



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Tesina presentada para obtener el grado académico de
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

“Modelación Hidrodinámica en el Tramo Inferior del Río Atuel”

Autor: Ricardo Gastón Buss

Director: Dr. Pablo F. Dornes

Santa Rosa, La Pampa, Argentina

2015

ÍNDICE

PREFACIO.....	1
RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
1.- INTRODUCCIÓN.....	4
2.- OBJETIVOS.....	7
3.- METODOLOGÍA	8
3.1.- Caracterización del área de estudio.....	8
3.1.1.- Clima	9
3.1.2.- Geomorfología y Edafología.....	12
3.1.3.- Hidrología e Hidrogeología	12
3.2.- Modelación hidrodinámica	14
3.2.1.- Modelo matemático HEC-RAS.....	14
3.2.2.- Información utilizada	15
3.2.3.- Estrategias de Calibración y ajuste del modelo	21
3.2.4.- Estrategias de Validación	23
4.- RESULTADOS	24
4.1- Escenarios de Calibración	24
4.1.1.- Calibración del Tramo Encauzado: “ <i>Carmensa – Puesto Ugalde</i> ”	24
4.1.2.- Calibración del Tramo Encauzado con Bañados: “ <i>Puesto Ugalde – La Puntilla</i> ”	28
4.2.- Escenarios de Validación.....	31
4.2.1.- Esgurrimiento Continuo e Intermitente.....	31
4.3.- Escenarios de Simulación.....	33
5.- CONCLUSIONES.....	38
6.- BIBLIOGRAFÍA.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Ubicación del área de estudio.	8
Figura 3.2. Tramo Inferior del Río Atuel desde la estación de Carmensa (Mendoza) hasta la estación de La Puntilla (La Pampa).	9
Figura 3.3. Precipitaciones medias mensuales (mm). Santa Isabel, La Pampa (1932-2014). (Administración Provincial del Agua, Provincia de La Pampa).	10
Figura 3.4. Precipitaciones anuales para la localidad de Santa Isabel, La Pampa (1932-2014). Promedio: 375 mm. (Administración Provincial del Agua, Provincia de La Pampa).	11
Figura 3.5. Caudales medios anuales para las estaciones de La Angostura (cuenca alta) y Carmensa (cuenca inferior) para el período 1985-2012.	13
Figura 3.6. Caudales medios mensuales. La Angostura (Mza), Carmensa (Mza) y Pto. Ugalde (LP) (1985-2000).	13
Figura 3.7. Imágenes representativas del Tramo Inferior del Río Atuel: Tramo Encauzado en Puesto Ugalde (La Pampa) sin escurrimiento, y Tramo Encauzado con Bañados con escurrimiento.	16
Figura 3.8. Perfil longitudinal del Tramo Inferior del Río Atuel comprendido entre las estaciones de aforo de Carmensa (Mendoza) y La Puntilla (La Pampa).	16
Figura 3.9. Perfil longitudinal del Tramo Encauzado con Bañados comprendido entre las estaciones de aforo de Puesto Ugalde y La Puntilla.	17
Figura 3.10. Perfiles transversales topobatimétricos de las estaciones de Carmensa (1), Puesto Ugalde (3) y uno de los perfiles interpolados del centro del Tramo Encauzado (2).	18
Figura 3.11. Perfiles transversales topobatimétricos del Tramo Encauzado con Bañados: estaciones de Puesto Ugalde (1), La Puntilla (7) y un conjunto de perfiles interpolados del propio tramo con la representación de bañados (2, 3, 4, 5, 6).	19
Figura 3.12. Períodos de registro de información hidrométrica de las estaciones de control. Disponibilidad de caudales diarios y aforos puntuales con secuencia mensual (1980-2015).	20
Figura 4.1. Caudales diarios observados en las estaciones de Carmensa (Mendoza) y Puesto Ugalde (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Altos (01/05/1998 - 31/07/1998).	24
Figura 4.2. Caudales observados y simulados en la estación de <i>Puesto Ugalde</i> . Pérdidas del 20%. Índice de Nash-Sutcliffe: $E=0,87$. Escenario de calibración de Caudales Altos (01/05/1998 - 31/07/1998).	25
Figura 4.3. Caudales diarios observados en las estaciones de Carmensa (Mendoza) y Puesto Ugalde (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Variables (01/07/1993 - 30/09/1993).	26

Figura 4.4. Caudales observados y simulados en la estación de <i>Puesto Ugalde</i> . Pérdidas del 20%. Índice de Nash-Sutcliffe: E=0,77. Escenario de calibración de Caudales Variables (01/07/1993 - 30/09/1993).	26
Figura 4.5. Caudales diarios observados en las estaciones de Carmensa (Mendoza) y Puesto Ugalde (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Bajos (01/05/1999 - 31/07/1999).	27
Figura 4.6. Caudales observados y simulados en la estación de <i>Puesto Ugalde</i> . Pérdidas del 15%. Índice de Nash-Sutcliffe: E=0,98. Escenario de calibración de Caudales Variables (01/05/1999 - 31/07/1999).	27
Figura 4.7. Caudales diarios observados en la estación de Puesto Ugalde (La Pampa) y Aforos puntuales en la estación de La Puntilla (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Altos (01/02/1998 - 31/07/1998).	28
Figura 4.8. Caudales observados y simulados en la estación de <i>La Puntilla</i> . Pérdidas del 10%. Escenario de calibración de Caudales Altos (01/02/1998 - 31/07/1998).	29
Figura 4.9. Caudales diarios observados en la estación de Puesto Ugalde (La Pampa) y Aforos puntuales en la estación de La Puntilla (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Bajos (01/05/1999 - 30/09/1999).	30
Figura 4.10. Caudales observados y simulados en la estación de <i>La Puntilla</i> . Pérdidas del 10%. Escenario de calibración de Caudales Altos (01/05/1999 - 30/09/1999).	30
Figura 4.11. Período de Validación con escurrimientos continuos. Valores de caudales observados en Carmensa, y caudales observados y simulados en La Puntilla. (Período 01/11/2000 - 31/10/2002).	32
Figura 4.12. Período de Validación con escurrimientos intermitentes. Valores de caudales observados en Carmensa, y caudales observados y simulados en La Puntilla. (Período 01/04/2009 - 31/10/2009).	32
Figura 4.13. Escenario hipotético de caudal fluvio-ecológico planteado en su ingreso a La Pampa (Puesto Ugalde) según condiciones de borde definidas en Carmensa y su respuesta aguas abajo (La Puntilla).	33
Figura 4.14. Sección transversal de la estación de Puesto Ugalde y nivel de agua para el escurrimiento simulado. Caudal Máximo: 17,70 m ³ /s (01-julio).	35
Figura 4.15. Sección transversal de la estación de Puesto Ugalde y nivel de agua para el escurrimiento simulado. Caudal Mínimo: 4,70 m ³ /s (01-noviembre).	35
Figura 4.16. Sección transversal de la estación de La Puntilla y niveles de agua para el escurrimiento simulado. Caudal Máximo: 15,23 m ³ /s (03-julio).	36
Figura 4.17. Sección transversal de la estación de La Puntilla y niveles de agua para el escurrimiento simulado. Caudal Mínimo: 4,09 m ³ /s (06-noviembre).	36
Figura 4.18. Sección transversal teórica representativa del área de bañados y los respectivos niveles máximos (1) y mínimos (2) de agua para el escurrimiento simulado.	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Valores del Coeficiente de Rugosidad de Manning (n) según las características del sustrato del cauce natural y su morfología. (Chow., 1994)	20
Tabla 3.2.- Caracterización de los escenarios seleccionados para la calibración del modelo para el Tramo Inferior del Río Atuel según la magnitud de los caudales observados y las pérdidas en escurrimiento (%).	22
Tabla 3.3. Valores referenciales del Índice de Nash-Sutcliffe. (Moriasi et al., 2007).	22
Tabla 4.1.- Valores finales del Coeficiente de Rugosidad de Manning (n) y Pérdidas en Escurrimiento (%) para cada tramo considerado en la Calibración.	31
Tabla 4.2.- Resultados obtenidos en la simulación del régimen de caudal fluvio-ecológico para el Tramo Inferior del Río Atuel. Estaciones de Puesto Ugalde y La Puntilla con sus escenarios máximos y mínimos.	34

PREFACIO

“Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución académica”.

Agradecimientos

El agradecimiento es para todo el conjunto de personas que ha colaborado en mi formación humana y profesional, acompañando y siendo parte de esta etapa. En particular, a mi Director, Dr. Pablo Dornes, por su guía en el desarrollo del presente trabajo, y a familiares y amigos por brindar su constante apoyo.

30 de octubre de 2015

Buss, Ricardo Gastón

Departamento de Recursos Naturales

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad Nacional de La Pampa

RESUMEN

La modelación hidrodinámica tiene como fin la caracterización del comportamiento hidráulico a través de las descripciones y predicciones hidrológicas representativas de los procesos para una correcta gestión del recurso hídrico. La simulación hidráulica en ambientes semiáridos y con regímenes hidrológicos modificados por acción antrópica constituye una herramienta fundamental por la escasez del recurso. El estudio se llevó a cabo en el Tramo Inferior del Río Atuel, comprendido entre las estaciones de Carmensa (Mendoza) y La Puntilla (La Pampa), donde el río presenta una condición de régimen modificado con atenuación de caudales. Los escurrimientos son de carácter alóctono, y es por ello que los caudales provenientes de la cuenca media y alta son los que definen la condición de borde. El cauce se desarrolla en una planicie aluvial caracterizada por su bajo gradiente hidráulico, con características de encauzamiento regular, con alternancia de pequeños bañados en sectores específicos.

El objetivo es aplicar el modelo de simulación unidimensional HEC-RAS para simular tirantes de agua, velocidades y caudales circulantes en distintas secciones transversales del río, y evaluar condiciones hidráulicas para escenarios específicos de escurrimiento, como lo son los escenarios de caudal fluvio-ecológico.

Se evidencia que la parametrización obtenida del modelo describe de manera eficiente el comportamiento de los escurrimientos en el tramo estudiado ante diversas condiciones de flujo. El modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS es aplicable a ríos de regiones semiáridas de baja pendiente con características de encauzamiento definido o de bañados intermedios, ya que permite representar adecuadamente la distribución de caudales en los diversos tramos estudiados. En particular, para el escenario de caudal fluvio-ecológico analizado, se demuestra la condición de encauzamiento a lo largo del tramo, favoreciendo el restablecimiento ecológico tal cual se plantea en dicho escenario. Se proporciona así una herramienta para futuros estudios, permitiendo el análisis de diversas situaciones a partir de un modelo con parámetros calibrados para fines específicos.

Palabras Clave: Atuel, Modelación Hidrodinámica, HEC-RAS, Calibración, Validación.

ABSTRACT

The object of hydrodynamic modeling is to characterizing the hydraulic behavior through descriptions and representative hydrological forecasting processes for a proper management of water resources. Hydraulic simulation in semiarid environments with hydrological regimes modified by human action is an essential tool for the scarcity of resource. The study was conducted in the lower reaches of the Rio Atuel, between the stations of Carmensa (Mendoza) and La Puntilla (La Pampa), where the river presents a modified regime condition of flow attenuation. The runoffs are of an allochthonous character, and that is why the flows from the middle and upper basin are those that define the boundary condition. The channel is set in a floodplain, characterized by a low hydraulic gradient, with regular features channeling, with a small alternating in specific sectors of bathed.

The object is to apply the one-dimensional simulation model HEC-RAS to simulate water depths, speeds and circulating flows in different cross-sections the river, and evaluate specific hydraulic conditions for runoff scenes, like the stages of fluvial-ecological flow.

Is evident that the parameters obtained by the model describes efficiently the behavior of the runoff in the section under study, with all of the flow conditions watched. The hydraulic one-dimensional model HEC-RAS is applicable to rivers of low slope in semiarid regions with defined characteristics or intermediate bathed channeling, because it allow an adequately representation of the distribution flow rates in the various sections studied. In particular, to the scenes of fluvial-ecological flow analyzed, is showed her condition of channeling along the section, favoring ecological restoration as it arises in this stage. So this provides a tool for future studies, allowing the analysis of a big number of situations starting of a model with calibrated parameters for specifics purposes.

Key Words: Atuel, Hydrodynamic Modeling, HEC-RAS, Calibration, Validation.

1.- INTRODUCCIÓN

La obtención de descripciones y predicciones hidrológicas representativas es un tema esencial para una adecuada comprensión de los procesos y gestión del recurso hídrico. Particularmente, la simulación hidrológica en ambientes semiáridos y con regímenes hidrológicos modificados por acción antrópica constituye una herramienta fundamental por la escasez del recurso. El tramo inferior de la cuenca del río Atuel se desarrolla en la región semiárida que abarca el noroeste de la provincia de La Pampa y sureste de Mendoza, dentro de una zona de transición entre los regímenes de precipitación subhúmedo-seco y árido, donde se presenta un marcado déficit hídrico a lo largo del año (Cano et al., 1980). Los ríos de zonas áridas y semiáridas dependen generalmente de los escurrimientos provenientes de las partes altas de las cuencas, lo que les confiere un comportamiento hidrológico característico.

Particularmente, el régimen de escurrimientos presenta una dinámica y variabilidad definida por la fusión de nieve en la alta cuenca, con valores de caudales máximos en los meses estivales y mínimos en el período invernal. Dicha variabilidad junto con la necesidad de garantizar el abastecimiento para los diversos usos planteados en la cuenca media, resultó en la construcción de obras de regulación y uso, que modifican el régimen hidrológico del río Atuel en su tramo medio e inferior. Tal modificación se evidencia a partir de un régimen invertido de los caudales característicos para el área. Se pasa de una dinámica estrictamente nival con escurrimientos importantes, a la presencia de caudales menores e intermitentes con valores mínimos o nulos en el período estival, y máximos en el período invernal. Esta condición se da en respuesta fundamentalmente a excedentes del agua de irrigación (Dornes, 2013).

Así, el tramo inferior, dependiente de los mencionados excedentes del área de almacenamiento e irrigación, presenta un escurrimiento de carácter modificado y alóctono. La condición de *alóctono* se ha verificado a través de diversos estudios donde no se ha observado una influencia directa y marcada de las precipitaciones locales sobre los caudales diarios para la zona en estudio (Buss et al., 2013). Del mismo modo, tampoco se ha evidenciado un comportamiento efluente del río en los valles aluviales (Dornes et al., 2012), por lo cual se asume que no existen aportes laterales al escurrimiento en el tramo estudiado.

La alteración del régimen hidrológico, debido al uso “aguas arriba” se evidencia fundamentalmente a partir de la drástica atenuación de los caudales circulantes y en la condición de intermitencia de los escurrimientos, que ha afectado a la región tanto en lo productivo como en lo social. Es por ello, que dicha realidad debe ser abordada a partir de la concurrencia de diversas disciplinas. En este sentido, estudios de carácter integrador como los llevados a cabo por la Universidad Nacional de La Pampa a instancias del Gobierno de la Provincia de La Pampa (UNLPam, 2005 y 2012) contribuyeron a la descripción y evaluación de la situación desde una amplia perspectiva. En ellos se determinaron los escenarios para la definición de un caudal fluvio-ecológico y la cuantificación del daño ambiental producto de la interrupción de los escurrimientos, abarcando estudios desde perspectivas sociales y antropológicas, productivas y económicas, ecológica-ambiental, geológicas e hidrológicas. Además, estudios focalizados a la descripción de

los procesos hidrológicos a partir de análisis hidráulicos, hidroquímicos e isotópicos, permitieron conocer las características del sistema hidrológico. Fundamentalmente, se ha trabajado en el detalle del comportamiento de los escurrimientos, el tipo y dinámica de la interacción entre agua superficial y subterránea y la cuantificación de las pérdidas por infiltración en el tramo encausado (Dornes et al., 2011, 2012, 2013 y 2015; Buss et al., 2013).

Como aporte y complemento a estos antecedentes, la utilización de modelos hidrológicos e hidráulicos, permite simular y describir la dinámica de un sistema hídrico a través del planteo de diversos escenarios de escurrimiento. Es posible analizar las respuestas de dichos escurrimientos en caudal, velocidad de flujo, tirante de agua, área de inundación, etcétera. Se constituye así una valiosa herramienta no sólo para la comprensión de los procesos físicos, sino también para la adecuada gestión del recurso hídrico, decisiones en proyectos de intervención sobre un cauce y el análisis de los efectos o impactos que se pudieran generar.

La evaluación de la respuesta hidrológica en un sistema es típicamente efectuada mediante la aplicación de modelos. Un modelo es una representación simplificada del sistema real. El mismo puede ser utilizado para reconstruir eventos pasados y predecir los futuros con sus debidos comportamientos (Puricelli, 2003). En general, el uso de modelos hidrológicos pretende simular fenómenos que ocurren en la realidad y que permita la predicción de escenarios futuros. Se trata de representaciones que poseen incertidumbres asociadas de distintos orígenes que resultan en diferencias entre lo representado por el modelo y la realidad. La diferenciación e identificación de las fuentes de incertidumbre facilita el proceso de calibración para que la serie de datos simulados se ajuste de manera acorde a los datos observados. Las fuentes de incertidumbre son:

- *Datos*: asociada a la calidad y densidad espacial y temporal de los datos de ingreso. Dichas observaciones usualmente son de distinta escala a la que se pretende en el modelo, por lo tanto son necesarias técnicas de escalamiento de la información.
- *Parámetros*: la existencia de parámetros conceptuales y efectivos ocasiona que sus valores no se pueden medir y no sean necesariamente representativos.
- *Estructura del modelo*: limitaciones y errores propios del modelo en una representación simplificada o no adecuada de los procesos y de la heterogeneidad espacial.

Las diferencias entre el modelo y la realidad se deben a la combinación de todas estas fuentes de incertidumbre. El proceso de calibración puede minimizar las dos primeras, pero no modifica a las limitaciones propias de la estructura del modelo. Por tal motivo es importante discriminar los efectos de cada fuente de error (Finger, 2011).

La elección del modelo es un hecho arbitrario que depende de varios factores, y son la disponibilidad de información adecuada y el objetivo que se persigue, los más determinantes. En ese contexto, dada la diversidad de modelos, se debe contemplar para su selección la posibilidad de optar entre modelos agregados o distribuidos, conceptuales o de base física, y continuos o de eventos. A su vez, dentro de estos grupos principales, existen variantes que definen modelos mixtos que muchas veces y en función de la información existente, se adaptan favorablemente a los objetivos propuestos (Beven, 2006).

En el presente caso se escogió el modelo HEC-RAS Versión 4.1 (USACE, 2002), teniendo en cuenta que es un modelo utilizado ampliamente, de acceso libre y que demuestra buen desempeño ante diversas situaciones y contextos. El modelo permite la simulación hidráulica unidimensional (1D) de canales tanto naturales como artificiales bajo condiciones de flujo permanente y no permanente, y regímenes de flujo subcrítico, crítico, supercrítico y mixto (Brunner, 2002; USACE.c, 2012), situaciones que caracterizan el régimen hidrológico del río Atuel en su cuenca inferior. Existe un antecedente de utilización de un modelo hidrodinámico en el río Atuel, entre el tramo de La Angostura (Mendoza) y Puesto Ugalde (La Pampa) sin considerar la influencia de las obras de regulación existentes. Esto hace que sea una aplicación simplificada en base a datos de caudal medio mensual y una única sección transversal trapezoidal, asumida como representativa para toda la extensión del tramo analizado, por lo que el ajuste tuvo un carácter parcial (Vives et al., 2005).

Considerando el carácter alóctono de los escurrimientos del río Atuel en su tramo inferior, la aplicación de un modelo hidrodinámico unidimensional, a partir de secciones reales del río y con caudales diarios, surge como la más adecuada para representar los principales procesos descritos en los estudios realizados en la cuenca. La modelación hidrodinámica basada en observaciones de campo redundará en la posibilidad de plantear esquemas de funcionamiento del río para la verificación de diversos escenarios, tanto teóricos como reales, y los respectivos comportamientos hidrodinámicos que puedan presentar en cada caso.

La determinación de tirantes de agua, caudal y velocidad en distintas secciones constituye una valiosa herramienta que permitirá en etapas posteriores, evaluar el carácter efluente/influente del río, pérdidas por infiltración, la activación y/o desactivación de la planicie de inundación, delimitación de líneas de ribera e inundación, definición de áreas de riesgo hídrico.

2.- OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio fue realizar la modelación hidrodinámica del Tramo Inferior del Río Atuel.

En particular se propuso:

- a).**- Aplicar un modelo de simulación unidimensional a los efectos de simular tirantes de agua, velocidades y caudales circulantes en distintas secciones transversales del río.
- b).**- Evaluar las condiciones hidráulicas para diferentes escenarios de escurrimiento, entre ellos uno de los planteados en el estudio de la determinación de un caudal fluvio-ecológico para el restablecimiento del sistema ecológico del río Atuel, utilizando series de datos de caudales diarios y secciones transversales reales.

Los objetivos planteados, entre ellos la selección y aplicación de un modelo hidrodinámico que simule la escorrentía en cauces asumiendo un flujo unidimensional, se fundamentan en el hecho que los caudales circulantes en el tramo analizado son principalmente alóctonos, aunque el carácter influente/efluente del río depende de los tirantes de agua y caudales circulantes, y de la condición antecedente de saturación del sistema.

3.- METODOLOGÍA

3.1.- Caracterización del área de estudio

El área de estudio comprende el Tramo Inferior de la cuenca del Río Atuel, ubicado en el sector sureste de la provincia de Mendoza con continuidad en el noroeste de La Pampa donde cumple el rol de ser el último afluente del Río Salado (Figura 3.1).



Figura 3.2. Ubicación del área de estudio.

Abarca los departamentos de Chalileo y Chical C6 (La Pampa), y Alvear (Mendoza), con localidades de importancia como Santa Isabel y Carmensa respectivamente, unidas por la Ruta Nacional N° 143. El Tramo inferior del Río Atuel (Figura 3.2) se caracteriza por tener una baja pendiente y conformar una serie de cauces en forma de abanico de los cuales sólo se mantiene activo el más occidental de ellos, llamado Arroyo de la Barda. La delimitación del área de estudio está dada por las estaciones de Aforo de Carmensa, Puesto Ugalde y La Puntilla que cubren una longitud aproximada de 210 km de cauce. Se trata de un tramo con características similares a lo largo de su recorrido en cuanto al encauzamiento, y sectores en la provincia de La Pampa donde dicho encauzamiento se hace difuso conformando bañados de amplia extensión.



Figura 3.2. Tramo Inferior del Río Atuel desde la estación de Carmensa (Mendoza) hasta la estación de La Puntilla (La Pampa).

El Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (Cano et al., 1980) incluye a esta zona en la región central de la provincia representada por la subregión de Llanuras Aluviales del río Atuel y Salado y comprende dentro de los recursos hídricos de La Pampa, la cuenca hídrica de los ríos Atuel y Salado-Chadileuvú-Curacó (Hernández Bocquet, 2009) caracterizada por ser una amplia llanura con sedimentos aluviales y arenosos. Las actividades locales se relacionan a la ganadería de cría extensiva dada la condición de aridez de la región, o actividades puntuales de regadío a baja escala (sobre todo en cercanías a la localidad de Carmensa, provincia de Mendoza).

3.1.1.- Clima

El clima es semiárido, con una temperatura media anual de 15,5 °C y la pluviometría anual media es de 375 mm (1932-2014) según datos de la Administración Provincial del Agua. Las distribuciones temporales de las precipitaciones son muy variables, aunque se concentran

fundamentalmente en los meses de verano. Los vientos predominantes son en orden decreciente: N-S y NE (Cano et al., 1980).

3.1.1.1.- Precipitaciones

Las precipitaciones en la región tienen un carácter irregular y escaso lo que remarca la condición de clima semiárido con un módulo pluviométrico de 375 mm (1932-2014) y distribuciones temporales muy variables. La estacionalidad de las lluvias, muestra una concentración de las precipitaciones en los meses estivales e inviernos con valores escasos (Figura 3.3). A lo largo del tiempo se pueden observar diferentes tendencias que marcan ciclos húmedos o secos para la región en relación al valor de precipitación media anual (Figura 3.4). Así, por ejemplo, se observa un período húmedo hasta comienzos de la década del 2000 para luego marcar un descenso en los totales anuales.

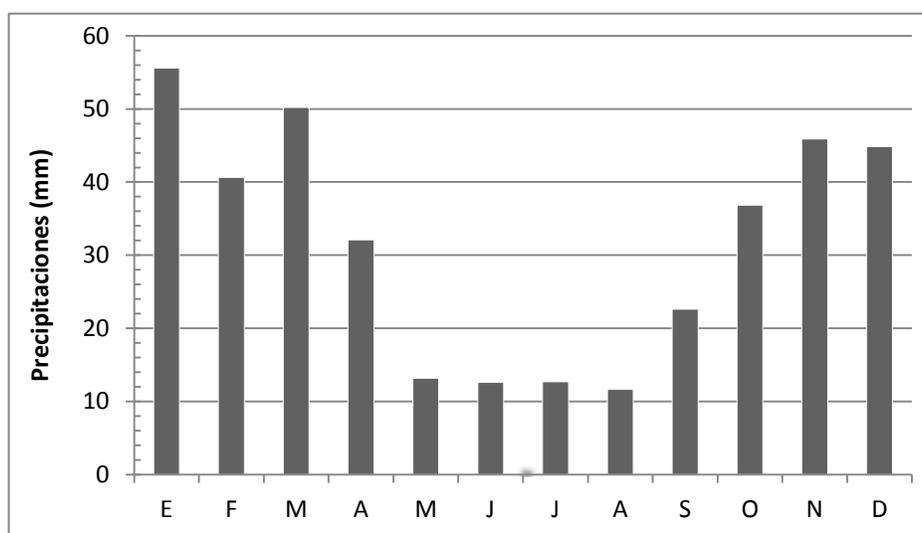


Figura 3.3. Precipitaciones medias mensuales (mm). Santa Isabel, La Pampa (1932-2014). (Administración Provincial del Agua, Provincia de La Pampa).

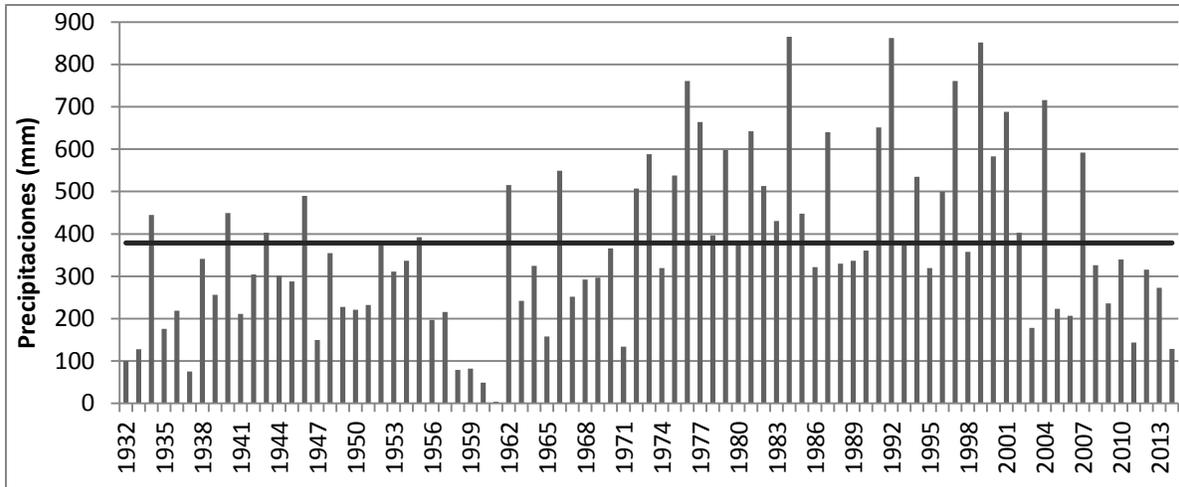


Figura 3.4. Precipitaciones anuales para la localidad de Santa Isabel, La Pampa (1932-2014). Promedio: 375 mm. (Administración Provincial del Agua, Provincia de La Pampa).

En relación a los aportes a los escurrimientos del río por parte de las precipitaciones, existen antecedentes que demuestran que no existe un vínculo directo entre estas dos variables salvo que el río esté bajo situaciones de escurrimiento activo y/o condiciones antecedentes altas de saturación del cauce, o sea con un breve período sin escurrimientos (subálveo saturado), y para eventos de precipitación sucesivos de gran magnitud e intensidad. El efecto, en estos casos, es sólo a escala diaria respondiendo a eventos puntuales y no se visualiza a nivel mensual (Buss et al., 2013). Es importante resaltar que las mayores precipitaciones ocurren principalmente en la época estival, período en el cual típicamente no se verifican escurrimientos.

3.1.1.2.- Temperatura y Evapotranspiración

Según las caracterizaciones de los recursos naturales y condiciones climáticas (Cano et al., 1980) se describe a la temperatura media mensual para la localidad de Santa Isabel (La Pampa) de 15,5°C y 15,8°C, con máximas y mínimas absolutas de 42,4°C y -14,4°C respectivamente (período 1951-1960). Respecto a los vientos, las direcciones predominantes son en orden decreciente: N, S y NE. Esto pone en evidencia los permanentes choques frontales de masas de aire de importancia, provenientes del N-NE y S-SW que afectan a toda la provincia, siendo ésta, la causa más destacada de las precipitaciones en La Pampa. La velocidad promedio del viento en la región oscila entre 8-10 km/h.

La evapotranspiración potencial (ET_0) abarca las variables de evaporación y transpiración vegetal que definirán las pérdidas de agua según las condiciones dadas. Así, para la zona se citaron valores de ET_0 anual próximos a 1300mm (Vives et al., 2005). Esta condición asociada a la precipitación media anual (375mm) y el balance hídrico, resulta en un déficit hídrico que oscila entre 850-900mm y ubica al tramo inferior del Atuel en la región semiárida que atraviesa la franja centro-occidental de provincia de La Pampa, entre la región sub-húmeda al noreste y la región árida hacia el suroeste.

3.1.2.- Geomorfología y Edafología

Desde sus nacientes la cuenca atraviesa diversos dominios marcando la existencia de subcuencas “alta”, “media” e “inferior”. En la cuenca alta lo hace a través de montañas y serranías de la Cordillera principal donde la red hidrográfica está controlada estructuralmente por fallas y fracturas con una red de drenaje densa. La cuenca media se caracteriza por un sistema fluvial de piedemonte con pérdida de pendiente y capacidad de carga con la correspondiente formación de abanicos aluviales. El área de estudio en la cuenca inferior del río Atuel se halla caracterizado por un relleno sedimentario que conforma un ambiente de llanura de acumulación fluvial con una orientación hacia el sud-este, con un relieve dominado por la presencia de médanos longitudinales y mantos de arenas que generan áreas inundables (bañados y lagunas) hasta su encuentro con el Río Desaguadero-Salado (Zárate, et al.; 2005).

3.1.3.- Hidrología e Hidrogeología

El tramo inferior del río Atuel está representado por una serie de brazos que se abren a lo largo de la llanura de acumulación fluvial. Las condiciones de escurrimiento han llevado a que el Arroyo de La Barda sea el único de los brazos que se mantenga activo por donde el río escurre e ingresa en territorio pampeano. Presenta características de cauce bien definido en su tramo desde Carmensa hasta Puesto Ugalde a partir de donde intercala con bañados que se forman aguas arriba de la estación de aforo de La Puntilla. Luego se vuelve a encauzar para terminar formando los grandes bañados del Atuel, aguas debajo de la localidad de Algarrobo del Águila.

El régimen hidrológico natural del río Atuel es fundamentalmente nival, con máximos caudales en primavera-verano. El derrame anual para la serie de 1906-2004 en la estación de aforos de La Angostura tiene un valor medio aproximado de 1110 hm^3 lo que equivale a un caudal medio diario de $35,2 \text{ m}^3/\text{s}$, con derrame máximo de 2193 hm^3 (año 82-83) y un mínimo $595,1 \text{ hm}^3$ de (año 70-71) (Vives, et al.; 2005). Se trata de una cuenca altamente intervenida en su parte media con diversos aprovechamientos de caudales, lo que genera disparidad en la oferta hídrica de los diferentes sectores de la cuenca según su ubicación. Tal situación se observa en la Figura 3.5 en donde se grafican los caudales medios anuales para estaciones representativas de la cuenca alta y de la cuenca inferior. Para el período descrito, la estación La Angostura posee un caudal medio anual de $36,9 \text{ m}^3/\text{s}$ en contraste con el módulo de Carmensa que es de $8,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Si bien la dinámica es similar respecto a los valores extremos, se evidencia una amplia intervención a través de la regulación de caudales, tanto para la generación hidroeléctrica como para el desarrollo de regadíos y usos menores.

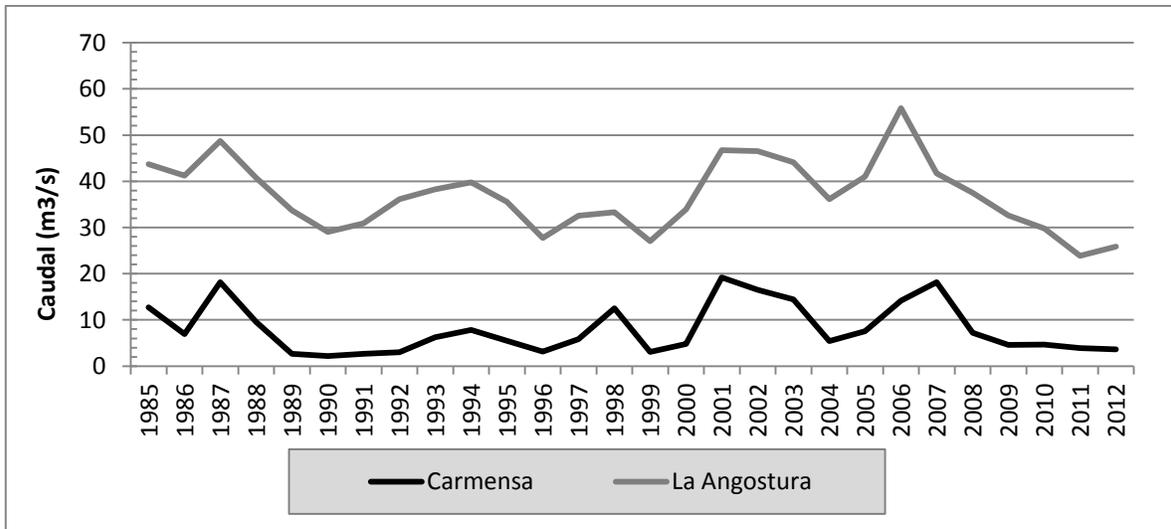


Figura 3.5. Caudales medios anuales para las estaciones de La Angostura (cuenca alta) y Carmensa (cuenca inferior) para el período 1985-2012.

La dinámica hidrológica del tramo inferior del río Atuel está altamente modificada entonces por el manejo realizado en la cuenca media de los caudales generados en la cuenca alta. En períodos ricos, los excedentes no aprovechables le dan continuidad a los escurrimientos que alcanzan al tramo inferior donde ingresan a la provincia de La Pampa, en tanto que para períodos de caudales medios o bajos, la serie tiene otro comportamiento caracterizado por un régimen hidrológico de carácter intermitente, con máximos invernales y mínimos o ausencia de escurrimiento en la época estival. Se observa entonces un régimen hídrico reducido e invertido entre los escurrimientos de la cuenca alta y cuenca baja (Figura 3.6). A su vez para el tramo comprendido entre Carmensa y Puesto Ugalde se definieron pérdidas que oscilan entre el 12% y el 35% según se trate de escurrimientos continuos con humedad antecedente o pulsos esporádicos con un nivel bajo de saturación del cauce (Dornes, 2013). Esta consideración se visualiza en la diferencia entre ambas curvas de caudales medios mensuales.

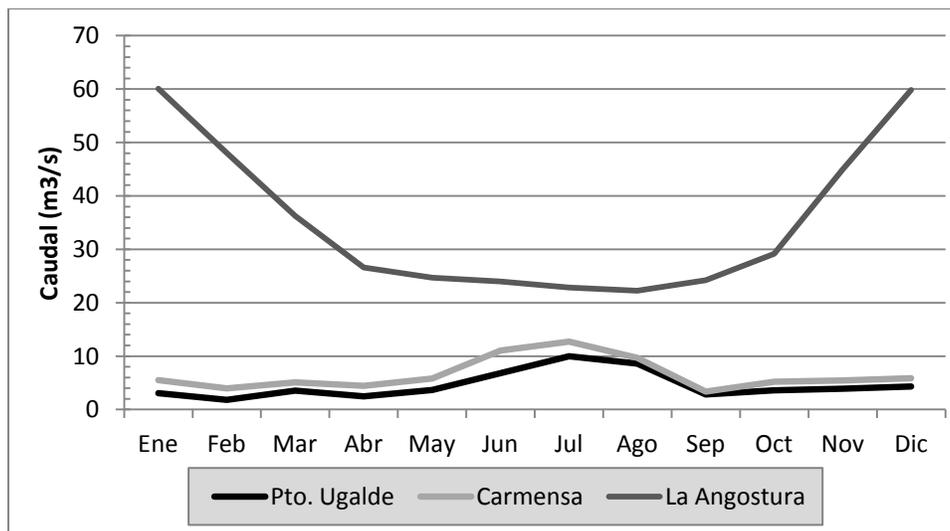


Figura 3.6. Caudales medios mensuales. La Angostura (Mza), Carmensa (Mza) y Pto. Ugalde (LP) (1985-2000).

La condición de régimen modificado e irregular, constituye además una variable adicional al comportamiento hidrológico local según presente diferentes caudales tanto en su magnitud como en su continuidad y permanencia en el tiempo. La dinámica de los escurrimientos determina la condición de humedad del cauce y sus alrededores por lo que dicha alteración produce cambios también en la interacción entre el escurrimiento superficial y el agua subterránea, afectando al sistema y sus características. Esta condición influye y se relaciona directamente con diferentes procesos como las pérdidas en cauce, recarga subterránea en las llanuras aluviales, y generación de escorrentía por lluvias locales.

3.2.- Modelación hidrodinámica

El objetivo de la modelación hidrodinámica es la obtención en forma integrada de caudales y alturas de agua a lo largo del sistema hidrológico considerado, y la caracterización del comportamiento hídrico ante diferentes escenarios de escurrimiento. El alcance espacial del modelo matemático hidrodinámico implementado comprende al Río Atuel desde la estación de aforos de Carmensa (Mendoza) hasta el ingreso de los escurrimientos a la provincia de La Pampa (estación Puesto Ugalde) y su continuidad hasta la estación de La Puntilla.

La existencia de características distintas en los tramos considerados del río hizo necesario que el estudio fuera dividido en:

- Tramo Encauzado (desde Carmensa hasta Puesto Ugalde)
- Tramo Encauzado con Bañados (desde Puesto Ugalde hasta La Puntilla)

Se simuló caudales medios diarios en el tramo inferior del río Atuel. La representación espacial en el modelo se planteó a partir de la definición de secciones reales que muestran las condiciones de encauzamiento y de bañados presentes en el tramo. Se consideraron distintos escenarios de escurrimientos para representar diferentes condiciones y comportamientos hidrológicos e hidrodinámicos. En particular a partir de los caudales observados en Carmensa se simuló los caudales en Puesto Ugalde y la Puntilla donde a partir de su comparación con los valores observados se determinó la capacidad del modelo en representar la dinámica hidrológica. La simulación se planteó a partir de un proceso de calibración donde se ajustaron parámetros no observados y de validación bajo distintos escenarios.

3.2.1.- Modelo matemático HEC-RAS

La modelación del río Atuel se realizó mediante la utilización del programa HEC-RAS 4.1 (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos. La selección del modelo se basó en su amplia versatilidad en la representación de condiciones del cauce y del escurrimiento en canales naturales y artificiales, en su amplio uso y reactualización, y por tratarse de un programa de libre acceso de dominio público. El modelo HEC-RAS plantea una solución numérica de la ecuación diferencial del flujo gradualmente variado en cauces de secciones no prismáticas mediante la implementación del método de pasos estándar (USACE, 2002). El modelo HEC-RAS resuelve mediante una aproximación numérica de diferencias finitas implícita, las ecuaciones de Saint Venant en una

dimensión, que comprende un sistema en derivadas parciales constituido por la ecuación de continuidad y la de conservación de la cantidad de movimiento. HEC-RAS es un paquete integrado de programas de análisis hidráulico unidimensional (1D), en el que el usuario interactúa con el sistema a través de una interfaz gráfica. El sistema es capaz de realizar el cálculo del perfil de flujo en régimen estacionario y no estacionario, e incluye módulos elementales para realizar varios cálculos de diseño hidráulico.

Para determinar la elevación de la superficie de agua en una sección transversal, se procede a calcular en forma iterativa las ecuaciones de Energía (3.1) y de Pérdida de Energía (3.2).

- Ecuación de Energía:

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 \times V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 \times V_1^2}{2g} + h_e$$

Ecuación 3.1

Donde y_1, y_2 es la profundidad del agua en la Sección Transversal; z_1, z_2 es la elevación del lecho del tramo; V_1, V_2 son las velocidades promedio (Q total / A total); α_1, α_2 son los coeficientes de velocidad; g es la aceleración de la gravedad; y h_e es la Pérdida principal de Energía.

La pérdida principal de energía (h_e) entre dos secciones transversales está relacionada con pérdidas por fricción y pérdidas por contracción y expansión. La ecuación para la pérdida principal de energía se aprecia en la ecuación 3.2.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left[\frac{\alpha_2 \times V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \times V_1^2}{2g} \right]$$

Ecuación 3.2

Donde L es la Longitud del tramo, \bar{S}_f es la Pendiente de fricción entre dos secciones, y C es el Coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

3.2.2.- Información utilizada

La información utilizada para la construcción del modelo hidrodinámico, en particular la representación de la heterogeneidad espacial fue:

- a)- Caracterización morfológica del cauce del río (Figura 3.7).
- b)- Visitas de campo y relevamientos topobatimétricos del cauce en las secciones consideradas.

La representación del tramo del río Atuel analizado, comprende una longitud total de 210 km, que puede ser dividida en tramos de distinta características en función de la morfología del cauce (Figura 3.7 y Figura 3.8) y los respectivos comportamientos de los escurrimientos.



Figura 3.7. Imágenes representativas del Tramo Inferior del Río Atuel: Tramo Encauzado en Puesto Ugalde (La Pampa) sin escurrimiento, y Tramo Encauzado con Bañados con escurrimiento.

En el primer tramo de 160 km desde Carmensa hasta Puesto Ugalde, el río presenta una pendiente homogénea de 0,073% y un encauzamiento regular. A partir de Puesto Ugalde y hasta La Puntilla se observa un cambio y disminución de la pendiente media del cauce (0,045%) con sectores que presentan pendientes localmente menores lo que hace que el encauzamiento sea más difuso dando lugar a una alternancia de bañados. La Figura 3.9 muestra el perfil longitudinal del tramo Encauzado con Bañados que fue incorporado en el modelo.

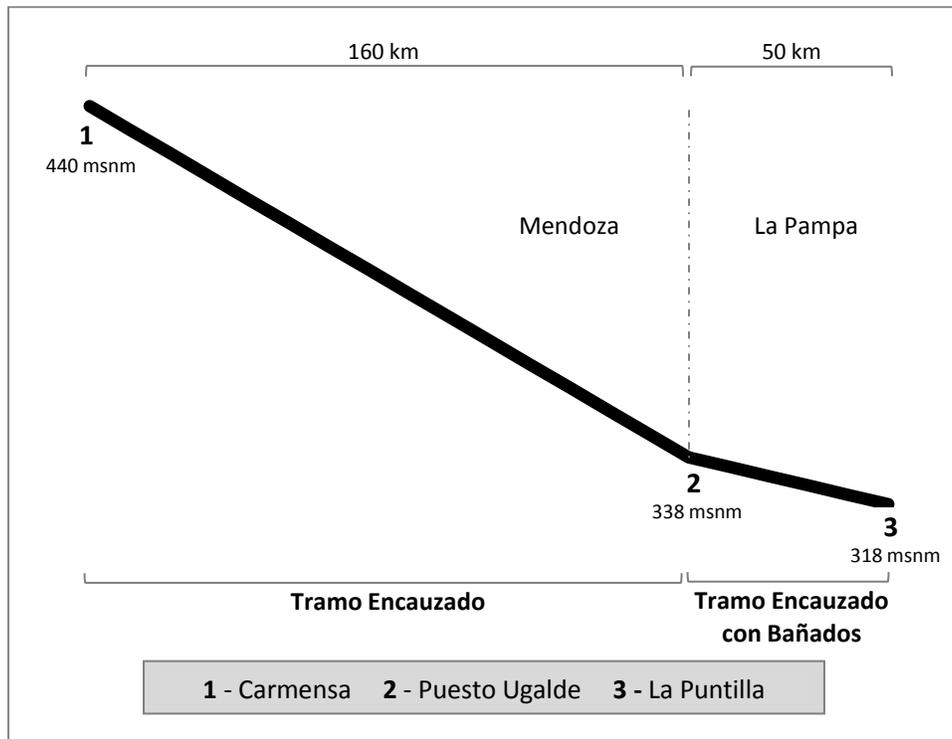


Figura 3.8. Perfil longitudinal del Tramo Inferior del Río Atuel comprendido entre las estaciones de aforo de Carmensa (Mendoza) y La Puntilla (La Pampa).

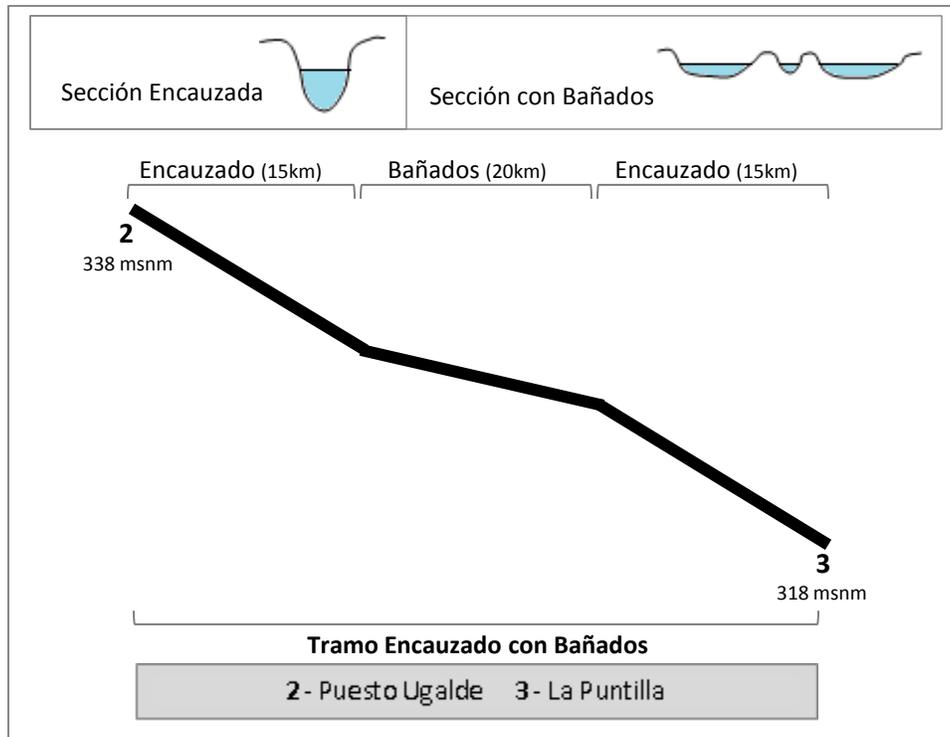


Figura 3.9. Perfil longitudinal del Tramo Encauzado con Bañados comprendido entre las estaciones de aforo de Puesto Ugalde y La Puntilla.

La incorporación de dichas características del cauce en el modelo HEC-RAS se plantea a partir de la definición de secciones transversales. Para el tramo encauzado considerando la relativa uniformidad del mismo, se tomaron en cuenta los perfiles topográficos al inicio y final de dicho tramo y se interpolaron las secciones intermedias cada 100 metros, mediante una aplicación del propio modelo (Figura 3.10). Para el último tramo, denominado Encauzado con Bañados y con una extensión de 50 km de cauce entre Puesto Ugalde y La Puntilla, se repitió el proceso de interpolación de secciones con la introducción de la representación de bañados en el centro de este tramo. De acuerdo a la interpretación del modelo digital del terreno a través de Google Earth, se plantearon *secciones teóricas* para la representación de dichos bañados en el tramo considerado, donde se observó que las mismas cuentan con un albardón central y amplias llanuras de inundación (Figura 3.11). Se logró de esta manera una representación espacial de las condiciones morfológicas que influirán en el tránsito de los escurrimientos al momento de evaluar diferentes dinámicas hidrológicas.

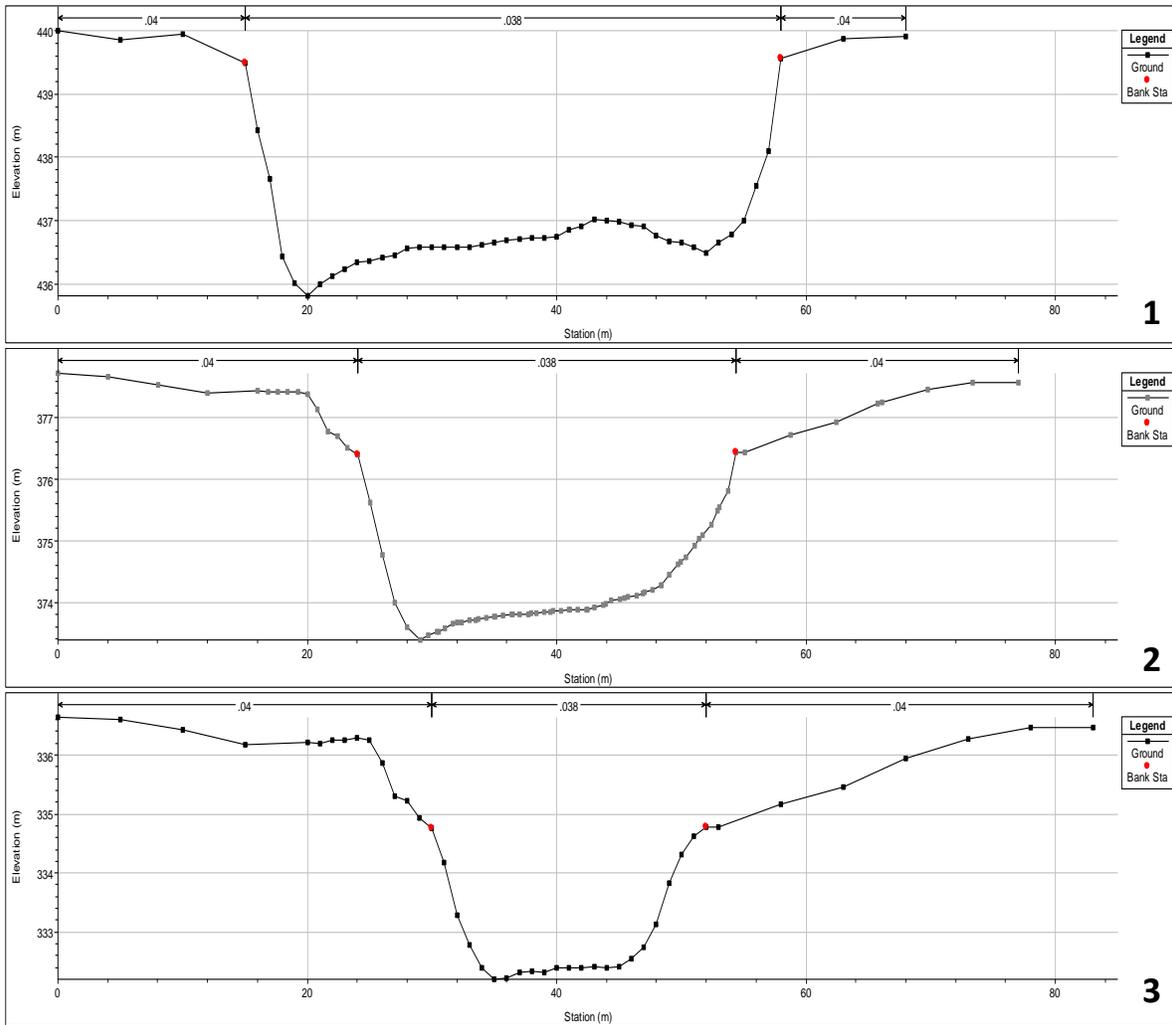


Figura 3.10. Perfiles transversales topobatimétricos de las estaciones de Carmensa (1), Puesto Ugalde (3) y uno de los perfiles interpolados del centro del Tramo Encauzado (2).

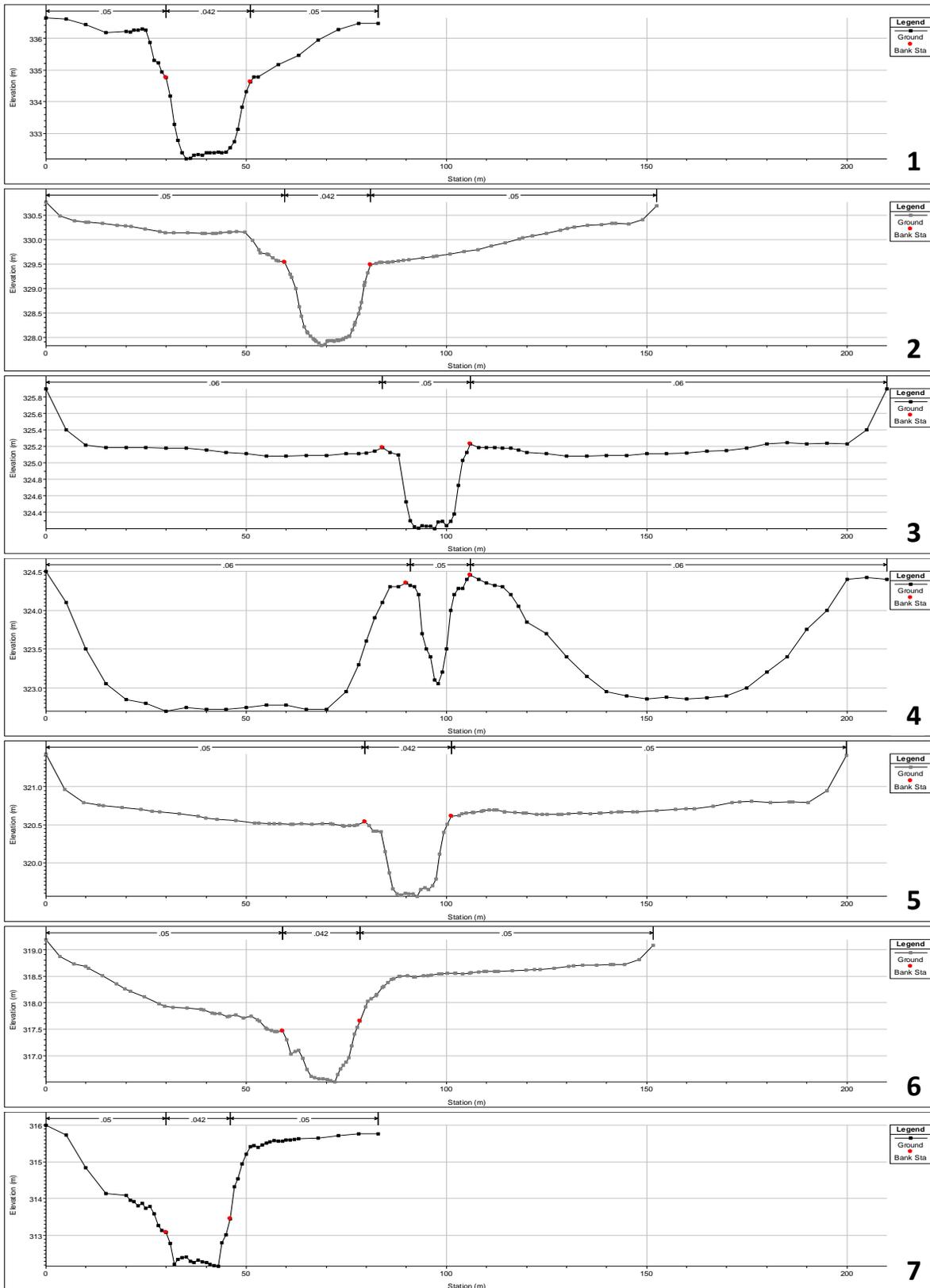


Figura 3.11. Perfiles transversales topobatimétricos del Tramo Encauzado con Bañados: estaciones de Puesto Ugalde (1), La Puntilla (7) y un conjunto de perfiles interpolados del propio tramo con la representación de bañados (2, 3, 4, 5, 6).

De esta manera, a lo largo del Tramo Inferior del río Atuel se cuenta con 3 perfiles topobatimétricos reales y sus respectivas interpolaciones para la representación total de las condiciones, cuyas longitudes transversales en cada caso fueron las necesarias para la adecuada descripción de la conducción del valle aluvial, ante condiciones normales y extremas.

En cuanto a la rugosidad del cauce, los valores adoptados fueron obtenidos de la bibliografía específica en correspondencia con las observaciones de cada lugar, tanto para el canal principal como para las planicies de inundación. Estos valores definen la resistencia al flujo de cada sustrato y serán característicos para cada sección (Tabla 3.1). La variación de los coeficientes de rugosidad se realizó para los diferentes tramos del modelo según sus características morfológicas.

Tabla 3.1.- Valores del Coeficiente de Rugosidad de Manning (n) según las características del sustrato del cauce natural y su morfología. (Chow., 1994)

Coeficiente de Rugosidad de Manning (n)	
Corrientes naturales limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lámina de agua suficiente, algo de vegetación	0,033-0,040
Corrientes naturales limpias, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	0,035-0,050
Corrientes naturales con vegetación y canales ramificados	0,050-0,080

Para seleccionar períodos de calibración se analizó la información hidrométrica correspondiente a las tres secciones definidas (Carmensa, Puesto Ugalde y La Puntilla) y sus correspondientes períodos de registros de caudales diarios o aforos (Figura 3.12). Los eventos seleccionados para cada escenario de calibración son de acuerdo a la disponibilidad de información simultánea en las distintas estaciones hidrométricas. Se escogieron así, para realizar la calibración de los diferentes tramos y distintos escenarios, períodos de 3 y 6 meses con presencia de datos de escurrimientos tanto “aguas arriba” como “aguas abajo”.

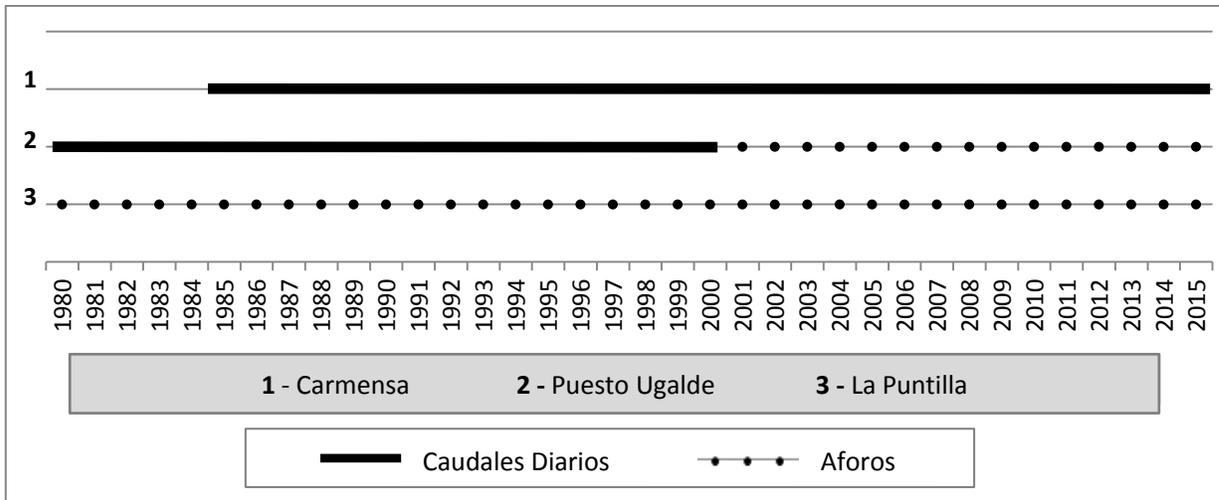


Figura 3.12. Períodos de registro de información hidrométrica de las estaciones de control. Disponibilidad de caudales diarios y aforos puntuales con secuencia mensual (1980-2015).

3.2.3.- Estrategias de Calibración y ajuste del modelo

Calibración es el procedimiento de ajuste progresivo de los parámetros empleados, con el fin de obtener la mayor concordancia entre los datos observados y los calculados por el modelo (Finger, 2011). Teniendo en cuenta que un modelo es una representación simplificada de una realidad física compleja, la calibración resulta un paso imprescindible para asignar valores a los parámetros del modelo cuya determinación no fue posible o presentan una elevada incertidumbre, constituyendo así parámetros efectivos.

Dicha calibración se lleva a cabo típicamente sobre parámetros conceptuales dependiendo de la estructura del modelo. En este caso, se calibró el modelo con el parámetro de rugosidad del cauce y del área de inundación (“n” de Manning), contemplando además la variable de las pérdidas en tránsito que presentan los escurrimientos en el tramo considerado del río Atuel. Se procedió a la calibración manual del modelo con el objetivo de minimizar una función objetivo establecido a partir de la diferencia de valores de caudal observado y simulado.

La calibración se implementó en el tramo Encauzado (Carmensa – Puesto Ugalde), y en el tramo Encauzado con Bañados (Puesto Ugalde – La Puntilla). De esta manera, se logró un ajuste dividido en tramos, en donde se verifica para cada caso, el comportamiento específico de los escurrimientos según las características del sistema hídrico. A su vez, se consideró para cada uno de los tramos, diferentes escenarios de escurrimientos que brindan condiciones contrastantes según la magnitud de los caudales y su permanencia en el tiempo (Tabla 3.2).

Para el tramo Encauzado entre Carmensa y Puesto Ugalde, los valores de Rugosidad considerados fueron $n=0,0038$ para el cauce y $n=0,004$ para la planicie de inundación. Los escenarios de escurrimiento seleccionados fueron de caudales diarios “Altos” ($> 10 \text{ m}^3/\text{s}$), “Bajos” ($< 10 \text{ m}^3/\text{s}$) y “Variables”, según las diferencias en el comportamiento que presentan uno de otro analizados en períodos de 3 (tres) meses. De este modo, se planteó una calibración para distintos escenarios de

escurrimiento, y cada uno de ellos, bajo dos condiciones diferentes de pérdidas en tránsito para verificar el mejor ajuste, tanto del 15% como del 20% respectivamente (Tabla 3.3). Las sustracciones en el escurrimiento se efectúan a través de la opción de “Diversion Curve” del programa HEC-RAS. Dichos valores surgen de estudios previos donde se analiza la correspondencia entre los valores observados de las secciones de control (Dornes, 2013).

Aguas abajo se encuentra el tramo Encauzado con Bañados, y tal como se mencionó anteriormente, presenta una condición sin un encauzamiento continuo con formación de bañados que modifican el normal escurrimiento. Los valores del parámetro n de Manning fueron de $n=0,0042$ para el cauce y $n=0,005$ para la planicie de inundación en las secciones con encauzamiento, y $n=0,005$ para el cauce y $n=0,006$ para la planicie de inundación en las zonas de bañados comprendidas en un sector de 20 km de extensión. Los escenarios de escurrimiento que se consideraron fueron períodos de 6 (seis) meses, que por tratarse de períodos más extensos y con cierta variabilidad, sólo se contemplaron escenarios de caudales “Altos” y caudales “Bajos”. Se requirieron períodos de mayor extensión para una mejor representatividad y visualización de la dinámica de los escurrimientos en la estación de La Puntilla, dado que sólo se dispone de valores de aforos mensuales en relación a los caudales diarios de Puesto Ugalde. Para este trayecto se asumen valores de pérdida en escurrimiento del 10% según la correspondencia entre aforos diarios de Puesto Ugalde y La Puntilla (Dornes et al., 2015).

Las *condiciones de borde* utilizadas corresponden a los hidrogramas de entrada de caudales a través de la sección de entrada para cada escenario y la definición de la pendiente Normal en la sección aguas abajo correspondiente. Como *condición inicial*, se definió en cada escenario, el caudal con el que se inicia el período de escurrimiento simulado.

Tabla 3.2.- Caracterización de los escenarios seleccionados para la calibración del modelo para el Tramo Inferior del Río Atuel según la magnitud de los caudales observados y las pérdidas en escurrimiento (%).

Tramo	Encauzado				Encauzado con bañados	
	Altos		Variables		Bajos	
Caudales						
% Pérdidas	15%	20%	15%	20%	15%	20%

Ante diversos escenarios de calibración y parametrización, aquel que muestre mayor eficiencia en la concordancia entre valores observados y simulados, es el considerado para los procesos de Validación y Simulación. Para estos casos se seleccionó el criterio de Nash-Sutcliffe como coeficiente de eficiencia en la calibración (Nash y Sutcliffe, 1970). Se trata de un índice aceptado y utilizado ampliamente para la evaluación de la eficiencia de modelos en hidrología.

Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q})^2} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde

Q_{sim} : caudales simulados

Q_{obs} : caudales observados

Q: caudal medio observado

El coeficiente E cuantifica la variabilidad de las observaciones que es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $E=1$; si $E<0$, las simulaciones presentan un ajuste inapropiado inclusive inferior al valor promedio de las observaciones, La Tabla 3.3 incluye una valoración del ajuste indicado por el coeficiente E.

Tabla 3.3. Valores referenciales del Índice de Nash-Sutcliffe. (Moriasi et al., 2007).

E	Ajuste
0,75 - 1,00	Muy Bueno
0,65 - 0,75	Bueno
0,50 - 0,65	Satisfactorio
< 0,50	No Satisfactorio

3.2.4.- Estrategias de Validación

Refsgaard y Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para un tiempo fuera del período de calibración o bien para otros sitios u otras variables utilizadas en la calibración. El proceso de validación incluye la evaluación de los ajustes brindados por los parámetros involucrados en el modelo. Esto implica la utilización de las calibraciones efectuadas anteriormente para obtener simulaciones que integren todo el sistema del Tramo Inferior del Río Atuel.

Se seleccionaron dos escenarios de validación en base a la parametrización definida en el proceso de calibración en los tramos analizados. Se tomaron períodos de datos con diferentes características: *Caudales Continuos* y *Caudales Intermitentes*. Para cada uno de estos períodos se realizó la simulación de los caudales que ingresaron al sistema a través de la estación de Carmensa (condición de borde superior) para la obtención de su respuesta aguas abajo. Se consiguieron los respectivos hidrogramas de caudales diarios simulados para la sección de La Puntilla, los cuales fueron verificados con los datos de aforos puntuales disponibles.

Para la condición de *Caudales Continuos* se consideró el período de escurrimientos que comprendió los años 2002 y 2003 con caudales permanentes, picos cercanos a los $40 \text{ m}^3/\text{s}$ y valores mínimos superiores a los $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Los *Caudales Intermitentes* seleccionados corresponden al año 1999, desde el mes de mayo hasta noviembre con picos que superan los $10 \text{ m}^3/\text{s}$ aguas arriba y caudales mínimos al comienzo y final del período.

4.- RESULTADOS

4.1- Escenarios de Calibración

El proceso de calibración se planteó mediante simulaciones de caudales diarios en los tramos establecidos. A partir del planteo de diferentes escenarios que reflejan distintas condiciones de escurrimiento (Tabla 3.2), fue posible mediante la calibración, la definición del valor de los parámetros descriptos en el punto 3.2.2, que resultaron en el mejor ajuste entre los caudales simulados y los observados.

4.1.1.- Calibración del Tramo Encauzado: “Carmensa – Puesto Ugalde”

4.1.1.1.- Escenario de Caudales Altos

Se consideró el período comprendido entre los meses de mayo, junio y julio de 1998, en donde los caudales que ingresan al sistema del tramo inferior del río Atuel superan en todo momento los 15 m³/s (Figura 4.1) con un hidrograma aguas abajo (Puesto Ugalde) con valores inferiores aunque siempre por encima de los 10 m³/s.

La calibración se llevó a cabo bajo dos condiciones distintas para verificar el mejor ajuste, suponiendo pérdidas en escurrimiento del 15% y 20% respectivamente. En ambos casos se verificó la eficiencia de la calibración con el índice de Nash-Sutcliffe (E). Para el escenario con pérdidas del 15% el ajuste fue de E=0,85, mientras que para el escenario con pérdidas del 20% se obtuvo un E=0,87. Ambos escenarios de calibración indican una muy buena representación de los caudales observados donde se verifica una correcta simulación de períodos con recesión, picos y caudales estables con un mejor ajuste para el escenario con pérdidas del escurrimiento del 20% a lo largo del tramo seleccionado (Figura 4.2).

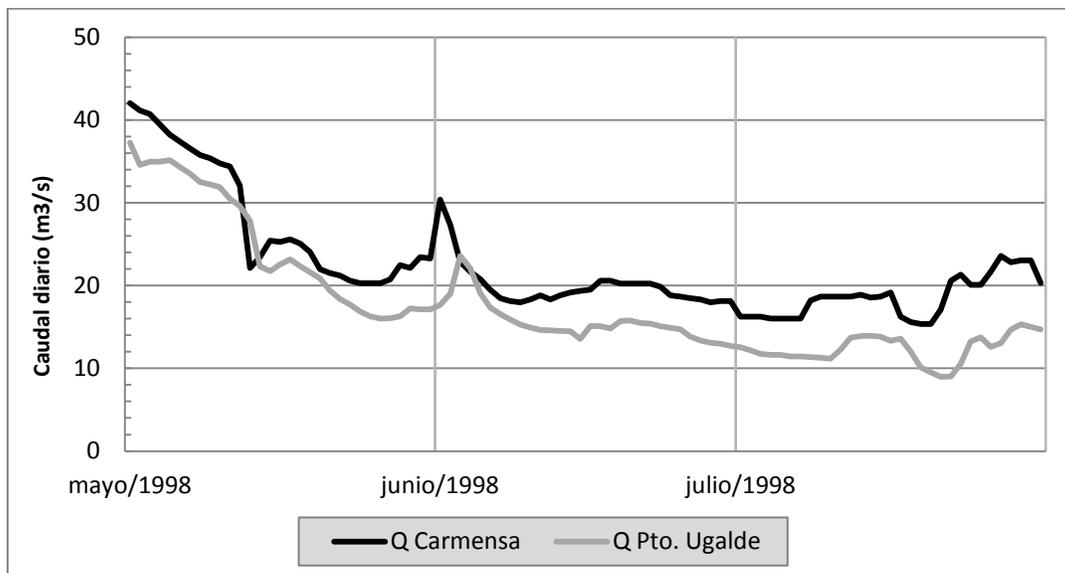


Figura 4.1. Caudales diarios observados en las estaciones de Carmensa (Mendoza) y Puesto Ugalde (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Altos (01/05/1998 - 31/07/1998).

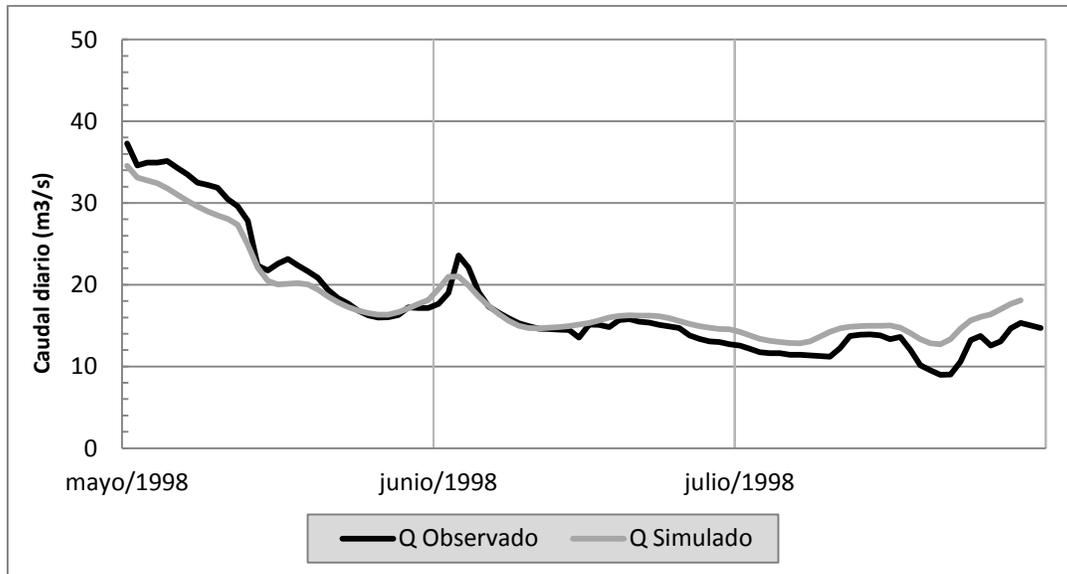


Figura 4.2. Caudales observados y simulados en la estación de *Puesto Ugalde*. Pérdidas del **20%**. Índice de Nash-Sutcliffe: **E=0,87**. Escenario de calibración de Caudales Altos (01/05/1998 - 31/07/1998).

4.1.1.2.- Escenario de Caudales Variables

El escenario de caudales variables refleja comportamientos contrastantes, con picos de caudales superiores a los $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y con valores mínimos de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación de Carmensa. Aguas abajo, en Puesto Ugalde, se observa un comportamiento similar con menores valores de caudal y muy cercanos a la interrupción de los escurrimientos (Figura 4.3).

Similarmente al escenario de caudales altos, se consideraron escenarios de pérdidas en escurrimiento del 15% y 20% respectivamente. Para ambas condiciones se verificó la eficiencia de la calibración con el índice de Nash-Sutcliffe (E), donde se evidenció para el escenario con pérdidas del 15% un ajuste de $E=0,75$, y para el escenario con pérdidas del 20% un valor de $E=0,77$. En los dos casos se mostró un ajuste muy bueno, con mayor eficiencia bajo la condición de 20% de pérdidas que adecuadamente representó los períodos con mayor y menor caudal (Figura 4.4).

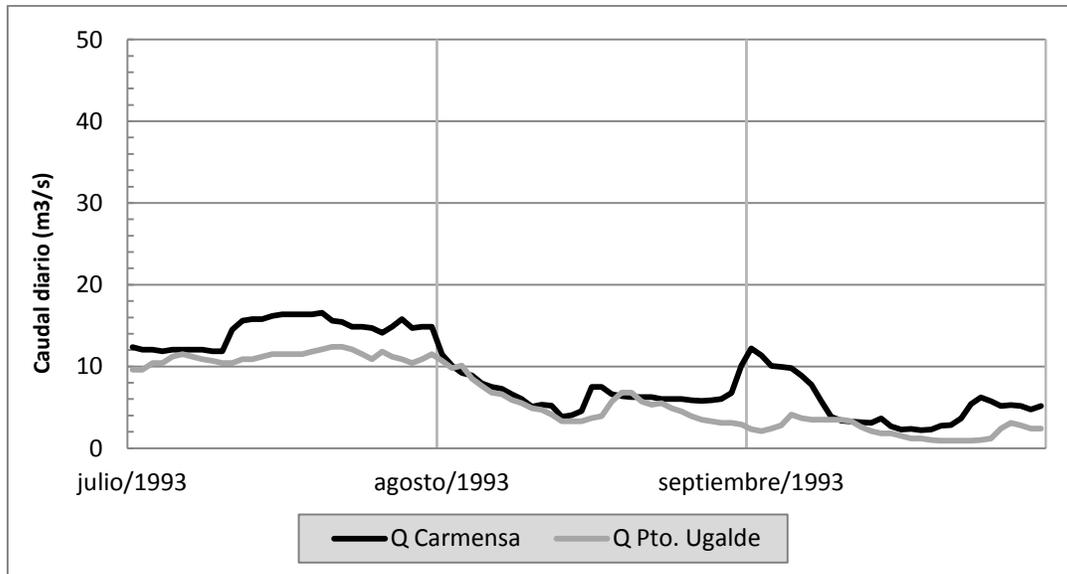


Figura 4.3. Caudales diarios observados en las estaciones de Carmensa (Mendoza) y Puesto Ugalde (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Variables (01/07/1993 - 30/09/1993).

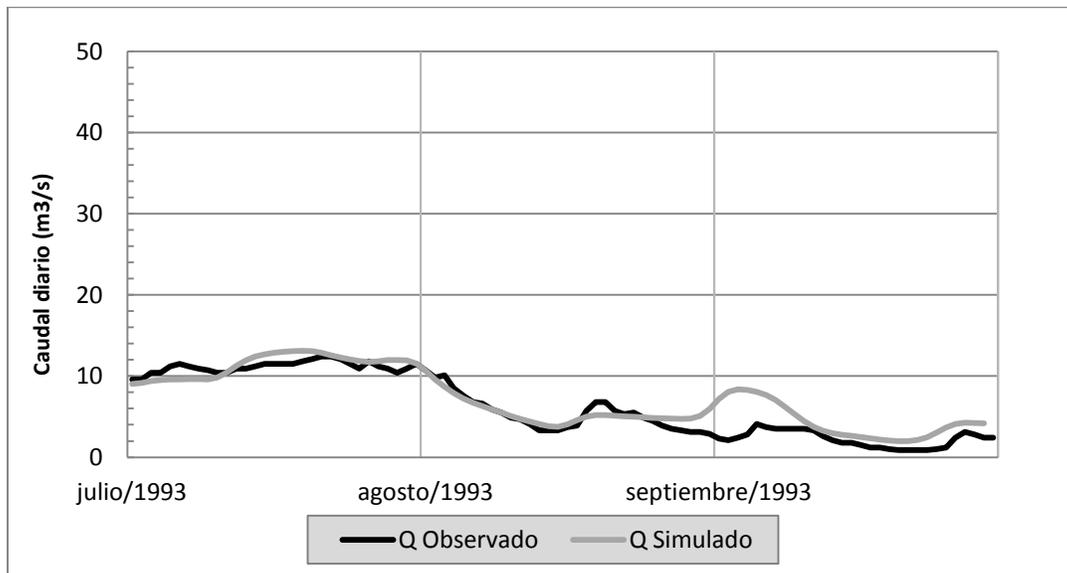


Figura 4.4. Caudales observados y simulados en la estación de *Puesto Ugalde*. Pérdidas del **20%**. Índice de Nash-Sutcliffe: **E=0,77**. Escenario de calibración de Caudales Variables (01/07/1993 - 30/09/1993).

4.1.1.3.- Escenario de Caudales Bajos

Se consideró un nuevo escenario, esta vez de caudales bajos que no superan los $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en el ingreso al sistema analizado (Figura 4.5). Se trata de un período de tres meses (may-jun-jul – 1999) que muestra una dinámica particular con un caudal medio de $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$, valores bajos y un comportamiento relativamente homogéneo sin amplias variaciones.

La calibración se realizó considerando nuevamente las condiciones físicas del tramo con sustracciones del 15% y 20%. En este caso, los ajustes fueron también considerados muy buenos donde el escenario que presentó mejor ajuste en la calibración fue el análisis con un 15 % de pérdidas ($E=0,98$) (Figura 4.6) sobre el de 20% ($E=0,95$).

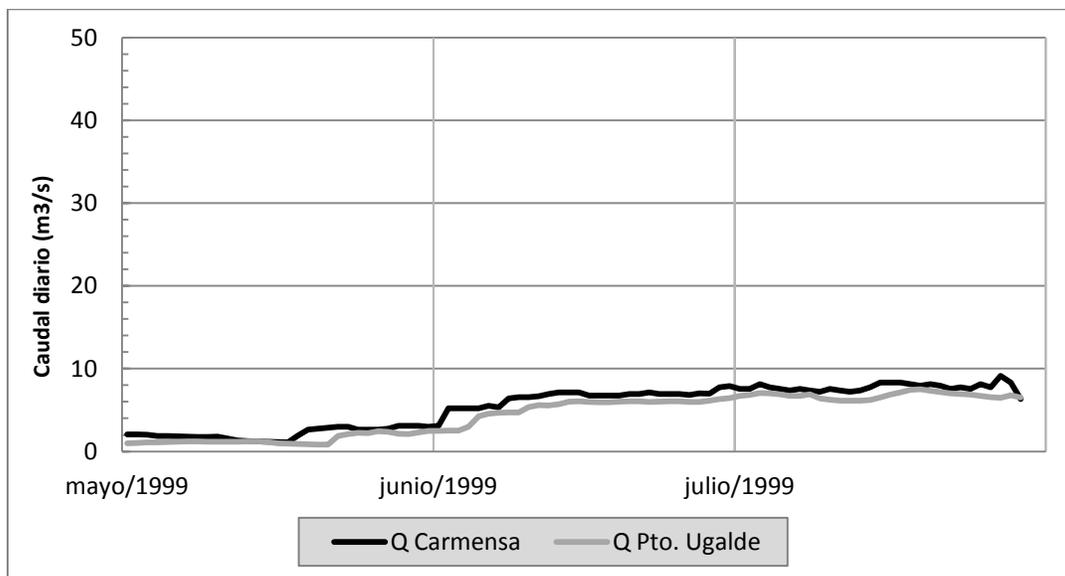


Figura 4.5. Caudales diarios observados en las estaciones de Carmensa (Mendoza) y Puesto Ugalde (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Bajos (01/05/1999 - 31/07/1999).

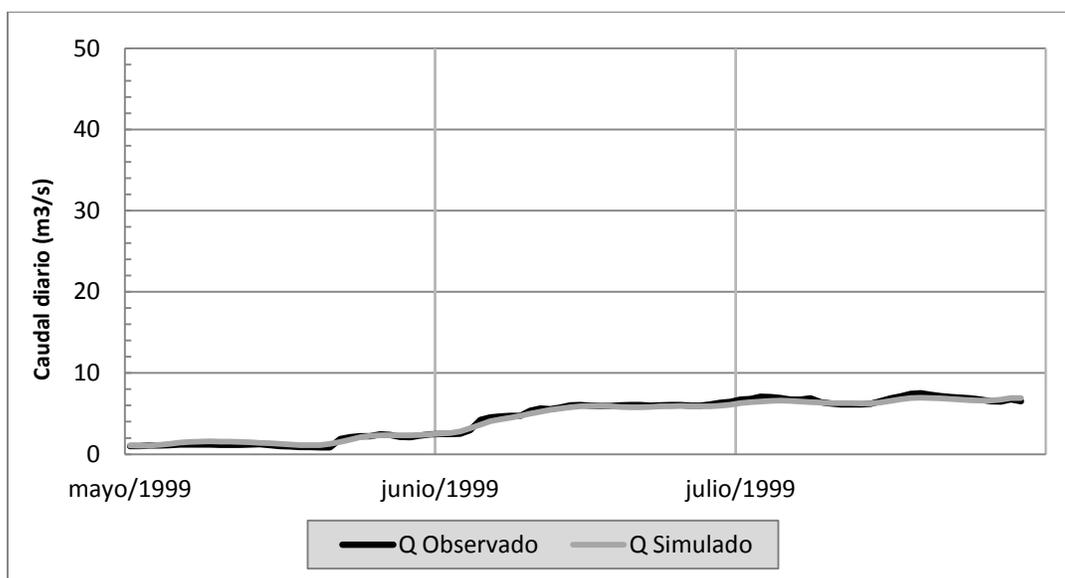


Figura 4.6. Caudales observados y simulados en la estación de *Puesto Ugalde*. Pérdidas del 15%. Índice de Nash-Sutcliffe: $E=0,98$. Escenario de calibración de Caudales Variables (01/05/1999 - 31/07/1999).

4.1.2.-Calibración del Tramo Encauzado con Bañados: “Puesto Ugalde – La Puntilla”

4.1.2.1.- Escenario de Caudales Altos

A partir de la disponibilidad de información, se tuvo en cuenta un escenario de caudales altos con un comportamiento variable, evidenciando en Puesto Ugalde, picos superiores a los 30 m³/s y valores mínimos superiores a los 5 m³/s (Figura 4.7). Dicho escenario, se extiende desde febrero hasta julio de 1998 inclusive, en el cual para la estación de La Puntilla se cuenta solamente con 5 (cinco) valores de caudal correspondientes a aforos puntuales (27-feb; 26-mar; 07-may; 03-jun y 01-jul de 1998).

La calibración se llevó a cabo bajo la condición de pérdidas en escurrimiento del 10% valor determinado a partir de la diferencia observada en registros continuos de Puesto Ugalde y de aforos en La Puntilla. En la Figura 4.8 se visualiza la marcha del hidrograma simulado junto a los valores de los aforos evidenciando una buena calibración sobre todo en los últimos 3 puntos, que resultó en un ajuste para los datos puntuales de $E = 0,96$. Respecto a los primeros 2 aforos, por tratarse de un pico rápido e importante, el modelo con la representación de bañados no logra replicar el amortiguamiento que producen los mismos en el proceso de saturación del sistema ante un cambio repentino, por lo que asume que el pico de crecida se copia de manera algo más directa. Una vez que el sistema hídrico se ha saturado, el modelo funciona correctamente y reproduce de forma aceptable los valores de caudal.

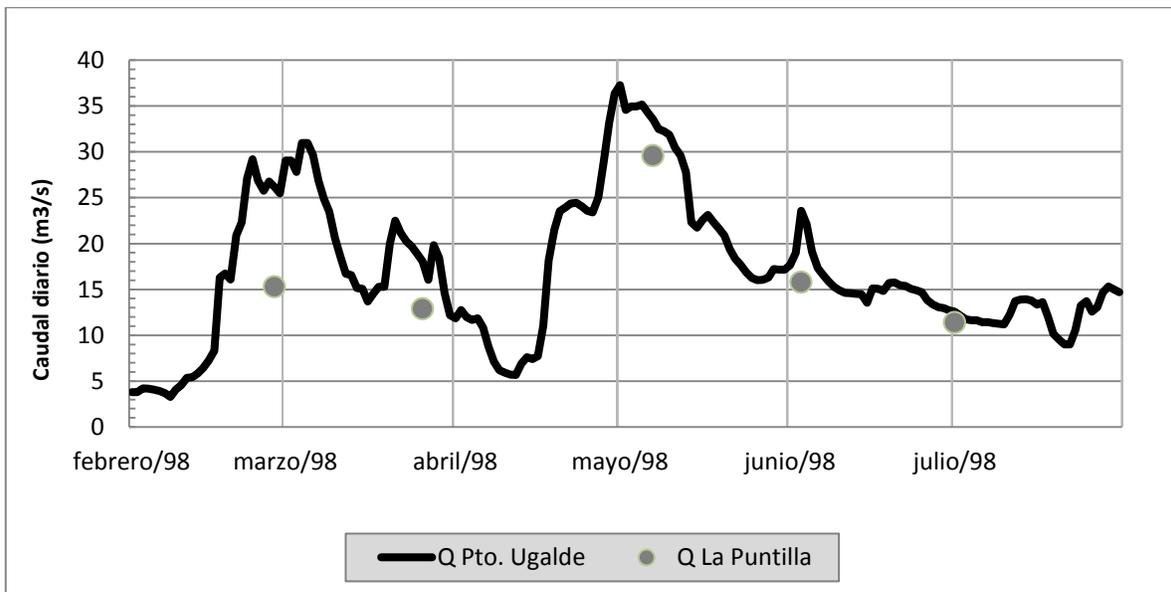


Figura 4.7. Caudales diarios observados en la estación de Puesto Ugalde (La Pampa) y Aforos puntuales en la estación de La Puntilla (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Altos (01/02/1998 - 31/07/1998).

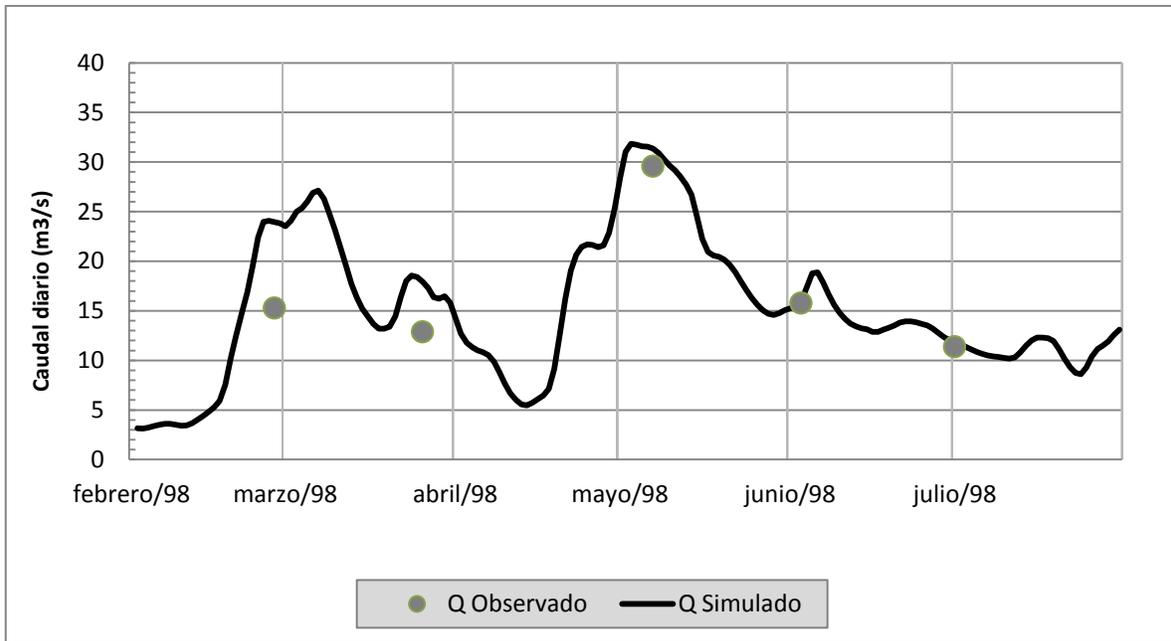


Figura 4.8. Caudales observados y simulados en la estación de *La Puntilla*. Pérdidas del 10%. Escenario de calibración de Caudales Altos (01/02/1998 - 31/07/1998).

4.1.2.2.- Escenario de Caudales Bajos

Fue escogido un escenario de caudales bajos con un comportamiento particular, típico de un régimen de escurrimiento intervenido con picos invernales. Inicia en Puesto Ugalde con valores mínimos cercanos a $1 \text{ m}^3/\text{s}$, y picos de escurrimiento que apenas superan los $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Aguas abajo, en la estación de La Puntilla, se aprecia un comportamiento acoplado, con valores similares y un pequeño desfasaje temporal en la respuesta de pequeños pulsos (Figura 4.9) con un ajuste de los valores de $E= 0,98$. El período comprende desde mayo hasta septiembre de 1999, en donde en La Puntilla sólo se posee 5 (cinco) valores de aforos puntuales (27-may; 08-jul; 05-ago; 01-sep; 29-sep).

En este caso, el ajuste se volvió a efectuar con pérdidas de caudal en tránsito del 10% y se obtuvieron valores satisfactorios para los 5 puntos que se disponían para la calibración (Figura 4.10). Por tratarse de valores de escurrimientos menores y crecidas menos importantes, la simulación con bañados en el tramo asume cierto grado de amortiguación en el traslado del pico, sobre todo en el primer aforo (27-may) donde la condición de saturación del sistema es menor.

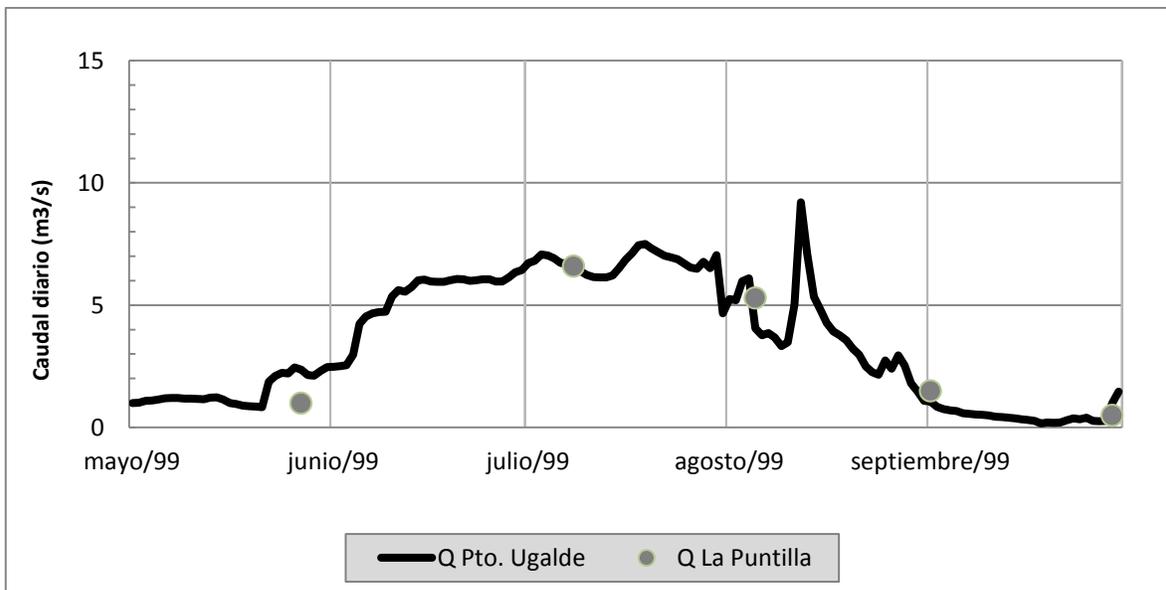


Figura 4.9. Caudales diarios observados en la estación de Puesto Ugalde (La Pampa) y Aforos puntuales en la estación de La Puntilla (La Pampa). Escenario de calibración de Caudales Bajos (01/05/1999 - 30/09/1999).

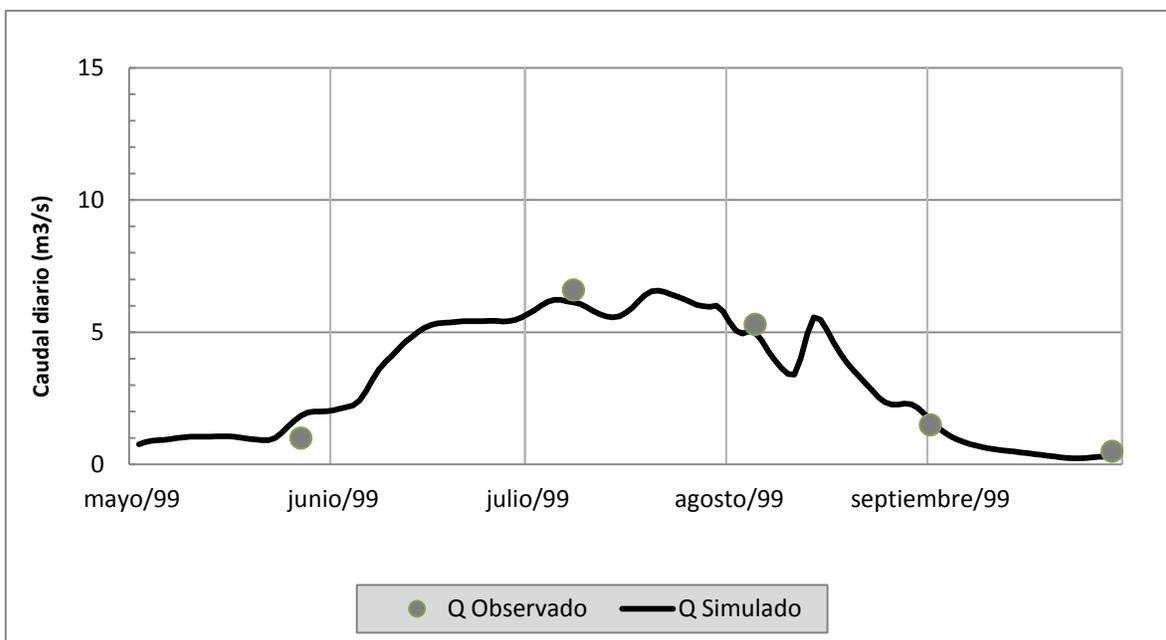


Figura 4.10. Caudales observados y simulados en la estación de *La Puntilla*. Pérdidas del 10%. Escenario de calibración de Caudales Altos (01/05/1999 - 30/09/1999).

4.2.- Escenarios de Validación

En la modelación matemática aplicada a la hidrología, la validación del modelo calibrado es el último análisis antes de efectuar las simulaciones de escenarios. El objetivo de este paso es reafirmar la predictibilidad del modelo y validar los resultados obtenidos en la etapa de calibración del modelo matemático.

Este proceso se realizó utilizando el modelo ya calibrado, sin alteración de la rugosidad ni de las características definidas del cauce, imponiéndole condiciones de borde conocidas (eventos de escurrimientos registrados) que no fueron utilizadas en la calibración. Durante la calibración del modelo para todos los escenarios seleccionados, se obtuvo un conjunto de valores del coeficiente de rugosidad para cada tramo del río, en base a sus características particulares que definen las condiciones de propagación del escurrimiento y comportamientos particulares. Se fijaron además, las pérdidas en escurrimiento que caracterizan los mejores ajustes en el tramo encauzado y en el encauzado con bañados detallados en Tabla 4.1.

A partir de dichos parámetros, se adoptaron los valores más representativos en cada sector, como los coeficientes definitivos de calibración para efectuar las simulaciones de validación (Tabla 4.1).

Tabla 4.1.- Valores finales del Coeficiente de Rugosidad de Manning (n) y Pérdidas en Escurrimiento (%) para cada tramo considerado en la Calibración.

Tramo	Rugosidad (n)		Pérdidas (%)
	Cauce Principal	Planicie de Inundación	
Carmensa - Pto. Ugalde	0,0038	0,004	20
Pto. Ugalde - La Puntilla	0,0042 (encauzado)	0,005 (encauzado)	10
	0,005 (bañados)	0,006 (bañados)	

4.2.1.- Escurrimiento Continuo e Intermitente

El primer escenario de validación corresponde al período que se extiende entre el 01 de noviembre de 2000 y el 31 de octubre de 2002, en el cual se registra una condición de escurrimiento *continuo* con caudales diarios variables, en su mayoría superiores a los $5 \text{ m}^3/\text{s}$ con picos mayores a los $30 \text{ m}^3/\text{s}$ para el ingreso al sistema en la estación de Carmensa (Figura 4.11). Los resultados obtenidos en la estación de La Puntilla muestran un adecuado ajuste ($E= 0,71$), que resultó en una aceptable correspondencia en la magnitud de los valores simulados respecto a los aforos puntuales de caudal.

El escenario de validación con caudales diarios *intermitentes*, se extiende entre el 01 de abril de 2009 y el 31 de octubre de 2009, período que se inicia con escurrimiento nulo y una dinámica posterior típica de régimen modificado. Se aprecia un ingreso de caudales en los meses invernales que rondan los $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y vuelve a disminuir en los meses de Agosto y Septiembre hasta hacerse nulos nuevamente en la época estival (Figura 4.12). La simulación aguas abajo, ofrece un ajuste muy bueno ($E= 0,87$) entre los valores obtenidos respecto a los observados en los aforos disponibles para el período.

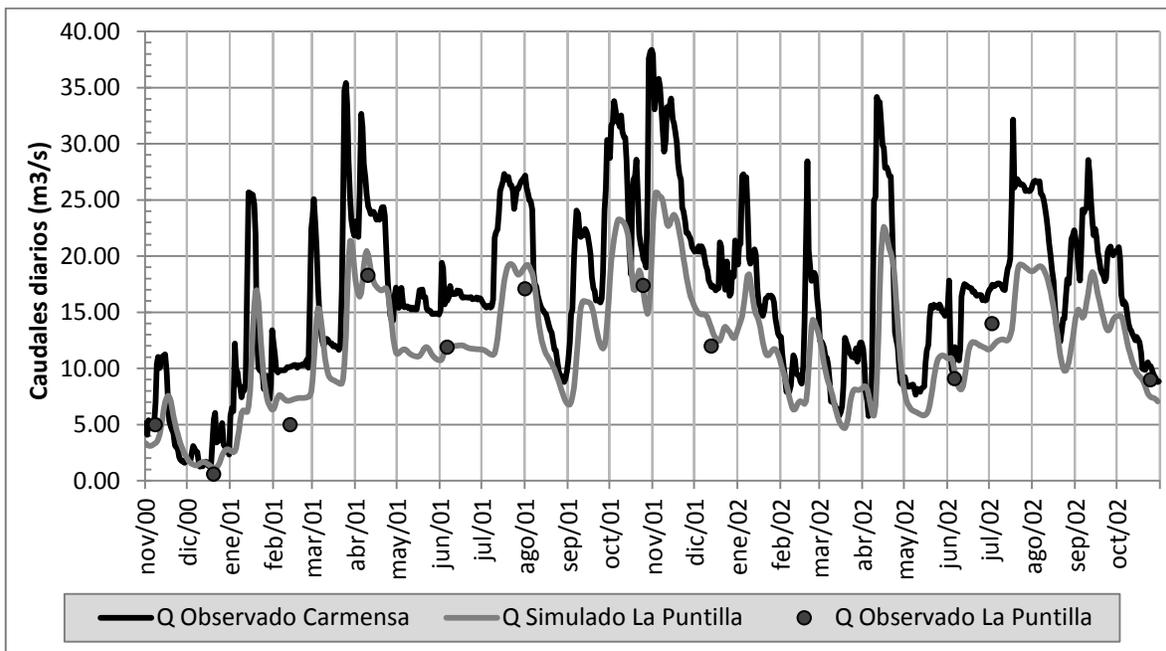


Figura 4.11. Período de Validación con escurrimientos continuos. Valores de caudales observados en Carmensa, y caudales observados y simulados en La Puntilla. (Período 01/11/2000 - 31/10/2002).

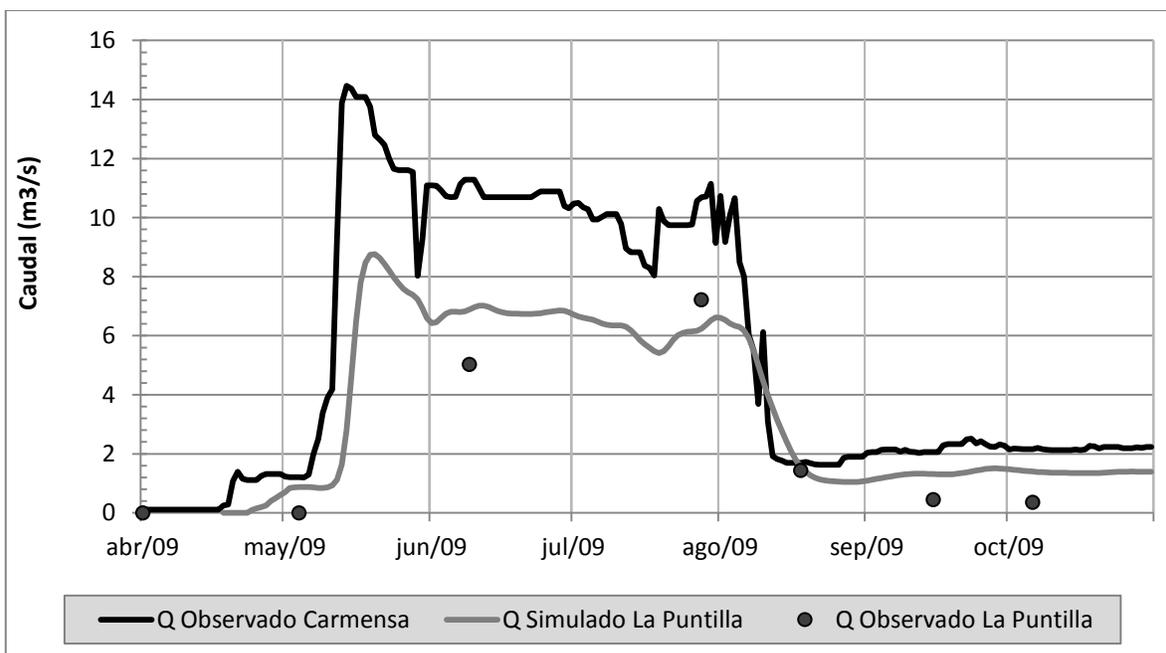


Figura 4.12. Período de Validación con escurrimientos intermitentes. Valores de caudales observados en Carmensa, y caudales observados y simulados en La Puntilla. (Período 01/04/2009 - 31/10/2009).

4.3.- Escenarios de Simulación

La evaluación de distintos escenarios de simulación se realizó con el modelo HEC-RAS donde, además de las simulaciones efectuadas para períodos con bajos y altos caudales, se consideró el escenario de escurrimientos encauzados planteado en el estudio del caudal fluvio-ecológico realizado por la Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam, 2005). Este escenario propone un caudal medio anual de $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$ que asegura el mantenimiento de las condiciones ecológicas para el área de estudio, con un máximo y mínimo mensual de $17,7$ y $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente en Puesto Ugalde. La implementación del modelo completo del Tramo Inferior del Río Atuel se basó en la utilización del modelo calibrado y validado que involucró a cada uno de los tramos en los que se dividió el análisis. El modelo hidrodinámico integrado se extiende desde la estación de Carmensa, al finalizar la zona de riego en el sur de la provincia de Mendoza, hasta la estación de La Puntilla representando una extensión de aproximadamente 210 km de cauce.

Con el fin de representar el caudal fluvio-ecológico con la respectiva variación de su régimen a lo largo del tramo inferior del río Atuel, y según los valores máximos y mínimos establecidos en el ingreso a La Pampa, se definió una condición de borde aguas arriba en Carmensa a través del hidrograma de caudales de entrada al sistema con un valor medio de $11,4 \text{ m}^3/\text{s}$, según el porcentaje de pérdidas en tránsito para dicho tramo obtenido en las calibraciones efectuadas (20%). La condición de borde aguas abajo es la pendiente en la estación de La Puntilla, en donde se obtuvo el correspondiente hidrograma en respuesta al régimen de escurrimiento propuesto atravesando un área de bañados. De este modo se puede apreciar en la Figura 4.13 la dinámica de cada una de las secciones, en donde se aprecian los hidrogramas para cada caso con valores mayores de escurrimiento en Carmensa respecto a Puesto Ugalde (caudal medio: $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$), y de esta última sección respecto a La Puntilla (caudal medio: $8,2 \text{ m}^3/\text{s}$). Se observan los valores máximos al inicio del mes de Julio con un retardo del pico de 4 a 5 días entre Carmensa ($21,2 \text{ m}^3/\text{s}$) y Puesto Ugalde ($17,7 \text{ m}^3/\text{s}$), y de 2 días más hasta manifestarse en la estación de La Puntilla ($15,2 \text{ m}^3/\text{s}$). Respecto a los valores mínimos, se presentan a principios del mes de Noviembre con un retardo de 5 días entre Carmensa ($5,6 \text{ m}^3/\text{s}$) y el ingreso a La Pampa ($4,7 \text{ m}^3/\text{s}$) y de 5 a 6 días más hasta llegar al mínimo en la estación de La Puntilla ($4,1 \text{ m}^3/\text{s}$).

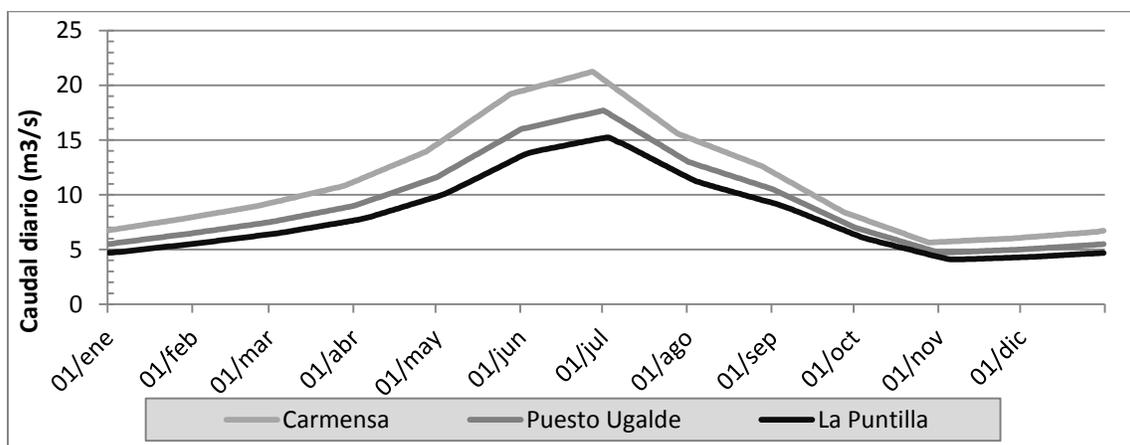


Figura 4.13. Escenario hipotético de caudal fluvio-ecológico planteado en su ingreso a La Pampa (Puesto Ugalde) según condiciones de borde definidas en Carmensa y su respuesta aguas abajo (La Puntilla).

Las respuestas a las condiciones de borde establecidas pueden evaluarse en las secciones que se deseen aguas abajo. De este modo, para un régimen de caudales de ingreso con valores máximos, mínimos y una dinámica definida, se puede analizar el comportamiento de los escurrimientos en las estaciones de Puesto Ugalde y La Puntilla (Tabla 4.2).

Tabla 4.2.- Resultados obtenidos en la simulación del régimen de caudal fluvio-ecológico para el Tramo Inferior del Río Atuel. Estaciones de Puesto Ugalde y La Puntilla con sus escenarios máximos y mínimos.

	Q	Vel	Flow Area	h	h	n Froude
	m ³ /s	m/s	m ²	msnm	m	
Puesto Ugalde	17,70	0,64	27,64	334,12	1,98	0,16
	4,70	0,39	12,05	333,22	1,02	0,14
La Puntilla	15,23	0,60	25,38	313,88	1,72	0,17
	4,09	0,38	10,61	313,11	0,95	0,15

Q: Caudal; Vel: Velocidad de flujo; Flow Area: Área de Flujo; h: Altura del nivel de agua; n Froude: Escurrimiento supercrítico (>1), crítico (=1) o subcrítico (<1).

Como es de esperarse, se aprecia un caudal mayor en Puesto Ugalde sobre La Puntilla, con mayor área de flujo y nivel de agua, verificándose las condiciones de escurrimiento encauzado planteadas en el escenario propuesto. Se tiene un régimen subcrítico en todo momento, con velocidades de flujo que van desde 0,64 a 0,6 m/s para los picos máximos en Puesto Ugalde y La Puntilla respectivamente, y de 0,39 a 0,38 m/s en los picos mínimos para las mismas estaciones de control. Dichas características pueden verificarse a través de la interfaz gráfica que otorga el modelo HEC-RAS en donde se muestra la sección transversal de cada estación con el nivel de agua correspondiente y su área de flujo en cada caso para la condición establecida. Para las secciones de Puesto Ugalde (Figura 4.14 - Figura 4.15) y La Puntilla (Figura 4.16 - Figura 4.17) se muestran los respectivos niveles correspondientes a los caudales máximos y mínimos del régimen de escurrimientos establecido, con un encauzamiento efectivo en todo momento. En la Figura 4.18 se presenta una sección teórica de bañados con el albardón central y las respectivas planicies de inundación, en donde se aprecian los niveles alcanzados por los valores extremos del mismo régimen de caudales modelado.

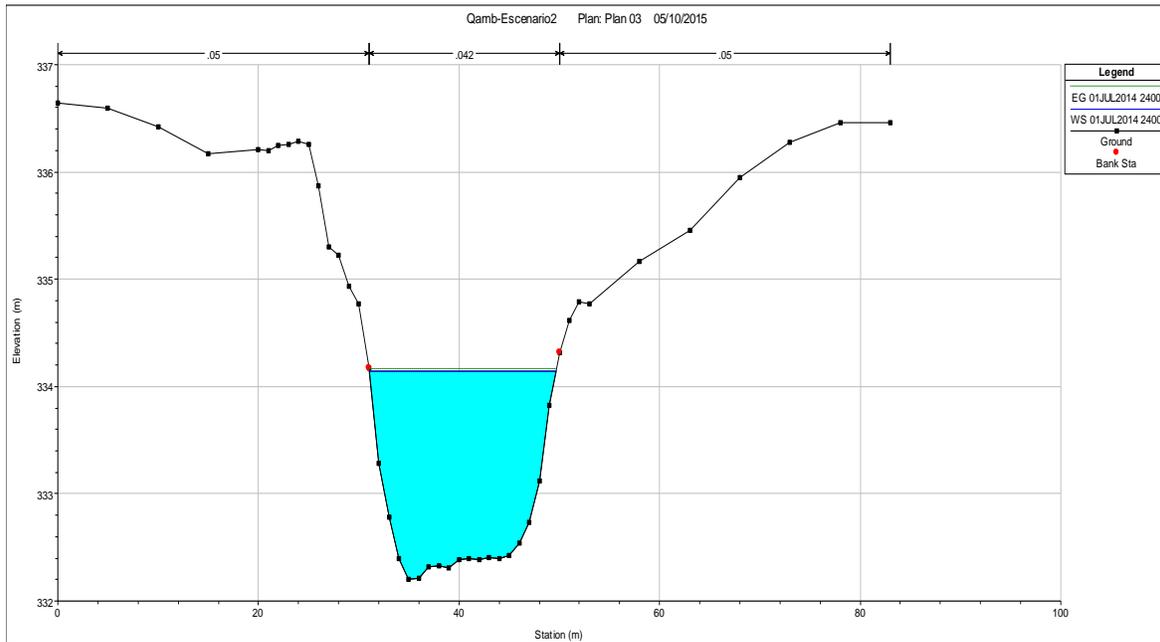


Figura 4.14. Sección transversal de la estación de Puesto Ugalde y nivel de agua para el escurrimiento simulado.
Caudal Máximo: 17,70 m³/s (01-julio).

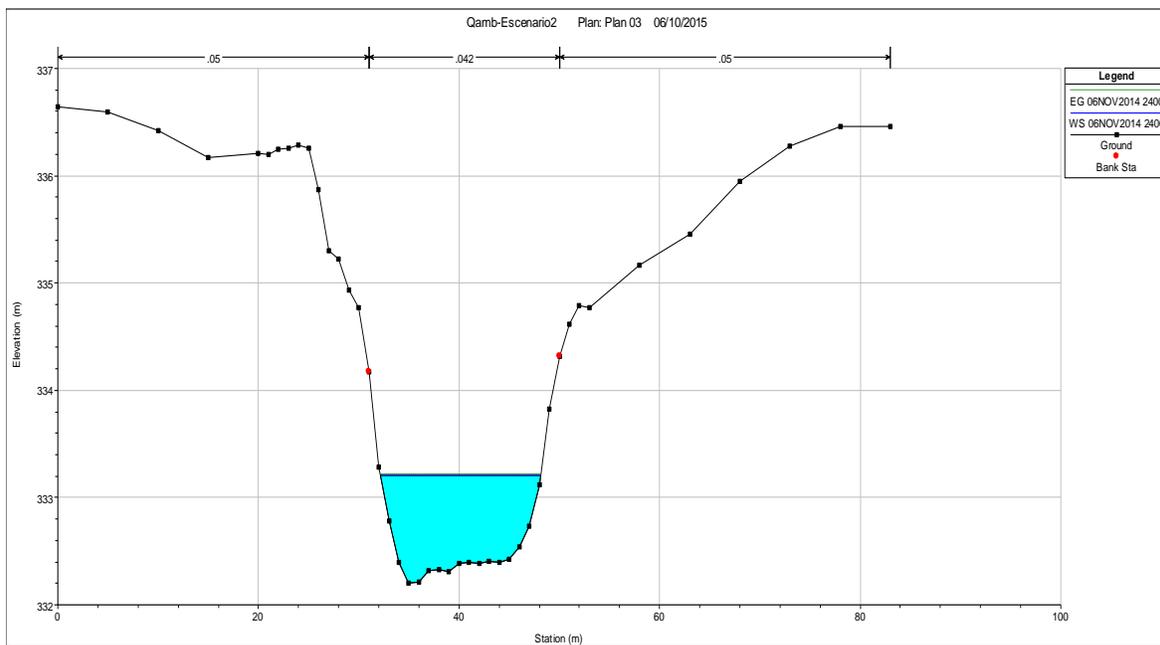


Figura 4.15. Sección transversal de la estación de Puesto Ugalde y nivel de agua para el escurrimiento simulado.
Caudal Mínimo: 4,70 m³/s (01-noviembre).

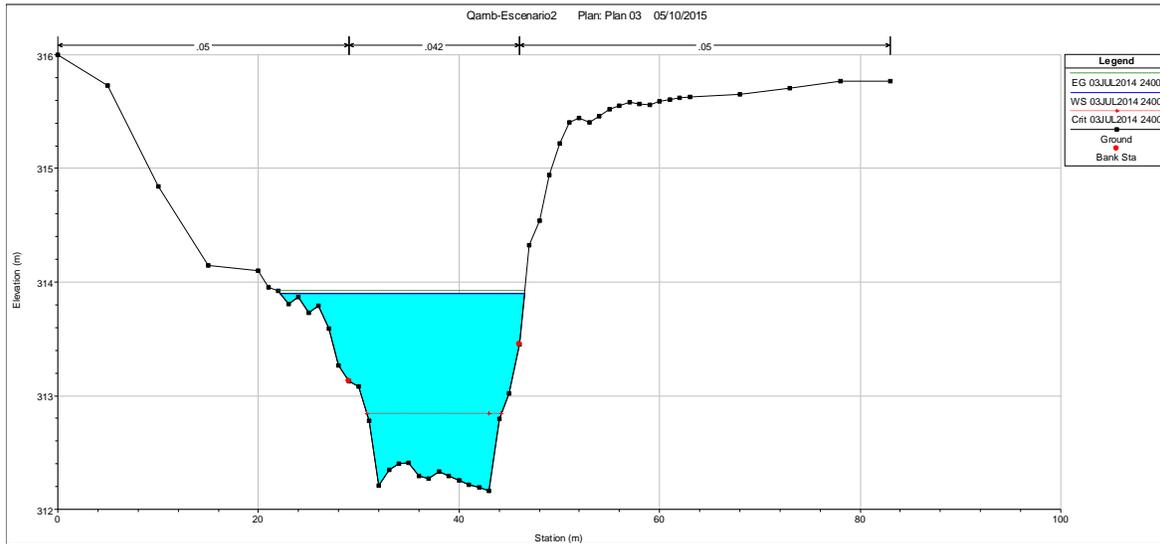


Figura 4.16. Sección transversal de la estación de La Puntilla y niveles de agua para el escurrimiento simulado. Caudal Máximo: 15,23 m³/s (03-julio).

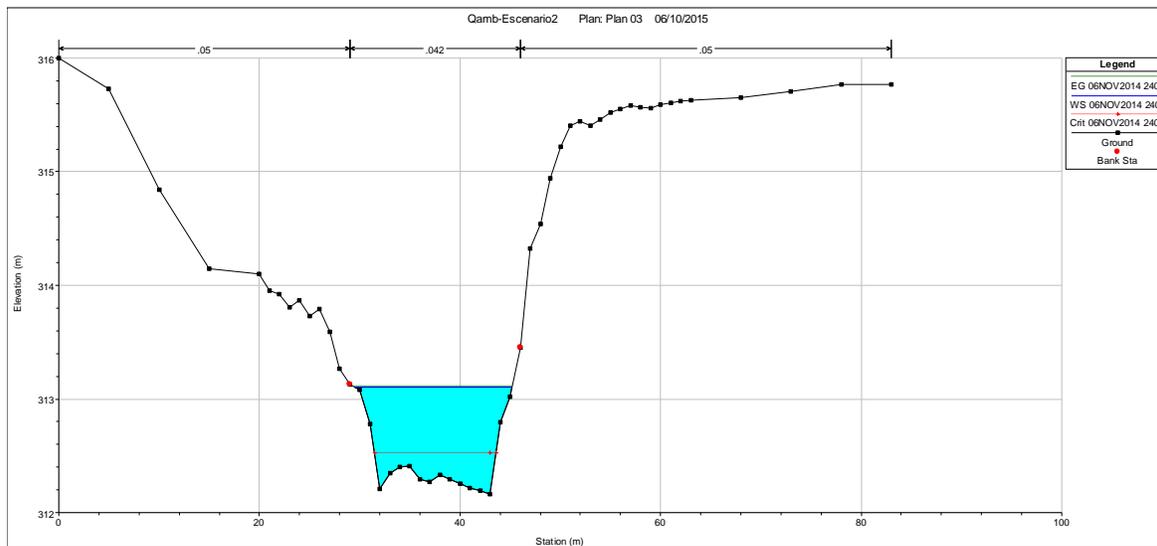


Figura 4.17. Sección transversal de la estación de La Puntilla y niveles de agua para el escurrimiento simulado. Caudal Mínimo: 4,09 m³/s (06-noviembre).

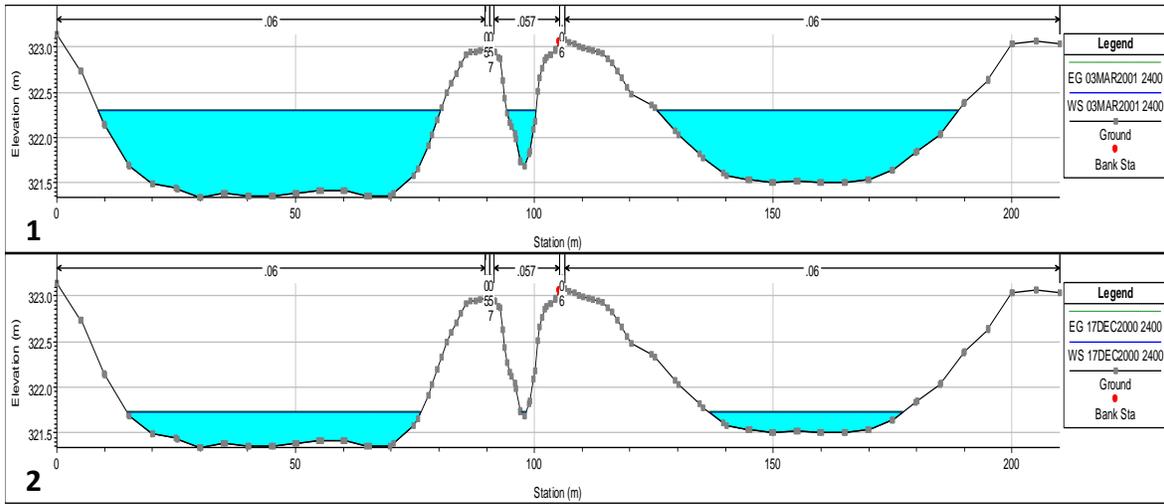


Figura 4.18. Sección transversal teórica representativa del área de bañados y los respectivos niveles máximos (1) y mínimos (2) de agua para el escurrimiento simulado.

5.- CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la implementación de un modelo hidrodinámico en el Tramo Inferior del Río Atuel, como lo es el modelo HEC RAS. Dicho modelo plantea el cálculo de parámetros hidráulicos (altura, caudal, velocidad de flujo) a partir de la introducción de condiciones de flujo conocidas y características físicas del cauce, tanto para régimen permanente de escurrimientos como para no permanente.

La representación espacial del río se planteó a partir de observaciones y mediciones a campo que incluyeron el relevamiento de distintas secciones y la identificación de diferentes características del cauce que resultó en la definición de un Tramo Encauzado y de un Tramo Encauzado con Bañados. Esta diferenciación permitió el análisis y ajuste particular según las respectivas condiciones y las respuestas hidrológicas de cada uno de ellos.

A partir del proceso de calibración en cada uno de los casos, se determinaron mediante un ajuste manual los parámetros de rugosidad y pérdidas de conducción bajo distintas condiciones de escurrimiento. Posteriormente, se evaluó la parametrización planteada en un ejercicio de validación que también incluyó distintos períodos y escenarios de escurrimiento. A través de ambos procesos, calibración y validación, fue posible describir satisfactoriamente las magnitudes y dinámica de los caudales observados que resultaron de las simulaciones efectuadas. En todos los casos se obtuvieron coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe de carácter “muy bueno” lo que implica una correcta representación de las simulaciones respecto a los valores observados de escurrimiento, tanto para escenarios de caudales bajos, altos, constantes o intermitentes.

Similarmente, y con la parametrización obtenida en la calibración, fue posible efectuar la simulación para uno de los escenarios de escurrimientos propuestos en el estudio del caudal fluvio-ecológico realizado por la UNLPam, con resultados que se ajustaron a los planteados, incluso con la representación teórica del área de bañados presente en el tramo comprendido entre las estaciones de Puesto Ugalde y La Puntilla. Dicho régimen de escurrimientos considerado, según los resultados, mantiene la condición de caudales encauzados y posibilitaría de este modo el restablecimiento del sistema ecológico del río Atuel en su tramo inferior tal cual se plantea. Se tiene la posibilidad para cada una de las simulaciones efectuadas, de llevar a cabo un análisis detallado de niveles y datos hidrodinámicos específicos para su estudio en particular.

En síntesis, el trabajo presenta un ejercicio de modelación en un área con muy poca información que resultó en una adecuada definición de parámetros conceptuales a partir de la representación espacial del terreno basada en mediciones a campo e interpolación de secciones. Dicha implementación del modelo permitió la representación de escurrimientos modificados por acción antrópica y principalmente alóctonos, de manera acorde y efectiva en el Tramo Inferior del Río Atuel. Tal implementación y representación sería aún más eficiente si se contara con mayor número de secciones reales a lo largo del tramo considerado, y con mayor disponibilidad de información de caudales diarios en cada una de las secciones de control.

Según el trabajo realizado, se concluye que el modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS es aplicable a ríos de regiones semiáridas con baja pendiente con características de encauzamiento definido o de bañados intermedios, ya que permite representar adecuadamente la distribución de caudales en los diversos tramos. El presente estudio aporta una herramienta fundamental para la adecuada gestión del recurso hídrico en la cuenca inferior del Río Atuel, ya que otorga una parametrización eficiente y una base para el avance en estudios que requieran de esta herramienta, como por ejemplo, delimitación de áreas de riesgo, líneas de ribera e inundación, definición de obras sobre el cauce, entre otros.

Desde una perspectiva académica, el presente trabajo muestra un ejercicio completo de modelación hidrodinámica, que resalta la relevancia de llevar adelante protocolos de simulación apropiados y rigurosos.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- Beven, K.** 2006. "A manifesto for the equifinality thesis." *Journal of Hydrology*, 320 (1-2), 18 pág.
- Brunner, G.W.** 2002. "HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual, Hydrologic Engineer Center, United States Army Corps of Engineers USACE". 580 pág.
- Buss, R.G., Secco N. y P. Dornes.** 2013. "Análisis de la influencia de la precipitación en los escurrimientos del Tramo Inferior del río Atuel". IV Congreso Pampeano del Agua. Santa Rosa, La Pampa. Argentina. 10 pág.
- Cano, E.** 1980. "Inventario Integrado de los Recursos Naturales de La Pampa". INTA, Provincia de La Pampa, UNLPam Buenos Aires, Argentina, 493 pág.
- Chow, V.T.** 1994. "Hidráulica de Canales Abiertos". McGraw-Hill Interamericana S.A. Santa fé de Bogotá, Colombia. 1994. 665 pág.
- Dornes, P., Mariño, E. y C. Schulz.** 2011. "Caracterización hidroquímica de los escurrimientos del Río Atuel en la provincia de La Pampa". Actas XXIII Congreso Nacional del Agua, Resistencia, Chaco ISSN 1853-7685 p: 280-291. 12 pág.
- Dornes, P., Mariño, E., Dapeña, C., Schulz, C. y G. Dalmaso.** 2012. "Efecto de la Intermitencia de los escurrimientos en la dinámica de la interacción entre el agua superficial y subterránea en la cuenca inferior del río Atuel, La Pampa, Argentina". XI Congreso Latinoamericano Hidrogeología. 20-24 de Agosto. Cartagena de Indias, Colombia. 7 pág.
- Dornes, P., Buss, R.G. y N. Secco.** 2013. "Influencia de la intermitencia de los escurrimientos en la cuenca inferior del río Atuel sobre la interacción agua superficial y subterránea". XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan. Argentina. Anales Congreso, 271. ISSN 1853-7685. 12 pág.
- Dornes, P., Díaz, P., Pochetti, R., Comas, R., Schulz, C. y E. Mariño.** 2015. "Ecurrimientos, infiltración y recarga en la Cuenca Inferior del río Atuel". XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná. Argentina. 10 pág.
- Finger, D.** 2011. "Calibration of Hydrological Models". *Hydrological Processes and Modelling*, SS 2011. Swiss Federal Research Institute WSL. Switzerland. 16 pág.
- Hernández Bocquet, R.** 2009. "Cuencas y Regiones Hídricas de la provincia de La Pampa. Características generales". Secretaría de Recursos Hídricos, Dirección de Investigación Hídrica, Santa Rosa. Versión disponible en <http://www.lapampa.gov.ar/cuencas-y-regiones-hidricas13.htm>. 10 pág.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. V., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and T. L. Veith.** 2007. "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations". *T. ASABE*, 50, 885–900. 16 pág.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe.** 1970. "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles". *Journal of Hydrology*. 10 (3). 9 pág.

- Puricelli, M.** 2003. "Estimación y Distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica." PhD Tesis. Universidad Politécnica de Valencia. 434 pág.
- Refsgaard, J. and J. Knudsen.** 1996. "Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models". Water Resources Research, Vol. 32, No. 7, Pages 2189–2202, July 1996. 14 pág.
- Secretaría de Minería de la Nación.** "Programa de asistencia técnica para el desarrollo del sector minero argentino – Inventario de Recursos Naturales". (<http://www.mineria.gov.ar/estudios/irn/lapampa/ind-clim.asp>)
- Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam).** 2005. "Estudio para la determinación del caudal mínimo necesario para el restablecimiento del sistema ecológico fluvial en el curso inferior del río Atuel". Informe Final. Gavillo Novillo, J.M, Porcel, G.H y J.M. Malán (Eds). Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 171 pág.
- Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam).** 2012. "Estudio para la cuantificación monetaria del daño causado a la Provincia de La Pampa por la carencia de un caudal fluvioecológico del río Atuel". Informe Final. Gavillo Novillo (Ed). Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 548 pág.
- United States Army Corps of Engineers USACE, Institute of Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC).** 2002. "HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual". Hydrologic Engineering Center. 528 pág.
- United States Army Corps of Engineers USACE, Institute of Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC).** (2012). "HEC-RAS: River Analysis System User's Manual (Version 4.1)". Davis, CA. 790 pág.
- Vives, L., Mariño, E., Rivas, R., Dalmaso, G., Moscardi, C.A., Scioli, C. y A.O. Villanueva.** 2005. "Estudio Hidrológico Local". En: Estudio para la determinación del caudal mínimo necesario para el restablecimiento del sistema ecológico fluvial en el curso inferior del río Atuel. Informe Final. Gavillo Novillo, J.M, Porcel, G.H y J.M. Malán (Eds). 7:1-26. UNLPam, Santa Rosa, La Pampa. 26 pág.
- Zárate, M., Lanzillotta, R. y A. Mehl.** 2005. "Cuenca del río Atuel: caracterización biofísica. Aspectos geológicos y geomorfológicos". En: Estudio para la determinación del caudal mínimo necesario para el restablecimiento del sistema ecológico fluvial en el curso inferior del río Atuel. Informe Final. Gavillo Novillo, J.M, Porcel, G.H y J.M. Malán (Eds). 3:1-7. UNLPam, Santa Rosa, La Pampa. 7 pág.