, Transporte de sustancia conservativa, Coeficiente de dispersión.

ABSTRACT:

This paper presents the results of the surface water quality modeling of a segment of the Aconcagua River between the Blanco River and Chacabuquito, both located in the First Section of the Aconcagua River, Region of Valparaíso, Chile. The quality of the water of the river Aconcagua is strongly influenced by the activities that are developed in the basin. Some of the most relevant activities are agriculture, mining and electricity generation (CENMA, 2015). The one-dimensional analysis of the hydraulic and water quality of the Aconcagua River section was performed using the HEC-RAS Software version 5.0.3 developed by the United States Army Corps of Engineers (USACE), through which it was possible to simulate the transport of A conservative substance for two modeling scenarios under steady-flow conditions. The results of the spatial variation of the maximum concentration of the substance are presented in this paper in the form of spatial graphs. The results of scenario 1 criterion a) of the month of May show, for minimum flows, a dilution of the substance of 9.53% for a time of 9 hours. The results of scenario 1 criterion b) of the month of May show, for minimum flows, a dilution of the substance of 6.79% for a time of 13 hours and 40 minutes. The results of scenario 2, of the month of June 2011, show low mean monthly flows, a dilution of the substance of 5.46% for a time of 9 hours and 20 minutes.

KEYWORDS: River Aconcagua, Transport of conservative substance, Coefficient of dispersion.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, lbarraguez@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El programa de regulación ambiental del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) aprobó, el año 2015, las Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCAs) para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de las cuencas de los ríos Biobío y Valdivia. Asimismo, el programa define como prioritarias para los años 2016 y 2017 las NSCAs respectivas para las cuencas de los siguientes ríos: Aconcagua, Huasco, Elqui, Mataquito y Rapel (MMA,2016).

En este contexto, cabe notar que el proceso de elaboración del anteproyecto de la NSCA para la cuenca del Río Aconcagua comenzó el año 2004, lográndose la publicación de un anteproyecto de norma el año 2006. Sin embargo, este proceso fue paralizado hasta el año 2009 cuando se ordenó una nueva foliación del expediente (Diario Oficial, 2015). Recientemente, el MMA publicó la Resolución Exenta N°946/2015, que revoca el proceso normativo anterior y da inicio a uno nuevo para elaborar otro anteproyecto de NSCA para la cuenca del Río Aconcagua. Para este nuevo anteproyecto se han elaborado una serie de estudios destacándose el “Estudio para Actualización de Antecedentes Técnicos para desarrollar la Norma Secundaria de Calidad para la Protección de las Aguas Continentales en la Cuenca del río Aconcagua” encargado por la Superintendencia del Medio Ambiente al Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) y el “Estudio de Línea Base Limnológica y Calidad del Agua de la Cuenca del río Aconcagua” encargado por Codelco División Andina al Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, entre otros. En este contexto cabe destacar que la calidad del agua del río Aconcagua se encuentra fuertemente influenciada por las actividades que se desarrollan en la cuenca y por el uso directo del agua; algunas de las actividades más relevantes desarrolladas en la parte alta de la cuenca son agricultura, minería, y generación de energía eléctrica (CENMA, 2015).

El presente estudio se contextualiza en el marco del proceso de elaboración de esta norma y su propósito es la modelación de las características de mezcla de un segmento del río Aconcagua comprendido entre el sector de río Blanco y Chacabuquito, ambos ubicados en la Primera Sección del río Aconcagua, Región de Valparaíso, Chile (DGA, 2004). La modelación unidimensional de calidad de agua se realizó con el Software HEC-RAS versión 5.0.3 desarrollado por el United States Army Corps of Engineers (USACE). Se simuló el transporte de una sustancia conservativa en un tramo de 25.2 km de longitud, considerando dos escenarios de flujo en condiciones estacionarias. En el primer escenario se modelaron caudales mínimos los cuales fueron calculados utilizando los criterios a) y b) descritos en “Reglamento para la determinación de caudal ecológico mínimo” aprobado mediante Decreto Supremo N°14/2012 (Modificado por Decreto Supremo N°71/2015), considerando para ello la estadística hidrológica del periodo 1970-2015. Para la modelación se escogió el mes con el menor caudal a la salida del tramo tanto para el caso a) como para el caso b) del reglamento mencionado. En el segundo escenario se modelaron caudales medios mensuales del río Aconcagua del año 2011, que corresponde al año con el menor caudal medio anual del periodo 2008-2015. En este escenario se consideraron los caudales medios mensuales captados por las bocatomas de riego y por las bocatomas de las centrales hidroeléctricas de pasada que se ubican el tramo de estudio. También, se consideraron los caudales medios mensuales descargados por estas centrales al río Aconcagua.

2. MÉTODOS

2.1 Antecedentes de la cuenca del río Aconcagua

La cuenca hidrográfica del río Aconcagua nace en la Cordillera de los Andes, en cumbres que superan los 5.000 m.s.n.m., se encuentra situada entre los paralelos 32°20' y 33°07' de latitud sur, y los meridianos 71°31' y 70°00' de longitud oeste, en la zona denominada de los Valles Transversales o Semiárida (DGA, 2011). Se ubica íntegramente en la región de Valparaíso, con una superficie total de 7.334 km², abarcando importantes ciudades como Los Andes, San Felipe, Quillota, Marga Marga y Valparaíso (CENMA, 2015). Desde el punto de vista del riego, se divide administrativamente en cuatro secciones, más la sección del río Putaendo, que hasta ahora ha operado de manera separada, consecuentemente se define un total de cinco secciones en toda la cuenca del río Aconcagua (DGA, 2011).

El río Aconcagua nace en la confluencia de los ríos Juncal y Blanco (1.420 m.s.n.m), y recibe el gran aporte andino proveniente del río Colorado (i.e. unos 13 km aguas abajo). De esta manera el río recibe aguas desde la alta cordillera de los Andes (i.e. alturas entre 5.400 y 7.000 m.s.n.m.), consecuentemente sus caudales presentan una marcada variación estacional que define su régimen hidrológico de carácter mixto o nivo-pluvial (EULA, 2015). En su zona alta y media es marcadamente nival, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera y verano producto de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, el río Aconcagua posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas directamente a las precipitaciones (EULA, 2015).

Desde su nacimiento, el río Aconcagua recorre 145 km hasta su desembocadura en la bahía de Concón. En este trayecto recibe varios aportes de ríos y esteros, como: los ríos Colorado y Putaendo, y los esteros menores Riecillos, Pocuro, Catemu, Las Vegas, Quilpué, Limache, entre otros (CENMA, 2015). La primera sección del río Aconcagua abarca desde las nacientes de los ríos Juncal, Blanco y Colorado hasta el puente El Rey (i.e. entrada sur de la Ciudad de San Felipe), y posee una superficie de 2.733 km². Esta sección se encuentra declarada oficialmente por la Dirección General de Aguas (DGA) como agotada para constituir nuevos derechos de agua consuntivos de ejercicio permanente (DGA, 2004).

2.2 Descripción de la zona de estudio y sus principales forzantes

La zona de estudio sólo abarca una porción de la primera sección antes descrita, desde sus nacientes en la cordillera de los Andes hasta la estación río Aconcagua en Chacabuquito administrada por la DGA (i.e. Código BNA N°05410002-7) ubicada a 8 km aguas arriba de la ciudad de Los Andes (DGA, 2011). Esta porción corresponde a una subcuenca del río Aconcagua y tiene una superficie de 2.100 km² (Figura 1).



Figura 1: Zona de estudio representada como una subcuenca del río Aconcagua. (Icarito, 2009).

2.2.1 Clima

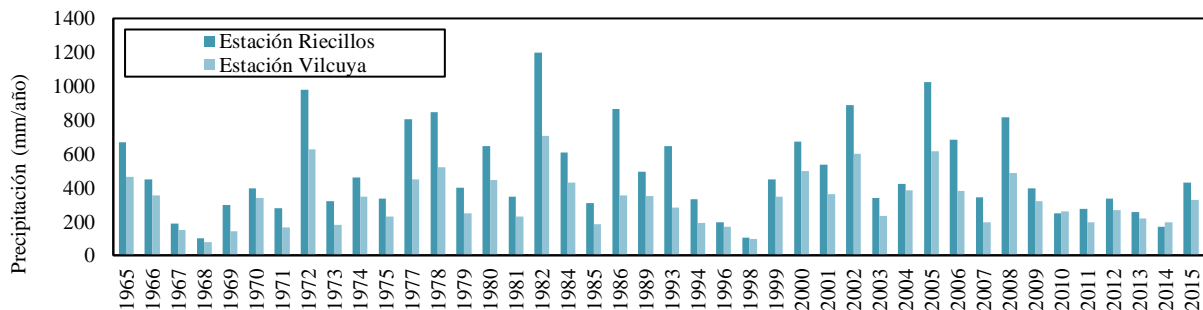
La zona de estudio se caracteriza por tener un clima templado del tipo mediterráneo, con estación seca prolongada en el valle y clima frío de altura en la cordillera de los Andes (DGA, 2011). Las precipitaciones en el valle se caracterizan por tener una marcada concentración invernal, y un verano prolongado y seco. La topografía se entiende como la responsable de la distribución espacial de precipitaciones, con cordones transversales que obstaculizan el paso del viento que predomina del suroeste. Las precipitaciones son principalmente de carácter frontal, con modificaciones debido al factor relieve y con origen ligado al avance frontal derivado de la acción del anticiclón del pacífico (DGA, 2011).

La precipitación media anual de la zona de estudio, se estimó analizando la estadística pluviométrica de las estaciones meteorológicas de la DGA: Vilcuya y Riecillos (Tabla 1).

Tabla 1: Estaciones meteorológicas de la DGA vigentes en la zona de estudio.

Nombre de Estación	Código BNA	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas Geográficas UTM HUSO 19 - DATUM WGS84		Precipitación Media Anual
			Norte (m)	Este (m)	mm/año
Vilcuya	05410006-K	1.100	362.268	6.363.187	324
Riecillos	05403006-1	1.290	373.275	6.356.403	489

En la Figura 2 se muestra la serie de precipitaciones medias anuales del periodo 1965-2015 en base datos registrados en las estaciones Riecillos y Vilcuya. Se observa en el periodo 2009-2014 una sequía meteorológica, debido a que las precipitaciones registradas en ambas estaciones están por debajo de la media. El año 2015 se presenta un alza en las precipitaciones debido al fenómeno El Niño - Oscilación del Sur (ONEMI, 2015).


Figura 2: Serie de precipitación media anual del periodo 1965-2015.

La temperatura del aire está determinada por el relieve y la distancia al océano que presenta la zona de estudio. Los valores de temperatura para esta zona son: media anual de 15.2°C, máximas diarias en verano de 27°C y mínimas diarias en invierno cercanas a los 0 °C (CENMA, 2015).

2.2.2 Caudales

Los caudales en la zona de estudio se definen sobre la base a los caudales del río Aconcagua aguas arriba y aguas abajo del segmento en estudio, y por los caudales de los aportes naturales del río Colorado, y de los esteros menores Riecillos, Vilcuya y Los Chacayes. La Tabla 2 presenta la información de las estaciones fluviométricas administradas por la DGA y vigentes en la zona de estudio.

Tabla 2: Estaciones fluviométricas propiedad de la DGA vigentes en la zona de estudio (Años: 1970-2015).

Nombre de Estación	Código BNA	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas Geográficas UTM HUSO 19 - DATUM WGS84		Caudal Medio Anual
			Norte (m)	Este (m)	(m ³ /s)
Río Juncal en Juncal	05401003-6	1.800	390.760	6.363.297	5.91
Río Blanco en Río Blanco	05402001-5	1.420	378.630	6.358.196	7.35
Río Aconcagua en Río Blanco	05403002-9	1.420	378.084	6.358.251	14.66
Río Colorado en Colorado	05406001-7	1.062	367.852	6.363.602	7.00
Río Aconcagua en Chacabuquito	05410002-7	950	358.743	6.364.246	33.09

La Figura 3 indica la serie de caudales medios anuales del periodo 1970-2015, se observa que los caudales en el último periodo 2008-2015, presenta niveles decrecientes en comparación con años anteriores, esto se debe en parte a la sequía que ha afectado a la región de Valparaíso durante este periodo (INIA, 2015).

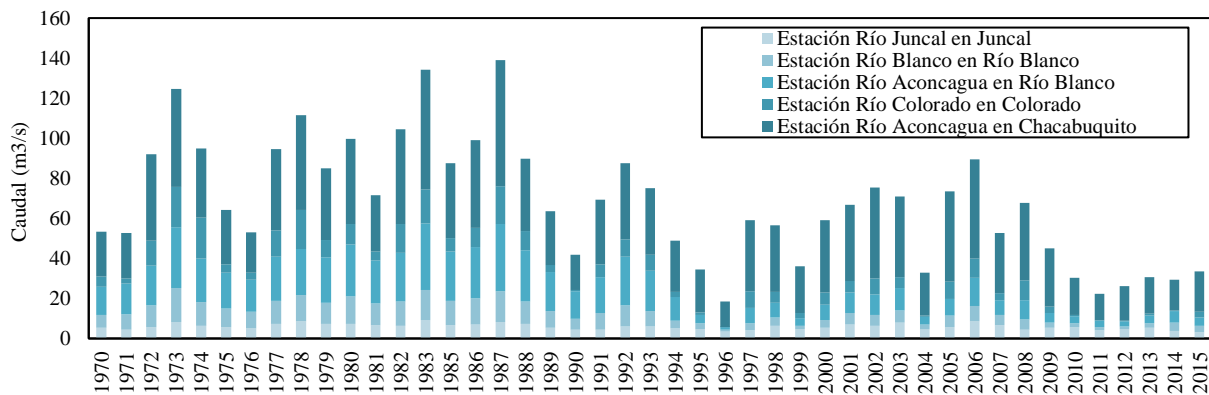


Figura 3: Serie de caudales medios anuales del periodo 1970-2015 en la zona de estudio.

La Figura 4 muestra la curva de variación estacional para el año hidrológico 2013/2014. Se observa que los caudales medios mensuales aumentan a partir del mes de septiembre hasta el mes de diciembre, disminuyendo gradualmente hasta el mes de mayo y junio, periodo en que se registran los menores caudales. Para la construcción de este gráfico no se utilizaron datos del año 2014/2015, debido a que estos se encuentran influenciados por el fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur (ONEMI, 2015).

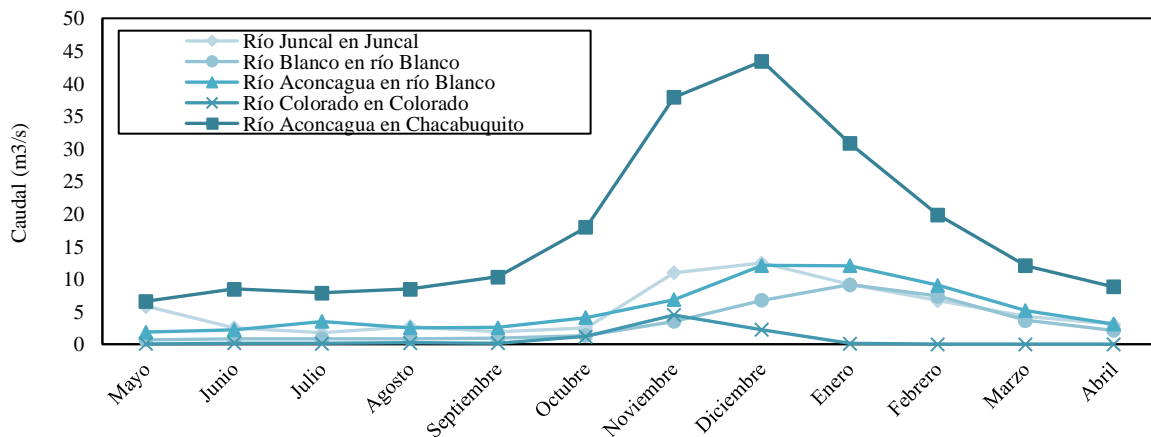


Figura 4: Curva de variación estacional de caudal para el año hidrológico 2013/2014.

Los caudales en esta parte de la cuenca están fuertemente influenciados por los usos del agua, la cual es utilizada mayormente en actividades agrícolas, mineras y de generación de energía eléctrica (EULA, 2015). También, se debe considerar la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur y el cambio climático global, los cuales ya se han visto intensificados en la zona central de Chile (IPCC, 2014; EULA, 2015).

2.3 Descripción del segmento de río Aconcagua

El segmento de río seleccionado tiene una longitud de 25.2 km, un ancho promedio para condición de flujo mínimo de 30 m y una pendiente longitudinal del cauce de 1.89%. El segmento de río se encuentra acotado por dos estaciones fluviométricas administradas por la DGA. Aguas arriba se ubica la estación Río Aconcagua en río Blanco (RARB) y aguas abajo la Estación río Aconcagua en Chacabuquito (RACH), así como se muestra en la Figura 5. El rumbo general del flujo en este tramo es de Este a Oeste y desciende desde una altura de 1.420 m hasta una altura de 950 m.



Figura 5: Tramo de estudio delimitado por estaciones fluviométricas administradas por la DGA.

2.4 Usos del agua del segmento de río en estudio.

En la zona de estudio se llevan a cabo diferentes actividades, siendo unas de las principales la generación de energía hidroeléctrica con una potencia instalada total de 147.8 MW. Estas centrales son alimentadas con aguas de la parte alta de la Primera Sección del río Aconcagua, principalmente aguas de los ríos Juncal, Blanco y Colorado (EULA, 2015). Una segunda actividad relevante corresponde a la actividad minera, en el río Blanco está presente la División Andina de CODELCO Chile, y en el río Colorado, la Compañía Minera Pimentón. Otra actividad de relevancia en la zona es la agricultura, lo anterior queda de manifiesto por las obras de extracción construidas en los ríos Aconcagua y Colorado, y en los esteros afluentes al río Aconcagua (i.e. bocatomas de riego). El sistema fluvial también es usado para otras actividades como la extracción de áridos y el turismo (CENMA, 2015).

En el segmento de estudio se ubican cuatro centrales hidroeléctricas de pasada: Blanco (53 MW), Juncal (29.2 MW), Los Quilos (39 MW) y Chacabuquito (29 MW). Las centrales Blanco y Juncal reciben aguas provenientes del río Blanco ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) y el río Juncal ($14 \text{ m}^3/\text{s}$), respectivamente. Actualmente, estas centrales forman parte de la central Aconcagua (EULA, 2015). La central Los Quilos recibe agua proveniente del río Colorado ($7 \text{ m}^3/\text{s}$) y de la bocatoma Aconcagua ($14 \text{ m}^3/\text{s}$), ubicada en el tramo de río en estudio. La central Chacabuquito recibe agua proveniente de la bocatoma Los Quilos ($21 \text{ m}^3/\text{s}$), también ubicada en el río Aconcagua (esta bocatoma también extrae agua para uso de riego). En la Figura 6 se presenta la ubicación referencial de las centrales (triángulos) y de las bocatomas que extraen agua para este uso (círculos). Las líneas azules representan la conducción de las aguas desde las bocatomas de captación hacia las centrales donde estas son restituidas para generar energía (i.e. generación de energía hidroeléctrica).



Figura 6: Sistema de centrales y bocatomas en la zona de estudio. Modificado de (Colbún, 2017).

En el tramo estudiado del río Aconcagua existen cerca de cinco bocatomas que extraen agua directamente del río Aconcagua para uso de riego, estas bocatomas son: Chacabuquito-Polpaico, El Calvario Uno, El Calvario Dos y Tranque Primera Quebrada. En la Figura 7 se presenta un Diagrama Unifilar con la ubicación referencial de las centrales hidroeléctricas de pasada, bocatomas de riego, bocatomas de las centrales, y también, la ubicación de las estaciones fluviométricas propiedad de la DGA y los puntos donde ingresa un aporte natural.

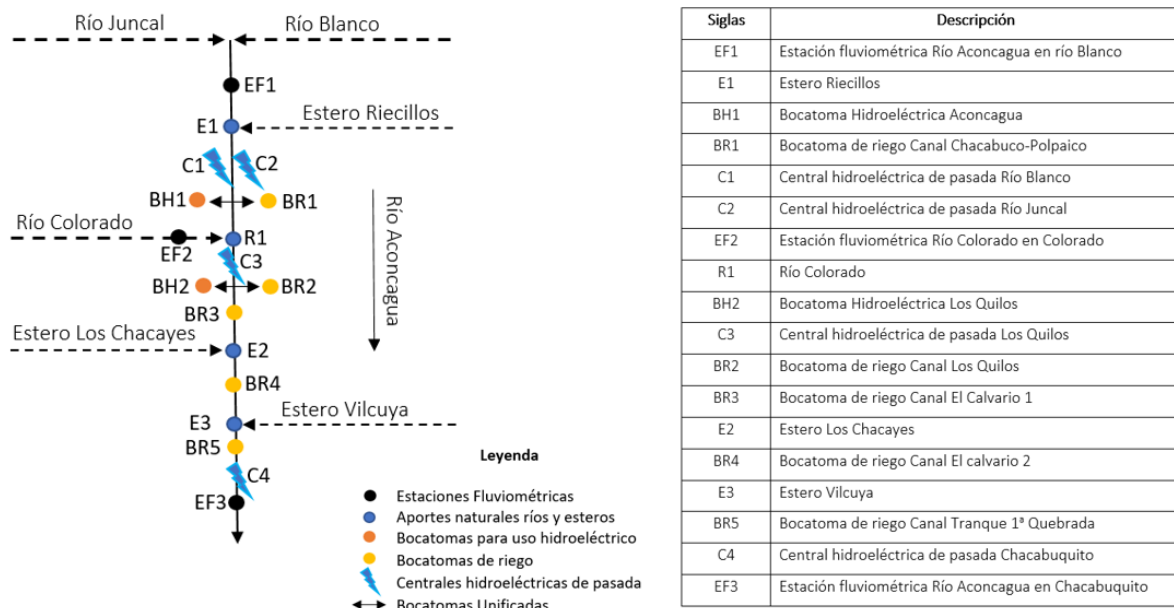


Figura 7: Diagrama Unifilar del segmento de río en estudio.

2.5 Software HEC-RAS versión 5.0.3.

El Software HEC-RAS versión 5.0.3 es una herramienta computacional desarrollada por el United States Army Corps of Engineers (USACE). El software permite la realización de cálculos de flujo estacionario y no estacionario en una dimensión (1D) y dos dimensiones (2D), o bien, una combinación 1D/2D. Este software es un sistema integrado que permite no sólo efectuar modelaciones del flujo sino también de los procesos de transporte como el transporte de sedimentos o el transporte de constituyentes en el medio acuático. Además, es un software gratuito que puede ser descargado fácilmente, y cuyos manuales de usuario y documentos son accesibles a través del programa o a través del sitio web de HEC-RAS. El sistema integrado HEC-RAS cuenta con una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que facilita las labores de pre y post-proceso, así como la posibilidad de intercambiar datos con otros sistemas (e.g., GIS, CADD). También, tiene la capacidad de gestionar el almacenamiento y transferencia de datos, y de presentar los resultados en informes y gráficos (Brunner et al., 2016).

2.5.1 Análisis de flujo estacionario en 1D

El software HEC-RAS realiza los cálculos del perfil 1D de la superficie del agua para flujo estacionario gradualmente variado en canales naturales y artificiales. Se pueden calcular los perfiles de la superficie del agua para régimen subcrítico, supercrítico y mixto. El perfil de la superficie del agua se calcula de una sección a otra resolviendo la ecuación de energía con un procedimiento iterativo denominado método de paso estándar (Brunner et al., 2016). Los datos requeridos para la simulación estacionaria son la geometría del río, el número de perfiles de forma que serán considerados en el cálculo, los datos de flujo y las condiciones de contorno aguas arriba y/o aguas abajo en el río cuya elección depende del régimen de flujo. Algunas de las limitantes o supuestos asumidos para el análisis de flujo estacionario son: el flujo es estacionario, el flujo es gradualmente variado, el flujo es unidimensional y la pendiente del cauce del río es lo suficientemente pequeña para asumir que el régimen de presiones es hidrostático, menor a 10% (Brunner et al., 2016).

2.5.2 Análisis de flujo no estacionario 1D

El perfil de la superficie del agua se calcula resolviendo las ecuaciones de Saint-Venant. Estas ecuaciones no tienen solución analítica, y para su solución se emplean métodos numéricos, como el método de diferencias finitas en esquemas implícitos. HEC-RAS utiliza una discretización espacio temporal a través del método de diferencias finitas implícitas para aproximar las ecuaciones de flujo no estacionario, las ecuaciones descritas son resueltas utilizando técnicas numéricas de iteración como Newton-Raphson o el esquema de Preissmann (Brunner, et al., 2016). Los datos requeridos para el análisis de flujo no estacionario son la geometría del río, las condiciones de contorno para todos los contornos externos e internos donde se produzca una entrada de agua, las condiciones iniciales con información de flujo para cada sección transversal definida en el sistema y el tiempo computacional. El tiempo computacional debe ser seleccionado para satisfacer la condición de Courant ($C_r \leq 1.0$) (Brunner, et al., 2016).

2.5.3 Análisis de calidad de agua en 1D

El software HEC-RAS cuenta con módulo de calidad de agua que utiliza el esquema numérico explícito QUICKEST-ULTIMATE (Leonard, 1979; Leonard, 1991) para resolver la ecuación de advección-dispersión en 1D. El módulo permite simular el transporte y comportamiento de las siguientes variables: temperatura del agua, constituyentes arbitrarios conservativos y no conservativos, nitrógeno disuelto, fósforo disuelto, algas, CBOD y oxígeno disuelto (Brunner et al., 2016). Como requisito indispensable para realizar una simulación de análisis de calidad de agua, se requiere que se cuente con un modelo hidráulico previamente calibrado para flujo estacionario y/o no estacionario. Los datos requeridos para el análisis de calidad de agua son la información del constituyente que se pretende simular, la longitud de las celdas de calidad de agua, las condiciones de contorno y sus respectivos valores de concentración, las condiciones iniciales y los valores del coeficiente de dispersión (Brunner et al., 2016). El tiempo computacional y la longitud de las celdas elegidos deben satisfacer las condiciones de Courant ($C_r \leq 0.9$) y Peclet ($\alpha_{us} \leq 0.4$) (Brunner et al., 2016).

2.6 Recopilación de información

2.6.1 Información recopilada para análisis de flujo estacionario

La principal entrada para el modelo de flujo estacionario corresponde a los datos de la geometría del río. Entonces, para obtener la forma del cauce se descargó un Digital Elevation Model (DEM) de un arco segundo de resolución (30 m), utilizando para ello la interfaz de acceso a datos denominada Global Data Explorer (GDEx) ubicada en el sitio web del United States Geological Survey (USGS). El procesamiento del DEM se realizó con el sistema de información geográfica ArcGIS versión 10.1 a través de su aplicación principal ArcMap. Se utilizó la extensión ArcHydro Tools para analizar el DEM, y estimar las variables hidrológicas de relevancia (i.e. red de drenaje, longitud de cauces principales y secundarios, delimitación de cuencas y sub-cuencas, parámetros morfométricos, etc). La geometría completa del segmento en estudio se obtuvo delimitando la superficie del tramo de estudio en Google Earth, luego esta superficie fue cargada al programa Global Mapper v18.1 donde se obtuvieron las curvas de nivel, las que posteriormente fueron cargadas a AutoCAD civil 3D para su procesamiento. Las curvas de nivel fueron transformadas a un modelo TIN (Triangulated Irregular Network), y sobre esta superficie a) se trazó el eje del río, b) se generaron las secciones transversales (cada 200 m) y c) se definieron las riberas. Luego, esta información fue importada a HEC-RAS v5.0.3. La geometría importada se revisó sección por sección corrigiendo todos los errores sobre la base de fotografías y la experiencia adquirida en las visitas a terreno. Luego, se interpolaron las secciones cada 10 m. La geometría del segmento de río interpolada en HEC-RAS v5.0.3 se presenta en la Figura 8.

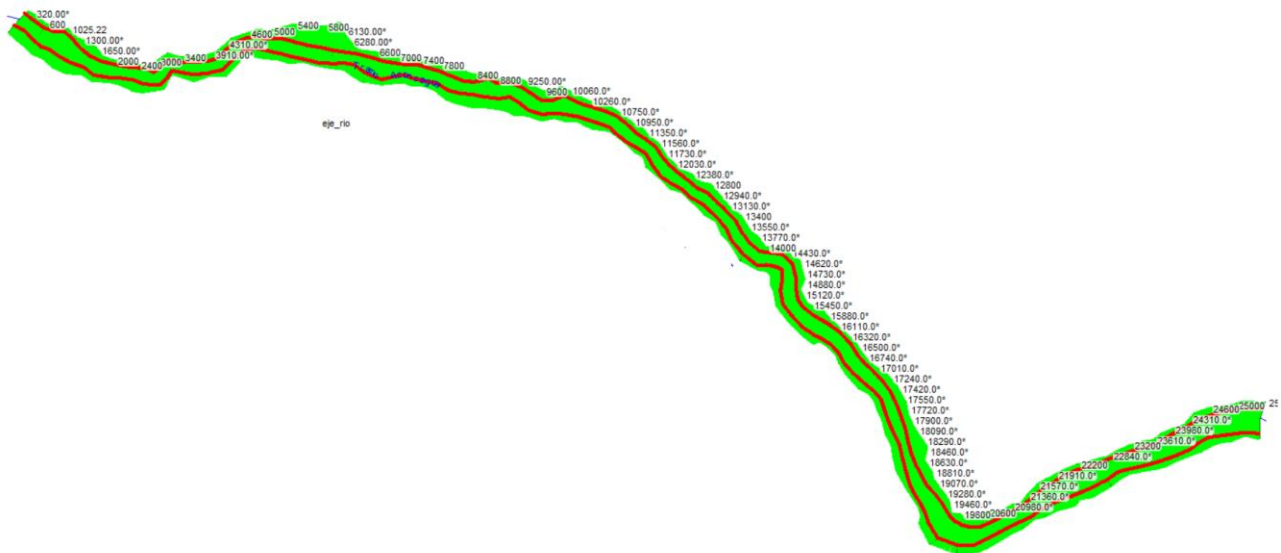


Figura 8: Vista en planta de la geometría del río ingresada a HEC-RAS v5.0.3.

La segunda entrada para el modelo corresponde a los datos de flujo del segmento del río Aconcagua. Para este modelo de flujo estacionario se definieron dos escenarios de modelación, un primer escenario (escenario 1) donde se simuló caudales mínimos y un segundo escenario (escenario 2) donde se simuló caudales medios mensuales.

Para construir el escenario 1 fue necesario obtener estadística hidrológica de las estaciones fluviométricas de la DGA ubicadas en el tramo de estudio y del río Colorado, su afluente más importante. También, de las otras estaciones de la zona de estudio, ya que esta estadística se utilizó para el procesamiento de los datos.

Para construir el escenario 2, también fue necesario la obtención de estadística hidrológica de las estaciones fluviométricas de la DGA. Además, se utilizó información de los caudales medios mensuales de captación de las bocatomas de canales de riego y las bocatomas de las centrales de hidroeléctricas de pasada presentes en el tramo de estudio, así como también, de los caudales de descarga de estas últimas (Figura 6 y 7).

La información sobre la red de canales de regadío y la disposición de las obras de las centrales hidroeléctricas de pasada en la zona de estudio, se obtuvo de la cartografía proporcionada por División Andina de CODELCO. Esta cartografía fue generada por el Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE como parte del “Estudio de Línea Base Limnológica y calidad de aguas Cuenca río Aconcagua” (EULA, 2015). También, se utilizó como referencia un Diagrama Unifilar elaborado por Hidroeléctrica Guardia Vieja S.A. donde se muestra en detalle el sistema de centrales y un Diagrama Unifilar de la Primera Sección del Río Aconcagua donde se presenta información detallada de los canales de regadío existentes en la zona (DGA, 2011). Toda esta información fue verificada en terreno durante una campaña que se efectuó en diciembre del año 2015, donde también se obtuvo un registro fotográfico de algunos tramos del río y de algunos accidentes topográficos como el “Salto del Soldado”, el cual se ubica a 1240 m.s.n.m (Figura 9).



Figura 9: Fotografía de formación geológica conocida como Salto El Soldado.

La información recopilada para cuantificar los aportes naturales y artificiales al tramo del río Aconcagua en estudio, se resume en la Tabla 3.

Tabla 3: Información utilizada para cuantificar los caudales naturales y artificiales.

Caudales	Recopilación de información	Fuente
Naturales	Datos de estadística fluviométrica de las 5 estaciones de monitoreo vigentes en la zona de estudio periodo 1970-2015.	Banco Nacional de Agua (BNA) del sitio web de la DGA. Link: www.dga.cl
Artificiales	Datos de la producción real mensual del Sistema Interconectado Central (SIC) para el periodo 2008-2015. Datos de la potencia máxima de la turbina y caudal de diseño de obras de las centrales hidroeléctricas de pasada.	Sitio web del Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC-SIC). Link: www.cdecsic.cl Decretos Supremos (D.S) que otorgaron concesión definitiva para el establecimiento de centrales hidroeléctricas de pasada.
	Datos de caudal de extracción efectiva de bocatomas de canales de riego. Datos de las dimensiones de las bocatomas sin información, y superficie regada.	Estudio “Levantamiento de Bocatomas en Cauces Naturales” de AC Ingenieros Consultores Ltda. (DGA, 2000) Estudio “Levantamiento de Información sobre Derechos No Inscritos Susceptibles de Regularizar. Cuenca del río Aconcagua” (DGA, 2007) Estudio “Actualización del Catastro de Usuarios/as de Aguas de la Primera Sección de la Cuenca del río Aconcagua” realizado por Infraeco (DGA, 2011).

En cuanto al procesamiento de la información, a los datos de caudales descargados del sitio web de la DGA, se les realizó un análisis de consistencia donde se verificó la calidad de los datos, permitiendo identificar estadísticas fluviométricas incompletas. Estas estadísticas se rellenaron utilizando el método de regresión

lineal simple, para ello se utilizaron datos de los caudales medios diarios y mensuales de estaciones con información completa (Río Aconcagua en Chacabucuito). La información fluviométrica rellena y corregida de las estaciones Río Aconcagua en Río Blanco y Río Colorado en Colorado, además de la estación Río Aconcagua en Chacabucuito se utilizó para calcular los caudales mínimos del río Aconcagua (aguas arriba y aguas abajo del tramo), y del río Colorado. El cálculo de los caudales mínimos se realizó considerando los criterios a) y b) descritos en el “Reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo” aprobado mediante D.S. N°14 (Modificado mediante D.S. N°71). La información hidrológica obtenida de ArcGIS y los caudales mínimos de la estación Río Aconcagua en Chacabucuito se utilizaron para estimar los caudales aportantes de los esteros, esto se hizo utilizando el método de transposición de caudales usando áreas ponderadas. En los esteros se detectó la presencia de bocatomas de riego, por esta razón se consideró aceptable utilizar los caudales mínimos de la estación río Aconcagua en Chacabucuito para hacer la transposición de caudales, porque esta estación refleja las intervenciones de este tipo de bocatomas en el río Aconcagua, lo que se asumió proporcional a lo que ocurre en los esteros afluentes.

En las Tablas 4 y 5 se presentan los resultados de los caudales mínimos obtenidos para cada una de las estaciones de monitoreo de la DGA vigentes en el tramo de estudio y para los esteros afluentes considerando los criterios a) y b) del reglamento para la determinación de caudal ecológico mínimo antes mencionado. Las estaciones de la DGA vigentes en el tramo de estudio se expresan en las Tablas 4 y 5 como Río Aconcagua en Río Blanco (RARB), Río Colorado en Colorado (RCC) y Río Aconcagua en Chacabucuito (RACH). Estos caudales fueron utilizados para la construcción del escenario 1.

Tabla 4: Resultados caudales mínimos naturales (m^3/s) periodo 1970-2015 considerando el criterio a).

Descripción	Área (km^2)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
RARB	883	2.017	1.466	1.466	1.466	1.466	1.466	1.466	1.466	1.466	1.466	1.842	2.825
Riecillos	162	0.510	0.510	0.451	0.310	0.255	0.255	0.255	0.260	0.330	0.510	0.510	0.510
RCC	832	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700
Los Chacayes	33	0.104	0.104	0.092	0.063	0.052	0.052	0.052	0.053	0.068	0.104	0.104	0.104
Vilcuya	38	0.121	0.121	0.107	0.073	0.060	0.060	0.060	0.062	0.078	0.121	0.121	0.121
RACH	2100	6.618	6.618	5.857	4.022	3.309	3.309	3.309	3.382	4.284	6.618	6.618	6.618

Tabla 5: Resultados caudales mínimos naturales (m^3/s) periodo 1970-2015 considerando el criterio b).

Descripción	Área (km^2)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
RARB	883	2.017	1.052	0.604	0.444	0.417	0.478	0.507	0.598	0.721	1.065	1.842	2.825
Riecillos	162	0.510	0.510	0.451	0.310	0.245	0.211	0.227	0.260	0.330	0.510	0.510	0.510
RCC	832	0.032	0.012	0.008	0.011	0.017	0.018	0.021	0.034	0.064	0.169	0.300	0.112
Los Chacayes	33	0.104	0.104	0.092	0.063	0.050	0.043	0.047	0.053	0.068	0.104	0.104	0.104
Vilcuya	38	0.121	0.121	0.107	0.073	0.058	0.050	0.054	0.062	0.078	0.121	0.121	0.121
RACH	2100	6.618	6.618	5.857	4.022	3.185	2.743	2.953	3.382	4.284	6.618	6.618	6.618

En las Tablas 6, 7 y 8 se presentan los caudales medios mensuales del periodo 2008-2015 los cuales fueron utilizados en la construcción del escenario 2. Dentro del rango de caudales se seleccionó el año con el menor caudal medio anual a la salida del tramo, en la estación río Aconcagua en Chacabucuito, este año corresponde al 2011 (Tabla 8).

Tabla 6: Caudales medios mensuales (m^3/s) estación DGA Río Aconcagua en Río Blanco.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Caudal Medio Anual (m^3/s)
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	--------------------------------

2008	9.70	2.84	2.01	1.92	4.17	4.26	3.18	4.76	3.68	8.13	30.70	36.94	9.36
2009	15.32	4.77	1.99	1.74	1.52	1.05	1.12	1.50	2.26	4.60	3.44	17.20	4.71
2010	16.53	4.71	4.03	1.18	1.12	1.13	1.13	1.13	1.15	2.43	2.78	2.60	3.33
2011	2.26	7.48	4.14	1.41	1.01	1.00	1.08	1.25	1.19	2.24	7.91	7.51	3.21
2012	3.31	2.62	1.62	3.16	1.46	2.01	1.31	1.08	1.60	2.11	5.47	4.14	2.49
2013	4.91	3.32	3.51	1.65	1.87	2.23	3.49	2.54	2.59	4.10	6.87	12.10	4.10
2014	12.04	9.07	5.20	3.13	2.38	2.33	3.30	2.52	2.80	7.15	9.59	10.55	5.84
2015	11.01	2.92	0.98	0.81	1.25	0.66	0.53	2.39	2.91	4.13	3.66	18.97	4.19

Tabla 7: Caudales medios mensuales (m³/s) estación DGA Río Colorado en Colorado.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Caudal Medio Anual (m ³ /s)
2008	1.89	0.11	5.49	0.98	3.65	4.63	1.44	4.25	8.11	15.13	43.66	29.59	9.91
2009	6.29	0.86	0.30	0.18	0.24	0.18	0.17	0.42	0.91	3.72	10.52	15.64	3.29
2010	2.83	0.37	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.24	0.27	0.41	1.18	1.01	0.62
2011	0.19	0.19	0.08	0.07	0.07	0.07	0.12	0.16	0.32	0.82	3.65	1.32	0.59
2012	0.15	0.05	0.03	0.06	0.60	0.20	0.17	0.17	0.17	0.19	2.01	0.13	0.33
2013	0.09	0.09	0.02	0.04	0.08	0.17	0.14	0.20	0.16	1.18	4.47	2.24	0.74
2014	0.11	0.02	0.02	0.02	0.20	0.06	0.04	0.06	0.12	1.41	0.09	0.05	0.18
2015	0.03	0.05	0.09	0.04	0.03	0.02	0.03	1.8	0.93	2.78	9.78	16.94	2.71

Tabla 8: Caudales medios mensuales (m³/s) estación DGA Río Aconcagua en Chacabuquito.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Caudal Medio Anual (m ³ /s)
2008	42.42	26.77	17.53	12.72	21.03	22.86	13.51	24	25.88	45.12	111.4	102.35	38.80
2009	60.69	39.01	23.89	15.87	10.81	8.95	10.51	13.13	22.22	28.46	46.67	71.08	29.27
2010	53.25	34.21	25.9	14.51	10.18	9.28	8.59	8.55	8.54	11.83	20.44	18.35	18.64
2011	17.25	16.09	12.42	7.85	5.98	5.29	5.61	6.42	10.26	16.42	33.93	18	12.96
2012	25.25	19.28	14.56	9.88	10.83	9.94	9.72	8.37	12.65	14.59	39.89	33.49	17.37
2013	32.14	24.04	13.12	8.17	6.6	8.49	7.89	8.46	10.31	17.95	37.88	43.43	18.21
2014	30.82	19.85	12.05	8.81	7.24	7.37	6.41	6.02	8.14	39.73	19.45	20.36	15.52
2015	20.92	16.18	13.18	8.46	6.18	4.85	5.55	11.05	14.53	20.09	46.89	76.03	20.33

El procesamiento de la información de la Producción Real Mensual del sistema SIC descargada del sitio web del CDEC, se realizó utilizando las herramientas de Excel. Primero, se seleccionaron solo los datos de producción real mensual de las centrales hidroeléctricas de pasada de la zona de estudio: Aconcagua (Blanco y Juncal), Los Quilos y Chacabuquito. Segundo, se revisó la información y se constató que se trataba de datos de Generación Bruta Diaria para cada mes del año de descarga. A partir de estos datos de generación bruta, se determinó el caudal de descarga promedio mensual y anual de las centrales hidroeléctricas de pasada, teniendo en cuenta los datos de la Generación máxima horaria (MWh) de las centrales y el caudal de diseño máximo (m³/s) de las tuberías de descarga de cada central (esta información se obtuvo de los decretos supremos antes mencionados). Tercero, para corroborar el cálculo se verificó que el caudal de descarga horario no fuese superior al caudal de diseño de las tuberías. En las Tabla 9 se presentan los caudales medios mensuales promedio de descarga de las centrales hidroeléctricas del año 2011.

Tabla 9: Caudales medios mensuales (m³/s) de las centrales Aconcagua, Los Quilos y Chacabuquito.

Central	Año 2011
---------	----------

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Aconcagua	17.32	10.26	9.60	5.91	4.09	2.94	2.93	2.96	5.31	8.55	16.57	21.53
Los Quilos	17.26	15.28	13.91	9.47	6.80	5.91	6.05	6.82	11.13	15.06	19.57	20.22
Chacabuquito	14.51	12.84	11.56	7.01	5.59	4.69	4.81	5.45	9.20	12.56	16.61	17.05

En la Tabla 10 se presentan los caudales de captación de cada una de las bocatomas de riego identificadas en el tramo de estudio. La temporada de riego está comprendida entre las estaciones de primavera-verano normalmente durante el periodo de septiembre a marzo (DGA, 2016).

Tabla 10: Caudales de captación de bocatomas de riego periodo septiembre-marzo en (m³/s).

Bocatoma	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Canal Chacabuco-Polpaico	3.60	3.60	3.60	-	-	-	-	-	3.60	3.60	3.60	3.60
Canal Los Quilos	0.95	0.95	0.95	-	-	-	-	-	0.95	0.95	0.95	0.95
Calvario uno	0.003	0.003	0.003	-	-	-	-	-	0.003	0.003	0.003	0.003
Calvario dos	0.009	0.009	0.009	-	-	-	-	-	0.009	0.009	0.009	0.009
Tranque Primera Quebrada	0.03	0.03	0.03	-	-	-	-	-	0.03	0.03	0.03	0.03

Para la construcción del escenario 2 sólo se consideraron los caudales de extracción de las bocatomas del Canal Chacabuco-Polpaico y Canal los Quilos, puesto que los caudales de las otras bocatomas son muy bajos para ser considerados en este estudio, además estas bocatomas son temporales.

En la Tabla 11 se presenta un resumen de la información utilizados para construir los escenarios de modelación definitivos para el caso estacionario.

Tabla 11: Resumen de la información utilizada para construir escenarios de modelación definitivos.

Escenario de Modelación	Condiciones de caudal	Datos
Escenario 1	Caudal Mínimo	Caudal mínimo aguas arriba y aguas abajo del tramo de río Aconcagua, y del río Colorado estaciones de monitoreo de la DGA. Caudal mínimo aporte natural de esteros Riecillos, Vilcuya y Los Chacayes calculados utilizando el método de transposición de caudales.
Escenario 2	Caudal Medios Mensuales Año 2011	Caudal medios mensuales aguas arriba y aguas abajo del tramo de río Aconcagua, y del río Colorado estaciones de monitoreo de la DGA. Caudal medios mensuales de aportes naturales de esteros Riecillos, Vilcuya y Los Chacayes calculados utilizando el método de transposición de caudales. Caudal medio mensual de captación de bocatomas riego, y de captación y restitución de centrales hidroeléctricas de pasada.

En la Tabla 12 y 13 se presentan los perfiles de flujo ingresados a HEC-RAS para simular el escenario 1, considerando los criterios a) y b) del D.S N°14 (Mod. D.S. N°71). En la Tabla 14 se presenta del escenario 2. Para la construcción de este escenario se consideraron los caudales medios mensuales del año con el menor caudal medio anual registrado en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito del periodo 2008-2015. De acuerdo con la Tabla 8, el año con menor caudal medio anual es el del año 2011.

Tabla 12: Caudales (m^3/s) para el escenario 1 considerando criterio a) del D.S N°14 (Mod. D.S. N°71).

Estación/Bocatoma	R.S	Altitud (m.s.n.m)	Caudales mínimos (m^3/s)												
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	
Río Aconcagua en río Blanco	25400	1416	2.02	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.84	2.83
Bocatoma Aconcagua	23400	1348	2.02	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.84	2.83
Estero Riecillos	21040	1292	2.53	1.98	1.92	1.78	1.72	1.72	1.72	1.73	1.80	1.98	2.35	3.33	
Bocatoma Los Quilos	12100	1100	2.53	1.98	1.92	1.78	1.72	1.72	1.72	1.73	1.80	1.98	2.35	3.33	
Río Colorado	10630	1075	3.23	2.68	2.62	2.48	2.42	2.42	2.42	2.43	2.50	2.68	3.05	4.03	
Estero Los Chacayes	9150	1054	3.33	2.78	2.71	2.54	2.47	2.47	2.47	2.48	2.56	2.78	3.16	4.14	
Estero Vilcuya	7310	1026	3.45	2.90	2.82	2.61	2.53	2.53	2.53	2.54	2.64	2.90	3.28	4.26	
Descarga Central Chacabuquito	1510	955	6.62	6.62	5.86	4.02	3.31	3.31	3.31	3.38	4.63	6.62	6.62	6.62	

Tabla 13: Caudales (m^3/s) para el escenario 1 considerando criterio b) del D.S N°14 (Mod. D.S. N°71).

Estación/Bocatoma	R.S	Altitud (m.s.n.m)	Caudales mínimos (m^3/s)												
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	
Río Aconcagua en río Blanco	25400	1416	2.02	1.05	0.60	0.44	0.42	0.48	0.51	0.60	0.72	1.07	1.84	2.83	
Bocatoma Aconcagua	23400	1348	2.02	1.05	0.60	0.44	0.42	0.48	0.51	0.60	0.72	1.07	1.84	2.83	
Estero Riecillos	21040	1292	2.53	1.56	1.05	0.75	0.66	0.69	0.73	0.86	1.05	1.57	2.35	3.33	
Bocatoma Los Quilos	12100	1100	2.53	1.56	1.05	0.75	0.66	0.69	0.73	0.86	1.05	1.57	2.35	3.33	
Río Colorado	10630	1075	2.56	1.57	1.06	0.77	0.68	0.71	0.76	0.89	1.12	1.74	2.65	3.45	
Estero Los Chacayes	9150	1054	2.66	1.68	1.16	0.83	0.73	0.75	0.80	0.95	1.18	1.85	2.76	3.55	
Estero Vilcuya	7310	1026	2.78	1.80	1.26	0.90	0.79	0.80	0.86	1.01	1.26	1.97	2.88	3.67	
Descarga Central Chacabuquito	1510	955	6.62	6.62	5.86	4.02	3.19	2.74	2.95	3.38	4.28	6.62	6.62	6.62	

Tabla 14: Caudales (m^3/s) para el escenario 2 considerando caudales medios mensuales del año 2011.

Estación/Bocatoma	R.S	Altitud (m.s.n.m)	Caudales medio mensuales (m^3/s)												
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	
Río Aconcagua en río Blanco	25400	1416	2.26	7.48	4.14	1.41	1.01	1.00	1.08	1.25	1.19	2.24	7.91	7.51	
Bocatoma Aconcagua	23400	1348	2.26	7.48	4.14	1.41	1.01	1.00	1.08	1.25	1.19	2.24	7.91	11.44	
Estero Riecillos	21040	1292	3.59	8.72	5.10	2.01	1.47	1.41	1.51	1.74	1.98	3.50	10.52	12.79	
Bocatoma Los Quilos	12100	1100	5.38	10.21	6.49	4.47	2.68	2.63	2.75	3.11	2.96	5.05	12.53	15.01	
Río Colorado	10630	1075	5.57	10.40	6.57	4.54	2.75	2.70	2.87	3.27	3.28	5.87	16.18	16.33	
Estero Los Chacayes	9150	1054	5.84	10.65	6.76	4.66	2.84	2.79	2.96	3.37	3.44	6.12	16.71	16.61	
Estero Vilcuya	7310	1026	6.16	10.94	6.99	4.81	2.95	2.88	3.06	3.49	3.63	6.42	17.33	16.93	
Descarga Central Chacabuquito	1510	955	20.67	23.78	18.55	11.82	8.55	7.57	7.88	8.94	12.83	18.99	33.94	33.98	

Debido a que el régimen hidráulico del río es Mixto, se deben definir condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo. Como condición de contorno aguas arriba, se ingresó la pendiente del tramo superior entre las cotas 25400 y 25200, el valor de esta pendiente es de 3.657% (es una pendiente promedio local y no corresponde en ningún caso a la pendiente promedio del cauce total). Como condición de contorno aguas abajo, se utilizó una curva de descarga o de calibración. Para construir las curvas del escenario 1 (Figura 10) se utilizaron los caudales instantáneos de la estación río Aconcagua en Chacabuquito del año 2015.

Para construir las curvas del escenario 2 (Figura 11) se utilizaron los caudales instantáneos de la estación río Aconcagua en Chacabuquito del año 2011.

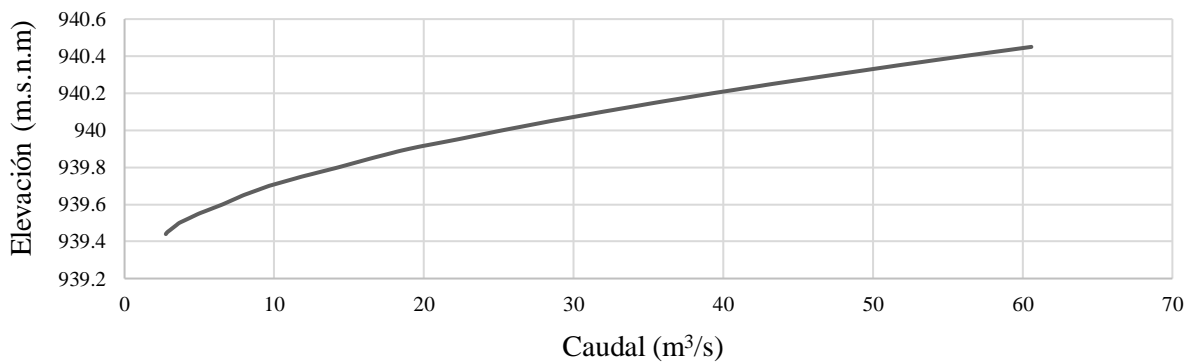


Figura 10: Curva descarga utilizada como condición contorno aguas abajo, escenarios 1, año 2015.

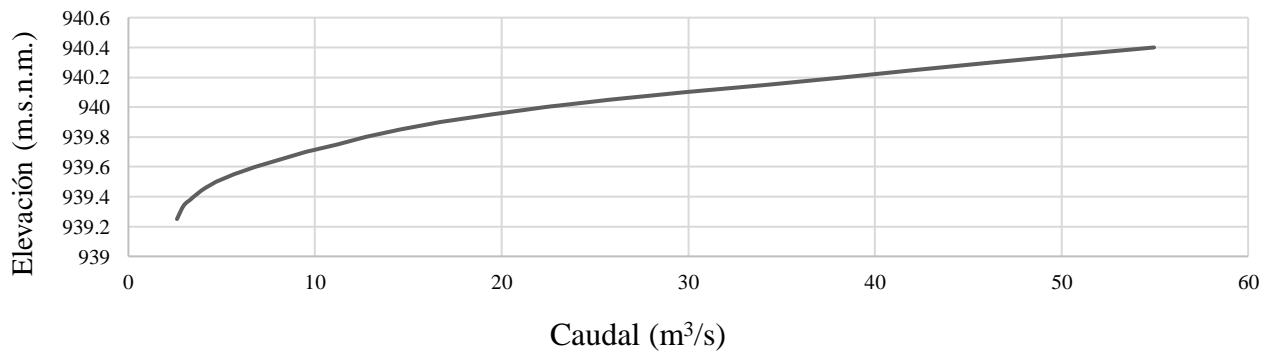


Figura 11: Curva de descarga utilizada como condición contorno aguas abajo, escenario 2, año 2011.

La rugosidad del cauce se determinó utilizando el método de Cowan (Cowan, 1956), para ello fue necesario analizar las imágenes satelitales obtenidas en conjunto con las fotografías recopiladas en la campaña a terreno realizada en diciembre del año 2015. En la Tabla 15 se presentan los valores obtenidos de cada uno de los componentes de la ecuación del coeficiente de rugosidad. En este caso se estima que el coeficiente de rugosidad es homogéneo tanto a lo largo como a lo ancho del río.

Tabla 15: Determinación del coeficiente de rugosidad por el método de Cowan.

Sector del cauce	Material del lecho	Grado de irregularidad Perímetro Mojado	Variaciones de las Secciones	Efecto relativo de las obstrucciones	Densidad de Vegetación	Sinuosidad y frecuencia de Meandros	Coeficiente de rugosidad
	n0	n1	n2	n3	n4	m	n
Centro	0.026	0.005	0.005	0.01	0.005	1	0.051
Ribera	0.026	0.005	0.005	0.01	0.009	1	0.055

Los datos de la rugosidad obtenidos fueron comparados con los proporcionados en el documento “Guide for Selecting Manning’s Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains” del USGS (Barnes, 1967). Se compararon las fotografías del tramo de estudio con las fotografías que se presentan en el libro, y se concluyó que los valores de rugosidad de 0.055 para las riberas y de 0.051 para el cauce principal, para todas las secciones transversales definidas eran razonables (Figura 12 y 13). Los coeficientes de contracción y expansión para todos los casos se asumieron de 0.1 y 0.3, respectivamente.



Figura 12: Comparación de fotografías para determinar rugosidad del cauce principal. Imagen de la izquierda corresponde al reporte del USGS, y la imagen a la derecha a una de las fotografías registradas en terreno.

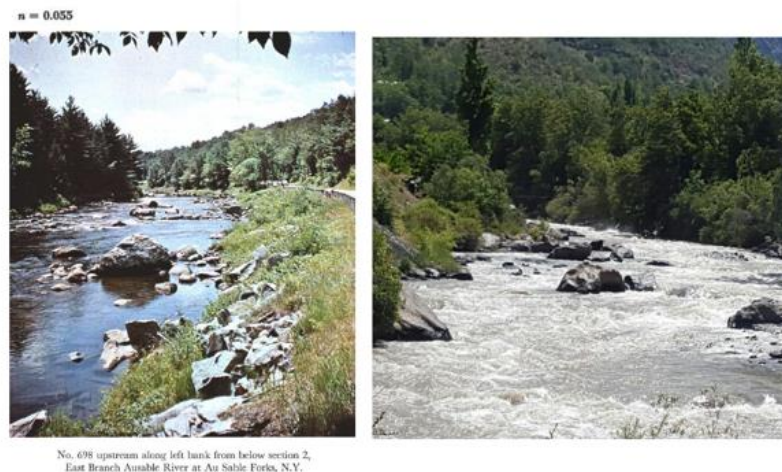


Figura 13: Comparación de fotografías para determinar rugosidad de las riberas. Imagen de la izquierda corresponde al reporte del USGS, y la imagen a la derecha a una de las fotografías registradas en terreno.

2.6.2 Información recopilada para el análisis de flujo no estacionario

Se realizó una simulación de flujo no estacionario para subsanar cualquier falta de precisión por parte del modelo estacionario. Las ecuaciones utilizadas en el modelo no estacionario representan mucho mejor los cambios de flujo y anomalías, minimizando errores en los resultados.

Para el análisis de flujo no estacionario, se seleccionaron (de los escenarios definidos para el caso estacionario) los meses con el menor caudal en la sección (R.S. 1510), que corresponde a la sección que se ubica antes de la descarga de la central en Chacabucuito y de la estación río Aconagua en Chacabucuito.

En las Tablas 16 y 17 se presentan los perfiles de flujo seleccionados para el escenario 1 y el escenario 2, respectivamente. La denominación caso a) y caso b) de las tablas 16, 18, 19, 20 y 21 hacen referencia a los caudales mínimos calculados con el criterio a) y criterio b) del reglamento para la determinación de caudal ecológico mínimo definido en el D.S. N°14 (Mod. D.S. N°71/2015).

Tabla 16: Caudales mínimos (m^3/s) seleccionados para definir Escenario 1.

R.S	Altitud (m.s.n.m)	Escenario 1	
		Caso a) - Mayo	Caso b) - Mayo
25400	1415.5	1.466	0.417
23400	1348	1.466	0.417
21040	1292	1.721	0.662
12100	1100	1.721	0.662
10630	1075	2.422	0.679
9150	1054	2.474	0.729
7310	1026	2.534	0.787

Tabla 17: Caudales medios mensuales (m^3/s) seleccionados para definir el Escenario 2.

R.S.	Escenario 2
	Año 2011 - Junio
25400	1.000
23400	1.000
21040	1.407
12100	2.632
10630	2.702
9150	2.702
7310	2.786

Debido a que en el flujo no estacionario se consideran las entradas laterales de flujo aparte, entonces se calcularon las diferencias entre caudales para obtener el flujo que está efectivamente ingresando. Los datos de caudal para cada escenario fueron ingresados como hidrogramas de flujo puesto que representan una condición de contorno del modelo. En la Tabla 18 se presentan las diferencias de caudal entre secciones, estos caudales fueron ingresados como hidrogramas de flujo externos e internos.

Tabla 18: Diferencias entre caudales Escenario 1 y 2 en (m^3/s).

R.S	Escenario 1		Escenario 2
	caso a) - Mayo	caso b) - Mayo	Junio - Año 2011
25400	1.466	0.417	1.000
23410	0.00	0.00	0.000
21050	0.255	0.245	0.407
12110	0.00	0.00	1.225
10640	0.700	0.017	0.070
9160	0.052	0.050	0.083
7320	0.060	0.058	0.097

Para los escenarios de flujo 1 y 2, se ingresó como condición de contorno aguas arriba (R.S 25400) un hidrograma de flujo. Las condiciones de contorno internas (R.S 23410, R.S 21050, R.S 12110, R.S 10640, R.S 9160, R.S 7320) se ingresaron como hidrogramas de flujo de entrada lateral. El caudal utilizado para la construcción de los hidrogramas de flujo se consideró como una función monótona creciente hasta alcanzar un valor constante, esto se hace para representar “la condición estacionaria de flujo”. Los hidrogramas de flujo de entrada lateral deben ser ingresados en la sección anterior a la que realmente llega el flujo. En aquellas secciones donde se repite el valor del caudal, no se ingresó hidrograma de flujo, puesto que la diferencia entre el caudal de esa sección y de la anterior es 0.00, así como se muestra en la Tabla 18.

Los rangos temporales definidos para las condiciones de contorno deben ser lo suficientemente extensos de forma que contengan los periodos de simulación, es decir, el rango de tiempo considerado para cada hidrograma de flujo debe ser mayor al rango de tiempo de la ventana de modelación. En la Tabla 19 se presentan el rango temporal considerado en las condiciones de contorno de cada escenario.

Tabla 19: Rangos temporales considerados en las condiciones de contorno del escenario 1 y 2.

Escenario	Casos	Rangos temporales de las condiciones de contorno
1	a)	Desde el 07 mayo del 2015 al 20 de mayo del 2015
	b)	
2	2011	Desde el 07 junio del 2011 al 20 de junio del 2011

Por último, como condición inicial se utilizó para cada escenario el caudal inicial de cada hidrograma de flujo ingresado en la sección 25400 (condición de contorno aguas arriba). Los datos de condición inicial se presentan en la Tabla 20. Como condición de contorno aguas abajo (R.S 200) se utilizó la pendiente promedio del lecho, la que fue determinada utilizando las herramientas de HEC-RAS, el valor obtenido es de 1.214% (es una pendiente promedio local y no corresponde en ningún caso a la pendiente promedio del cauce total).

Tabla 20: Condición inicial ingresada en los escenarios 1 y 2.

R.S	Escenario 1 (m ³ /s)		Escenario 2 (m ³ /s)
	Caso a)	Caso b)	2011
	May.	May.	Jun.
25400	1.459	0.410	0.993

La ventana de tiempo de simulación utilizada para cada escenario y caso se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Ventana de tiempo de simulación utilizado para la modelación de flujo no estacionario.

Escenario	Casos	Ventana de tiempo de simulación
1	a)	Desde el 10 mayo del 2015 al 18 de mayo del 2015
	b)	
2	2011	Desde el 10 junio del 2011 al 18 de junio del 2011

Para los escenarios 1 y 2 se consideró un intervalo de cálculo o tiempo de paso computacional de 0.3 segundos el cual cumple con la condición de Courant ($Cr \leq 1.0$), esto teniendo en cuenta que la mayor velocidad calculada por el programa es de 2.1 m/s y la distancia entre secciones es de 10 m. El número de iteraciones máximo considerado para los análisis de los escenarios 1 y 2 fue de 30 y 40, respectivamente.

2.6.3 Información recopilada para el análisis de calidad de agua

Los datos de calidad de agua que deben proporcionarse para realizar el análisis de calidad del agua en HEC-RAS v5.0.3, dependen de los componentes o constituyentes de calidad de agua que se deseen modelar. En este estudio se consideró la modelación de un constituyente arbitrario conservativo el cual fue ingresado como una inyección puntual e instantánea. Se establecieron células de calidad de agua entre secciones transversales, para este segmento de río se definieron células de calidad de agua cada 100 m, con esta longitud de celda se satisface las condiciones de Courant y Peclet. Otro dato que debe ser especificado son las condiciones de contorno, estas se deben ingresar en todos los lugares donde el flujo entra al sistema (i.e. limite aguas arriba del río principal y sus afluentes y entradas laterales).

En este estudio, las condiciones de contorno se definieron para las mismas secciones definidas en el flujo no estacionario, debido a que se utilizó este plan hidráulico para realizar el análisis de calidad de agua. La sustancia fue ingresada sólo en la condición de contorno aguas arriba (R.S 25400), la concentración ingresada fue de 25 mg/l. Este dato fue ingresado como tabla, donde el tiempo considerado fue el mismo tiempo de

simulación del flujo no estacionario (Tabla 21), el valor de 25 mg/l se ingresó en la primera casilla como una inyección instantánea, al resto de las casillas se les ingresó un valor de 0 mg/l. El resto de las condiciones de contorno de entrada lateral se definieron con un valor de 0 mg/l, es decir, no existe presencia de esta sustancia en las entradas de flujo lateral. Como condición inicial se ingresó en la estación R.S 25400 un valor de 0 mg/l, ya que se consideró que inicialmente el río no presenta este tipo de sustancia.

Respecto al coeficiente de dispersión, se seleccionó la opción de que el modelo de calidad de agua calcule los coeficientes en base a las variables hidráulicas de cada cara de la celda o célula de calidad de agua. Este método evita la inestabilidad del modelo que puede ocurrir cuando una sección transversal con un área de superficie y un coeficiente de dispersión grande, es seguida inmediatamente por una sección transversal con un área de superficie pequeña y un coeficiente de dispersión bajo. La ecuación para la dispersión calculada por el modelo se basa en la ecuación de Fisher (Fisher et al., 1979), que es una estimación de la dispersión del flujo cortante basada en las cantidades hidráulicas y geométricas del río (Brunner et al., 2016). Además, de seleccionar la opción de cálculo del coeficiente de dispersión, también se debe ingresar un valor para el multiplicador “m”, para este estudio se seleccionó un valor 1.0, con el que se obtiene la ecuación original de Fisher. También, se deben ingresar los valores que limitan el coeficiente de dispersión, para este estudio se decidió no establecer límites muy estrechos, más bien se seleccionaron valores que permitieran observar la variabilidad de los coeficientes de dispersión en el tramo de estudio. Para el análisis de calidad de agua se consideró la misma ventana de tiempo de simulación que para la modelación de flujo no estacionario (Tabla 21), ya que se utilizó este plan hidráulico para la modelación de calidad de agua.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados de la modelación de flujo no estacionario

Los resultados de la modelación de flujo no estacionario se presentan en las Figuras 14, 15 y 16, debido a que este análisis se realizó con el propósito de alcanzar la condición estacionaria de flujo, los gráficos de cada perfil debiesen entregar un solo resultado, independiente del tiempo de simulación considerado.

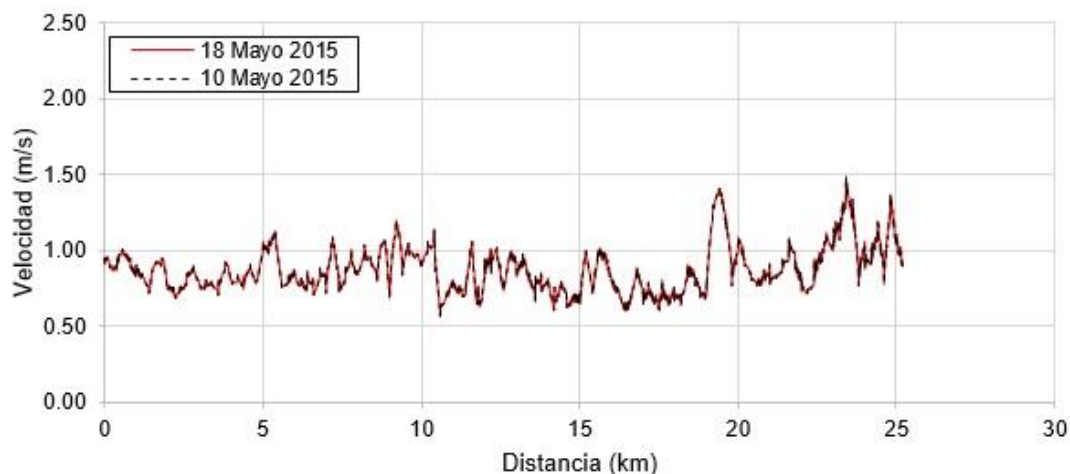


Figura 14: Perfil de velocidad del escenario 1 caso a) mes mayo.

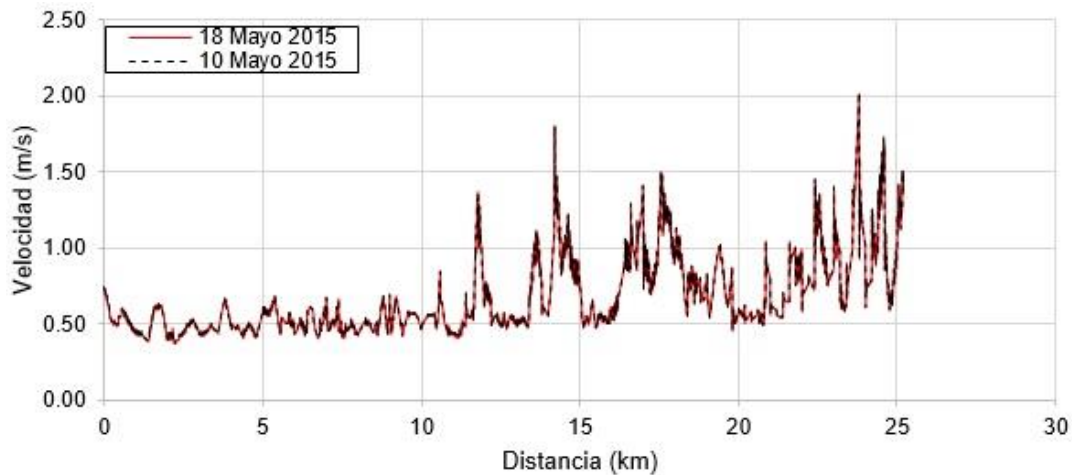


Figura 15: Perfil de velocidad del escenario 1 caso b) mes mayo.

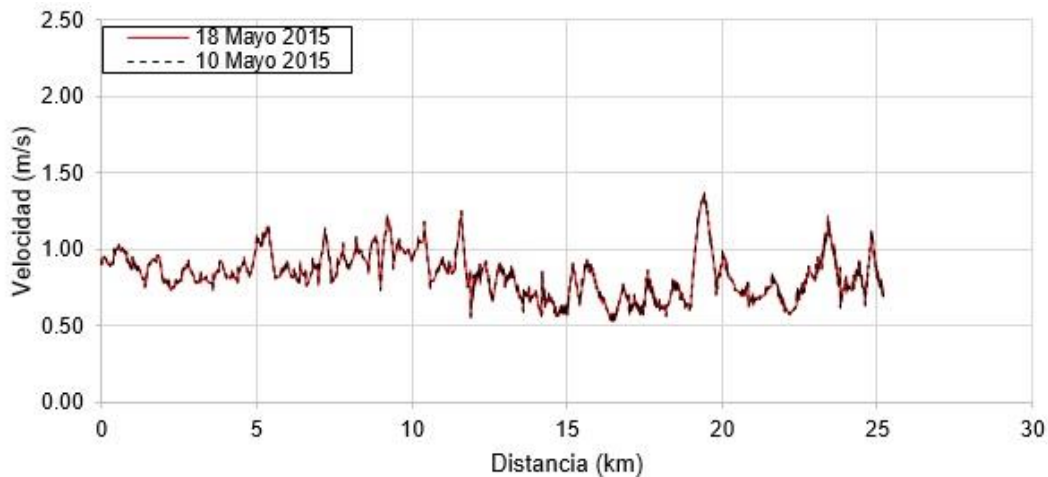


Figura 16: Perfil de velocidad del escenario 2 año 2011 mes junio.

3.2 Resultados de la modelación de calidad de agua

Los resultados obtenidos de la modelación de calidad de agua se presentan en las Figuras 17, 18 y 19, en forma de gráficos espaciales. Las concentraciones máximas de la sustancia (concentración peak) obtenidas, fueron normalizadas utilizando la concentración de la sustancia inicial (25 mg/l), formando una envolvente. Además, se incorporó al gráfico la variación espacial de los caudales, para así establecer la relación existente entre la variación del caudal (que se produce debido a las entradas de flujo lateral) y la variación del porcentaje de concentración de la sustancia simulada.

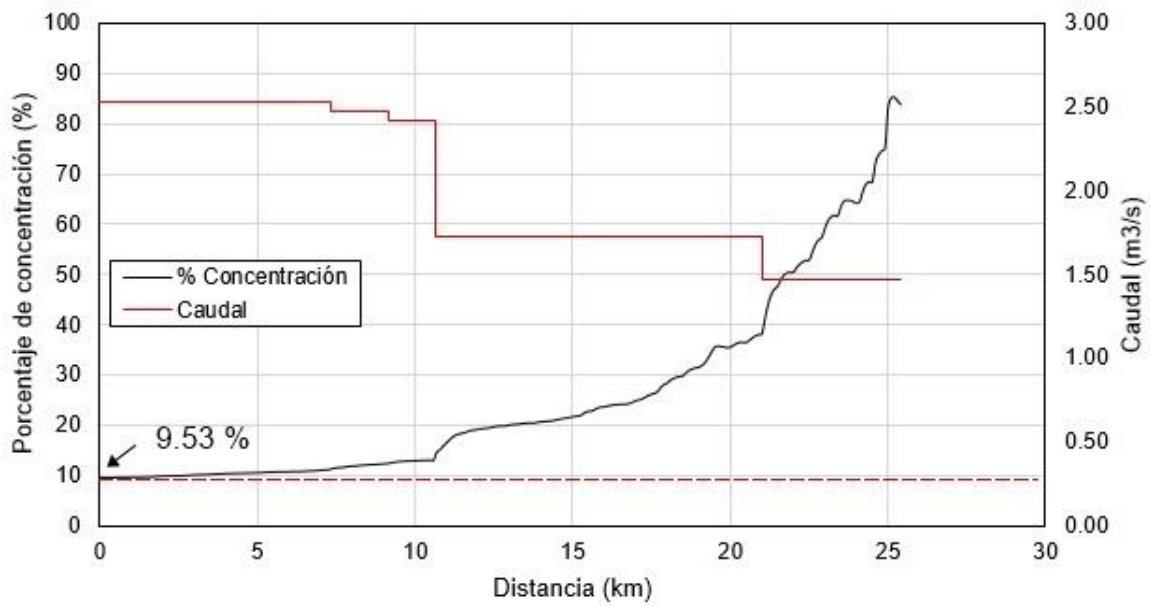


Figura 17: Evolución espacial de la concentración normalizada para el escenario 1 caso a).

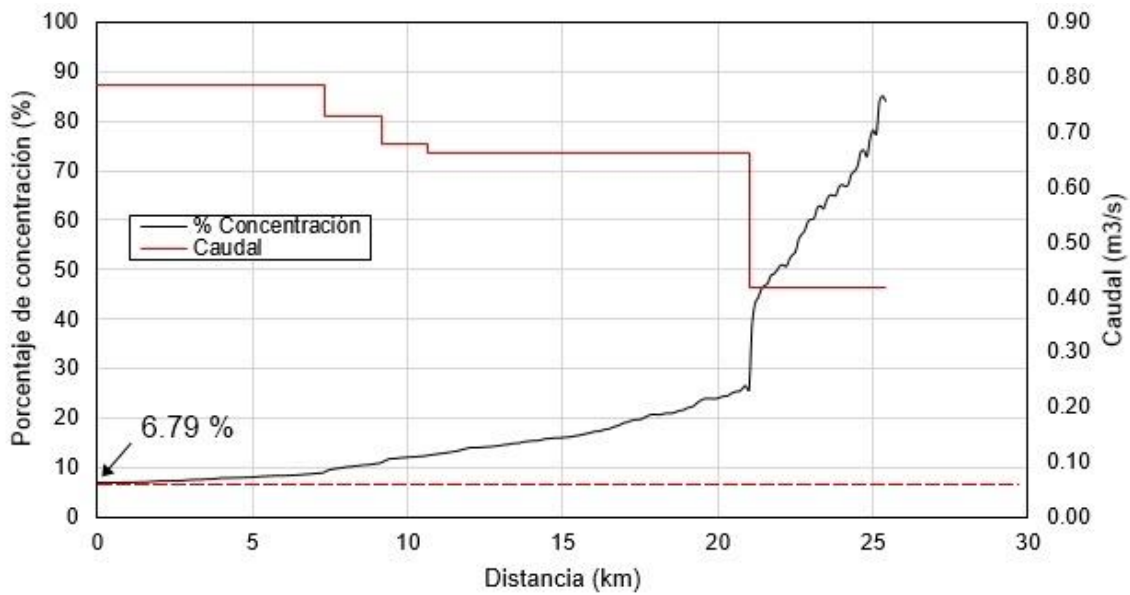


Figura 18: Evolución espacial de la concentración normalizada para el escenario 1 caso b).

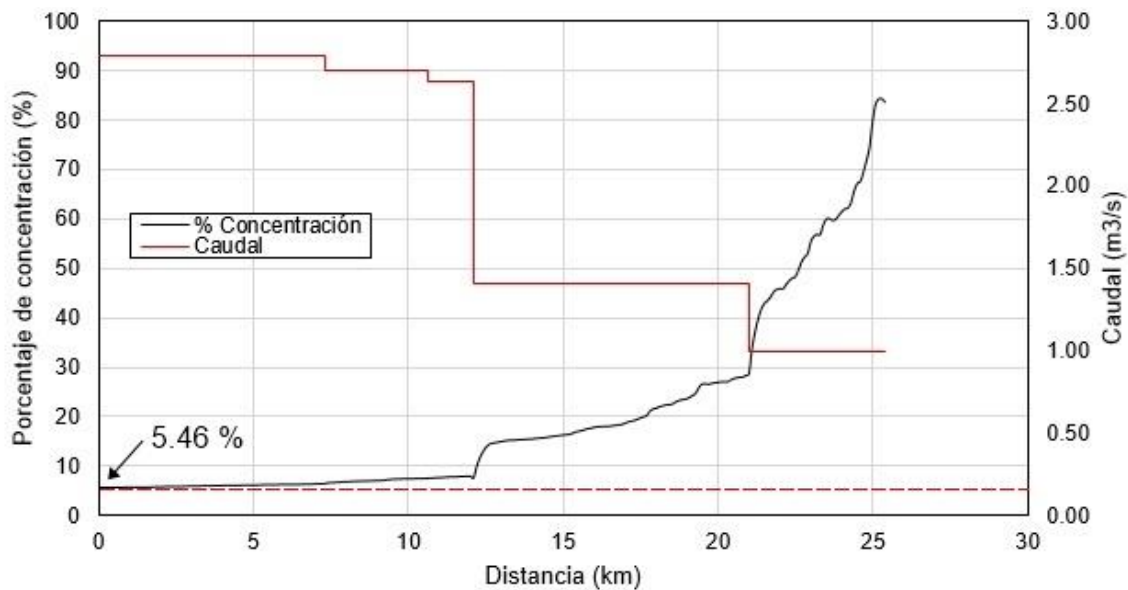


Figura 19: Evolución espacial de la concentración normalizada para el escenario 2, junio año 2011.

Los resultados de los gráficos anteriores, permitieron obtener la variación de la concentración máxima de la sustancia, desde la primera sección hasta la última sección aguas abajo. Lo primero que se observa es que el porcentaje de concentración en la sección R.S. 25400 para todos los escenarios no es de un 100%, esto se debe a la dispersión inicial que se produce debido a la inyección instantánea de la sustancia. Lo segundo que se observa, es que la pendiente de la envolvente es más pronunciada cuando los caudales son más bajos, produciéndose una mayor dispersión de la sustancia. Por otro lado, cuando los caudales son mayores la dispersión de la sustancia disminuye, esto se explica por los componentes de la ecuación Advección-Dispersión, ya que para caudales bajos es mayor la turbulencia por lo que predomina el término de dispersión de dicha ecuación.

4 CONCLUSION

En este estudio se realizó una modelación hidráulica y de calidad de agua para simular el transporte de una sustancia conservativa en un segmento del río Aconcagua. La sustancia modelada se ingresó al río en la primera sección aguas arriba (R.S 25400), como una inyección supuesta puntual e instantánea de 25 mg/l.

Los resultados de la modelación hidráulica en flujo estacionario revelaron que el segmento de río Aconcagua analizado, posee un régimen mixto con una geometría con fuertes cambios de pendiente en el lecho del río, lo que podría ocasionar presencia de resaltos hidráulicos y condiciones críticas en ciertas secciones. Estos resultados requirieron que se tomara la decisión de efectuar un análisis de flujo no estacionario, puesto que las ecuaciones de Saint-Venant son más apropiadas para resolver este tipo de situaciones. El análisis de flujo no estacionario se realizó de tal manera que fue posible alcanzar la condición estacionaria de flujo, esto se logró ingresando hidrogramas con un caudal que se asumió inicialmente como una función monótonica creciente, pero que luego se mantuvo como un valor constante que se extendió por un tiempo suficiente para alcanzar el estado estacionario. Los resultados del análisis de flujo no estacionario para cada escenario se presentaron en las Figuras 14, 15 y 16 correspondientes a los perfiles de velocidad, estos demuestran que en todos los tiempos de modelación considerados se alcanza la condición estacionaria de flujo, es decir, que los resultados de cada perfil se mantienen constantes en el tiempo. Respecto al cumplimiento de la condición de Courant para flujo no estacionario ($C_r \leq 1.0$) se tiene que para una velocidad máxima de 2.1 m/s y una distancia entre secciones transversales de 10 m, el tiempo de 0.3 segundos es adecuado, puesto que satisface esta condición para todos los escenarios analizados.

Los resultados obtenidos de la modelación de calidad de agua se presentaron en las Figuras 17, 18 y 19, en forma de gráficos espaciales. Las concentraciones máximas de la sustancia (concentración peak) obtenidas, fueron normalizadas utilizando la concentración de la sustancia inicial (25 mg/l), formando una envolvente. Además, se incorporó al gráfico la variación espacial de los caudales, para así establecer la relación existente

entre la variación del caudal (que se produce debido a las entradas de flujo lateral) y la variación del porcentaje de concentración de la sustancia simulada.

Los resultados de los gráficos espaciales (Figuras 17, 18 y 19), para cada escenario modelado, permitieron obtener la variación de la concentración máxima de la sustancia (en porcentaje), desde la primera sección (R.S. 25400), hasta la última sección aguas abajo (R.S. 200). Lo primero que se observa es que el porcentaje de concentración en la sección R.S. 25400 para todos los escenarios no es de un 100%, esto se debe a la dispersión inicial que se produce debido a la inyección instantánea de la sustancia.

En cuanto a los resultados al final del tramo, se tiene que para la situación de flujo mínimo del escenario 1 caso a), la sustancia alcanza la sección a la salida del tramo (R.S. 200) en un tiempo de 9 horas (10 mayo a las 10:00 am), la concentración máxima de sustancia que llega a esa sección es de 2.379 mg/l (9.53%) y es transportada a una velocidad promedio de 0.78 m/s. Toda la concentración de sustancia pasa por la sección R.S. 200, el día 12 de mayo del 2015 a las 9:10 am.

En la situación de flujo mínimo del escenario 1 caso b), la sustancia alcanza la sección a la salida del tramo (R.S. 200) en un tiempo de 13 horas y 40 minutos (10 mayo a las 14:40 pm), la concentración máxima de sustancia que llega a esa sección es de 1.699 mg/l (6.79%) y es transportada a una velocidad promedio de 0.51 m/s. Toda la concentración de sustancia pasa por la sección R.S. 200, el día 13 de mayo del 2015 a las 3:50 am.

En la situación del escenario 2 (junio del 2011), la sustancia alcanza la sección a la salida del tramo (R.S. 200) en un tiempo de 9 horas y 20 minutos (10 junio a las 10:20 am), la concentración máxima de sustancia que llega a esa sección es de 1.366 mg/l (5.46%) y es transportada a una velocidad promedio de 0.75 m/s. Toda la concentración de sustancia pasa por la sección R.S. 200, el día 12 de junio del 2011 a las 11:30 am.

Comparando los resultados del escenario 1, podemos concluir que los caudales mínimos calculados con el criterio a) permiten un transporte más rápido de la sustancia, pero una menor dispersión de la misma, lo que apunta a un flujo del tipo advectivo dominante. En cambio, los caudales mínimos calculados con el criterio b) permiten un transporte menos rápido pero una mayor dispersión de la sustancia. Esto se debe a que al disminuir la velocidad baja el efecto de la advección, y la dispersión aumenta su ponderación en la solución de la ecuación de transporte.

Los resultados del escenario 2 del mes de junio del año 2011 revelan una mayor dispersión de la sustancia, en comparación con el escenario 1 caso a), esto se debe a que los caudales de este escenario en los primeros 13.3 km (i.e. hasta la sección R.S. 12100) son menores a los simulados para el escenario 1 caso a), inmediatamente después de esta sección ocurre un aumento del caudal debido a la restitución de la central Los Quilos (que restituye un caudal que es casi un 88% mayor al caudal transportado por el río), lo que aumenta la componente de advección. Esto podría explicar el porque la dispersión es mayor, pese a que el tiempo de transporte es el mismo del escenario 1 caso a).

Respecto a la variación del caudal del río y el porcentaje de concentración máxima de la sustancia, se observa en los gráficos que son inversamente proporcionales, es decir, a medida que aumenta el caudal del río hacia aguas abajo, la pendiente de la envolvente se vuelve menos pronunciada indicando que existe una menor dispersión de la sustancia, sin embargo, en algunos puntos se presenta un aumento puntual de la dispersión de la sustancia, esto ocurre porque en esos puntos se produce una entrada lateral de flujo. Luego, de esta entrada de flujo la pendiente de la envolvente vuelve a ser menos pronunciada mostrando una menor tasa de dispersión (Figuras 17, 18 y 19).

Por último, los valores del coeficiente de dispersión varían notoriamente a lo largo del río, sin embargo, en todos los escenarios considerados el valor en la última sección transversal del tramo de estudio no supera el 10% de la concentración inyectada. Sugiriendo que para estos caudales mínimos el río posee una capacidad de autodepuración en el tramo de estudio de al menos un 90%. Interesante sería realizar estudios con trazadores para registrar en terreno los valores de los coeficientes de dispersión y comparar éstos con los valores modelados, de manera de validar los resultados obtenidos en este estudio.

5 AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo agradece al Sr. Francisco Riestra (de la Gerencia de Sustentabilidad y Asuntos Externos de la División Andina de Codelco), por su colaboración durante el desarrollo de este trabajo. Este estudio se desarrolló en el marco del proceso elaboración del anteproyecto de Norma Secundaria de Calidad Ambiental de la Cuenca del río Aconcagua (Res. Ex. N°946/2015).

6 REFERENCIAS

- Barnes, H.H. (1967).** Roughness characteristics of natural channels; U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849, 213 p.
- Brunner, G. W. y CEIWR-HEC. (2016).** HEC-RAS River Analysis System. User's Manual – Version 5.0.
- Bruner, G. W. (2016).** HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual - Version 5.0.
- Cowan, W.L. (1956).** Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering, 377,p. 473–475.
- Dirección General de Aguas (DGA) - AC Ingenieros Consultores LTDA. Ayala, Cabrera y Asociados LTDA. (2000).** Levantamiento de Bocatomas en Cauces Naturales. Cuenca del Río Aconcagua. Vol. no. II. Santiago. Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA)- Departamento de Administración de Recursos Hídricos (2004).** Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Aconcagua. Santiago. Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA) - Cade-Idepe Consultores en Ingeniería (2004).** Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad: Cuenca del Río Aconcagua. Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA) - AC Ingenieros Consultores LTDA. Ayala, Cabrera y Asociados LTDA. (2007).** Levantamiento de Información sobre Derechos no Inscritos Susceptibles de Regularizar. Cuenca del Río Aconcagua, Vol. No. I. Santiago. Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA) - Infraestructura y Ecología S.A. (2011).** Actualización Catastro de Usuarios/as de Aguas de la Primera Sección de la Cuenca del Río Aconcagua. Informe Final Versión 1. Tomo II. Diciembre 2011. Santiago. Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). Gobierno de Chile (2016).** Atlas del agua. Capítulo 1. Chile en el Mundo. Pág. 14.
- Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). (2015).** Estudio para actualización de antecedentes técnicos para desarrollar la norma secundaria de calidad para la protección de las aguas continentales en la cuenca del río Aconcagua, Región de Valparaíso. Chile.
- Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile (EULA). (2015).** Estudio de Línea Base Limnológica y calidad de aguas Cuenca río Aconcagua.
- Fisher, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H., (1979).** Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic, New York.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2015).** Boletín nacional de análisis de riesgos agroclimáticos para las principales especies frutales y cultivos, y la ganadería. Febrero 2015. Región de Valparaíso.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014).** Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad.
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile (2016).** Diario Oficial de la República de Chile N° 41.451. Ministerio del Medio Ambiente. Establece primer programa de regulación ambiental, 2016 - 2017, Res. Ex. N° 177, Santiago, Chile, 10 de marzo de 2016, Cuerpo I-14 a I-17.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2016).** Tablas públicas. Tablas públicas de Planes y Normas. Tabla pública de planes y normas del medio hídrico, marzo de 2016.
- Leonard, B. P. (1979).** A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 19, 59–98.

Leonard, B. P. (1991). The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 88, 17–74

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública - ONEMI y DÍAZ LABBÉ, Fernando (ONEMI, 2015). Perspectivas de riesgo hidrometeorológico para Chile durante lo que resta de primavera e inicio de verano, conforme a la evolución del sistema océano-atmósfera del pacífico ecuatorial. Santiago, Chile.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (1994). Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Quinta edición 1994.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2011). Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I, Hidrología – De la medición a la información hidrológica. Sexta edición 2011.