*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.*
*UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*

# PROPUESTA Y ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS PARA CINCO RÍOS DE LA CUENCA DE LA VERTIENTE SUR DE SIERRA NEVADA

TRABAJO FINAL DE GRADO

Trabajo realizado por:
***Juan Hervella Presa***

Dirigido:
***Araceli Puente Trueba***
***José Antonio Juanes de la Peña***

Titulación:
**Grado en Ingeniería Civil (Mención en Hidrología)**

Santander, Diciembre de 2017

# ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN ..... 5
1.1.-Caudales ecológicos y regímenes de caudales ecológicos ..... 5
1.2.-Interés de la zona de estudio. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas ..... 8
1.3.-Importancia en el futuro (cambio climático) ..... 10
2.- OBJETIVOS DEL ESTUDIO ..... 12
3.-ÁMBITO DEL ESTUDIO ..... 13
3.1.- Caracterización de la Demarcación ..... 13
3.2.- Descripción general del medio ..... 16
3.2.1.- Hidrología ..... 16
3.2.2.- Climatología ..... 18
3.2.- Descripción de los tramos fluviales de estudio ..... 20
4.- METODOLOGÍA ..... 33
4.1.- Datos de partida ..... 33
4.1.1.- Datos hidrológicos: series históricas de caudales en régimen natural. ..... 34
4.2.2.- Datos hidrobiológicos: curvas SPU – Q ..... 36
4.3.- Estimación de caudales ecológicos ..... 36
4.3.1.- Caudal Básico de Mantenimiento (QBM). ..... 36
4.3.2.- Método de los Microhábitats ..... 40
4.4.- Propuesta del régimen de caudales ecológicos ..... 53
5.- PROPUESTA DE REGÍMENES DE CAUDALES ECOLÓGICOS ..... 54
5.1.- Chico de Bérchules ..... 56
5.2.- Grande de Bérchules ..... 61
5.3.- Trévelez ..... 66
5.4.- Mecina ..... 71
5.5.-Chico de Soportujar ..... 76
7.1.- Síntesis de los resultados obtenidos ..... 81
7.2.- Conclusiones ..... 82
8.- BIBLIOGRAFÍA ..... 84

# 1.- INTRODUCCIÓN

La integración de los caudales ecológicos en los proyectos de gestión de agua empieza a ser entendida por la Administración de los recursos hídricos en España (i.e., Plan Nacional de Restauración e Instrucción para el estudio e implantación de caudales ecológicos). Las alternativas que surgen de considerar todos los recursos disponibles (aguas superficiales, subterráneas, depuración, desalación, entre otros) amplían las posibilidades de suministro y quita tensión sobre nuestros deteriorados ecosistemas acuáticos superficiales, posibilitando el mantenimiento de unos caudales que permitan conservar la estructura y funcionamiento de dichos sistemas. Como se ha comprobado en algunas cuencas andaluzas, el uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales, abre muchas posibilidades para garantizar el suministro, mantener la calidad de las aguas y contemplar el coste de las infraestructuras hidráulicas. También considera los aspectos ambientales, lo que puede llevarnos a un sistema de actuación en la gestión del agua, ambiental y socialmente, mucho más equilibrado, positivo y con mayores posibilidades de garantía del suministro.

Los caudales ecológicos son una herramienta que nos va a permitir cuantificar las restricciones al uso del recurso y las demandas ambientales de la cuenca (Artículo 59.7 Texto refundido de la Ley de Aguas 10/01 de 5 de julio). Así pueden ser utilizados en la gestión, incluyendo una limitación a la extracción de recursos superficiales, y animar a los gestores a la búsqueda de soluciones, indagando en todas las alternativas posibles para poder implementarlos y así conseguir los objetivos de conservación de los sistemas hídricos que nos impone la Directiva Marco del Agua (DMA, Directiva 2000/60/CE).

En el presente estudio, se establecerá una propuesta de caudales ecológicos para cinco ríos de una cuenca en Andalucía. Para ello, se estimarán las necesidades hídricas de las poblaciones de la trucha común (*Salmo trutta fario*) y el cacho (*Squalius pyrenaicus*)) en dichos ríos, en los cuales estas especies habitan; utilizando un método de cálculo hidrobiológico. Junto a dicha estimación, se aplicará también un método de cálculo hidrológico, basado en una serie de datos históricos de los caudales que discurren por cada uno de los ríos a estudiar, en un intervalo de 30 años, que hará que dicha propuesta esté más justificada.

## 1.1.-Caudales ecológicos y regímenes de caudales ecológicos

### *-Propuesta del régimen de caudales ecológicos*

Existe una necesidad marcada por el texto refundido de la ley de aguas (TRLA), que en su artículo 59.7 indica que los caudales ecológicos se fijarán en los Planes Hidrológicos de cuenca, tras la realización de los estudios específicos para cada tramo de río.

Llama la atención que, a día de hoy no encontramos una definición exacta o unánimemente aceptada para referirnos a estos regímenes. Aunque sí es cierto, que encontramos como concepto fundamental la necesidad de mantener unas exigencias en lo que respecta a condiciones de cantidad y calidad de las aguas.

En cuanto a su definición, según el citado artículo del TRLA, los *caudales ecológicos* no son un aprovechamiento privativo más de los recursos hídricos, sino una restricción que se impone con carácter general a los sistemas de explotación, con la única excepción del abastecimiento de poblaciones. El artículo 42.1.b.c' de la citada ley define los caudales ecológicos como aquellos que mantienen como mínimo la vida piscícola que de manera natural habitaría o pudiera habitar en el río, así como su vegetación de ribera.

El artículo 18 del Reglamento de Planificación Hidrológica (RPH) introduce el concepto de *régimen de caudales ecológicos*, entendiéndolo como el que permite mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición.

A estas definiciones podemos añadir que partimos de la base de que un cauce fluvial debe tener un caudal mínimo que garantice el desarrollo de una vida fluvial igual o al menos equivalente a la que existía anteriormente en el río. Por lo tanto, podríamos realizar una primera aproximación que introduzca el concepto en la definición de caudal ecológico, de que debe garantizarse un caudal mínimo de agua en cada tramo del río para mantener la capacidad biogénica de este, en cada período hidrológico. Es importante destacar el concepto de período hidrológico, pues dependiendo de la época del año en la que nos encontremos o del tramo de río que estemos estudiando, este caudal deberá adaptarse a dichas condiciones, intermitentes en la mayoría de los casos, y ser variable en el tiempo y/o espacio.

Por lo tanto, se justifica plenamente la necesidad de adoptar adecuados regímenes de caudales ecológicos en aquellos ríos que han sido regulados mediante diversas infraestructuras hidráulicas y que pueden poner en peligro los sistemas naturales que albergan y, por ende, el conjunto de valores de diversa índole vinculados a ellos. Para ello, se requiere disponer de información sobre la variabilidad de los regímenes naturales y acerca de los requerimientos ambientales de las especies representativas.

A la hora de realizar este tipo de estudios nos encontramos con un problema asociado a la reducida disponibilidad de registros históricos de caudales en diferentes zonas de las cuencas hidrográficas que hay que gestionar. En este sentido, el modelado, tanto hidrológico como biológico, proporciona hoy en día respuestas que, a pesar de la diversidad metodológica, se consideran apropiadas para dar una solución a esta carencia de datos, lo cual permite llevar a cabo predicciones sobre los regímenes de caudales que asegurarían una cierta funcionalidad de los sistemas fluviales.

Actualmente se ha hecho un esfuerzo muy importante en la determinación de regímenes de caudales en numerosos tramos de las cuencas hidrográficas. Sin embargo, para la evaluación de estos regímenes de caudales ecológicos, en un escenario previsible de cambio climático o al menos de mayor variabilidad interanual, será imprescindible tener en cuenta la influencia del periodo de tiempo seleccionado para el establecimiento de estos regímenes.

### *-Planificación hidrológica*

Mediante el presente estudio, se pretende también justificar o resaltar una de las importantes facetas y disciplinas del Ingeniero Civil en aspectos de hidrología e hidráulica; el

Ingeniero Civil como Ingeniero Hidrólogo. Esta disciplina, indispensable para el desarrollo y evolución de la ingeniería civil en todos aquellos proyectos o estudios que de alguna u otra manera estén relacionados con la influencia del agua, es la de la *planificación higrológica.*

Debemos destacar y no olvidarnos, que nos encontramos ante un recurso finito, el agua. Un recurso que es utilizado para satisfacer los distintos usos que de él se demandan (abastecimiento urbano, industrial, regadíos, aprovechamientos energéticos…). Por lo tanto, para poder satisfacer todos estos usos, se necesita llevar a cabo una adecuada planificación y gestión hidrológica. Una planificación en la que, como se recoge en la DMA, de prioridad a los diferentes usos. Una planificación que en todo momento respete la actividad biológica en los ecosistemas, pues prácticamente todos los procesos ecológicos dependen del agua. Una planificación capaz de adaptarse a los múltiples cambios que se presentan y se van a presentar en el entorno, debido a cambio de las condiciones ambientales, la evolución y necesidades de la población, y el avance de la ingeniería entre otros; para poder mantener satisfechos todos los usos ligados o dependientes del agua.

Esta planificación, aparte de englobar la tarea de la construcción de cualquier infraestructura hidráulica que se necesita llevar a cabo, también lleva consigo la de la gestión de los caudales en los cauces fluviales; para ello se recurre a la determinación del *régimen de caudales ecológicos*. En este caso, para este estudio, se determinarán dichos caudales para una cuenca andaluza.

Y como bien es sabido, el establecimiento de un régimen de caudales ecológicos es, en la actualidad, una herramienta prácticamente imprescindible en la gestión de los recursos hídricos en las diferentes cuencas hidrográficas, tal y como se pone en evidencia en los distintos planes. El número de infraestructuras hidráulicas construidas ha sufrido un enorme incremento en las últimas décadas, como respuesta a la demanda creciente de recursos hídricos originada por el desarrollo agrícola, industrial y urbano.

### *-Métodos para la determinación de caudales ecológicos*

Existen diferentes métodos para la estimación de caudales, que podemos clasificar en:

- Métodos hidrológicos
- Métodos hidráulicos
- Métodos biológicos

Este estudio se ha realizado empleando dos métodos. El primero es un método hidrológico, es decir, se basa en el análisis de las series históricas de caudales naturales de aportación. En concreto, nos referimos al cálculo del “Caudal Básico de Mantenimiento” (QBM) (Palau, 1988). El segundo método utilizado es hidrobiológico por lo que se centra en caracterizar el hábitat fluvial para diferentes condiciones de caudal. El método hidrobiológico se lleva a cabo mediante el software RHYHABSYM, que surge a partir del método de los microhábitats, IFIM (Instream Flow Incremental Methodologic, Bovee, 1982)

Hay que tener en cuenta que el QBM se obtiene a partir de series históricas de caudales, mientras que para el RHYHABSYM se emplean las curvas de habitabilidad de distintas especies de peces.

Para poder aplicar estos métodos, se ha utilizado software diseñados específicamente para el cálculo de caudales ecológicos, los cuales se encuentran entre los más actualizados y precisos que existen ahora en el mercado del ámbito hidrológico, biológico e hidráulico. Estos programas, los cuales se explican en su apartado correspondiente (metodología), además de la explicación de su funcionamiento, son:

- "Visual QBase (v.3)" (Agencia Catalana del Agua, 2002).
- "RHYHABSYM" (Jowett,1999),

Dicho trabajo se ha acompañado en todo momento por el soporte ofrecido por el programa Excel, que permite tanto la entrada como la salida de datos, así como su modificación y ayuda para la interpretación de los mismos.

## 1.2.-Interés de la zona de estudio. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas

Tal y como lo refleja en su Plan Hidrológico, la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA), el agua es un bien escaso en muchas zonas de la DHCMA, donde existe una importante presión antrópica sobre el medio hídrico debido a la utilización del recurso. El gran objetivo, como se ha expuesto anteriormente, de la planificación hidrológica es lograr la compatibilidad de los usos del agua con la preservación y mejora del medio ambiente. Ello requiere de una planificación y gestión eficaces para asegurar el suministro a todos los usuarios y evitar la degradación de los ecosistemas fluviales.

Con objeto de asegurar esta compatibilidad, se han establecido una serie de objetivos medioambientales, adoptados también para la DHCMA, cuyo cumplimiento debe asegurar la disponibilidad de recursos en cantidad y calidad suficientes. Pero además de estos objetivos, debido a la problemática derivada de la escasez de agua, se hace imprescindible establecer una restricción al uso del recurso, con el objetivo de mantener la funcionalidad de los ecosistemas, evitando su deterioro. Así queda plasmado en la legislación española, que establece la necesidad de determinar los caudales ecológicos en los planes de cuenca, entendiendo los mismos como una restricción impuesta con carácter general a los sistemas de explotación. Esta normativa incluye además las disposiciones que definen el concepto de caudal ecológico, su consideración como una restricción previa al uso en los sistemas de explotación y el proceso para su implantación.

*- Planes especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía*

Las sequías e inundaciones son los dos fenómenos meteorológicos que, en mayor medida, afectan a todo el territorio. La desigual distribución de las lluvias en el espacio y en el tiempo da origen a una acusada irregularidad en el régimen de los ríos en todo el ciclo

hidrológico. A pesar de ello, en nuestra zona de estudio, en Sierra Nevada, se encuentran cuencas que mantienen un volumen de caudales de cierta importancia durante el período de verano, y sus recursos en conjunto se pueden considerar excedentarios.

La evapotranspiración, que en la Cuenca el Sur es una de las más altas a nivel nacional, determina que solo el 25% de las precipitaciones se incorpore al ciclo hidrológico como recursos superficiales y subterráneos, lo cual origina bajos índices de disponibilidad de agua por zonas y población habitante.

La sequía estacional de verano coincide con uno de los momentos de mayor demanda, debido a las necesidades de los sectores turístico y agrícola.

Por requerimiento del artículo 27 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, por la que se aprueba el Plan Hidrológico Nacional, cada organismo de cuenca desarrolló su plan especial de actuación frente a situaciones de alerta y eventual sequía, conocidos como Planes Especiales de Sequía (PES). En la demarcación, el PES fue sometido a consulta pública mediante la Resolución de 25 de junio de 2007, de la Dirección General de la Cuenca Mediterránea Andaluza de la Agencia Andaluza del Agua, por la que se anuncia la apertura del periodo de consulta pública de la versión preliminar del Plan Especial de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca Mediterránea Andaluza y del Informe de Sostenibilidad Ambiental.

El PES de la DHCMA viene acompañado de una memoria ambiental, resultado del proceso de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) que se ha desarrollado paralelamente. La EAE es un instrumento de prevención para integrar los aspectos ambientales en la toma de decisiones de planes y programas públicos que puedan tener efectos significativos sobre el medio ambiente.

El objetivo general del PES es minimizar los impactos ambientales, económicos y sociales, generados en situaciones de eventual sequía. Este objetivo general se persigue a través de los siguientes objetivos específicos:

- Garantizar la disponibilidad de agua requerida para asegurar la salud y la vida de la población.
- Evitar o minimizar los efectos negativos de la sequía sobre el estado ecológico de las masas de agua, en especial sobre el régimen de caudales ecológicos, evitando en todo caso efectos permanentes sobre el mismo.
- Minimizar los efectos negativos sobre el abastecimiento urbano.
- Minimizar los efectos negativos sobre las actividades económicas, según la priorización de usos establecidos en la legislación de aguas y en los planes hidrológicos.

A su vez, para alcanzar los objetivos específicos se plantean los siguientes objetivos instrumentales u operativos:

- Definir mecanismos para la previsión y detección de la presentación de situaciones de sequía.

• Fijar umbrales para la determinación del agravamiento de las situaciones de sequía.
• Definir las medidas para conseguir los objetivos específicos en cada fase de las situaciones de sequía.
• Asegurar la transparencia y participación pública en el desarrollo de los planes.

*-Prioridades en el uso del agua*

Lograr la mejor satisfacción de las demandas de agua en cantidad, calidad y garantía en el suministro constituye el primer objetivo del Plan Hidrológico de la Cuenca Sur. Para ello, el plan define los usos posibles del agua en función de la calidad del recurso y del origen y destino del mismo. Establece también las dotaciones precisas en sintonía con la previsión de necesidades en los distintos escenarios temporales y fija los requisitos de calidad. De acuerdo con la Ley de Aguas de 1985, el orden de prioridad de usos queda establecido, con carácter general, del siguiente modo:

- Abastecimientos urbanos
- Caudales exigibles por razones ambientales
- Regadíos y usos agrarios
- Usos industriales para la producción de energía eléctrica
- Otros usos industriales
- Acuicultura
- Usos recreativos
- Otros aprovechamientos

## 1.3.-Importancia en el futuro (cambio climático)

El cambio climático con aumento de la temperatura, y en España, disminución de la precipitación, causará una disminución de aportaciones hídricas y un aumento de la demanda de los sistemas de regadío.

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, no solo dependen de las aportaciones que ceda el ciclo hidrológico, condicionadas por el uso y cubierta del suelo, la temperatura y la estructura temporal de la precipitación, sino que es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo, un factor determinante de la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades humanas globales.

La sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de temperatura y disminución de la precipitación es muy alta, precisamente en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas, como es el caso de la zona en la que se encuentran los ríos de este estudio. Las zonas más críticas son las semiáridas, en las que las disminuciones de aportación pueden llegar a ser del 50% de los recursos potenciales de la zona.

La temporalidad en la distribución de precipitaciones y temperaturas incide en la generación de recursos hídricos con mayor entidad, en muchas ocasiones, que los mismos valores medios de estos dos parámetros climáticos.

En la estimación de recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático existen incertidumbres inherentes tanto a los datos de base, como al proceso de generación de recursos, siendo los primeros de mayor importancia relativa. Se destacan entre estas incertidumbres los escenarios previsibles, la distribución espacial y temporal de la precipitación, el comportamiento del uso y cubierta del suelo y la recarga de acuíferos y las limitaciones de los modelos de simulación.

# 2.- OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El presente estudio persigue cumplir con los siguientes objetivos:

- Determinar los valores de los caudales ecológicos para los ríos de la Vertiente sur de Sierra Nevada, Andalucía (ríos Trévelez, Chico de Soportujar, Chico de Bérchules, Grande de Bérchules y Mecina), aplicando un método hidrológico y otro hidrobiológico.

- Establecer una propuesta de régimen de caudales ecológicos, para los diferentes períodos del año hidrológico, necesarios para garantizar unas condiciones hidráulicas e hidrobiológicas adecuadas para los ríos a estudiar.

# 3.-ÁMBITO DEL ESTUDIO

Los cinco ríos a estudiar se encuentran en la vertiente sur de Sierra Nevada, en la provincia de Granada, la cual pertenece a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA), de la que se hará una descripción en este capítulo, junto con la correspondiente a los ríos objeto de estudio.

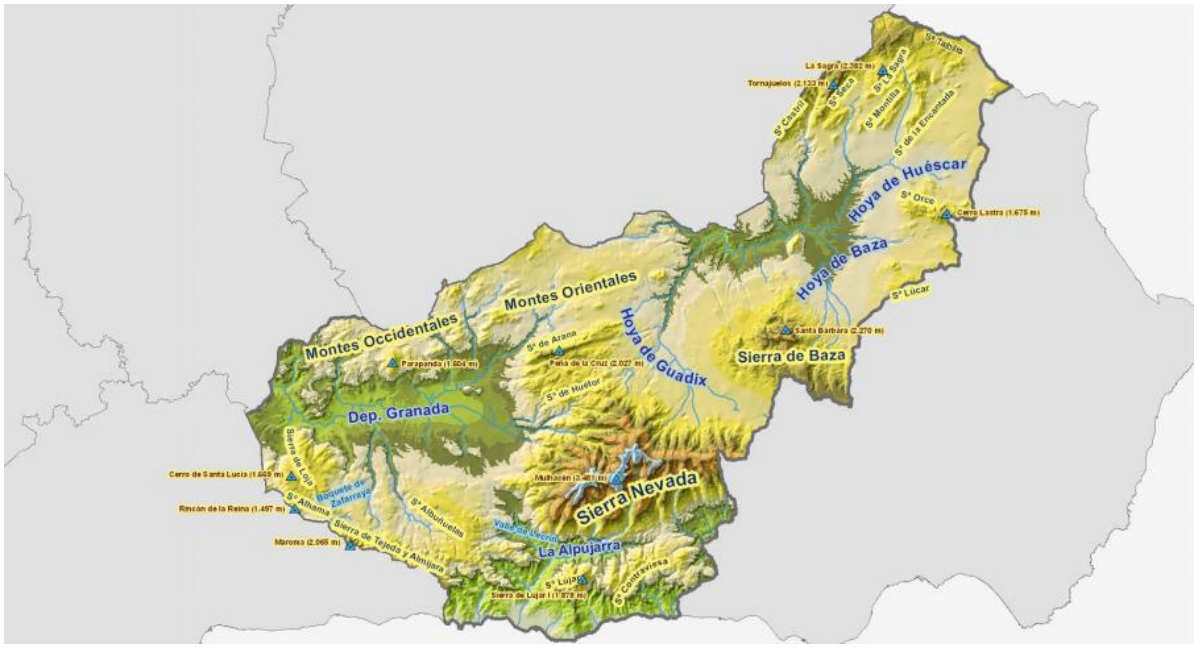



**Figura 3.1.- Representación orográfica de la provincia de Granada, donde se encentran los ríos de estudio.**

## 3.1.- Caracterización de la Demarcación

La Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA) se extiende sobre una superficie de 17.952 km$^2$ a lo largo de una franja de unos 50 kilómetros de ancho y 350 de longitud. Está conformada por un conjunto de ríos, arroyos y ramblas que nacen en sierras del Sistema Bético y desembocan en el mar Mediterráneo. Todo este territorio está enmarcado en la Comunidad Autónoma de Andalucía, y en él se integran la mayor parte de las provincias de Málaga y Almería, así como la vertiente mediterránea de la provincia de Granada (en la cual se encuentran los ríos pertenecientes a este estudio) y el Campo de Gibraltar en la provincia de Cádiz.

**Figura 3.2.- Situación geográfica de la DHCMA.**

El ámbito territorial completo de planificación comprende la parte continental definida como Distrito Hidrográfico Mediterráneo y la parte litoral que engloba las aguas de transición y costeras. Dicho ámbito queda, tal y como se establece en el Decreto 352/20093, enmarcado en el territorio andaluz de las cuencas hidrográficas que vierten al Mediterráneo desde el límite entre los términos municipales de Tarifa y Algeciras hasta la desembocadura del río Almanzora, incluida la de este río, quedando excluida la Rambla de Canales. Comprende, además, la cuenca endorreica de Zafarraya y las aguas de transición asociadas a sus cuencas. Las aguas costeras tienen como límite oeste la línea con orientación 144º que pasa por el Arrecife La Parra, extremo occidental de la Ensenada del Tolmo, y como límite este la línea con orientación 122º que pasa por el Puntazo de los Ratones, al norte de la desembocadura del río Almanzora.

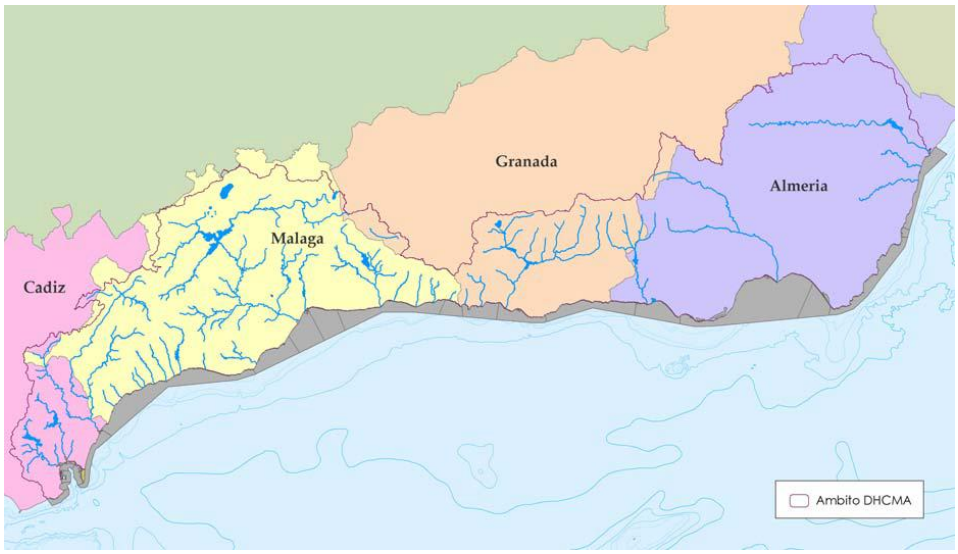



**Figura 3.3.- Ámbito territorial de la DHCMA.**

La DHCMA se caracteriza por sus fuertes contrastes, tanto en los rasgos físicos del territorio como en sus condiciones climáticas.

El relieve, en general muy montañoso y con una marcada orientación paralela a la costa, presenta los mayores desniveles peninsulares en el sector central, en donde a escasos kilómetros del mar se elevan las cumbres de Sierra Nevada hasta casi los 3.500 m en el pico Mulhacén. Este paisaje accidentado se ve interrumpido esporádicamente por planicies interiores, intensamente cultivadas (Llanos de Antequera, Valle de Lecrín, etc.), o por valles aluviales y llanuras deltaicas litorales en donde se concentra la mayor parte de la población y de la actividad económica. Los ríos, en sus cursos altos, aprovechan las líneas estructurales del relieve y los contactos litológicos con rocas más blandas y de inferior grado de compacidad, mientras que en sus cursos medios y bajos se encajan sobre materiales de sedimentación neógena, tales como limos, margas y areniscas, generando frecuentes glacis.

**Figura 3.4.- Orografía y red hidrográfica de la DHCMA.**

## 3.2.- Descripción general del medio

### *3.2.1.- Hidrología*

La red hidrográfica de Sierra Nevada, nos muestra en su totalidad un conjunto de tipo radial centrífugo, abierto por el Este, donde Sierra Nevada continúa en la provincia de Almería; la red muestra una buena adaptación con la estructura en domo de la Sierra, adecuándose a grandes líneas la intensidad del drenaje con la litología, de modo que las zonas de más alta densidad de drenaje corresponden con las áreas occidentales ocupadas por dolomías y mármoles dolomíticos, calizas y calizo-dolomías, como se explica más adelante.

La hidrología de Sierra Nevada está directamente condicionada por las variables que controlan la innivación y el deshielo, así como con el comportamiento hidrogeológico de los materiales aflorantes. En este último aspecto, la cuenca de Sierra Nevada presenta una relativa homogeneidad, ya que la mayor parte de su superficie se asienta sobre micasquistos (pizarras, lastras, en el argot local); estos materiales metamórficos, de edad paleozoica, pertenecen, desde el punto de vista geológico, al Complejo Nevadofilábride (Zona Interna de las Cordilleras Béticas); se trata de materiales poco permeables, si bien en la parte alta de Sierra Nevada presentan tal grado de alteración que posibilitan la infiltración de las aguas de deshielo y escorrentía. Alrededor de estos materiales, y aflorando a cotas más bajas, hay una

potente serie de dolomías y calizo-dolomías, generalmente muy fracturadas, de edad triásica; se trata de materiales permeables, en los que la escorrentía superficial es poco frecuente.

La morfología alargada del macizo de Sierra Nevada, en sentido Este-Oeste, permite repartir sus aguas entre dos grandes vertientes hidrográficas: la Norte, que drena al río Guadalquivir, con desembocadura en el Océano Atlántico (Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir), y la Sur, que es drenada por varios cursos independientes hacia el Mar Mediterráneo (Cuenca Hidrográfica del Sur de España).

La vertiente mediterránea (la Sur), en la que se encuentran los ríos objeto de estudio, es la más extensa, y está drenada por tres grandes cuencas, que son las del Guadalfeo, Adra y Andarax. La del Guadalfeo está integrada, entre otros, por los ríos Dúrcal, Torrente, Lanjarón, Chico, Poqueira, Trevélez y Cádiar. La cuenca del Adra la integran los ríos Mecina, Válor, Nechite, Laroles, Bayárcal y Alcolea. Por último, la cuenca del Andarax, está compuesta únicamente por los ríos Láujar y Nacimiento; éste es el más oriental de Sierra Nevada y, como curiosidad, es el único río de la vertiente Sur que drena aguas recogidas en la vertiente Norte.

Como ya se ha comentado, los registros hidrológicos no son abundantes, y, en cualquier caso, se concentran generalmente a la salida de las diferentes cuencas, a cotas comprendidas entre los 900 y 1.200 m, por debajo de los límites actuales del Parque Nacional; por ello se vuelven a extrapolar los parámetros hidrológicos más representativos. Debido a que las aportaciones de los ríos proceden de las precipitaciones recibidas, los hidrogramas son diferentes según la altitud, latitud y orientación de los respectivos valles fluviales. Para los ríos occidentales, los máximos caudales mensuales se producen en Mayo, seguidos por los de Junio, Abril y Julio. Por el contrario, los mínimos son los de Septiembre, seguidos por los de Agosto y Diciembre. Los ríos más orientales presentan deshielos más adelantados y atenuados, con máximos de caudal en Febrero y mínimos en Septiembre.

Los parámetros hidrológicos ofrecen valores igualmente dispares. Así, los coeficientes de escorrentía (porcentaje de escorrentía superficial con respecto a la pluviometría recibida) oscilan en Sierra Nevada entre cerca del 75 % para ríos occidentales y menos del 30 % para los orientales, donde son máximas las pérdidas por evapotranspiración.

Otro parámetro ilustrativo es el caudal específico, caudal drenado por cada kilómetro cuadrado de cuenca vertiente. Este índice se relaciona muy estrechamente con la precipitación y la evapotranspiración, así como con el grado de derivación e importación de recursos. Los valores más altos de los que se dispone información (Castillo et al., 1996b) se dan, nuevamente, en los valles más occidentales, ríos Poqueira, Monachil, Dílar y Genil; a la salida del Parque Nacional, dichos valores se estiman comprendidos de 15 a 20 l/s por $km^2$. En ríos orientales, como los de Ugíjar y Alcolea, se estima que el valor es del orden de 6 l/s por $km^2$. Mención aparte (y destacada) merecen las lagunas de Sierra Nevada, como reliquias de los últimos episodios glaciares sufridos por Sierra Nevada (hace unos 12.000 años). Se localizan normalmente en antiguas cubetas de sobre-excavación o bien en depresiones y circos cerrados por diques morrénicos. Se trata de elementos del mayor valor paisajístico y ecológico del parque Nacional, sobre todo en primavera y verano. Su relación directa con el modelado glaciar las circunscribe a las zonas de altas cumbres, por encima de los 2.600 m de altitud. De las 42 existentes con aguas relativamente permanentes, la mayor parte se localizan en la

vertiente Sur. Casi la mitad, unas 17, se conservan en la cuenca del río Trevélez, y 11 más en la cuenca del río Poqueira. La más alta de todas es la laguna Altera, en la cañada de Siete Lagunas (valle del Trevélez), situada a cota 3.146; la más grande es la de La Caldera (valle del Poqueira); la más profunda, la de Vacares (valle del Trevélez). El régimen hídrico de ellas no ha sido apenas estudiado; muy pocas tienen entradas de agua permanente, siendo algunas endorréicas, esto es, sin salida visible de aguas, mientras que la mayoría conservan aliviaderos, bien en forma de arroyos o de chorreras. A final de la primavera son visibles otras muchas lagunas y lagunillos, cuya principal característica es su menor tamaño y lo efímero de sus aguas, que no suelen alcanzar el final del estiaje.

### *3.2.2.- Climatología*

El clima en las cuencas andaluzas es quizás uno de los máximos exponentes de variabilidad, no tanto por las temperaturas sino por el régimen de lluvias, muy generoso en el extremo occidental, donde se localiza uno de los máximos nacionales en la cuenca del Guadiaro –llegándose localmente a superar los 2.000 mm de precipitación media anual–, y propio de un ambiente desértico en algunos sectores de la provincia almeriense, con valores inferiores a 200 mm. En conjunto, el balance de agua es negativo, es decir, las pérdidas por evaporación son superiores a las ganancias por precipitaciones y por aportes fluviales. Se evapora más de un 5% del agua que penetra por el Estrecho de Gibraltar debido a su carácter de cuenca cerrada.

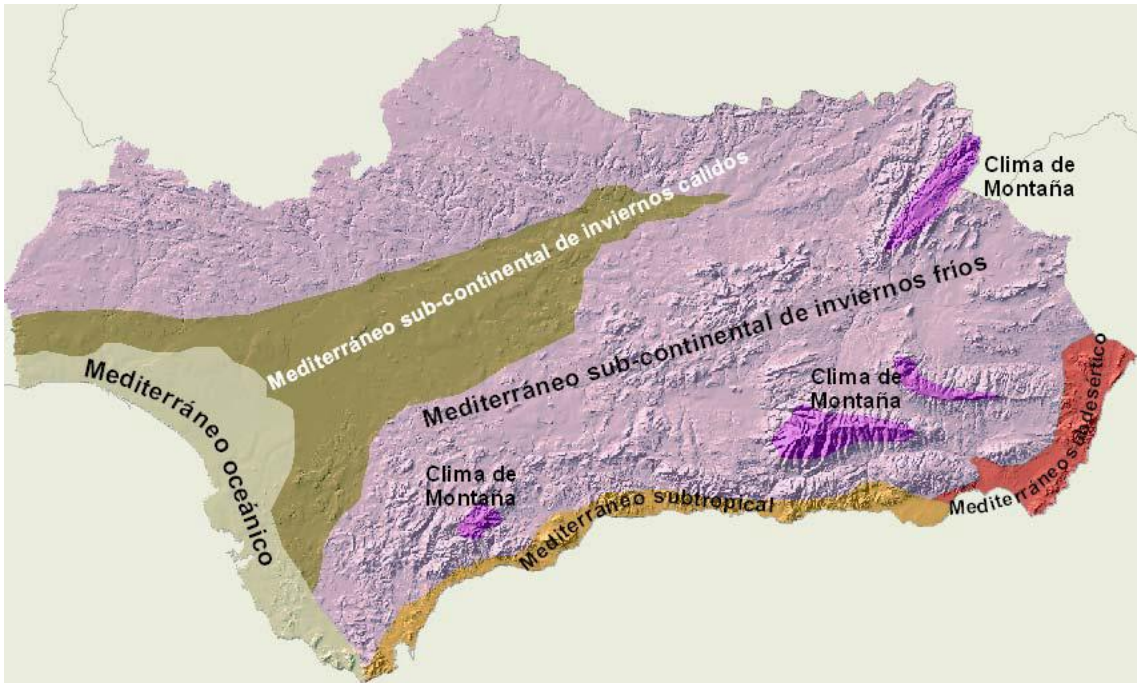



**Figura 3.5.- Tipos climáticos en Andalucía**

En concreto en nuestra zona de estudio, la cual se sitúa en el Parque Nacional de Sierra Nevada, predomina un clima eminentemente mediterráneo (y de montaña, como se observa

en la Figura 3.5), si bien su condición de alta montaña le confiere también características propias de un clima continental frío. La temperatura media anual se estima en 6 grados, con fuertes oscilaciones térmicas, día-noche, y mínimos invernales, en ocasiones, por debajo de los 35 grados bajo cero. Las precipitaciones medias son del orden de 800 mm, de las que el 75 % lo son en forma de nieve por encima de los 2.000 m de cota.

Los estiajes, no obstante, se pueden considerar largos, secos y cálidos. Existe una importante variabilidad espacial, principalmente impuesta por la alineación Oeste-Este del macizo y la disposición transversal de muchos de sus valles. El Parque Nacional abarca dos grandes vertientes, la Norte o atlántica y la Sur o mediterránea (objeto de este estudio), separadas por la línea de crestería del macizo. Estas vertientes presentan una clara diferenciación climática, manifestada en multitud de evidencias hidrológicas, botánicas y faunísticas, y también en las formas heredadas del modelado glaciar; la vertiente Norte es más fría, con menos horas de insolación, lo que influye en los procesos de invasión y deshielo. Durante los episodios glaciares cuaternarios ello afectó muy directamente al modelado de ambas vertientes, abrupto para la cara Norte y suave para la Sur, así como a la generación de formas y depósitos glaciares; todo ello influye decisivamente en el comportamiento hídrico de la alta montaña de Sierra Nevada. De este modo, la vertiente Norte siempre se ha identificado con la Sierra Nevada más típica o genuina, recibiendo la Sur la denominación genérica de La Alpujarra, aunque ambas conforman, como es de sobra conocido, el macizo de Sierra Nevada.

Sin embargo, en la distribución de la precipitación, ambas vertientes no tienen una influencia tan decisiva; en este caso, el control lo ejerce fundamentalmente la alineación Oeste- Este del macizo, coincidente con la dirección de los frentes de precipitación atlánticos (los más frecuentes en el área); debido a ello, los valles occidentales (Oeste) son los más húmedos y los más secos los orientales, muy próximos a las depresiones almerienses, dominadas ya por climas semiáridos.

-Precipitaciones

El Parque Nacional de Sierra Nevada posee unas precipitaciones difíciles de caracterizar aún, debido al déficit de pluviómetros adecuados en su zona de alta montaña; los totalizadores, escasos, funcionan mal en ese dominio, en el que, como se ha comentado, la mayor parte de la precipitación se produce en forma de nieve, y donde son frecuentes las ventiscas y tormentas de nieve. No existen nivómetros, entre otras razones, por la escasez de emplazamientos idóneos que permitan su mantenimiento y control. Ahora empiezan a disponerse de algunos datos fiables en la cuenca alta del Monachil (2.200-2.800 m), en la estación de esquí de Solynieve. Otra cuestión es la representatividad espacial de las observaciones, en un Parque con más de 60 km de línea de cumbres, con alineación Oeste-Este y numerosos valles transversales; además, a esta variabilidad espacial habría que añadir la temporal, característica de los mecanismos de precipitación de tipo mediterráneo, que también tienen su impronta en Sierra Nevada, sobre todo en su vertiente Sur.

Las máximas precipitaciones medias anuales, algo superiores a los 1.000 mm, se producen en las cabeceras de las cuencas comprendidas entre los picos de El Caballo (3.013 m) y La Alcazaba (3.366 m). Especialmente expuestos a los frentes atlánticos (del Oeste) están los valles de los ríos Lanjarón, Dúrcal, Torrente, Dílar, Monachil y Genil. Por el contrario, las precipitaciones más bajas, el orden de 450 mm, se producen en el extremo oriental del Parque, a cota próxima a los 1.000 m. Por lo que respecta a la distribución intra-anual, y con las lógicas salvedades de representatividad espacio-temporal ya señaladas, los meses de mayor pluviometría son los de Diciembre (sobre todo en la vertiente Sur) y Marzo, seguidos, con cantidades de precipitación muy similares, por los de Noviembre, Febrero y Enero. Por el contrario, el mes más seco es Julio, seguido por Agosto.

Las precipitaciones se producen mayoritariamente en forma sólida, si bien el porcentaje varía también, a igualdad de altitud, de unas vertientes y valles a otros. En la fachada occidental del Parque, más del 75 % de la precipitación se produce en forma de nieve por encima de los 2.000 m de altitud, porcentaje que decrece hacia el Este. Por encima de los 2.200 m de altitud en la fachada occidental del Parque, la persistencia de un manto prácticamente continuo de nieve es del orden de cuatro meses (de Diciembre a Marzo), persistencia que se va haciendo más efímera nuevamente hacia el Este. La existencia de nieves perpetuas en Sierra Nevada ya no existe; actualmente sólo se llegan a conservar pequeños neveros fini-estivales en la pared Norte de La Alcazaba, El Mulhacén y, sobre todo, El Veleta (Corral del Veleta). Muy probablemente, todo ello tenga que ver con un cambio climático, demasiado acelerado para ser natural, que se está dejando notar en glaciares y neveros de todo el mundo. Las cantidades de agua interceptadas o condensadas por el terreno y la vegetación en el Parque Nacional deben ser importantes, sobre todo desde el punto de vista cualitativo (vegetación), pero no están medidas, ya que escapan al control de los pluviómetros convencionales; son muchos los días en los que las nubes entran en contacto con el terreno (nieblas), especialmente en la vertiente Sur. Por otra parte, las fuertes y rápidas oscilaciones térmicas provocan procesos de condensación no menos importantes.

## 3.2.- Descripción de los tramos fluviales de estudio

Como se ha indicado anteriormente, para el presente estudio se ha partido, de la selección de los investigadores del IH, de cinco estaciones de estudio en las que se desarrollaron modelos de simulación del hábitat para la definición de un régimen de caudales ecológicos mínimos (Tabla 3.1; Figura 3.6). Estos cinco tramos de estudio se sitúan en la vertiente sur de Sierra Nevada y presentan poblaciones naturales de trucha común (*Salmo trutta*) y cacho (*Squalius pyrenaicus*). Concretamente los tramos están en los ríos Trevélez, Chico de Soportújar, Chico de Bérchules, Grande de Bérchules y río Mecina (Figura 1B).

| Estación/Río | UTM X | UTM Y | Altitud (m) |
|---|---|---|---|
| Chico de Soportújar | 463578,14 | 4091388,1 | 1.709 |
| Trevélez | 476997,62 | 4095748,68 | 1.471 |
| Chico de Bérchules | 481932,97 | 4099065,54 | 1.947 |
| Grande de Bérchules | 483529,56 | 4099722,62 | 1.740 |
| Mecina | 488323,64 | 4100990,79 | 1.863 |

**Tabla 3.1.- Situación de las estaciones de estudio donde se han desarrollado modelos de simulación del hábitat (Proyección ETRS89 Huso 30N).**

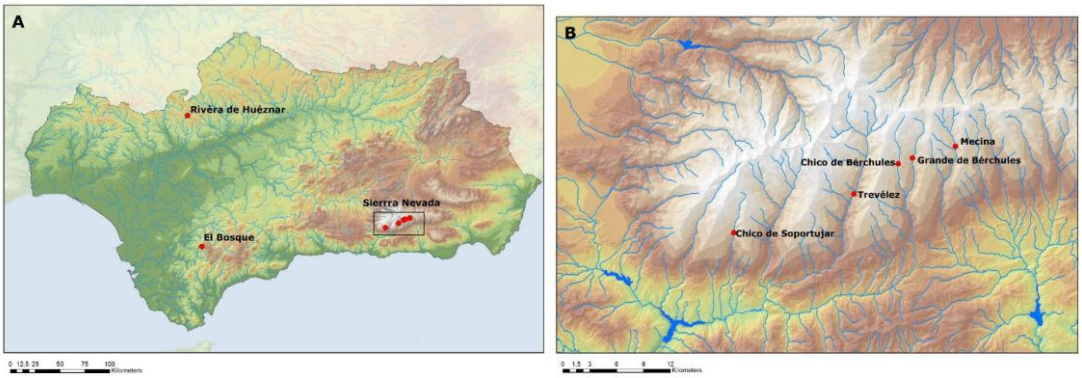



**Figura 3.6.- Localización de los ríos en la cuenca andaluza.**

A continuación se realiza una breve descripción de los tramos de río objeto de estudio, para facilitar la comprensión y entendimiento, de los resultados y las conclusiones obtenidas.

*-Chico de Bérchules*

El tramo de estudio del río Chico de Bérchules se sitúa inmediatamente aguas arriba de la acequia del Espino, a 1947 m de altitud aproximadamente (Figura 3.7). Este tramo ya se ve afectado por la detracción de aguas en las acequias de los Poyos y la de la Loma de las Chorreras, entre otras. En el presente estudio se ha caracterizado un tramo fluvial de 27 metros. El sustrato está compuesto predominantemente por bloques (35%) y cantos (30%), aunque las zonas de gravas también son abundantes (15%).

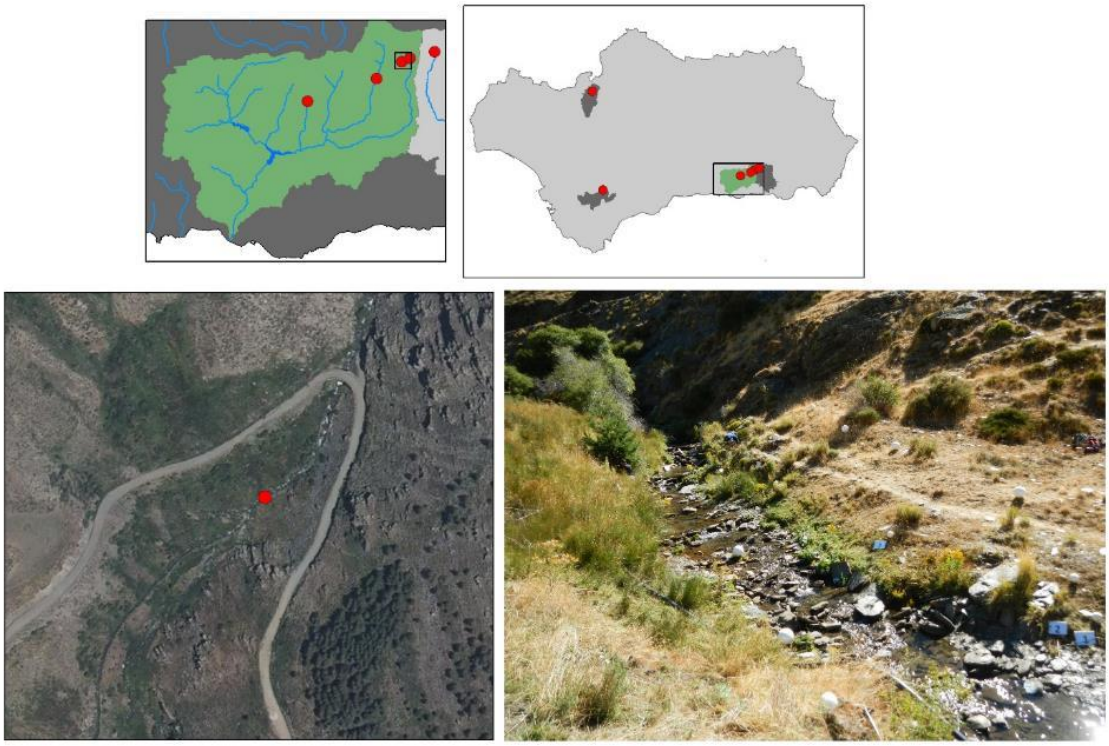


**Figura 3.7.- Localización y vista general de la estación situada en el Río Chico de Bérchules.**

El río Chico de Bérchules en el tramo de estudio presenta 0,15 $m^3/s$ de caudal medio anual en régimen natural, es decir, el menor de todos los ríos analizados en este estudio. Como ya se ha comentado anteriormente, dado el carácter nival de estos ríos. Por esta razón, de cara al establecimiento de un régimen de caudales ecológicos adecuado se ha considerado oportuno segregar el régimen anual en cuatro periodos hidrológicos.

A partir de los datos de caudales mensuales de cada año hidrológico de estudio (obtenidos mediante SIMPA II), se obtiene una gráfica (figura 3.8) que muestra la media de caudales mensuales de los 30 años, representada junto a los períodos establecidos para el estudio, los cuales e justifican más adelante. Dicha gráfica, la cual se muestra a continuación, refleja la marcada diferencia entre los períodos húmedo y seco, así como una mayor continuidad entre los períodos intermedios, para el río Chico de Bérchules.

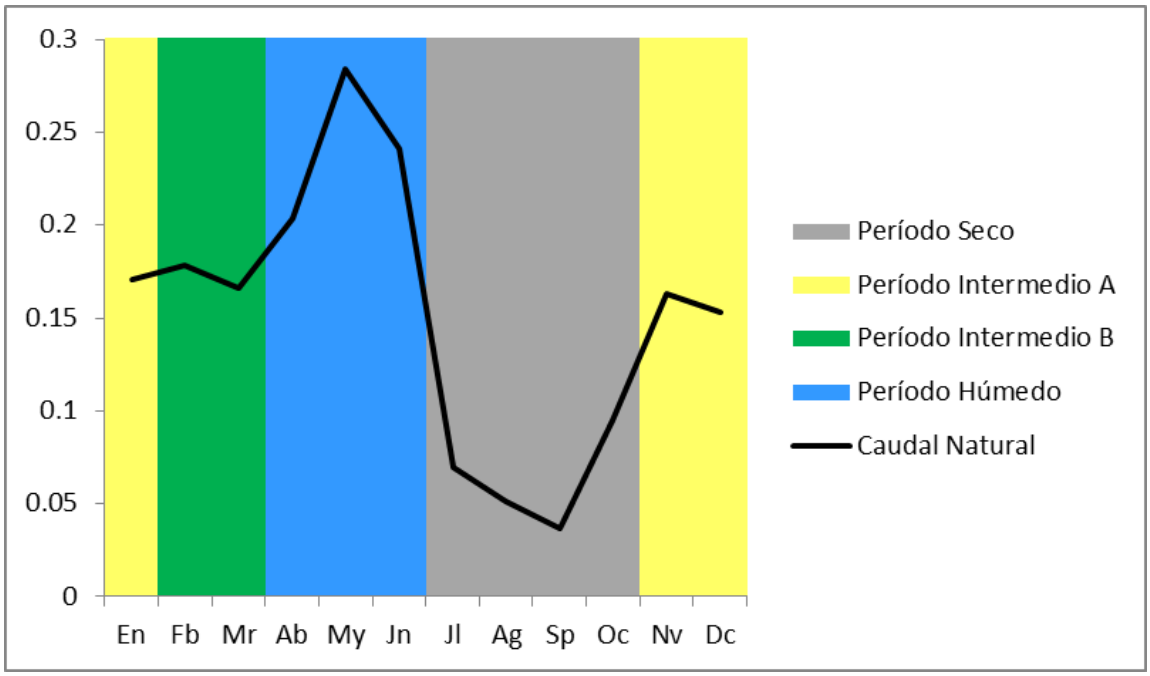



**Figura 3.8.- Régimen de caudales mensuales obtenidos mediante SIMPA-II y la aplicación de las correcciones mensuales en el punto del Chico de Bérchules.**

Las aportaciones anuales a lo largo de los 30 años hidrológicos que se toman para el estudio se muestran en la siguiente gráfica (Fifura 3.9), en la cual se observan tres máximos de aportación en los años 1992, 1996, y 2004; así como los años más secos que se datan en 1983, 1995 y 1999.

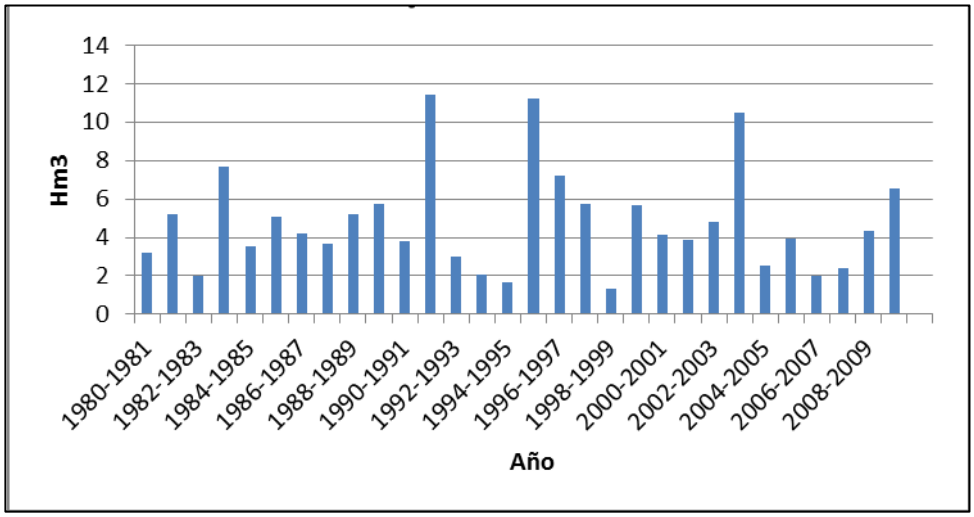



**Figura 3.9.- Aportaciones anuales del río Chico de Bérchules**

*-Grande de Bérchules*

El tramo de estudio del río Grande de Bérchules es el más oriental de la cuenca del Guadalfeo y está situado a 1740 m de altitud, 500 m aguas arriba de la acequia de las Hoyas aproximadamente (Figura 3.10). El tramo caracterizado y posteriormente modelado tiene una longitud de 26,30 m.

Se observa una cierta homogeneidad en los caudales medios de Julio y Septiembre. Esta diferencia entre estos caudales, es debida probablemente, a la detracción de agua en la acequia de Mecina, situada aguas arriba. Esta homogeneidad entre los dos caudales medidos limita hasta cierto punto la extrapolación de la curva de gasto para caudales muy altos.

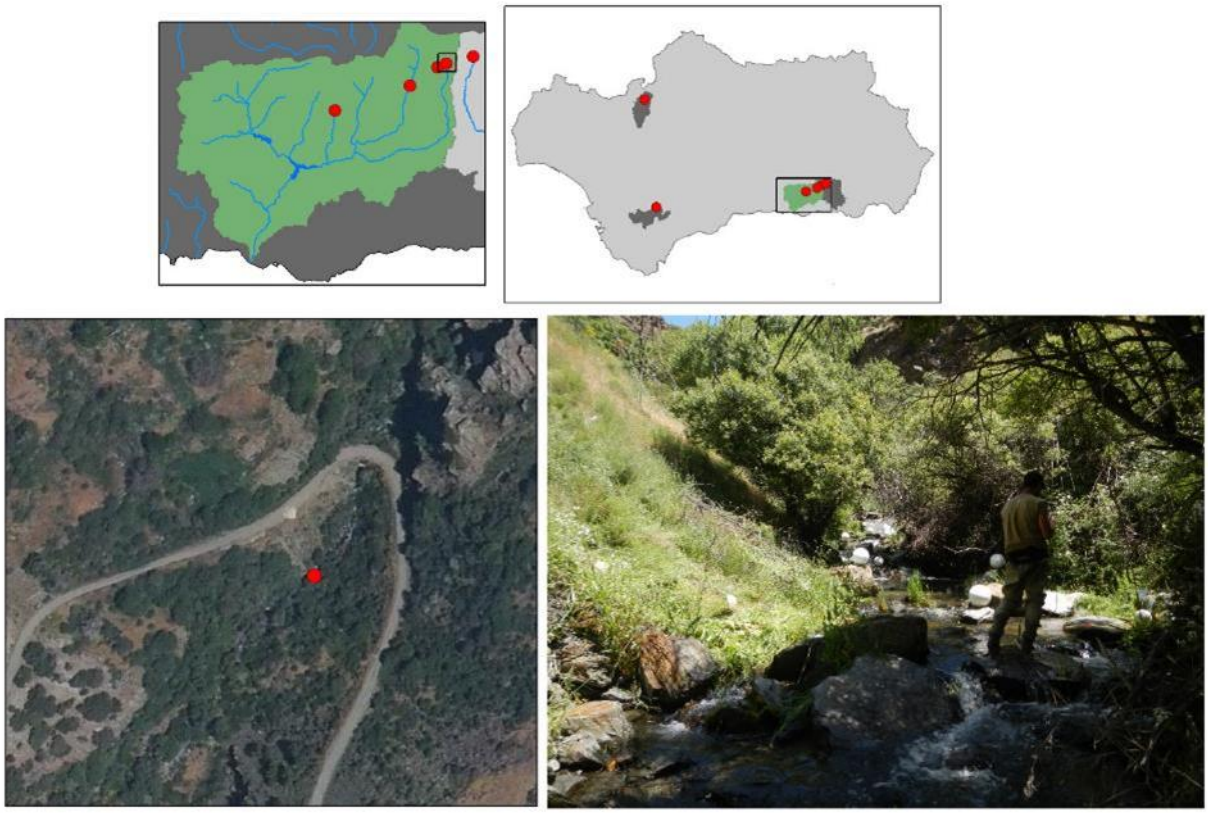


Figura 3.10.- Localización y vista general de la estación situada en el Río Grande de Bérchules.

Para el establecimiento de un régimen de caudales ecológicos adecuado se ha considerado oportuno segregar el régimen anual también en cuatro periodos hidrológicos.

El caudal medio anual en régimen natural es 0,2 m3/s, y el caudal medio por períodos se muestra en la siguiente figura.

La gráfica que aporta la información de la media de los caudales SIMPA II con su respectiva corrección (Figura 3.11), la cual se muestra a continuación, refleja la marcada

diferencia entre los períodos húmedo y seco, así como una menor diferencia entre los períodos intermedios para el río Grande de Bérchules.

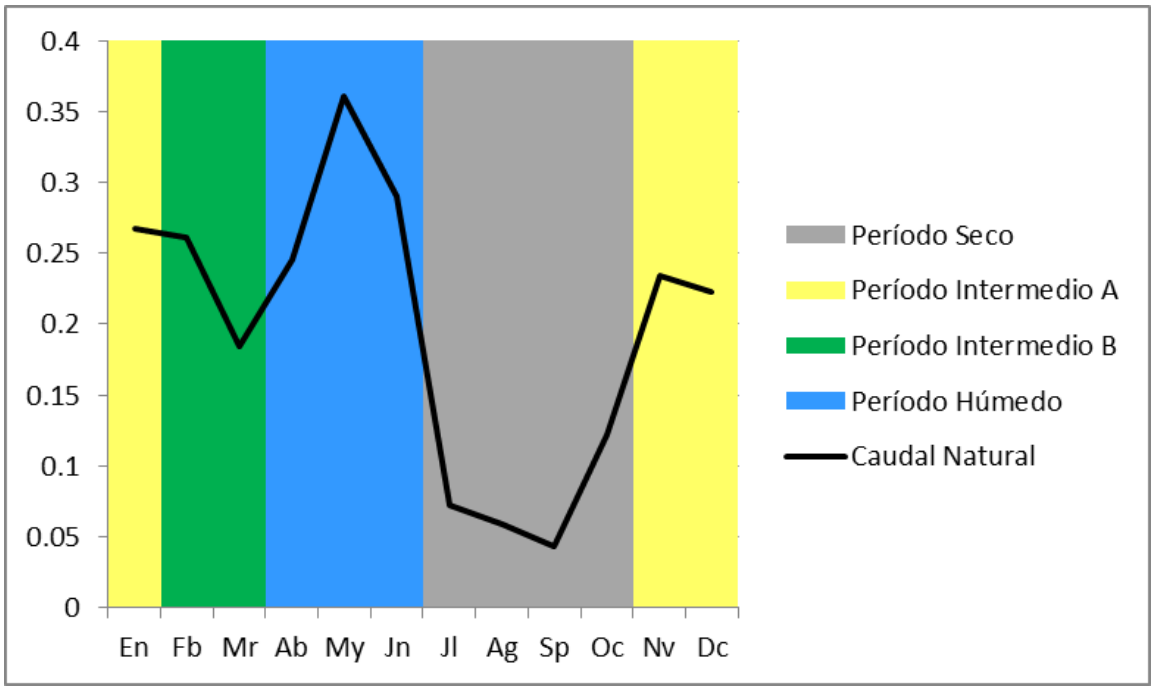



**Figura 3.11.- Régimen de caudales mensuales obtenidos mediante SIMPA-II y la aplicación de las correcciones mensuales en el punto del Grande de Bérchules.**

Las aportaciones anuales a lo largo de los 30 años hidrológicos que se toman para el estudio se muestran en la siguiente gráfica (Figura 3.12), en la cual se observan tres máximos de aportación en los años 1992, 1996, y 2004; así como los años más secos que se datan en 1983, 1995 y 1999.

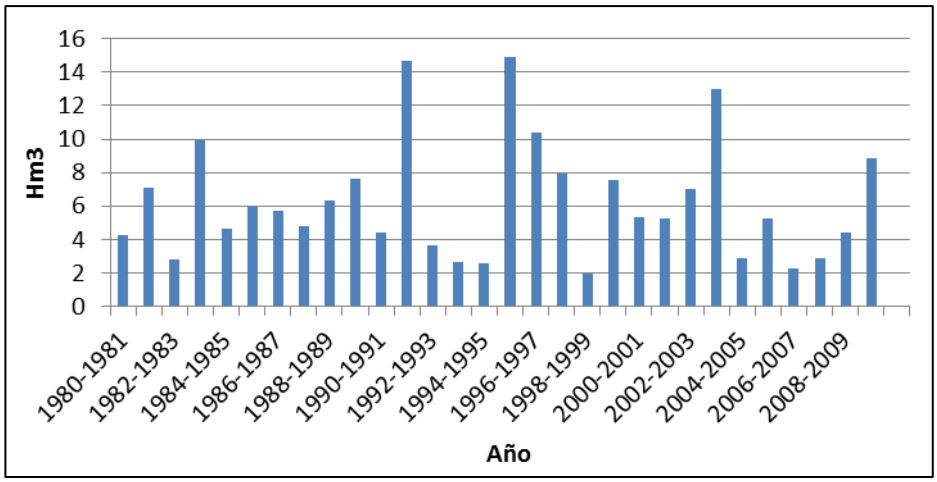



**Figura 3.12.- Aportaciones anuales del río Grande de Bérchules**

*-Trevélez*

La cuenca del Trevélez, afluente del Guadalfeo, se sitúa en la vertiente meridional de Sierra Nevada, en la zona centro-sur de la provincia de Granada. El río tiene una longitud de 33 Km y su cuenca ocupa una superficie de 23.460 ha.

Nace en el Puerto de Trevélez a unos 3.180 m. de altitud, siendo el punto de mayor cota de la cuenca el pico Horcajo de Trevélez con 3.182 m. Discurre en la mayor parte de su trayecto por zonas montañosas de fuerte pendiente en la Alpujarra alta, siendo predominantes las pendientes escarpadas, con desniveles del 30-50% pero alcanzándose en algunos puntos las muy escarpadas con más del 50% de desnivel. Al alcanzar las proximidades de la localidad de Trevélez apacigua sus aguas en algunos parajes, lo que permite encontrarnos tramos de río de aguas más remansadas con lugares excelentes para la freza de las truchas.

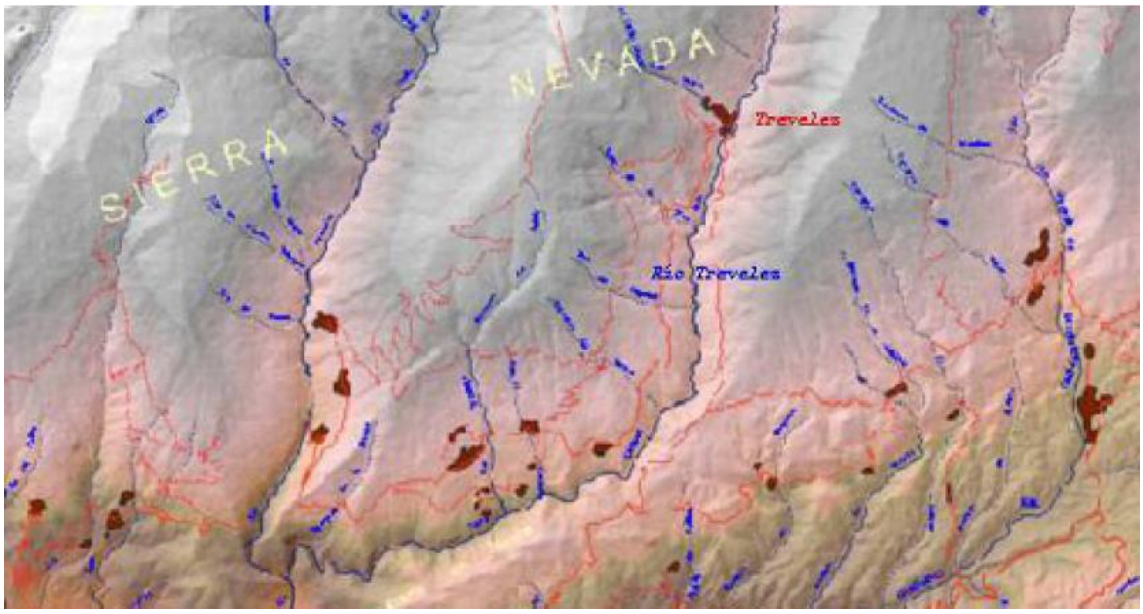



Figura 3.13.- Cuenca del río Trevélez

Geológicamente la cuenca del río Trevélez pertenece a los complejos de Sierra Nevada en cabecera y Alpujarroide en el sur. La composición geológica es muy uniforme y sencilla, formada principalmente por micaesquistos, con otros materiales como el granito. Esta composición geológica ocupa prácticamente toda la cuenca; en los márgenes del río encontramos aluviones recientes, formados por gravas, arenas arcillas y limos; aunque de poca potencia y extensión son muy importantes desde el punto de vista hidrogeológico. Este acuífero somero, que ocupa poca extensión relativa en la cuenca, no tiene la trascendencia cuantitativa en el suministro de recursos que proporcionan los acuíferos de las cuencas de los ríos de Jaén; sin embargo sí lo es desde el punto de vista social y, también como aporte hídrico que aguas abajo permite el mantenimiento de una humedad freática y sostiene una variedad vegetal característica de las laderas de las Alpujarras.

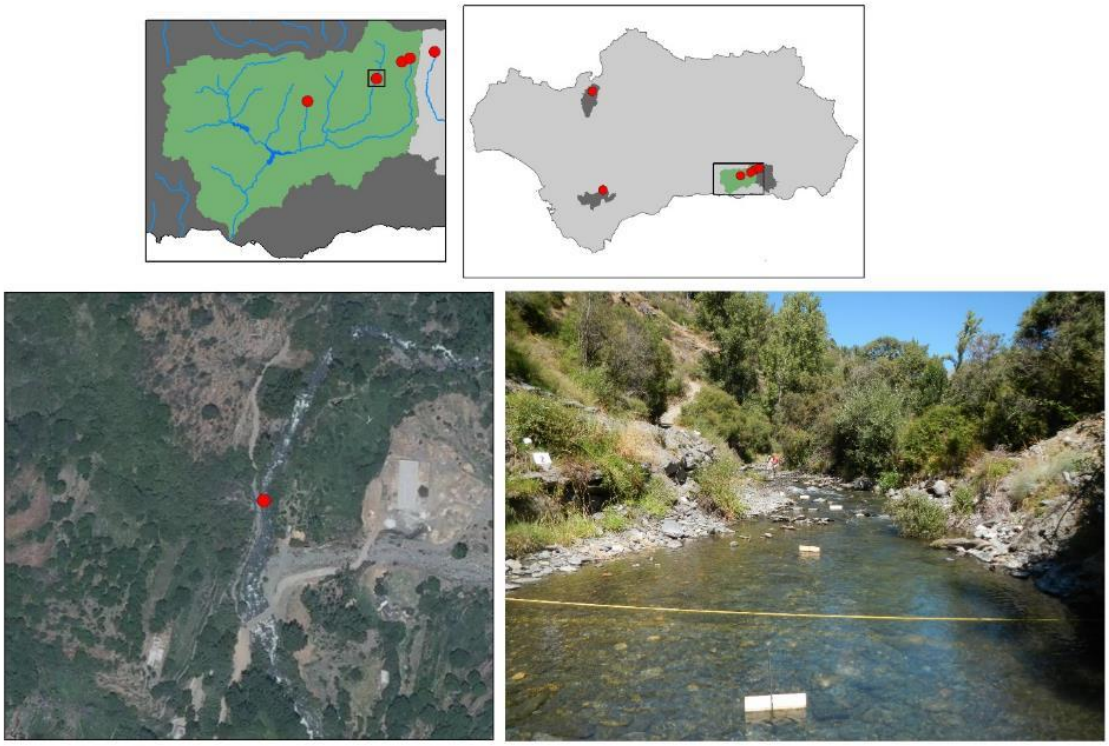


Figura 3.14.- Localización y vista general de la estación situada en el Río Trevélez.

El río Trevélez es el más caudaloso de todos los ríos analizados en la vertiente sur de Sierra Nevada en este estudio. El caudal medio anual es 1,35 $m^3/s$. El régimen hidrológico presenta un importante carácter nival, que genera un aumento significativo del caudal durante la época de deshielo. Por esta razón, de cara al establecimiento de un régimen de caudales ecológicos adecuado se ha considerado oportuno segregar el régimen anual también en cuatro periodos hidrológicos.

La gráfica que aporta la información de la media de los caudales SIMPA II con su respectiva corrección (Figura 3.15), la cual se muestra a continuación, refleja la marcada diferencia entre los períodos húmedo y seco, así como una menor diferencia entre los períodos intermedios para el río Trévelez.

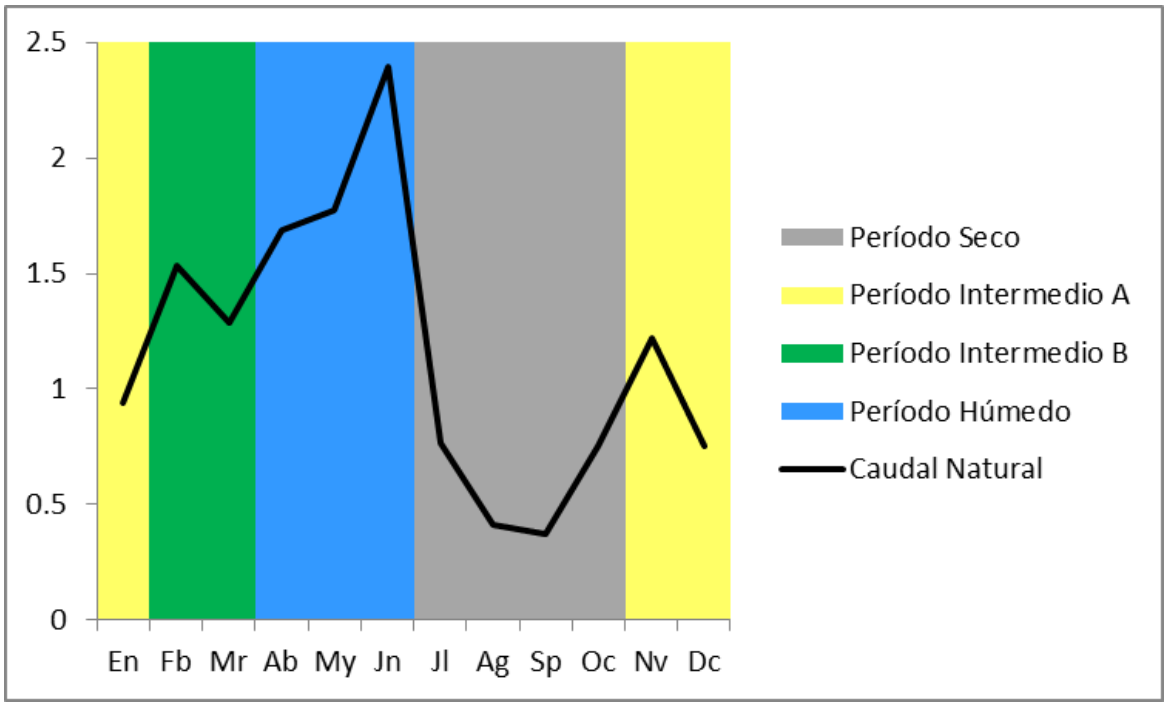



**Figura 3.15.- Régimen de caudales mensuales obtenidos mediante SIMPA-II y la aplicación de las correcciones mensuales en el punto del Trevélez.**

Las aportaciones anuales a lo largo de los 30 años hidrológicos que se toman para el estudio se muestran en la siguiente gráfica (Figura 3.16), en la cual se observan tres máximos de aportación en los años 1992, 1996, y 2004; así como los años más secos que se datan en 1983, 1995 y 1999.

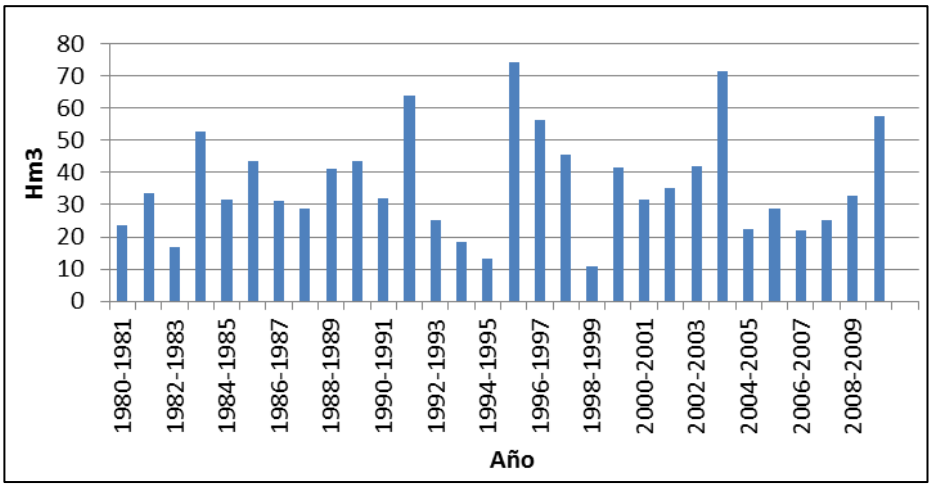



**Figura 3.16.- Aportaciones anuales del río revélez**

*-Mecina*

El tramo del río Mecina es el único tramo considerado en este estudio que está situado en la vertiente Sur de Sierra Nevada pero fuera de la cuenca del Guadalfeo. Concretamente se encuentra en la cuenca del río Adra, adyacente a la cuenca del Guadalfeo por su parte oriental. El tramo se encuentra a 1863 metros de altitud, aproximadamente 700 metros aguas arriba de la Acequia de la Enramadilla y 2500 m aguas abajo de la acequia de Horcajo (Figura 37). El sustrato está compuesto mayoritariamente por cantos, ocupando estos más del 65% de la superficie del lecho. En menor medida, también encontramos grandes bloques (18%) y grava (15%).

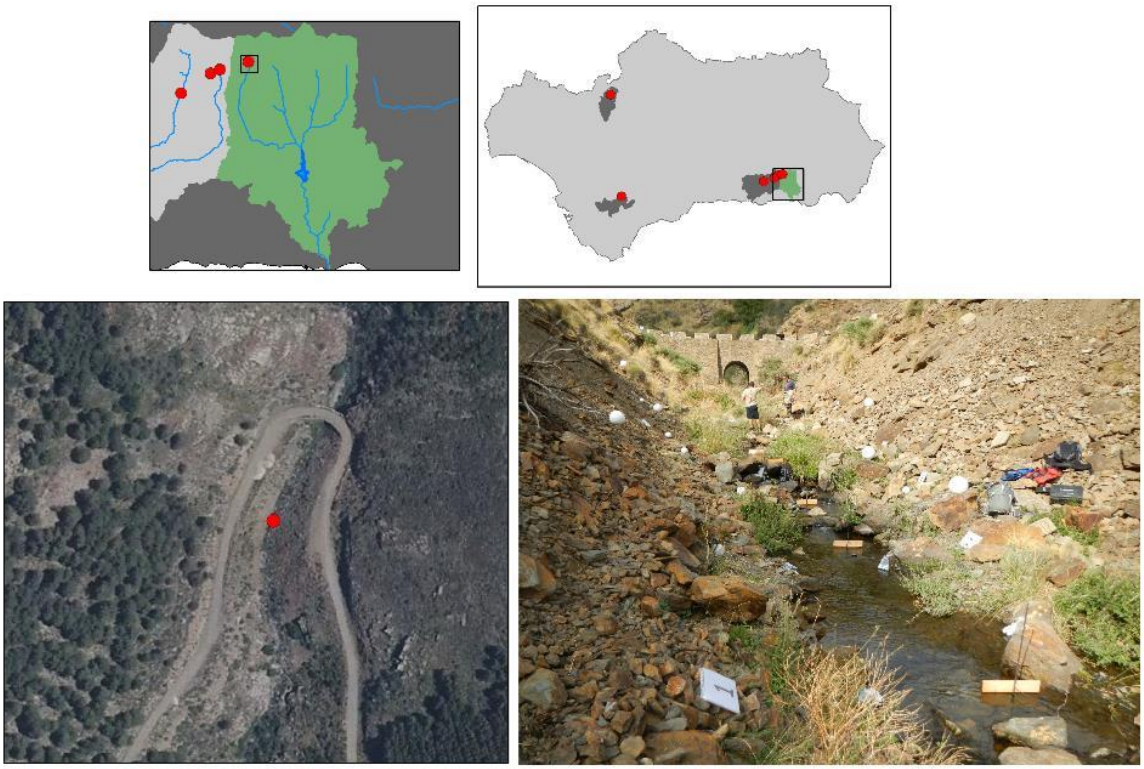


Figura 3.17. Localización y vista general de la estación situada en el Río Mecina.

El río Mecina en el tramo estudiado presenta un caudal medio anual en régimen natural de 0,17 $m^3/s$. De cara al establecimiento de un régimen de caudales ecológicos adecuado se ha considerado oportuno segregar el régimen anual también en cuatro periodos hidrológicos.

La gráfica que aporta la información de la media de los caudales SIMPA II con su respectiva corrección (Figura 3.18), la cual se muestra a continuación, refleja la marcada diferencia entre los períodos húmedo y seco, así como una menor diferencia entre los períodos intermedios para el río Mecina.

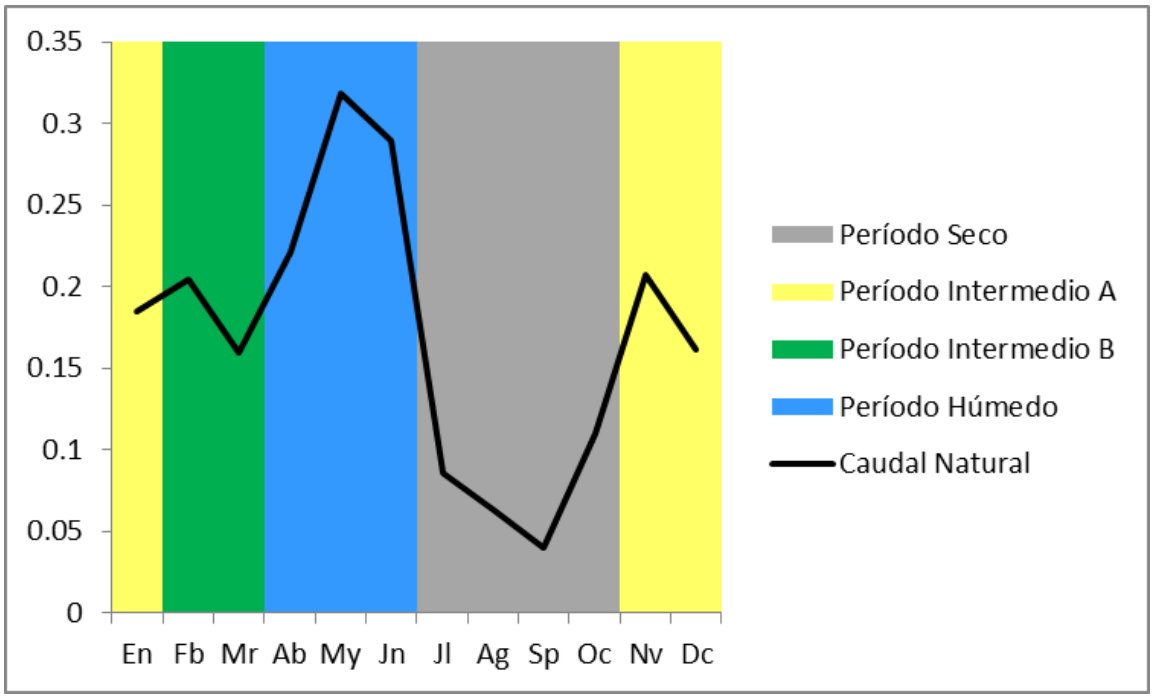



**Figura 3.18.- Régimen de caudales mensuales obtenidos mediante SIMPA-II y la aplicación de las correcciones mensuales en el punto del Mecina.**

Las aportaciones anuales a lo largo de los 30 años hidrológicos que se toman para el estudio se muestran en la siguiente gráfica (Figura 3.19), en la cual se observan tres máximos de aportación en los años 1992, 1996, y 2004; así como los años más secos que se datan en 1983, 1995 y 1999.

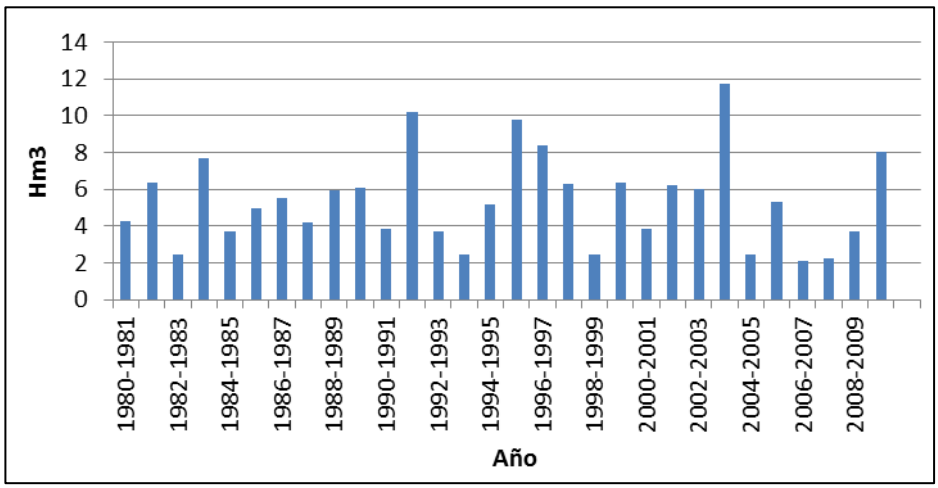



**Figura 3.19.- Aportaciones anuales del río Mecina**

*-Chico de Soportujar*

El tramo del Río Chico de Soportújar se encuentra situado inmediatamente aguas abajo del Puente Palo, a 1790 m de altitud (Figura 3.20). La longitud total de la estación de estudio es de 34 metros. El sustrato del cauce está compuesto preferentemente por cantos (50%), aunque también aparecen porcentajes significativos de grandes bloques (20%) y gravas (20%).

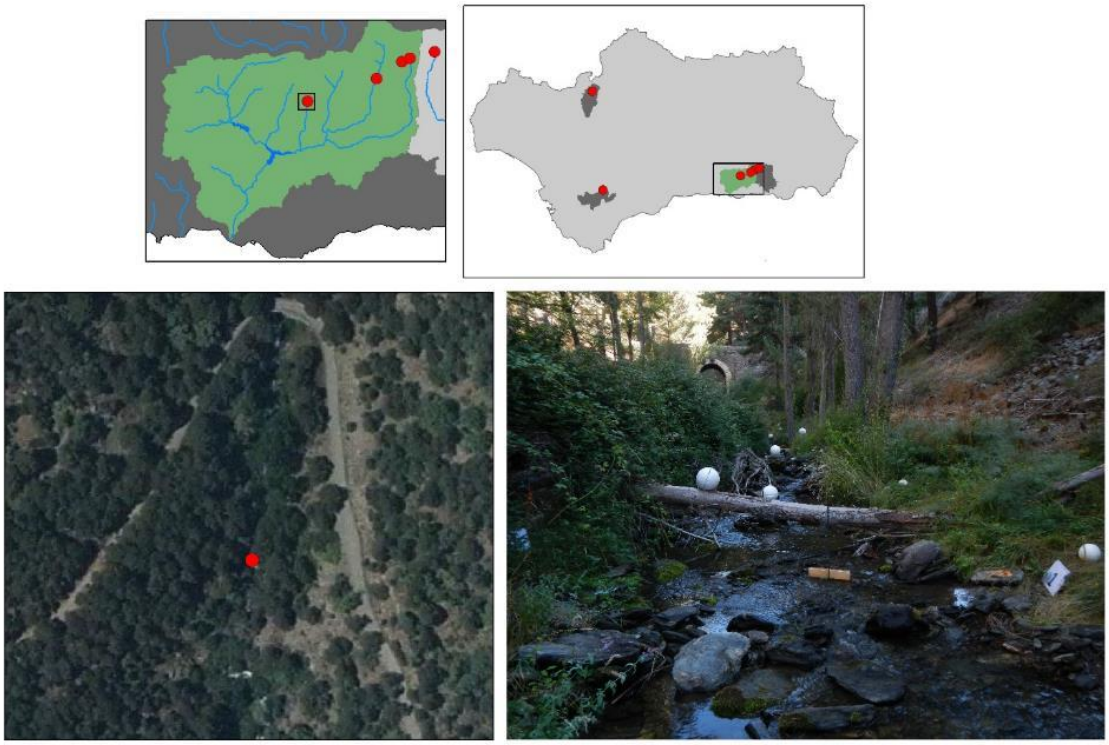


Figura 3.20. Localización y vista general de la estación situada en el RíoChico de Soportujar.

El Chico de Soportújar en la estación de estudio presenta 0,12 m3/s de caudal medio anual en régimen natural. Al igual que los demás ríos analizados en el área de Sierra Nevada, el chico de Soportújar posee un régimen hidrológico en el que los procesos de acumulación de nieve y deshielo son muy patentes, es decir, presenta un régimen nival. Sin embargo, el aumento de caudal durante la época de deshielo en relación con otros meses del periodo otoñal e invernal no es tan acusado como en los demás ríos analizados, tal como se verá más adelante. Por esta razón, de cara al establecimiento de un régimen de caudales ecológicos adecuado se ha considerado oportuno segregar el régimen anual también en cuatro periodos hidrológicos.

La gráfica que aporta la información de la media de los caudales SIMPA II con su respectiva corrección (Figura 3.21), la cual se muestra a continuación, refleja la marcada diferencia entre los períodos húmedo y seco, así como una mayor continuidad entre los períodos intermedios para el río Chico de Soportujar.

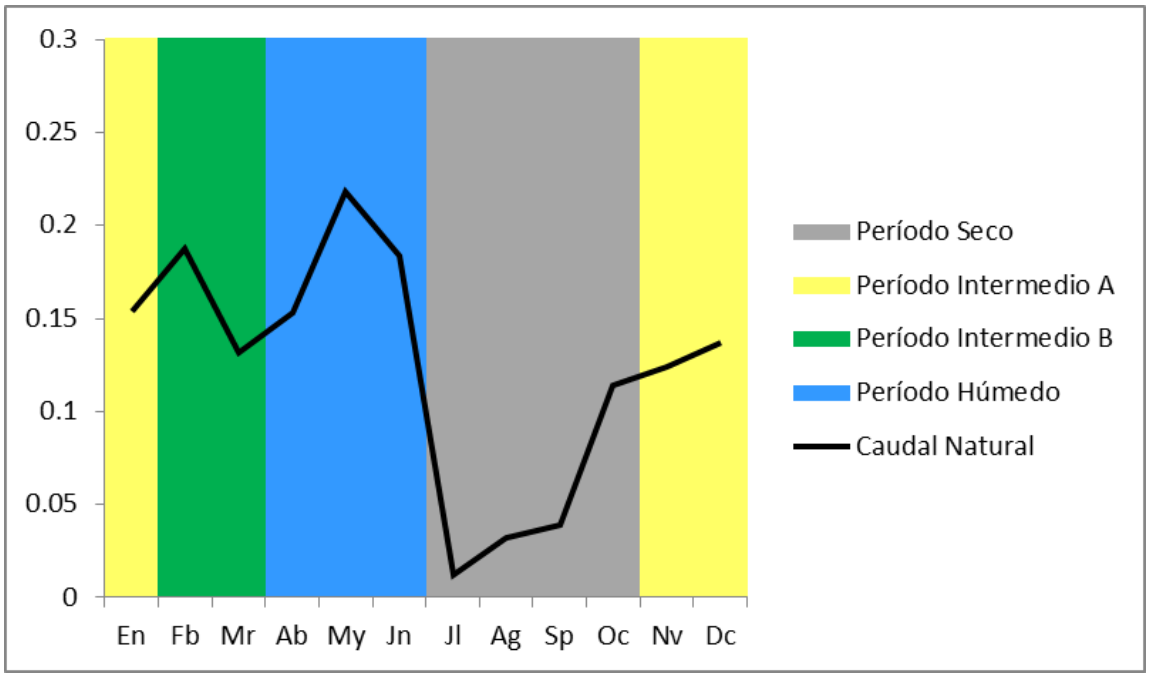



**Figura 3.21.- Régimen de caudales mensuales obtenidos mediante SIMPA-II y la aplicación de las correcciones mensuales en el punto del Chico de Soportujar.**

Las aportaciones anuales a lo largo de los 30 años hidrológicos que se toman para el estudio se muestran en la siguiente gráfica (Figura 3.22), en la cual se observan tres máximos de aportación en los años 1992, 1996, y 2004; así como los años más secos que se datan en 1983, 1995 y 1999.

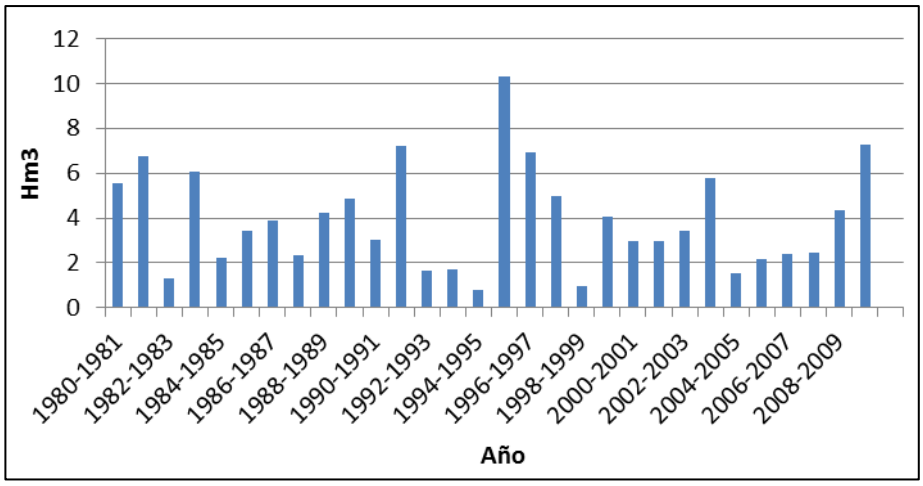



**Figura 3.22.- Aportaciones anuales del río Chico de Soportujar**

# 4.- METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico empleado para el desarrollo de los objetivos planteados comprende tres tareas (Figura 4.1*):*

- Tarea 1. Obtención y generación de datos, incluyendo la recopilación de las series temporales de caudales y de los gráficos SPU – Q para las estaciones seleccionadas.
- Tarea 2. Estimación de caudales ecológicos, mediante la aplicación de distintos métodos de cálculo (hidrológico e hidrobiológico) a los datos de cada estación.
- Tarea 3. Propuesta resolutiva, del régimen operativo de caudales, de acuerdo a una serie de criterios y decisiones.

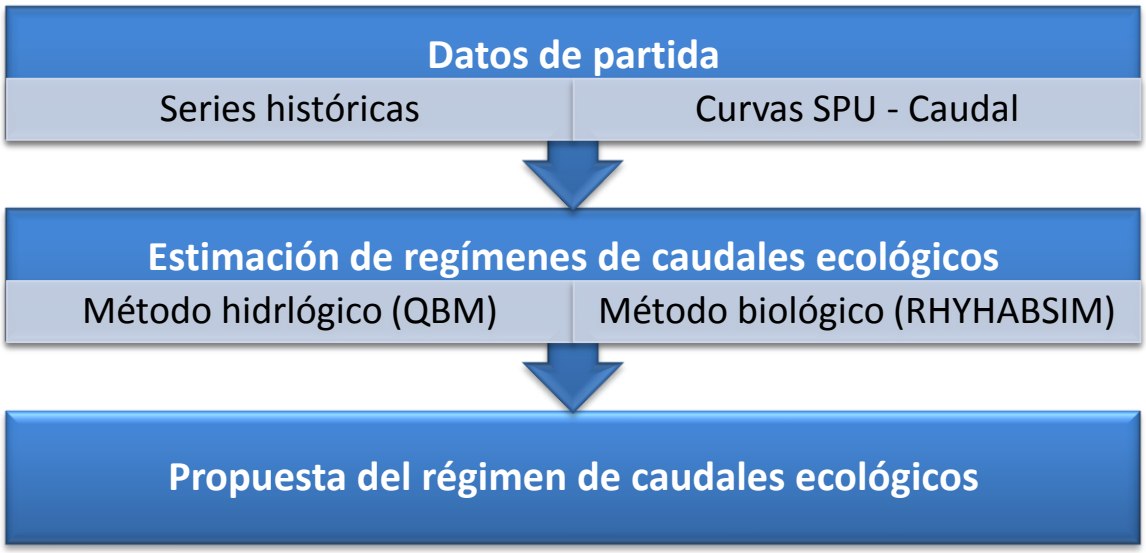



**Figura 4.1.- Esquema general del trabajo.**

## 4.1.- Datos de partida

Para el cálculo de los caudales ecológicos en el sistema fluvial de esta cuenca andaluza se han precisado dos tipos de datos: unos de tipo hidrológico y otros de tipo biológico, fruto del trabajo previo de investigadores del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria) en campañas de campo.

### 4.1.1.- Datos hidrológicos: series históricas de caudales en régimen natural.

Las series históricas de caudales (en $m^3/s$). Para el propósito de este estudio, se han escogido 30 años hidrológicos: desde el 1 de octubre de 1980 al 30 de septiembre de 2010, habiendo eliminado los 29 de febrero de los años bisiestos para uniformizarlos con 365 días.

Una fase fundamental para la estimación del régimen de caudales ecológicos mínimos es la obtención del régimen natural de caudales. Esta información es necesaria para simular y conocer las condiciones hidráulicas del tramo en el rango de valores de caudal que debería circular por el tramo objetivo de manera natural. En el presente estudio se ha utilizado la información hidrológica generada a nivel nacional por el CEDEX mediante el Modelo SIMPA-II. Esta información consiste en series mensuales de escorrentía total calculadas sobre celdas de 1 Km X 1 Km para el periodo 1980-2010 (Figura 4.2).

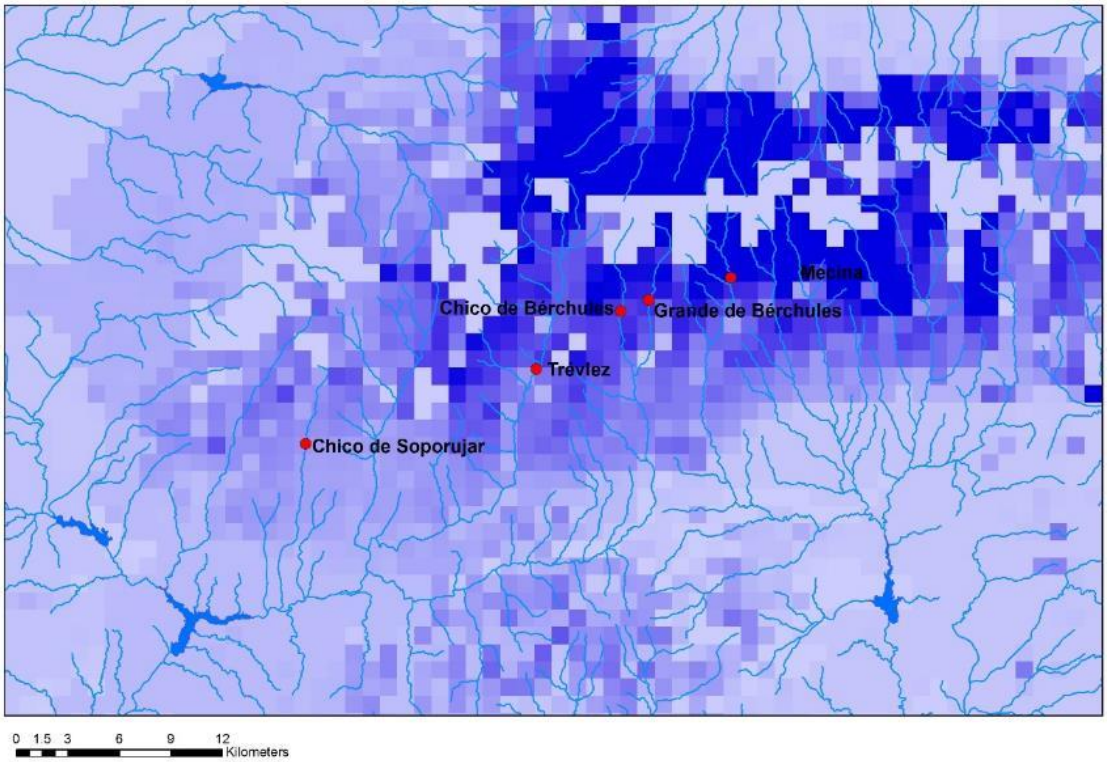



**Figura 4.2.- Raster de escorrentía total generado mediante SIMPA-II en la zona de Sierra Nevada para el mes de Febrero de 1993.**

Las series de escorrentía total extraídas de SIMPA-II representan la información hidrológica básica, pero es necesario convertirla a un formato compatible con los modelos hidráulicos desarrollados en este estudio y acordes con los objetivos del estudio. En este caso, los datos de escorrentía ($hm^3$/mes) correspondientes a los pixeles de una cuenca concreta se trasformaron a datos de caudal ($m^3/s$) en los segmentos fluviales de los ríos de dicha cuenca. Es decir, fue necesario acumular la escorrentía obtenida en toda la cuenca vertiente asociada a

puntos concretos de la red fluvial. Para conseguir esta transformación, en primer lugar, a partir de un MDT con tamaño de celda de 20 m x 20 m se generó una red fluvial sintética. Esta red fluvial está formada por segmentos fluviales comprendidos entre 100 y 500 metros de longitud. Posteriormente, se acumuló la escorrentía mensual, lo que ha permitido generar series de caudal mensual en cada uno de estos segmentos. Tanto la generación de la red fluvial sintética como la acumulación de la escorrentía de la cuenca se han llevado a cabo mediante la herramienta NetStream (www.terrainworks.com).

Una vez que se obtuvieron las series de caudal natural a escala mensual para el periodo 1980-2010 en cada estación de estudio, se calcularon los caudales medios mensuales. Este hidrograma representa las condiciones hidrológicas naturales y a partir de las mismas se calcularon posteriormente los caudales ecológicos.

Cabe mencionar que en el área de estudio de Sierra Nevada existen dos estaciones de aforo cuyo régimen hidrológico se puede considerar practicante natural. Estas son las estaciones de aforo situadas en el río Trevélez (EA 6103) y en el río Lanjarón (EA 6097) (Figura 4.3).

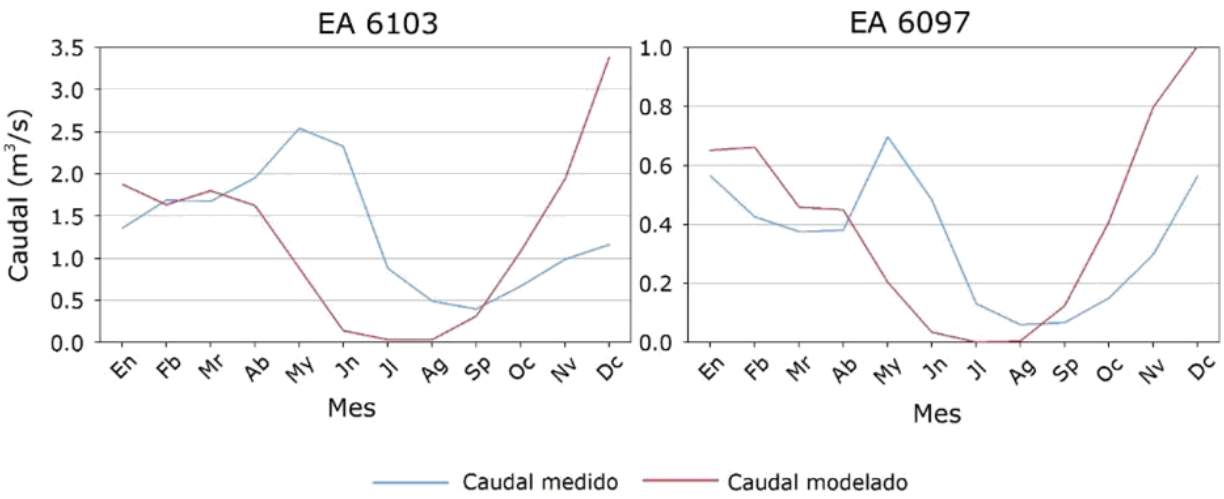



**Figura 4.3.- Comparación gráfica entre los caudales medios mensuales medidos en los ríos Trevélez (EA 6103) y Lanjarón (EA 6907) y los obtenidos en esos tramos fluviales a partir de las series modeladas mediante SIMPA-II.**

La comparación de las series medidas en las estaciones de aforo y las generadas a partir de SIMPA-II ha puesto de manifiesto discrepancias importantes. Estas discrepancias son entendibles asumiendo el carácter nival del ciclo hidrológico en estos ríos y las limitaciones de SIMPA-II para incluir el efecto de la acumulación de nieve y el deshielo. Dada la importancia de conocer la hidrología natural de los ríos objeto de estudio, todos ellos influenciados por el efecto de la acumulación de nieve, se ha optado por corregir todas las series modeladas a partir de las series medidas. Para ello, en base a las diferencias entre las series de caudales medidas en los aforos EA 6103 y EA 6097 y sus correspondientes series modeladas mediante

SIMPA-II, se han obtenido unos factores de corrección mensuales que posteriormente se han aplicado a las series modeladas en cada uno de los ríos objeto de estudio.

### *4.2.2.- Datos hidrobiológicos: curvas SPU – Q*

Las fases que se llevaron a cabo para la obtención de dichos datos por el personal del Instituto, los cuales necesitaron un trabajo de campo y un posterior procesado de datos, fueron, entre otras, el desarrollo de un modelo hidráulico, el desarrollo o adopción de un modelo biológico para las especies representativas del tramo, la obtención del régimen natural de caudales y una simulación del hábitat.

Gracias a este trabajo, se consiguieron los datos necesarios para proceder a poner en práctica el método hidrobiológico, empleándose los gráficos que relacionan el caudal con la Superficie Ponderada Útil (Q/SPU).

## 4.3.- Estimación de caudales ecológicos

Para el cálculo de los caudales ecológicos se han utilizado dos métodos representativos, cada uno de ellos, de las corrientes o enfoques científicos más importantes existentes en la actualidad. El primero, el método del Caudal Básico de Mantenimiento (QBM), es un método hidrológico que se ha empleado en el estudio general de caudales ecológicos de todas las cuencas en los correspondientes planes hidrológicos. Por otra parte, el segundo método utilizado es biológico, por lo que se centra en caracterizar el hábitat fluvial para diferentes condiciones de caudal. El método biológico que se ha empleado es el método de los microhábitats “Evaluation de l'Habitat” (EVHA), en el cual se emplean las curvas de habitabilidad de distintas especies piscícolas.

### *4.3.1.- Caudal Básico de Mantenimiento (QBM).*

Esta metodología, desarrollada por el Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña y posteriormente adoptada por el CEDEX (1998), permite la estimación de un caudal mínimo, o “caudal de mantenimiento”, que se asume capaz para mantener un nivel de habitabilidad adecuado en el curso fluvial.

-Base teórica

El punto de partida del método está en la relación caudal – habitabilidad, así como en dos principios ecológicos básicos:

- La organización y persistencia de los ecosistemas se encuentran condicionados en el tiempo por sucesiones de acontecimientos y en el espacio por la distribución de gradientes físicos.

- Se puede considerar que los acontecimientos temporales modifican los gradientes físicos, pero no a la inversa, lo que permite ordenar jerárquicamente la actuación de dichos factores.

En el caso de los ríos, el tiempo lo marca el caudal circulante en términos de magnitud y variabilidad, mientras que los gradientes físicos se definen a partir de la interacción entre el caudal circulante y el cauce. De esta forma, el método asume que el flujo de agua es el factor clave en la configuración de los sistemas fluviales, del cual dependen, en última instancia, el resto de procesos hidráulicos, morfológicos y biológicos.

## - Determinación de los caudales ecológicos

El método de los Caudales de Mantenimiento se basa en el análisis estadístico de series hidrológicas de caudales medios diarios, siendo necesario disponer de datos lo más completos posibles. Para ello, el método QBM define una serie de parámetros, de cuya integración surge la propuesta de régimen de caudales de mantenimiento. Éstos son los siguientes:

- *Caudal base (Qb)*, o caudal mínimo necesario para el mantenimiento de las características esenciales y estructura de la comunidad acuática afectada, por debajo del cual las condiciones de habitabilidad se reducen de forma considerable.

- *Caudal de acondicionamiento (Qc)*, valor opcional constante que se aplica como una corrección del Qb, a la baja o al alza, en el caso de que, por criterios de diferente índole (regulaciones, criterios estéticos, protección de un recurso biológico específico…), se crea conveniente y/o justificado adoptar un caudal base mayor o menor al calculado.

- *Caudal estándar (Qe),* definido como la suma de Qb y Qc.

- *Caudal de mantenimiento (Qm),* calculado a partir de la aplicación al caudal estándar de un factor de corrección de la variabilidad temporal (fc) del hidrograma natural.

- *Caudal generador (Qg),* establecido como el caudal de plena ocupación de la sección ordinaria del río.

- *Caudal máximo admisible (Qa)*, a partir del cual se acotan los valores máximos derivados de posibles regímenes artificiales de los aprovechamientos hidráulicos.

En el presente estudio, la aplicación práctica de la metodología se realizó obteniendo, inicialmente, el Qb y el Qm, con el fin de establecer una primera propuesta de régimen de caudales ecológicos para cada estación. La incorporación del caudal de acondicionamiento y del caudal generador representa una decisión a tomar en la futura implantación de los regímenes operativos de caudales, en función de los requerimientos y condiciones de cada tramo, tal y como se analizará en la interpretación final de la cuenca.

De acuerdo con el método original de Palau (CEDEX, 1998), la determinación de dichos valores se ajustó al siguiente esquema de cálculo (Figura 4.4):

- Para el cálculo del caudal base (Qb) se aplica un análisis estadístico de medias móviles. Los datos de partida para el cálculo son los registros de los caudales medios diarios "qij", donde "i"" son los días del año y "j" son los distintos años considerados. De esta forma se obtiene una matriz de caudales medios diarios para los j años considerados.

- Sobre cada columna de esta matriz, comenzando por el último año disponible, se calculan las medias móviles sobre intervalos de orden creciente, que varían desde 1 hasta 100, obteniéndose "j" tablas trapezoidales de 100 columnas y un número de filas que varía desde 365 en la primera columna (medias móviles de orden 1) a 266 en la última columna (medias móviles de orden 100).

- De cada una de estas columnas (caudales medios de 1, 2, 3… hasta 100 días consecutivos) se obtiene el valor mínimo, el cual tiende hacia el caudal medio anual (media móvil de orden 365, no calculada), siendo menor que este valor. Repitiendo este proceso para cada uno de los años considerados, se obtiene una matriz de caudales mínimos para los j años considerados.

- A partir de la matriz de mínimos, se calculan las medias aritméticas por columnas, obteniéndose una serie de 100 valores (vector vs), sobre el que se calcula el mayor incremento relativo entre cada par de valores consecutivos, siendo Qb el caudal mayor que define dicho par de valores.

- En el caso del presente estudio, al no considerarse inicialmente ningún caudal de acondicionamiento, el caudal base define al mismo tiempo el caudal estándar (Qe).

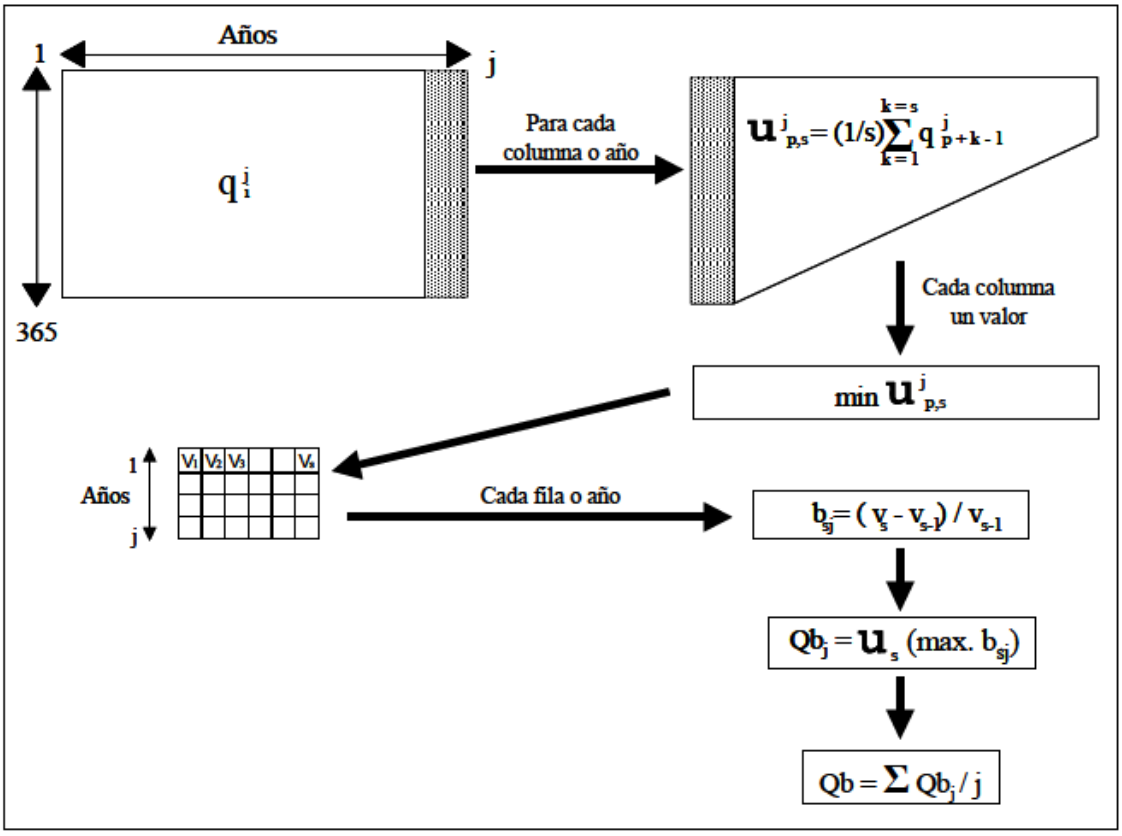



**Figura 4.4.- Esquema del proceso de cálculo del caudal básico a partir de una matriz inicial de caudales medios diarios de "j" años.**

A partir del caudal estándar (Qe) se obtiene el caudal de mantenimiento para cada mes del año (Qmi), multiplicando el valor del Qe por un factor de variabilidad (fc) específico, calculado a partir de la relación entre el caudal medio para el mes i (Qmesi) y el mínimo caudal medio mensual (Qmesmin):

$$Q_{mi} = Q_e \sqrt{\frac{Q_{mesi}}{Q_{mesmin}}}$$

- Ejecución del método QBM

- Se utilizó el programa "Visual Qbase, versión 3.0.9" (de la "Agència Catalana de l´Aigua", empresa pública de la Generalitat de Catalunya encargada de la política del Govern en materia de aguas) para calcular el régimen mensual de caudales básicos de mantenimiento (en su programación se aplica el método QBM que propuso Palau).

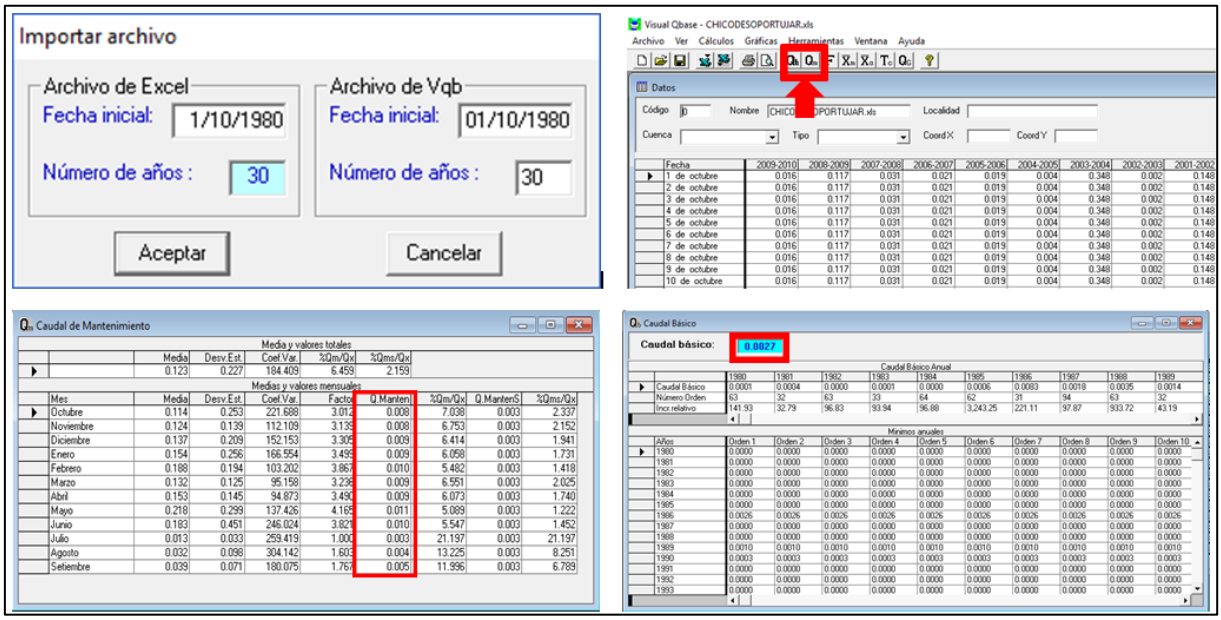



**Figura 4.5.- Algunas impresiones del procedimiento de cálculo mediante el software. (Periodo escogido: 30 años).**

$$QBM = Q_b \cdot \sqrt{\frac{Q\ mes\ i}{Q\ mes\ inf.}}$$

## *4.3.2.- Método de los Microhábitats*

El Método de los Microhábitats (Souchon, 1994) fue desarrollado por el Cemagref, basado en los principios del método IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) propuesto por Bovee (1982) para la determinación de los caudales ecológicos.

El método de los microhábitats emplea datos para cada segmento de calado, velocidad, sustrato y superficie y, a partir de ellos, estima el hábitat disponible para cada especie considerada en cada tramo de río, también denominado "Superficie Ponderada Útil" (SPU). Este estudio, para aplicar este método se hace uso del software "Rhyhabsim".

### - Base teórica

El método de los microhábitats proporciona una cuantificación de las capacidades potenciales de acogida para la fauna piscícola, en función del caudal, a un nivel de estudio de amplitud espacial y temporal reducida, entre las facies o unidades morfológicas y el microhábitat. De forma general, este método permite determinar, en un tramo de un curso fluvial, la superficie de hábitat disponible para diferentes especies.

En el método IFIM (en el que se basa el Método de los Microhábitats) el cálculo de los caudales mínimos se realiza estimando la cantidad de hábitat útil para diferentes especies en función del caudal. La existencia de una estrecha relación entre la "funcionalidad" en términos ecológicos y la "habitabilidad" en términos físicos permite asumir que, para unas condiciones supuestamente adecuadas de habitabilidad, la respuesta del propio ecosistema se puede encaminar a proporcionar un nivel de funcionalidad adecuado.

En la determinación del hábitat útil se combinan dos modelos: un modelo hidráulico, que permite la estimación de los gradientes hidráulicos que se producen dentro de un tramo para un rango de caudales analizados, y un modelo de carácter biológico, que estima las preferencias de los organismos considerados (peces en el caso del RHYHABSYM, a través de la interpretación de las respuestas de las diferentes especies a los gradientes de una serie de parámetros hidráulicos y físicos (velocidad, calado, sustrato).

La combinación de los dos modelos permite la cuantificación del Hábitat Potencial Útil, en forma de Superficie Ponderada Útil (SPU), para un rango de caudales, en varias secciones de un determinado cauce. A partir de esta información, generada en diferentes tramos de un río, se pueden determinar los regímenes de caudales propuestos para mantener un nivel de funcionalidad que se considere aceptable.

-Estimación de caudales con el método de los Microhábitats

Las fases principales del cálculo de caudales ecológicos realizada por el modelo RHYHABSIM se pueden resumir en los aspectos que se incluyen en el esquema de la Figura 4.6 y que se explican a continuación:

- La aplicación del modelo hidráulico requería, en primer lugar, la generación y validación de un proyecto, basado en los ficheros topográfico, hidráulico y de caudales de la estación correspondiente, tal y como se ha explicado en apartados anteriores.

- Por otra parte, el desarrollo del modelo biológico se basa en la selección de una o varias especies de peces representativas del tramo estudiado. Para ello, se contaron con las curvas de preferencia para la trucha y el cacho, incluidas en el propio programa.

- Con ello procedieron al cálculo de la Superficie Ponderada Útil en diferentes situaciones de caudal, lo que aportó una primera estimación de caudal ecológico a considerar en el análisis posterior.

- De la conjunción de estas curvas con la información sobre distribución mensual de caudales se pueden obtener aproximaciones al establecimiento de caudales ecológicos para diferentes épocas del ciclo hidrológico anual, de acuerdo con el procedimiento de optimización propuesto por Bovee (1982).

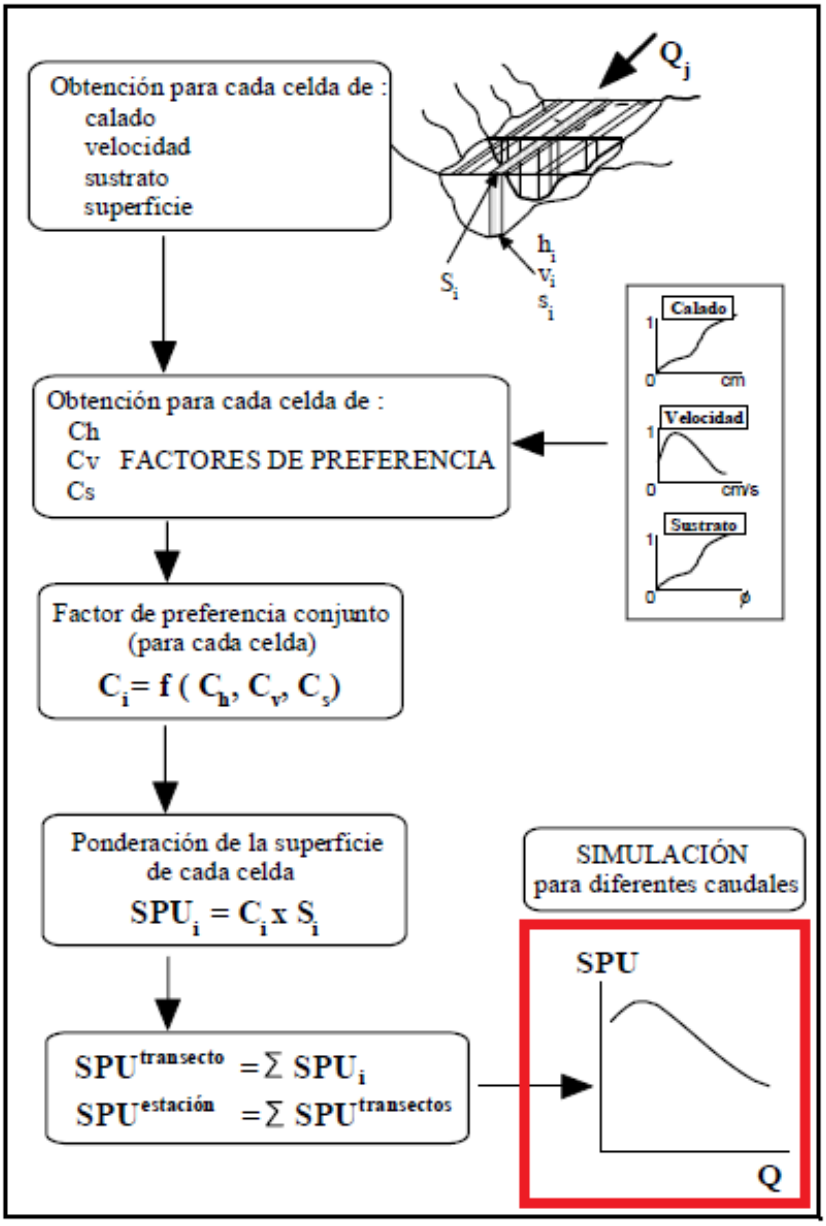



**Figura 4.6.- Esquema de aplicación del modelo hidráulico y biológico de RHYHABSYM. Se destaca la curva final que corresponde al input obtenido para el desarrollo del estudio**

Desde un punto de vista práctico, la aplicación del método RHYHABSIM se ha visto plasmada en el siguiente procedimiento en este estudio:

- Selección de las especies de peces representativas de la estación.

- Utilización de las curvas SPU/caudal, correspondientes a los estadíos de las especies consideradas, para todo el tramo (SPU absoluta) y para cada una de las facies analizadas (SPU normalizada a 100 m de río).

- Aplicación de las técnicas de optimización, con el fin de determinar las combinaciones de condiciones más limitantes que generan un menor impacto, en cada mes del año, considerando todos los resultados de cada especie conjuntamente.

- Propuesta preliminar del régimen mensual de caudales ecológicos para cada especie y periodo.

- Selección de las especies objetivo

Dada la diversidad de ambientes fluviales, se decidió tomar dos especies piscícolas como especies representativas. Dichas especies son la *trucha común* y el *cacho*; de las cuales se estudian los estadíos de adulto, juvenil, y alevín. La elección de dichas especies se llevó a cabo en base a su representatividad y habitabilidad en todos los tramos de los ríos analizados, así como su valor ecológico. Estas especies son dos, y se muestran a continuación en la siguiente tabla.

| Especie | Nombre Científico | Estadíos Analizados | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ADU | JUV | ALE |
| Trucha común | *Salmo trutta fario* | X | X | X |
| Cacho | *Squalius pyrenaicus* | X | X | X |

**Tabla 4.2.- Estadíos estudiados para las especies seleccionadas.**

Los modelos biológicos se representan mediante curvas de preferencia. Las curvas de preferencia son funciones univariantes que expresan la idoneidad para una especie o estadio de un rango de valores de una determinada variable hidráulica (velocidad, profundidad y sustrato). Las curvas de preferencia toman valores entre 0 (no útil) y 1 (útil). Dada la dificultad y la cantidad de datos y recursos necesarios para desarrollar curvas de preferencia robustas, habitualmente se opta por el uso de curvas de preferencia desarrolladas en estudios específicos.

A continuación se muestran imágenes de un ejemplar de cada especie piscícola con sendas imágenes que muestran los factores de preferencia para cada una de ellas.

**Figura 4.7.- Imagen de la trucha común (*Salmo trutta fario*).**

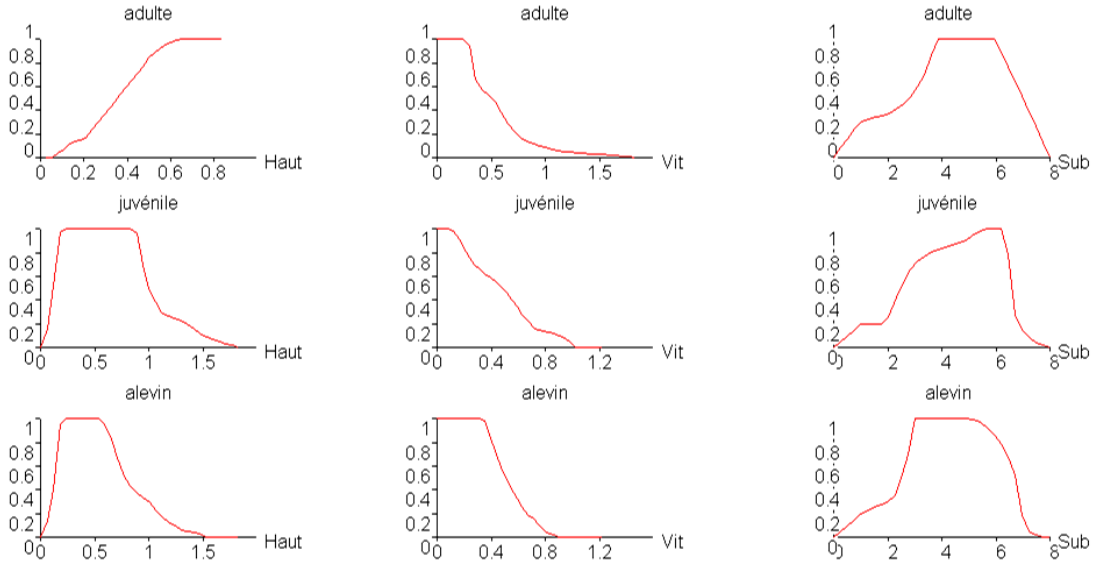



**Figura 4.8.- Imagen de los factores de preferencia (profundidad, velocidad y sustrato) de la trucha común (*Salmo trutta fario*).**

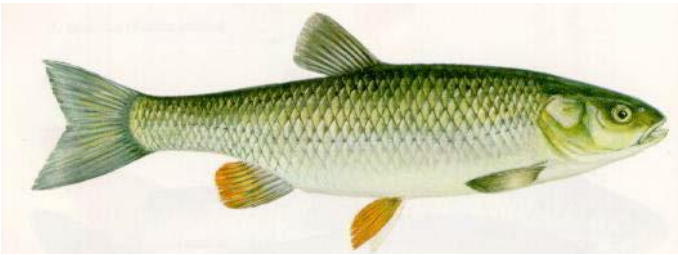


**Figura 4.9.- Imagen del cacho (*Squalius pyrenaicus*).**

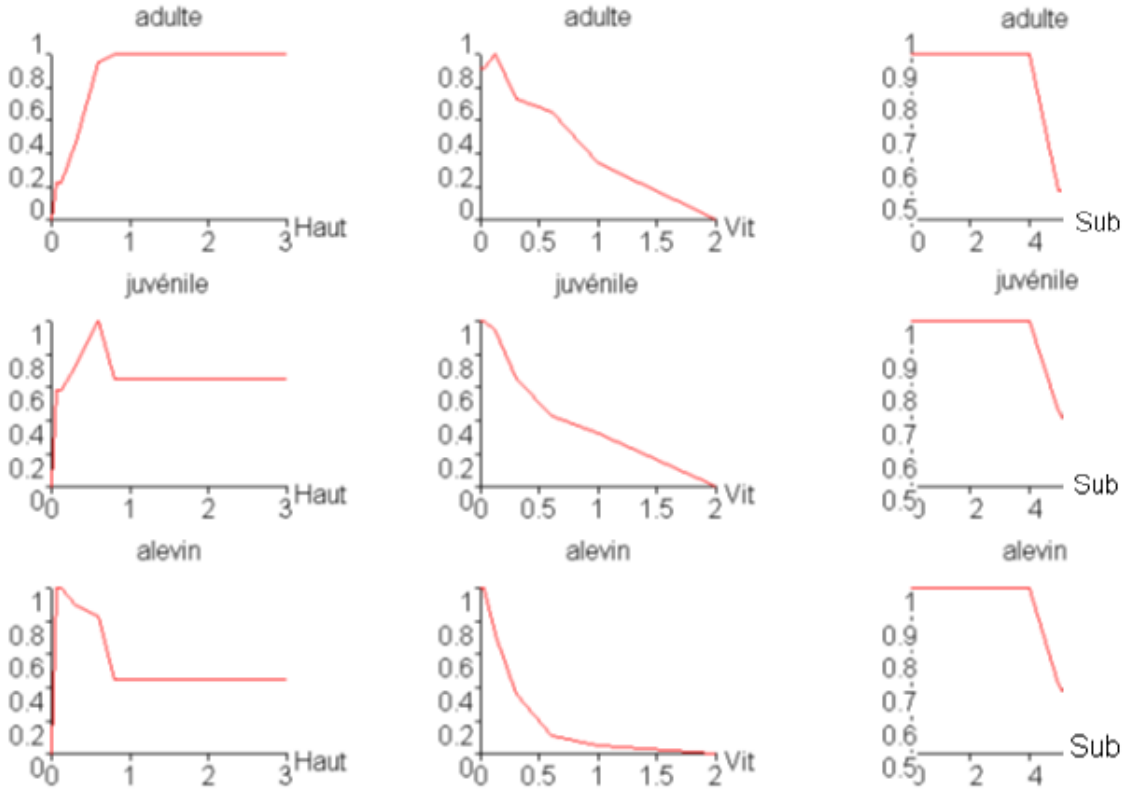



**Figura 4.10.- Imagen de los factores de preferencia (profundidad, velocidad y sustrato) del cacho (*Squalius pyrenaicus*).**

## - Aplicación de las técnicas de optimización

La superficie ponderada útil (SPU) resulta de la combinación de dos variables del hábitat: un índice de idoneidad del hábitat (Factor de preferencia conjunta, Ci) y de la superficie que éste ocupa. El método IFIM estima la superficie ponderada del hábitat de forma independiente para cada especie y estadío de desarrollo. El problema surge de la necesidad de tener que seleccionar un valor entre todos los resultados obtenidos. Esta simplificación conlleva, lógicamente, una pérdida de información, tras el laborioso proceso de toma y tratamiento de los datos que supone la aplicación del método de los microhábitats.

Como se observa en la Figura 4.3.2.B, en la que se representan las curvas SPU/Caudal para diferentes estadíos y especies en distintos tramos, los cambios en el hábitat físico en función del caudal no se producen de forma homogénea en todos los casos. Así, un flujo beneficioso para un estadío de vida de una determinada especie puede ser perjudicial para otro y, además, un incremento del caudal no se traduce necesariamente en un aumento del hábitat "útil". Por otra parte, los requerimientos de caudales de las diferentes especies y fases varían según la época del año. Incluso, dentro del mismo cauce, el flujo que maximiza los hábitats en un determinado tramo puede no afectar de forma significativa aguas arriba o abajo del mismo, ya que depende de la propia geomorfología de cada zona.

Otro condicionante a tener en cuenta es el ciclo de vida de las especies. De ahí que el conocimiento sobre el aporte anual de agua es al menos tan importante como la relación hábitat – caudal. Hay determinados períodos del año en los que una reducción excesiva del caudal puede traer consigo consecuencias negativas para las poblaciones piscícolas, el período reproductor es un momento especialmente crítico para las poblaciones.

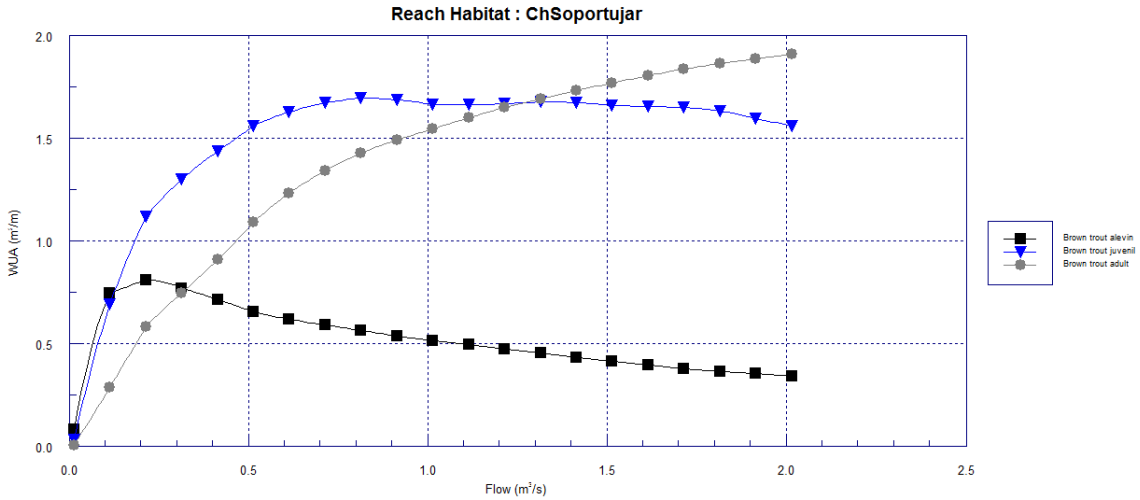



**Figura 4.11.- Resultados del software RYHABSYM para de las curvas SPU-caudal de la trucha y sus diferentes fases de desarrollo.**

## -Método de Bovee

Teniendo en cuenta todos los aspectos referidos anteriormente, se ha considerado oportuno aplicar una técnica de interpretación que permita seleccionar un valor de forma objetiva y acorde con las metas que se persiguen y que, por otra parte, sea una técnica sencilla en su resolución. En este caso, se ha optado por la técnica de optimización propuesta por Bovee (1982).

El método de Bovee es un método que nos permite poner en relación los resultados obtenidos hasta el momento. Esta técnica se utiliza para determinar las combinaciones de condiciones que producen la opción más beneficiosa, en términos de habitabilidad, o la que minimiza los impactos negativos. Para ello, el caudal que proporciona la mejor combinación de disponibilidad de hábitats para una especie determinada, en cualquier mes, se selecciona a partir de una matriz de optimización como la que se muestra en la Figura 4.12,

Menor SPU

**RÍO CHICO DE SOPORTUJAR SPU - Trucha**

| Mes | | | Probabilidad superación | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | |
| Enero | | Qd (m3/seg) | 0.06 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 0.11 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | |
| | | Juveniles | 0.36 | 0.21 | 0.07 | 0.07 | 0.00 | Caudal |
| | | Alevines | 0.55 | 0.39 | 0.19 | 0.19 | 0.00 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 0.11 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | **0.06** |
| Febrero | | Qd (m3/seg) | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.02 | 0.00 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 0.31 | 0.18 | 0.11 | 0.02 | 0.00 | |
| | | Juveniles | 0.74 | 0.51 | 0.36 | 0.07 | 0.00 | Caudal |
| | | Alevines | 0.77 | 0.66 | 0.55 | 0.19 | 0.00 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 0.31 | 0.18 | 0.11 | 0.02 | 0.00 | **0.12** |

Mayor SPU

**Figura 4.12.- Ejemplo de matriz elaborada para la selección de caudales ecológicos correspondientes a cada mes, de acuerdo con el método de optimización de Bovee (1982).**

- Se toman los caudales correspondientes a una determinada probabilidad de superación, para cada mes, estimada a partir de la curva de caudales clasificados de dicho mes. Éstos representan los caudales que son superados un tanto por ciento de los días del mes analizado, en el conjunto de los 42 o el periodo de 14 años en cuestión, considerando el valor medio registrado en dicho período. El rango de probabilidades de superación empleado incluye los valores de: 50 %, 60%, 70%, 80% y 90%.

- El segundo paso consiste en calcular, para cada estadío y valor de caudal, el valor de la SPU correspondiente, partiendo de las curvas de SPU/caudal elaboradas anteriormente.

- Para determinar el flujo óptimo entre todos los estadíos de cada especie analizada, se selecciona el valor mínimo de SPU para cada caudal y, a continuación, se marca el máximo de dichos valores mínimo.

- Finalmente, el caudal considerado como óptimo es el que genera dicha SPU máxima (valor máximo de las SPU mínimas de cada estadío y caudal). Este valor corresponde al flujo que maximiza el hábitat con el menor aporte o, dicho de otra forma, el que minimiza la pérdida de hábitat.

Con los resultados obtenidos para cada mes se construye un hidrograma que representa el régimen preliminar de caudales ecológicos propuesto para cada especie Figura 4.13

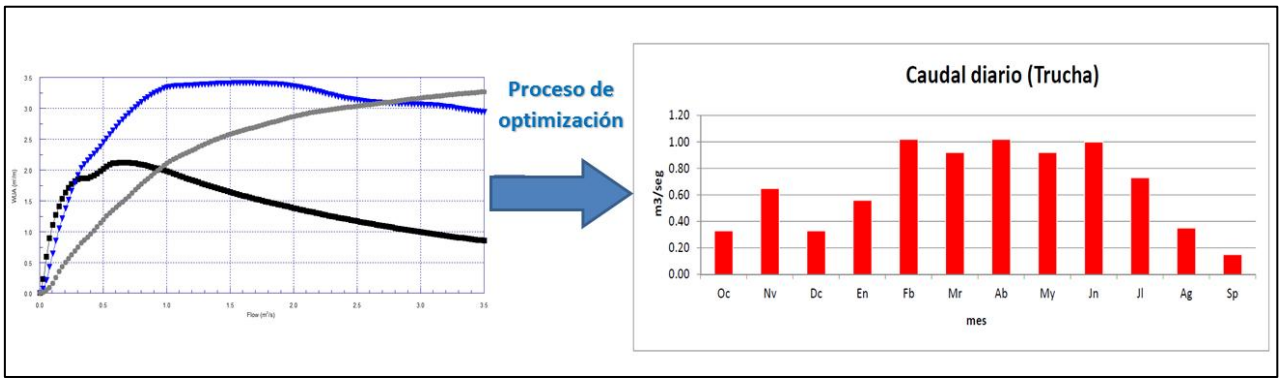



**Figura 4.13.- Ejemplo del régimen de caudales obtenido tras la aplicación de la técnica de optimización propuesta por Bovee (1982).**

-Adaptación del procedimiento del método de los Microhábitat

1. Para establecer el régimen mensual de caudales ecológicos, se utilizaron las curvas que relacionan SPU (Superficie Ponderada Útil, en $m^2$) y el caudal (Q, en $m^3/s$) para cada una de las especies. En los gráficos (Figura 4.14) se distinguen funciones SPU = f(Q) distintas dependiendo de la edad del pez en cuestión: freza, alevín, juvenil y adulto.

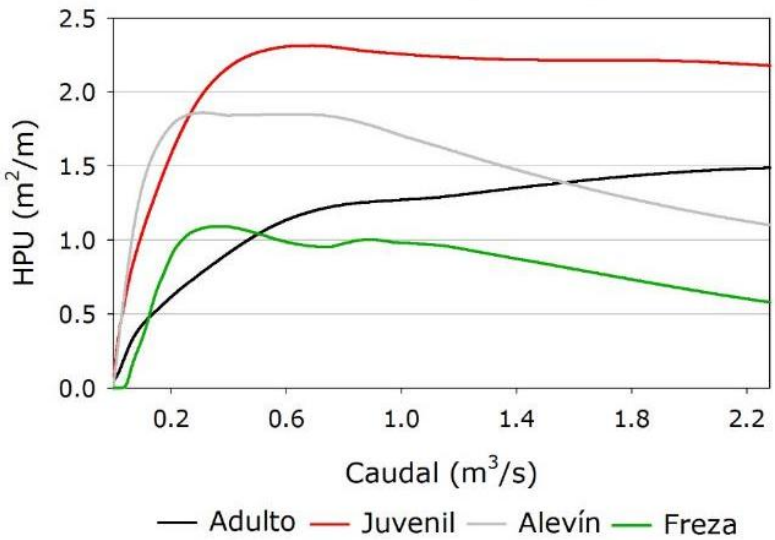



**Figura 4.14.- Gráfica SPU-Q para diversas fases de desarrollo de la trucha en la estación del río Trévelez.**

2. Para facilitar el proceso de aplicación del método EHVA, se utiliza el software RHYHABSYM para visualizar cada una de las gráficas y sus puntos representativos.

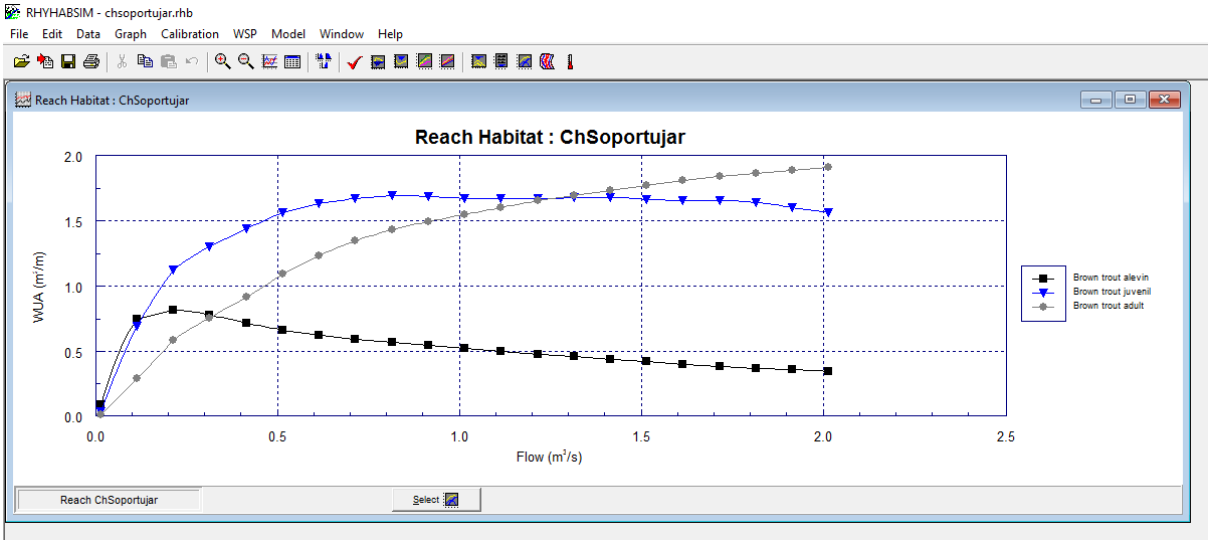
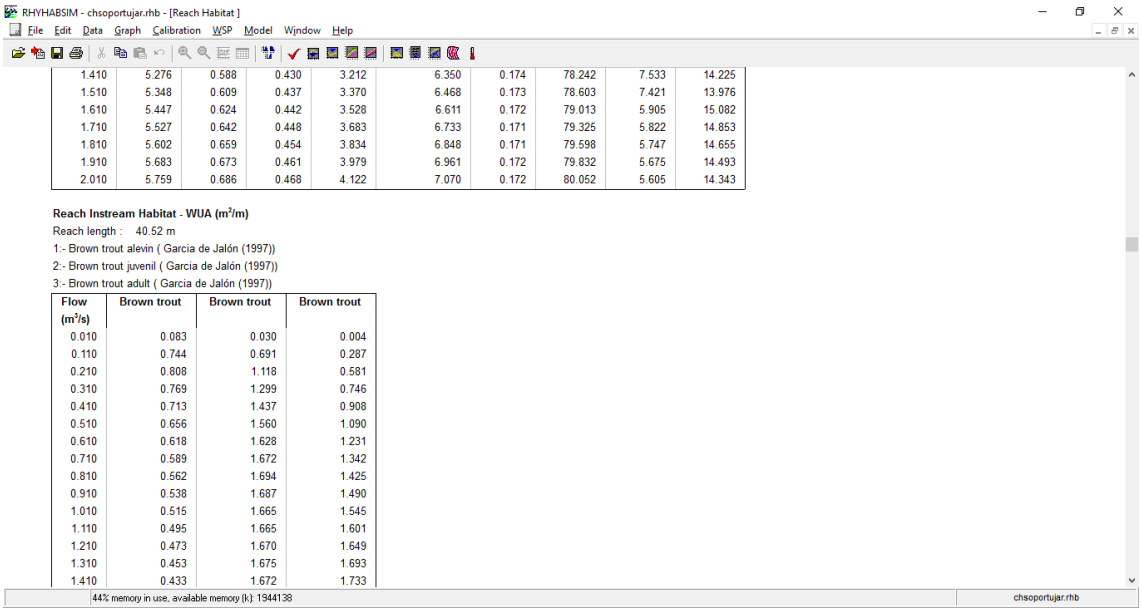



**Figura 4.15.- Visualización de la gráfica SPU-Caudal, de las diferentes etapas en la vida de la trucha en el río Chico de Soportujar, a través del programa RHYHABSYM.**

3. Para poder determinar las coordenadas (SPU, caudal) de cada punto de la gráfica que nos interesa, el programa RHYHABSYM nos ofrece la opción de visualizar los valores de la gráfica por puntos en una lista.



| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.410 | 5.276 | 0.588 | 0.430 | 3.212 | 6.350 | 0.174 | 78.242 | 7.533 | 14.225 |
| 1.510 | 5.348 | 0.609 | 0.437 | 3.370 | 6.468 | 0.173 | 78.603 | 7.421 | 13.976 |
| 1.610 | 5.447 | 0.624 | 0.442 | 3.528 | 6.611 | 0.172 | 79.013 | 5.905 | 15.082 |
| 1.710 | 5.527 | 0.642 | 0.448 | 3.683 | 6.733 | 0.171 | 79.325 | 5.822 | 14.853 |
| 1.810 | 5.602 | 0.659 | 0.454 | 3.834 | 6.848 | 0.171 | 79.598 | 5.747 | 14.655 |
| 1.910 | 5.683 | 0.673 | 0.461 | 3.979 | 6.961 | 0.172 | 79.832 | 5.675 | 14.493 |
| 2.010 | 5.759 | 0.686 | 0.468 | 4.122 | 7.070 | 0.172 | 80.052 | 5.605 | 14.343 |

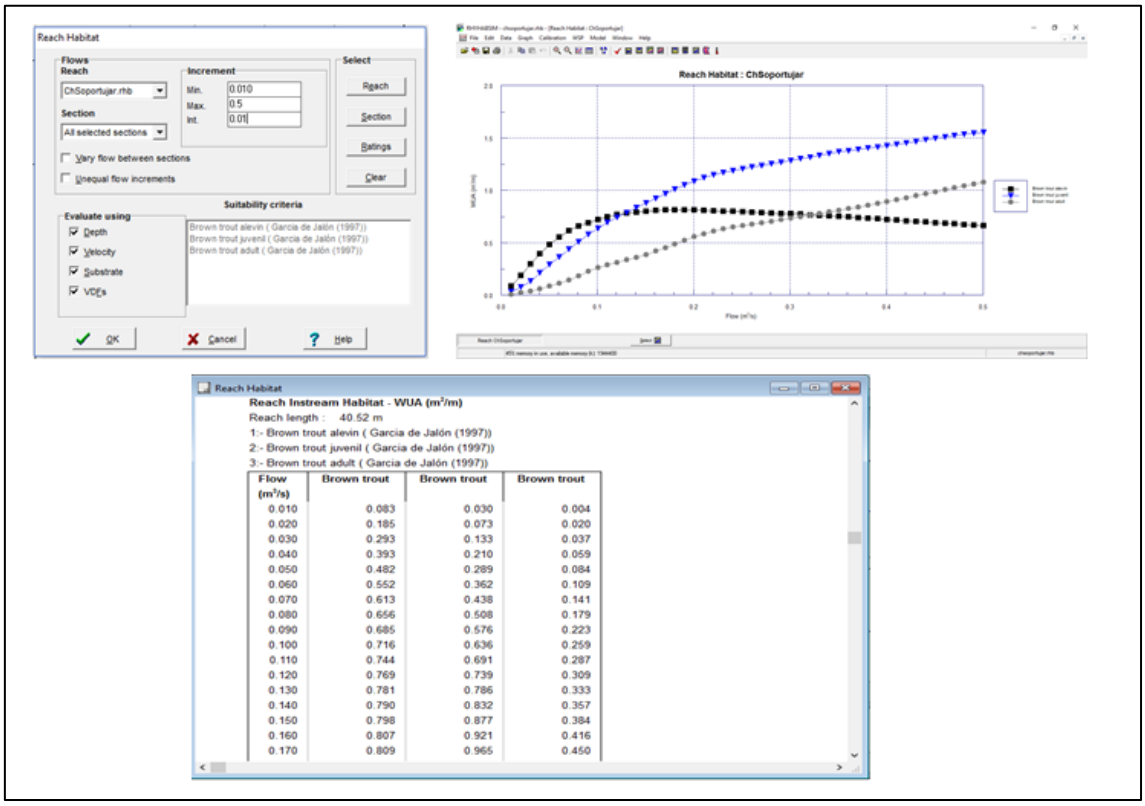


| Flow (m³/s) | Brown trout | Brown trout | Brown trout |
|---|---|---|---|
| 0.010 | 0.083 | 0.030 | 0.004 |
| 0.110 | 0.744 | 0.691 | 0.287 |
| 0.210 | 0.808 | 1.118 | 0.581 |
| 0.310 | 0.769 | 1.299 | 0.746 |
| 0.410 | 0.713 | 1.437 | 0.908 |
| 0.510 | 0.656 | 1.560 | 1.090 |
| 0.610 | 0.618 | 1.628 | 1.231 |
| 0.710 | 0.589 | 1.672 | 1.342 |
| 0.810 | 0.562 | 1.694 | 1.425 |
| 0.910 | 0.538 | 1.687 | 1.490 |
| 1.010 | 0.515 | 1.665 | 1.545 |
| 1.110 | 0.495 | 1.665 | 1.601 |
| 1.210 | 0.473 | 1.670 | 1.649 |
| 1.310 | 0.453 | 1.675 | 1.693 |
| 1.410 | 0.433 | 1.672 | 1.733 |



**Figura 4.16.- Visualización de los valores de la gráfica SPU-Caudal para la trucha en el río Chico de Soportujar mediante el programa RHYHABSYM**

4. Para poder obtener con mayor precisión los valores de dichas coordenadas, podemos acotar el rango, y reducir la escala de representación de los puntos; así se determinaron cada uno de los puntos de interés.




| Flow (m³/s) | Brown trout | Brown trout | Brown trout |
|---|---|---|---|
| 0.010 | 0.083 | 0.030 | 0.004 |
| 0.020 | 0.185 | 0.073 | 0.020 |
| 0.030 | 0.293 | 0.133 | 0.037 |
| 0.040 | 0.393 | 0.210 | 0.059 |
| 0.050 | 0.482 | 0.289 | 0.084 |
| 0.060 | 0.552 | 0.362 | 0.109 |
| 0.070 | 0.613 | 0.438 | 0.141 |
| 0.080 | 0.656 | 0.508 | 0.179 |
| 0.090 | 0.685 | 0.576 | 0.223 |
| 0.100 | 0.716 | 0.636 | 0.259 |
| 0.110 | 0.744 | 0.691 | 0.287 |
| 0.120 | 0.769 | 0.739 | 0.309 |
| 0.130 | 0.781 | 0.786 | 0.333 |
| 0.140 | 0.790 | 0.832 | 0.357 |
| 0.150 | 0.798 | 0.877 | 0.384 |
| 0.160 | 0.807 | 0.921 | 0.416 |
| 0.170 | 0.809 | 0.965 | 0.450 |

**Figura 4.17.- Procedimiento en el programa RYHABSYM para delimitar el rango de caudal en una gráfica de SPU-Caudal, en este caso, para la especie piscícola de la trucha, en el río Chico de Soportujar.**

5. Se repitió dicho proceso con cada una de las curvas de las especies principales analizadas en cada tramo: trucha y cacho.

6. Tal y como se explica en este apartado, se obtienen las curvas de caudales clasificados, en cada uno de los meses, para obtener aquellos caudales que son superados en un 90, 80, 70, 60 y 50 % del tiempo, a partir de tablas dinámicas con Microsoft Office Excel.

$$Q_{90\%} < Q_{80\%} < Q_{70\%} < Q_{60\%} < Q_{50\%}$$

La propia definición de caudal que es superado por un x % permite establecer esta relación entre ellos y sirvió a modo de comprobación. En nuestro caso, no sucede el caso extremo de que 2 caudales consecutivos sean iguales (e.g.: $Q_{90\%} = Q_{80\%}$), debido a que se cuenta con una cantidad elevada de datos.

7. Con cada uno de estos cinco valores, se genera la información (con la ayuda de las curvas anteriormente mencionadas) de los SPU correspondientes a dichos caudales según la especie y la edad de esta: adulto, juvenil o alevín (Figura 4.18).

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mayo | | Qd (m3/seg) | 0.96 | 0.79 | 0.51 | 0.34 | 0.26 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 0.49 | 0.46 | 0.39 | 0.36 | 0.35 | |
| | | Juveniles | 1.12 | 1.00 | 0.76 | 0.66 | 0.57 | Caudal |
| | | Alevines | 0.78 | 0.80 | 0.77 | 0.78 | 0.74 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 0.49 | 0.46 | 0.39 | 0.36 | 0.35 | **0.96** |
| Junio | | Qd (m3/seg) | 1.66 | 1.37 | 0.80 | 0.78 | 0.70 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 0.63 | 0.55 | 0.46 | 0.46 | 0.44 | |
| | | Juveniles | 1.17 | 1.20 | 1.01 | 0.99 | 0.92 | Caudal |
| | | Alevines | 0.56 | 0.66 | 0.80 | 0.80 | 0.79 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 0.56 | 0.55 | 0.46 | 0.46 | 0.44 | **1.66** |
| Julio | | Qd (m3/seg) | 0.58 | 0.52 | 0.48 | 0.42 | 0.32 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 0.41 | 0.39 | 0.39 | 0.37 | 0.36 | |
| | | Juveniles | 0.81 | 0.77 | 0.74 | 0.71 | 0.65 | Caudal |
| | | Alevines | 0.78 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.78 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 0.41 | 0.39 | 0.39 | 0.37 | 0.36 | **0.58** |

**Figura 4.18.- Ejemplo de tabla creada en Excel. En este caso para la especie del cacho y el río Trevelez.**

8. Para un mismo caudal y una misma especie (misma columna), se escoge la mínima SPU. Se repite el proceso con los demás caudales y se selecciona, en esta ocasión, el máximo SPU (de la misma fila). Dicha SPU corresponde al caudal superado un % de tiempo que aparece en la parte superior. Ese valor formará parte del régimen de caudales ecológicos (medios diarios) para cada especie, mes y periodo, que se obtendrá repitiendo este procedimiento (Figura 4.19).

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Abril | | Qd (m3/seg) | 1.50 | 0.93 | 0.84 | 0.65 | 0.24 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 2.57 | 2.00 | 1.84 | 1.48 | 0.59 | |
| | | Juveniles | 3.40 | 3.27 | 3.17 | 2.82 | 1.60 | Caudal |
| | | Alevines | 1.64 | 2.01 | 2.07 | 2.11 | 1.74 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 1.64 | 2.00 | 1.84 | 1.48 | 0.59 | **0.93** |
| Mayo | | Qd (m3/seg) | 0.96 | 0.79 | 0.51 | 0.34 | 0.26 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 2.04 | 1.74 | 1.21 | 0.84 | 0.64 | |
| | | Juveniles | 3.30 | 3.09 | 2.47 | 2.07 | 1.71 | Caudal |
| | | Alevines | 2.00 | 2.09 | 2.03 | 1.86 | 1.79 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 2.00 | 1.74 | 1.21 | 0.84 | 0.64 | **0.96** |
| Junio | | Qd (m3/seg) | 1.66 | 1.37 | 0.80 | 0.78 | 0.70 | |
| | SPU (m2) | Adultos | 2.67 | 2.48 | 1.76 | 1.73 | 1.57 | |
| | | Juveniles | 3.41 | 3.39 | 3.10 | 3.07 | 2.92 | Caudal |
| | | Alevines | 1.54 | 1.72 | 2.08 | 2.09 | 2.11 | Máx. SPU |
| | | Mín. SPU | 1.54 | 1.72 | 1.76 | 1.73 | 1.57 | **0.80** |

**Figura 4.19.- Aplicación estricta del método de optimización de Bovee.**

9. Tras la aplicación del proceso, se recopilan y comparan los regímenes de caudales ecológicos de las diferentes especies para cada uno de los periodos.

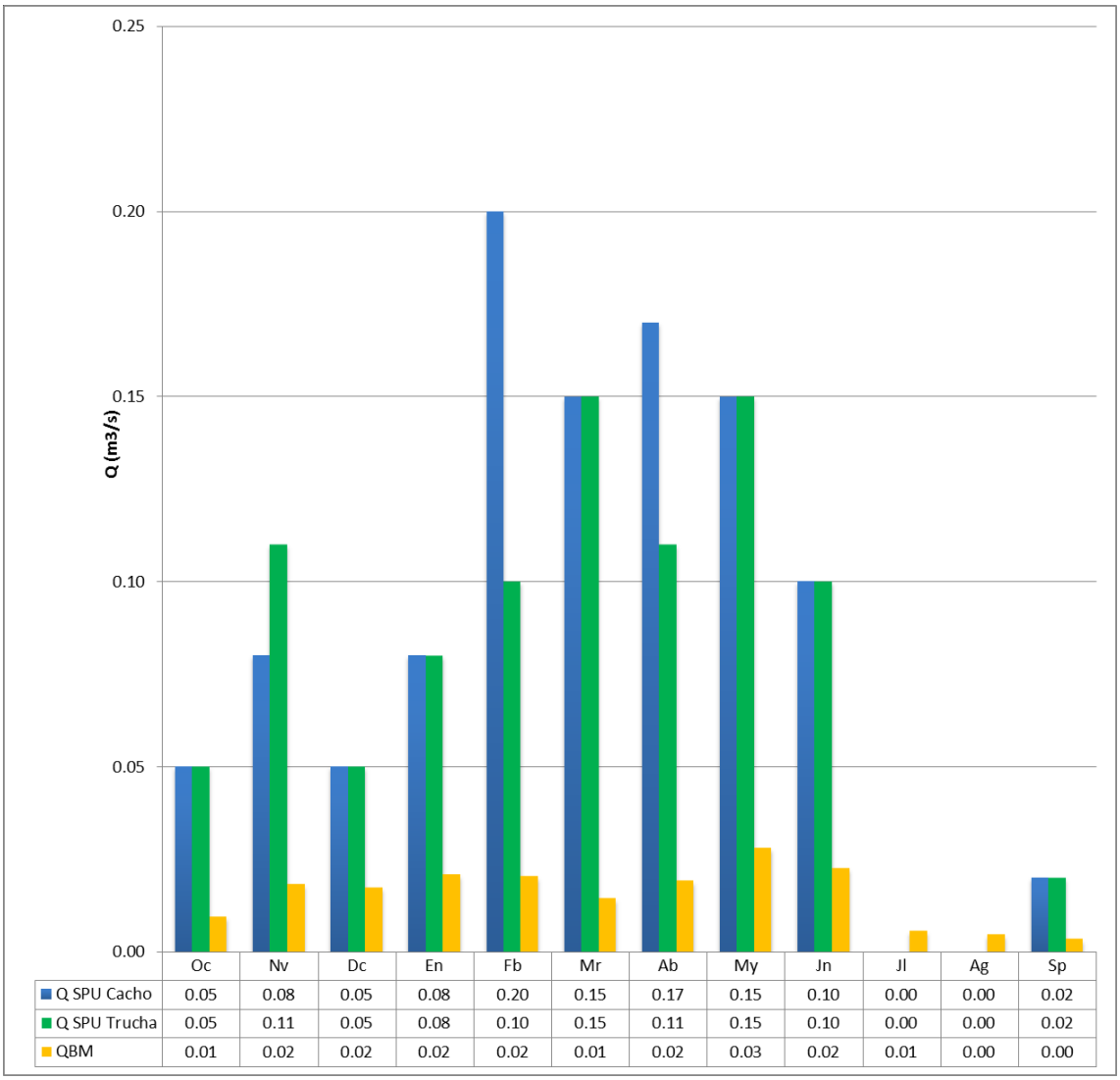



**Figura 4.20.- Ejemplo de gráfica en que se representan los regímenes de caudales ecológicos.**

10. Repitiendo el procedimiento con cada especie, se puede comparar la demanda de caudales medios mensuales requeridos por cada especie.

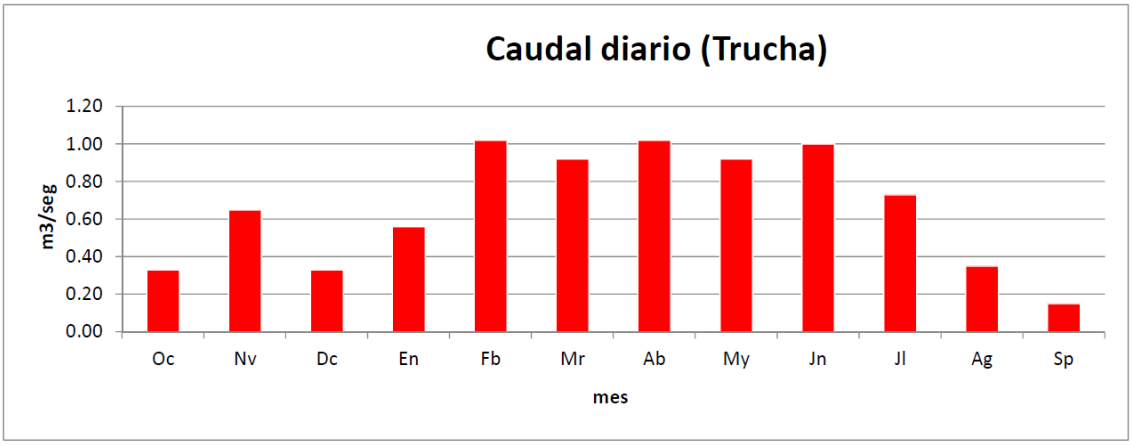



**Figura 4.21.- caudal requerido por la trucha para uno de los ríos a estudiar.**

11. A partir de la conjunción de los diferentes regímenes de las especies analizadas, se redujeron los valores mensuales seleccionando el valor máximo (el más limitante) de caudal de las especies estudiadas en cada uno de los periodos.

12. De esta forma, se obtuvo un régimen de caudales ecológicos desde el punto de vista biológico.

## 4.4.- Propuesta del régimen de caudales ecológicos

### - Criterios y consideraciones

Los pasos y criterios que se han tenido en cuenta para establecer el régimen mensual de caudales, a partir de los resultados obtenidos con los métodos ya explicados, han sido los siguientes:

- Se comparan los resultados obtenidos para los diferentes meses del año hidrológico.

- Se escoge, en primer lugar el caudal que presente la mayor exigencia en cada caso.

- En los casos de mayor exigencia por demandas hidrobiológicas de alguna especie piscícola, se trata de reducir el caudal, siempre y cuando la SPU, no se vea afectada por una reducción de esta del 15% o más.

- Se tiene en especial consideración la garantía de los caudales necesarios para cada especie durante los periodos reproductivos. En este caso, el de la trucha presenta una duración de aproximadamente 4 meses, comenzando en octubre y finalizando en febrero con la freza; y la del cacho con una duración aproximada de dos a tres meses, de abril a junio.

- Posteriormente se hace un estudio por los diferentes períodos hidrológicos de cada rio (período húmedo, período intermedio A, período intermedio B, período seco).
    - Se comprueban los meses de dicho período que presentan el mayor y menor caudal medio mensual para fijar límites.
    - Se comprueban los meses de dicho período que presentan las mayores y menores exigencias, ya corregidas.

- Finalmente, se propone un caudal ecológico para cada período hidrológico para cada río, que trate de adaptarse con la mayor rigurosidad a los criterios recientemente establecidos.

El establecimiento de los diferentes períodos hidrológicos, se ha llevado a cabo en base al hidrograma natural de los ríos, que presenta temporadas de mayor escasez de caudal como en el período seco, temporadas intermedias y temporadas de mayor cantidad de caudal como en el período húmedo.

# 5.- PROPUESTA DE REGÍMENES DE CAUDALES ECOLÓGICOS

En el presente capítulo se presenta la propuesta de un régimen de caudales ecológicos en base a los resultados numéricos obtenidos mediante los métodos hidrobiológicos expuestos anteriormente. Como complemento de información, se presentan dos anejos. El primero, *Anejo 1*, muestra los perfiles transversales de cada tramo de río de estudio, que servirán para observar las condiciones hidráulicas que presenta la geometría de dichos tramos, y el segundo, *Anejo 2*, contiene las gráficas SPU-Q de las especies piscícolas en cada río.

Como ya se ha expuesto con anterioridad, el régimen de caudales no es solo un número, sino que se requiere de una propuesta de gestión concreta. Para llegar a ella, se han tenido en cuenta una serie de criterios, los cuales se han tratado de seguir de la forma más rigurosa posible, tratando de adaptarse en todo momento a cada situación, tanto ordinaria como extraordinaria, pues cada una presenta las mismas semejanzas que diferencias respecto a la anterior.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por los métodos ya expuestos y las propuestas de régimen de caudal para cada río de estudio y período hidrológico mediante gráficas, tablas y resultados numéricos. Para la representación de dichos resultados, se respetará el orden, anteriormente expuesto en el apartado de “criterios y consideraciones” en Metodología.

La forma de exposición de los resultados de cada río de estudio será la siguiente:

-Se comienza mostrando los resultados (tanto del procedimiento como los finales) obtenidos por el método del QBM (caudal básico de mantenimiento):

1º Se muestra una tabla con los caudales medios mensuales (de los 30 años hidrológicos que componen este intervalo de estudio) junto con los cocientes de proporcionalidad de cada mes, resultado de dividir cada caudal medio entre el caudal medio de menos valor.

2º Se muestra una tabla con el resultado de los caudales de mantenimiento de cada mes, obtenidos de la suma del caudal base (Qb), obtenido mediante el programa QBM, más el caudal de acondicionamiento (Qa), el cuál, como ya se explicó en el capítulo de “metodología”, no se tendrá en cuenta y se dejará para una futura decisión en la implantación de los regímenes operativos de caudales, en función de los requerimientos y condiciones de cada tramo. A esta suma se le aplica el cociente de proporcionalidad, anteriormente obtenido.

3º Se muestra una gráfica que representa los caudales de mantenimiento obtenidos para cada mes y el caudal base.

-Después se exponen los resultados obtenidos mediante el método hidrobiológico de los microhábitats:

1º Se muestran directamente los gráficos que representan las exigencias de cada especie piscícola a partir de las gráficas SPU-Q (***mostradas en el Anejo 2***).

-Seguidamente, se procede a comparar los resultados obtenidos mediante los anteriores métodos. Para ello, se exponen en una tabla los resultados de ambos métodos, escogiendo para cada mes, el caudal más exigente. Estos valores de máxima exigencia pasarán a formar el régimen preliminar de caudales ecológicos, el cual se muestra en una gráfica junto con el caudal natural del río.

- Siguiendo los puntos de "criterios y consideraciones", se expondrán los resultados obtenidos, al realizar el estudio en cada período hidrológico.

1º Se muestra una tabla con el mayor y menor caudal natural, junto con los caudales de los meses que más y menos exigen, en términos de SPU. Todo ello respecto a cada período hidrológico.

2º Se muestra la propuesta de caudal ecológico para dicho intervalo, junto con las consideraciones que se han tomado.

-Finalmente, se reúnen todas las propuestas de cada período y se muestran mediante tablas y gráficas.

Las discusiones y conclusiones que surgen del análisis de los resultados y de la propuesta de régimen de caudales ecológicos que aquí se realiza, se expondrán más adelante en el capítulo de "*Discusión y Conclusiones*".

## 5.1.- Chico de Bérchules

*-Aplicación y resultados del método QBM*

Los caudales medios mensuales junto con los cocientes de proporcionalidad de cada mes, resultado de dividir cada caudal medio entre el caudal medio de menos valor, para el tramo del río Chico de Bérchules son los que se indican en la siguiente tabla:

| *Caudales medios mensuales* | m3/seg | Coc. Proporc |
|---|---|---|
| OCTUBRE | 0.095 | 2.562 |
| NOVIEMBRE | 0.162 | 4.395 |
| DICIEMBRE | 0.152 | 4.131 |
| ENERO | 0.171 | 4.613 |
| FEBRERO | 0.178 | 4.818 |
| MARZO | 0.166 | 4.493 |
| ABRIL | 0.204 | 5.508 |
| MAYO | 0.284 | 7.678 |
| JUNIO | 0.241 | 6.521 |
| JULIO | 0.069 | 1.888 |
| AGOSTO | 0.051 | 1.385 |
| SEPTIEMBRE | **0.037** | 1 |
| Qmesmin | 0.037 | |

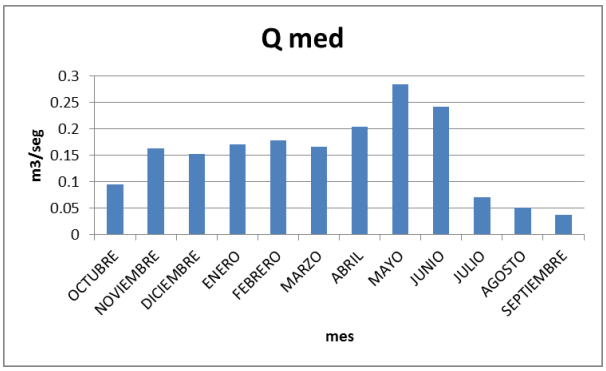



**Tabla 5.1.- Caudales medios mensuales y cocientes de proporcionalidad del río Chico de Bérchules**

Una vez introducidos los datos en el programa, y obtenido entonces el caudal base para el tramo del río Chico de Bérchueles, que resulta ***0.002 m3/s*** los caudales de mantenimiento que se obtienen se muestran a continuación.

| Q base ( $m^3$/seg) | 0.002 |
|---|---|
| *Q mantenimiento ($m^3$/seg)* | (Qb+Qa)*CocP |
| OCTUBRE | **0.006** |
| NOVIEMBRE | **0.010** |
| DICIEMBRE | **0.009** |
| ENERO | **0.011** |
| FEBRERO | **0.012** |
| MARZO | **0.011** |
| ABRIL | **0.013** |
| MAYO | **0.018** |
| JUNIO | **0.016** |
| JULIO | **0.005** |
| AGOSTO | **0.003** |
| SEPTIEMBRE | **0.002** |

**Tabla 5.2.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Chico de Bérchules**

A continuación se representa en una gráfica la distribución de los caudales de mantenimiento para cada mes, junto con el caudal base obtenido para el tramo del río Chico de Bérchules.

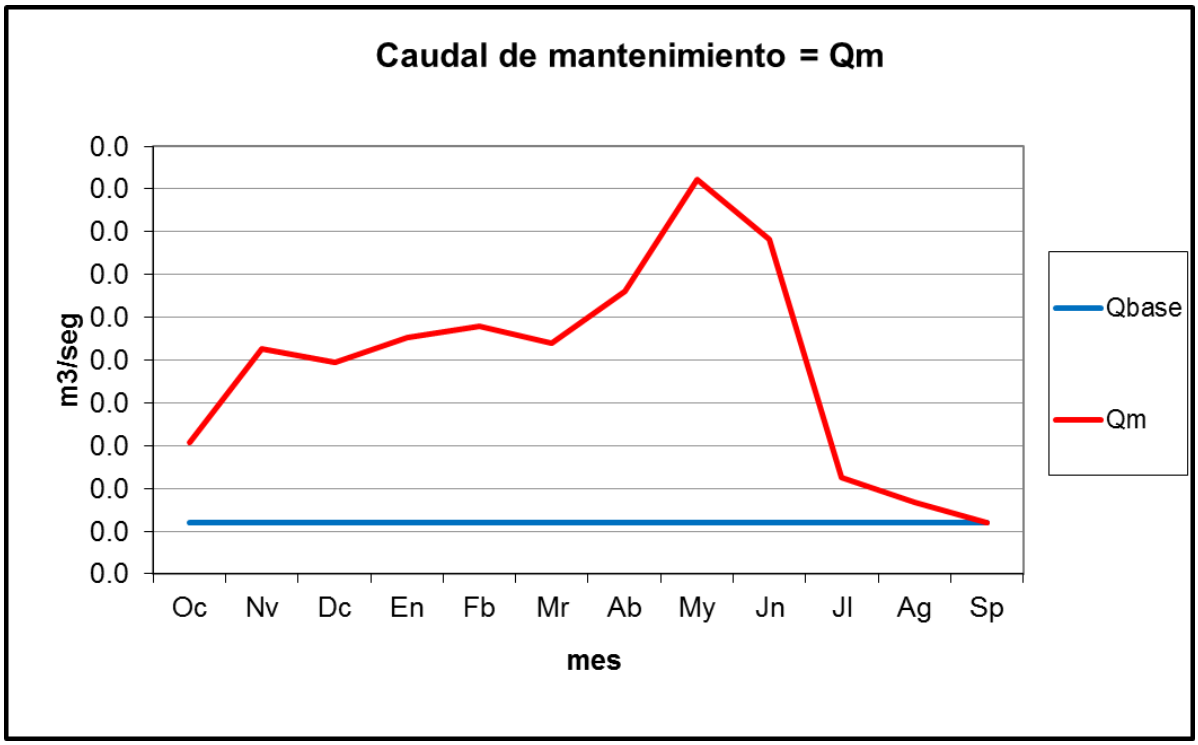



**Figura 5.1.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Chico de Bérchules**

## -*Aplicación y resultados del método de los microhábitats (RHYHABSIM)*

A continuación se muestran los gráficos obtenidos mediante los resultados de la aplicación del método hidrobiológico de los microhábitats; ejecutado este, por el programa RHYHABSIM, y siguiendo los pasos del método Bovee, para el tramo del río Chico de Bérchules. Los datos exactos se muestran más adelante, en la comparación de caudales.

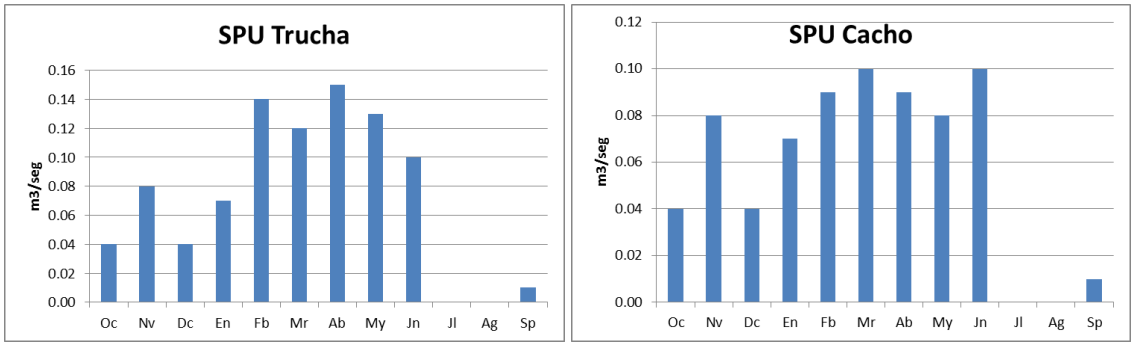



**Figura 5.2.- Exigencias mensuales del cacho y de la trucha del río Chico de Bérchules**

En el siguiente gráfico se representa la comparación de las exigencias de caudal de cada método y en la siguiente tabla se muestran dichos valores y se selecciona para cada mes, el valor más exigente de caudal, que como se ha expuesto anteriormente, pasará a formar parte del régimen preliminar de caudales.

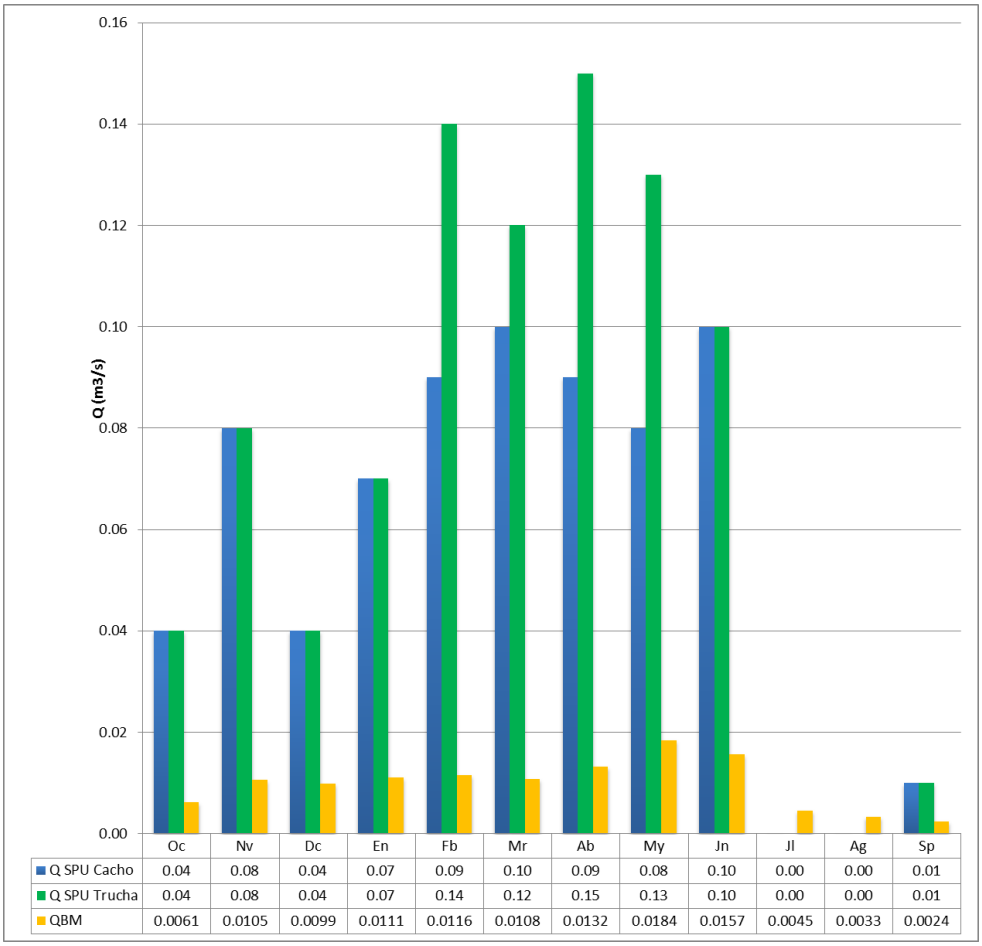



**Figura 5.3.- Comparación de caudales de cada método del río Chico de Bérchules**

| | QBM | TRUCHA | CACHO | MAYOR VALOR |
|---|---|---|---|---|
| Oc | 0.006 | 0.04 | 0.04 | 0.040 |
| Nv | 0.010 | 0.08 | 0.08 | 0.080 |
| Dc | 0.010 | 0.04 | 0.04 | 0.040 |
| En | 0.011 | 0.07 | 0.07 | 0.070 |
| Fb | 0.012 | 0.14 | 0.09 | 0.140 |
| Mr | 0.011 | 0.12 | 0.10 | 0.120 |
| Ab | 0.013 | 0.15 | 0.09 | 0.150 |
| My | 0.018 | 0.13 | 0.08 | 0.130 |
| Jn | 0.016 | 0.10 | 0.10 | 0.100 |
| Jl | 0.004 | 0.00 | 0.00 | 0.004 |
| Ag | 0.003 | 0.00 | 0.00 | 0.003 |
| Sp | 0.0024 | 0.01 | 0.01 | 0.010 |

**Tabla 5.3.- Comparación de caudales de cada método del río Chico de Bérchules**

A continuación se muestra un gráfico representando el régimen natural de caudales y el régimen preliminar de caudales ecológicos para el tramo del río Chico de Bérchules.

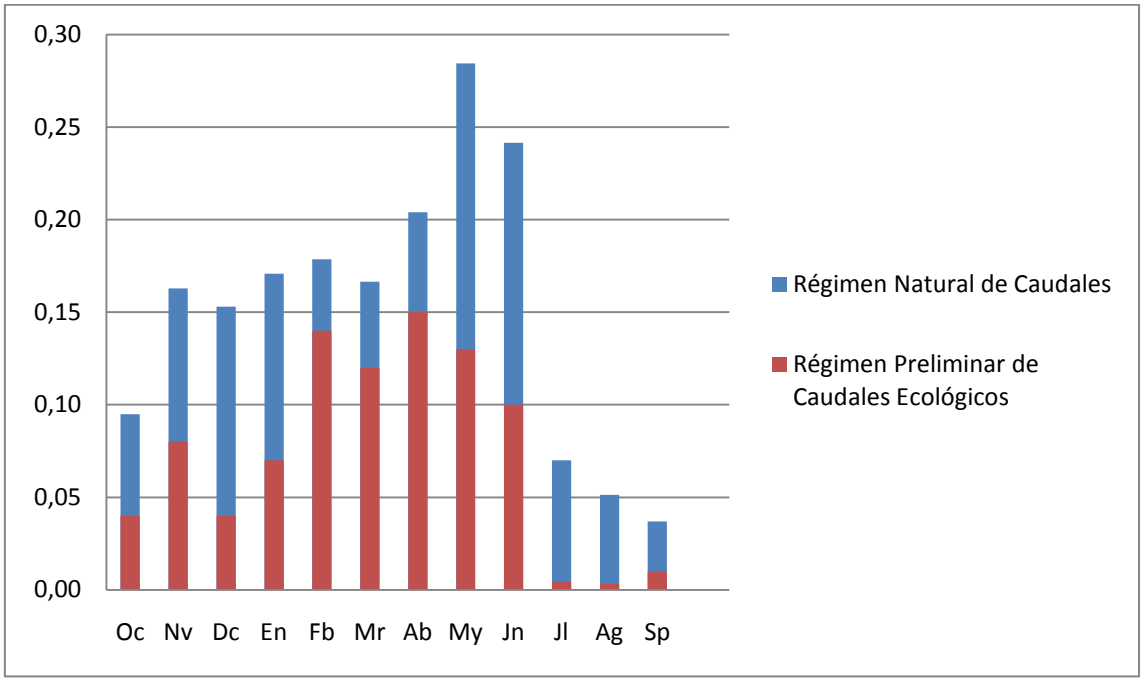
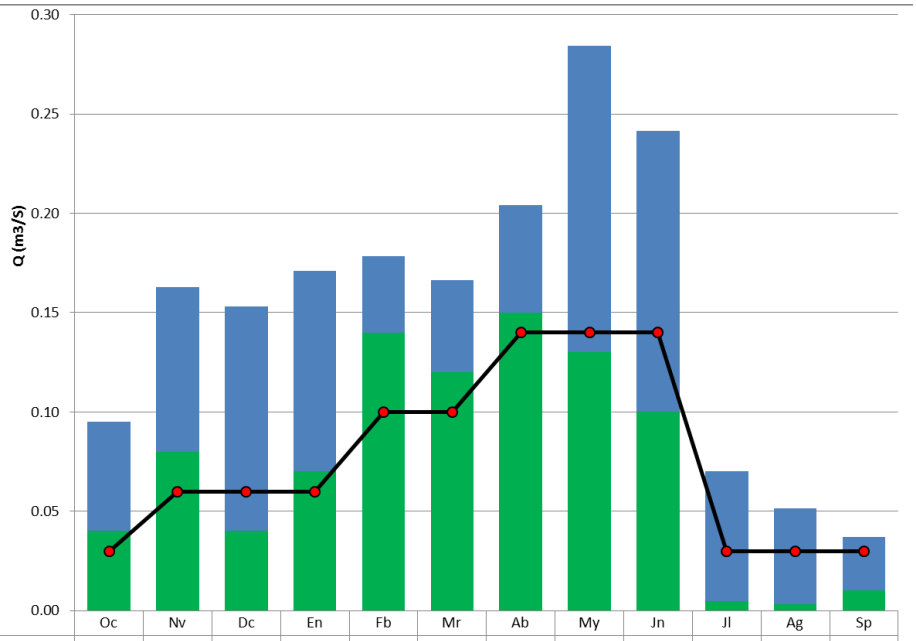



**Figura 5.4.- Régimen preliminar de caudales ecológicos del río Chico de Bérchules**

Una vez obtenido el régimen preliminar de caudales ecológicos, y en base a los criterios y consideraciones que ya se han descrito, ***se propone el siguiente régimen de caudales ecológicos, por períodos, para el río Chico de Bérchules.***




| | Oc | Nv | Dc | En | Fb | Mr | Ab | My | Jn | Jl | Ag | Sp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Régimen Natural de Caudales | 0.09 | 0.16 | 0.15 | 0.17 | 0.18 | 0.17 | 0.20 | 0.28 | 0.24 | 0.07 | 0.05 | 0.04 |
| Régimen Preliminar de Caudales Ecológicos | 0.040 | 0.080 | 0.040 | 0.070 | 0.140 | 0.120 | 0.150 | 0.130 | 0.100 | 0.005 | 0.003 | 0.010 |
| Régimen propuesto | 0.03 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |

**Figura 5.5.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Chico de Bérchules**

| CAUDALES ECOLÓGICOS PROPUESTOS POR PERÍODOS (m3/s) | |
|---|---|
| Período Seco | 0.03 |
| Período Intermedio A | 0.06 |
| Período Intermedio B | 0.10 |
| Período Húmedo | 0.14 |

**Tabla 5.4.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Chico de Bérchules**

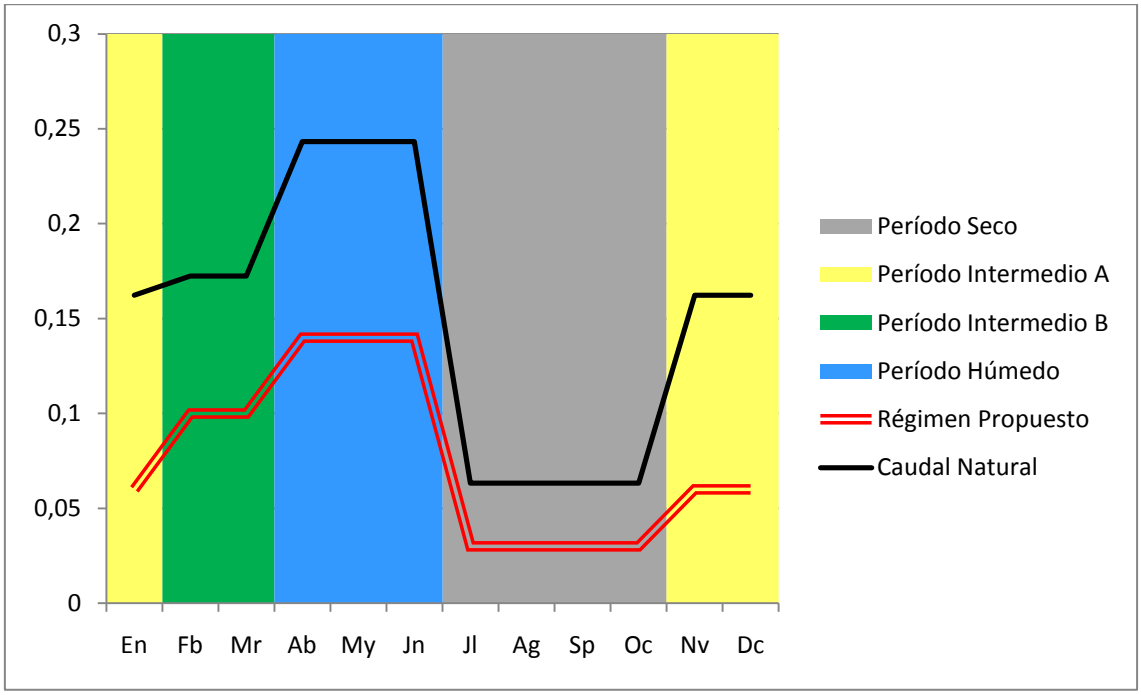



**Figura 5.6.- Régimen propuesto de caudales ecológicos por períodos del río Chico de Bérchules**

## 5.2.- Grande de Bérchules

*-Aplicación y resultados del método QBM*

Los caudales medios mensuales junto con los cocientes de proporcionalidad de cada mes, resultado de dividir cada caudal medio entre el caudal medio de menos valor, para el tramo del río Grande de Bérchules son los que se indican en la siguiente tabla:

| *Caudales medios mensuales* | m3/seg | Coc. Proporc |
|---|---|---|
| OCTUBRE | 0.123 | 2.780 |
| NOVIEMBRE | 0.234 | 5.358 |
| DICIEMBRE | 0.223 | 5.101 |
| ENERO | 0.267 | 6.111 |
| FEBRERO | 0.261 | 5.964 |
| MARZO | 0.185 | 4.223 |
| ABRIL | 0.245 | 5.615 |
| MAYO | 0.361 | 8.251 |
| JUNIO | 0.290 | 6.631 |
| JULIO | 0.072 | 1.641 |
| AGOSTO | 0.059 | 1.351 |
| SEPTIEMBRE | 0.044 | 1 |
| Qmesmin | 0.044 | |

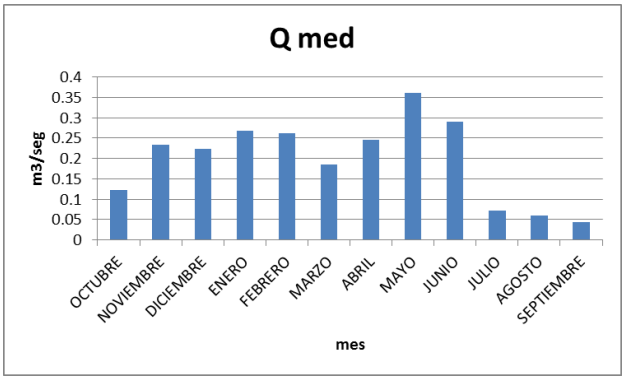



**Tabla 5.5.- Caudales medios mensuales y cocientes de proporcionalidad del río Grande de Bérchules**

Una vez introducidos los datos en el programa, y obtenido entonces el caudal base para el tramo del río Grande de Bérchueles, que resulta ***0.003 m3/s*** los caudales de mantenimiento que se obtienen se muestran a continuación.

| Q base ( $m^3$/seg) | 0.003 |
|---|---|
| *Q mantenimiento ($m^3$/seg)* | (Qb+Qa)*CocP |
| OCTUBRE | 0.009 |
| NOVIEMBRE | 0.018 |
| DICIEMBRE | 0.017 |
| ENERO | 0.021 |
| FEBRERO | 0.020 |
| MARZO | 0.014 |
| ABRIL | 0.019 |
| MAYO | 0.028 |
| JUNIO | 0.023 |
| JULIO | 0.006 |
| AGOSTO | 0.005 |
| SEPTIEMBRE | 0.003 |

**Tabla 5.6.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Grande de Bérchules**

A continuación se representa en una gráfica la distribución de los caudales de mantenimiento para cada mes, junto con el caudal base obtenido para el tramo del río Grande de Bérchules.

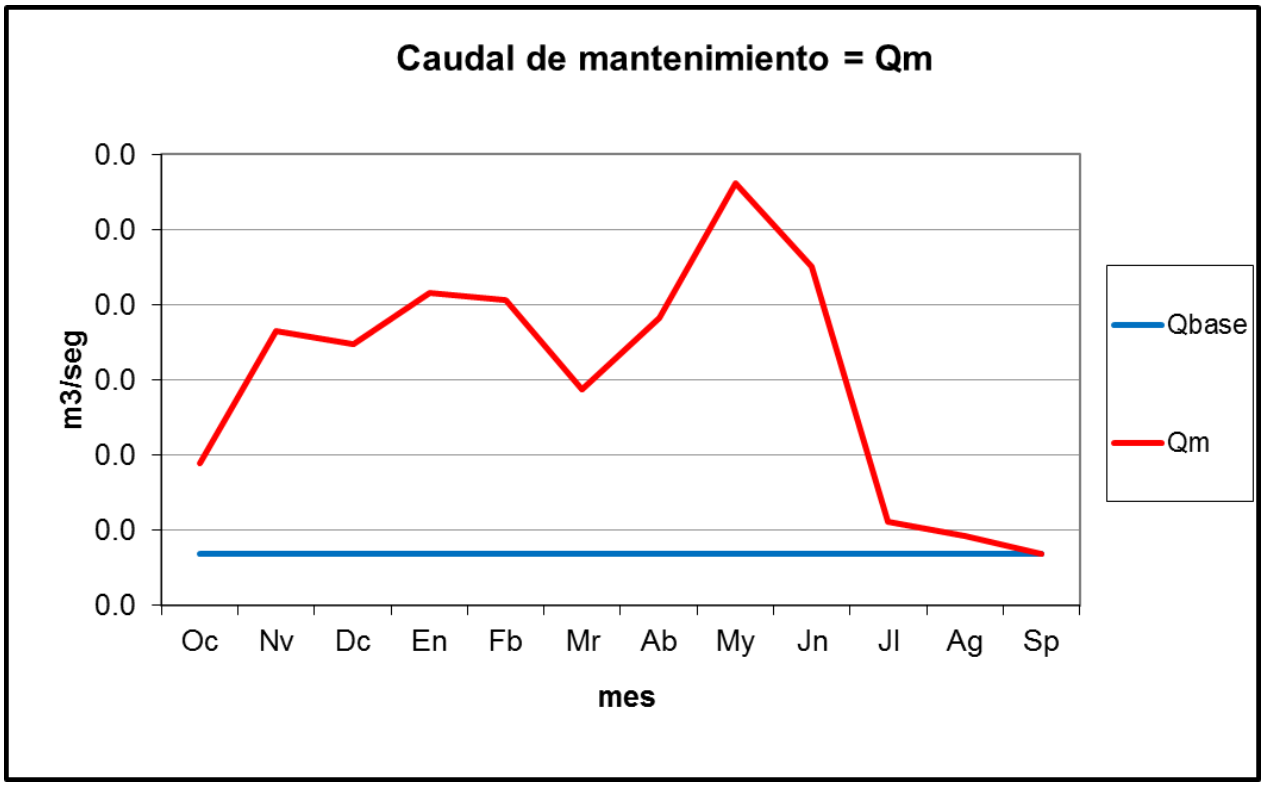



**Figura 5.7.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Grande de Bérchules**

*-Aplicación y resultados del método de los microhábitats (RHYHABSIM)*

A continuación se muestran los gráficos obtenidos mediante los resultados de la aplicación del método hidrobiológico de los microhábitats; ejecutado este, por el programa RHYHABSIM, y siguiendo los pasos del método Bovee, para el tramo del río Grande de Bérchules. Los datos exactos se muestran más adelante, en la comparación de caudales.

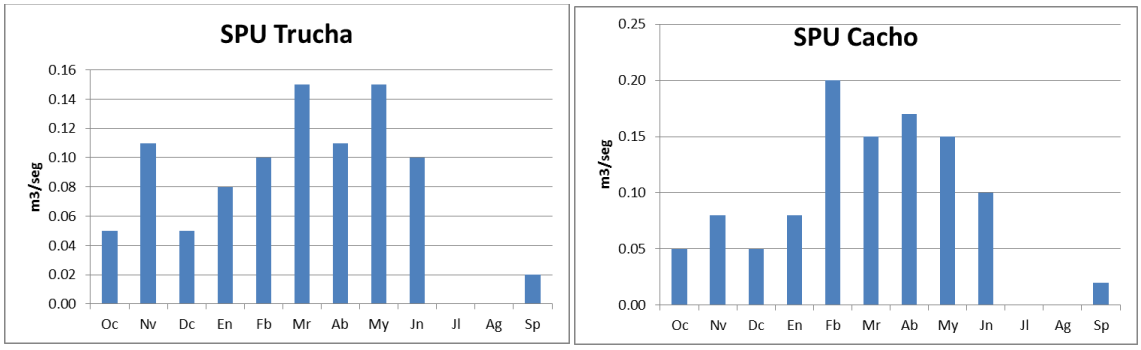



**Figura 5.8.- Exigencias mensuales del cacho y de la trucha del río Grande de Bérchules**

En el siguiente gráfico se representa la comparación de las exigencias de caudal de cada método y en la siguiente tabla se muestran dichos valores y se selecciona para cada mes, el valor más exigente de caudal, que como se ha expuesto anteriormente, pasará a formar parte del régimen preliminar de caudales.

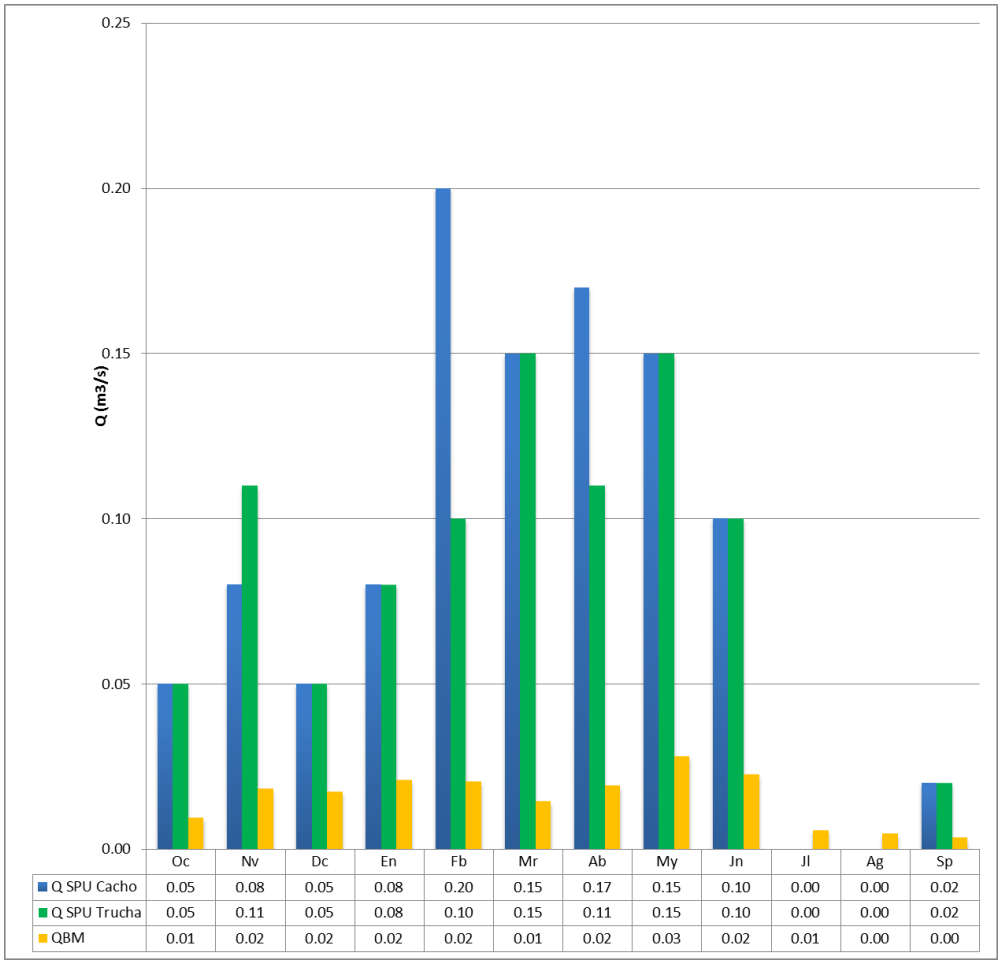



**Figura 5.9.- Comparación de caudales de cada método del río Grande de Bérchules**

| | QBM | TRUCHA | CACHO | MAYOR VALOR |
|---|---|---|---|---|
| Oc | 0.009 | 0.05 | 0.05 | 0.050 |
| Nv | 0.018 | 0.11 | 0.08 | 0.110 |
| Dc | 0.017 | 0.05 | 0.05 | 0.050 |
| En | 0.021 | 0.08 | 0.08 | 0.080 |
| Fb | 0.020 | 0.10 | 0.20 | 0.200 |
| Mr | 0.014 | 0.15 | 0.15 | 0.150 |
| Ab | 0.019 | 0.11 | 0.17 | 0.170 |
| My | 0.028 | 0.15 | 0.15 | 0.150 |
| Jn | 0.023 | 0.10 | 0.10 | 0.100 |
| Jl | 0.006 | 0.00 | 0.00 | 0.006 |
| Ag | 0.005 | 0.00 | 0.00 | 0.005 |
| Sp | 0.003 | 0.02 | 0.02 | 0.020 |

**Tabla 5.7.- Comparación de caudales de cada método del río Grande de Bérchules**

A continuación se muestra un gráfico representando el régimen natural de caudales y el régimen preliminar de caudales ecológicos para el tramo del río Grande de Bérchules.

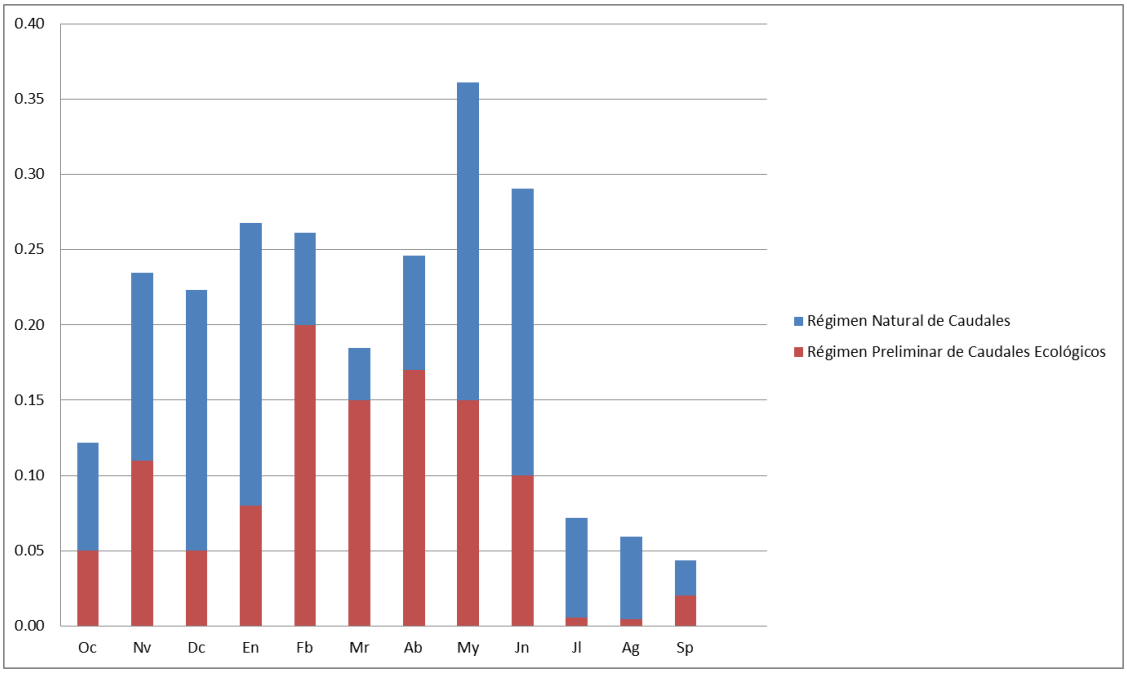
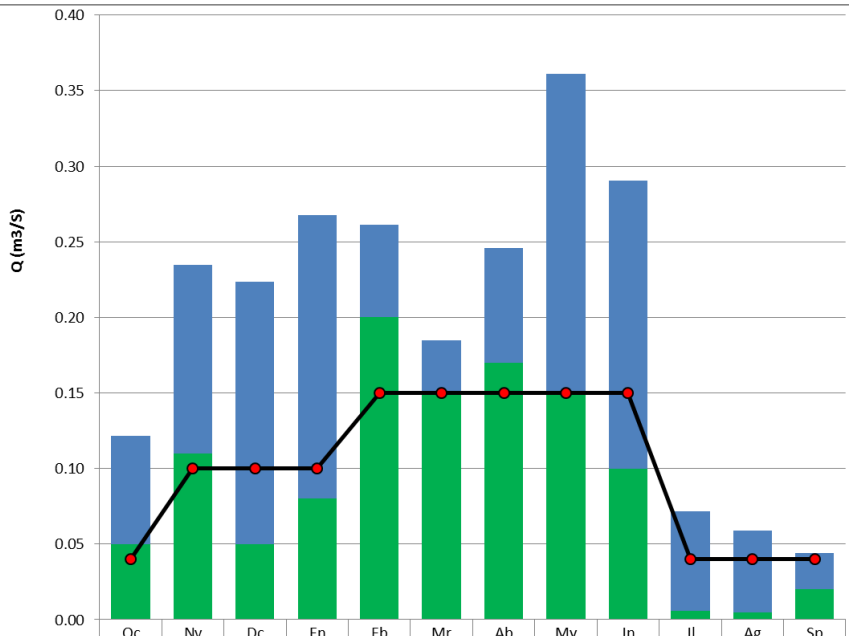



**Figura 5.10.- Régimen preliminar de caudales ecológicos del río Grande de Bérchules**

Una vez obtenido el régimen preliminar de caudales ecológicos, y en base a los criterios y consideraciones que ya se han descrito, ***se propone el siguiente régimen de caudales ecológicos, por períodos, para el río Grande de Bérchules.***




| | Oc | Nv | Dc | En | Fb | Mr | Ab | My | Jn | Jl | Ag | Sp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Régimen Natural de Caudales | 0.12 | 0.23 | 0.22 | 0.27 | 0.26 | 0.18 | 0.25 | 0.36 | 0.29 | 0.07 | 0.06 | 0.04 |
| Régimen Preliminar de Caudales Ecológicos | 0.05 | 0.11 | 0.05 | 0.08 | 0.20 | 0.15 | 0.17 | 0.15 | 0.10 | 0.01 | 0.00 | 0.02 |
| Régimen propuesto | 0.04 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |

**Figura 5.11.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Grande de Bérchules**

| CAUDALES ECOLÓGICOS PROPUESTOS POR PERÍODOS (m3/s) | |
|---|---|
| Período Seco | 0.04 |
| Período Intermedio A | 0.10 |
| Período Intermedio B | 0.15 |
| Período Húmedo | 0.15 |

**Tabla 5.8.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Chico de Bérchules**

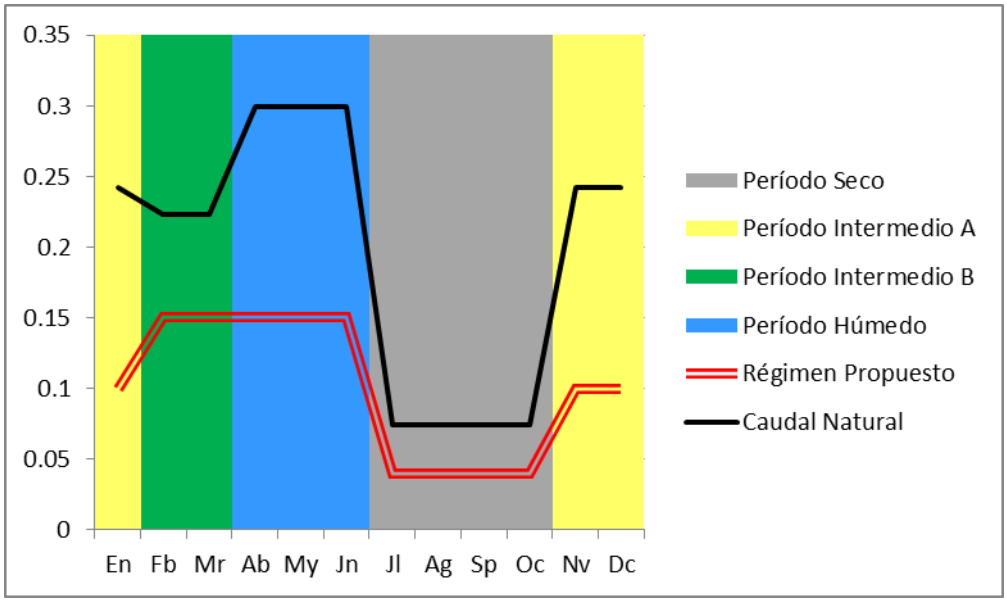



**Figura 5.12.- Régimen propuesto de caudales ecológicos por períodos del río Hrande de Bérchules**

## 5.3.- Trévelez

*-Aplicación y resultados del método QBM*

Los caudales medios mensuales junto con los cocientes de proporcionalidad de cada mes, resultado de dividir cada caudal medio entre el caudal medio de menos valor, para el tramo del río Trévelez son los que se indican en la siguiente tabla:

| *Caudales medios mensuales* | m3/seg | Coc. Proporc |
|---|---|---|
| OCTUBRE | 0.752 | 2.010 |
| NOVIEMBRE | 1.218 | 3.258 |
| DICIEMBRE | 0.754 | 2.016 |
| ENERO | 0.937 | 2.505 |
| FEBRERO | 1.530 | 4.092 |
| MARZO | 1.284 | 3.435 |
| ABRIL | 1.688 | 4.513 |
| MAYO | 1.774 | 4.744 |
| JUNIO | 2.395 | 6.404 |
| JULIO | 0.763 | 2.041 |
| AGOSTO | 0.413 | 1.106 |
| SEPTIEMBRE | **0.374** | 1 |
| Qmesmin | 0.374 | |

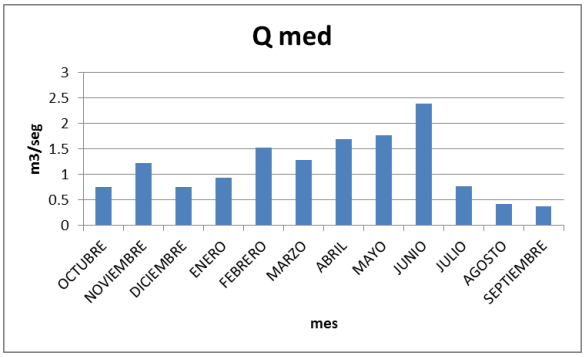



**Figura 5.9.- Caudales medios mensuales y cocientes de proporcionalidad del río Trevélez**

Una vez introducidos los datos en el programa, y obtenido entonces el caudal base para el tramo del río Trévelez, que resulta ***0.083 m3/s*** los caudales de mantenimiento que se obtienen se muestran a continuación.

| Q base ( $m^3$/seg) | 0.083 |
|---|---|
| *Q mantenimiento ($m^3$/seg)* | (Qb+Qa)*CocP |
| OCTUBRE | **0.166** |
| NOVIEMBRE | **0.269** |
| DICIEMBRE | **0.167** |
| ENERO | **0.207** |
| FEBRERO | **0.338** |
| MARZO | **0.284** |
| ABRIL | **0.373** |
| MAYO | **0.392** |
| JUNIO | **0.529** |
| JULIO | **0.169** |
| AGOSTO | **0.091** |
| SEPTIEMBRE | **0.083** |

**Tabla 5.10.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Trevélez**

A continuación se representa en una gráfica la distribución de los caudales de mantenimiento para cada mes, junto con el caudal base obtenido para el tramo del río Trévelez.

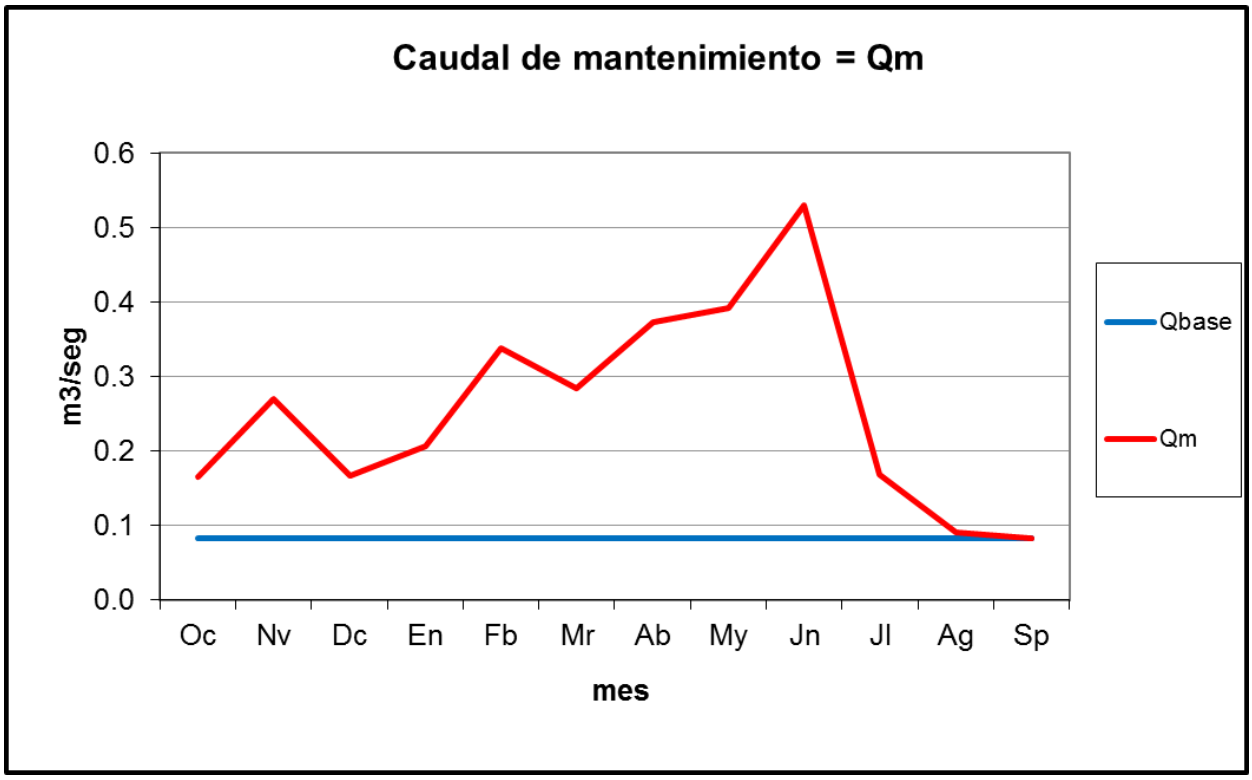



**Figura 5.13.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Trevélez**

*-Aplicación y resultados del método de los microhábitats (RHYHABSIM)*

A continuación se muestran los gráficos obtenidos mediante los resultados de la aplicación del método hidrobiológico de los microhábitats; ejecutado este, por el programa RHYHABSIM, y siguiendo los pasos del método Bovee, para el tramo del río Trévelez. Los datos exactos se muestran más adelante, en la comparación de caudales.

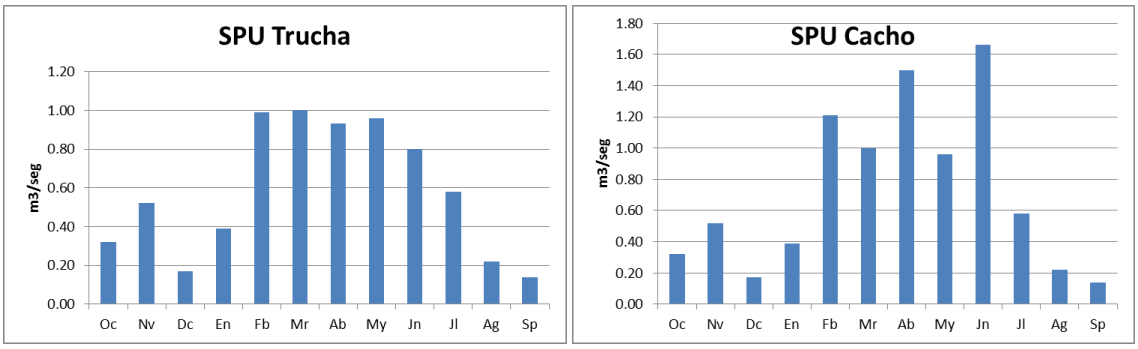



**Figura 5.14.- Exigencias mensuales del cacho y de la trucha del río Trevélez**

En el siguiente gráfico se representa la comparación de las exigencias de caudal de cada método y en la siguiente tabla se muestran dichos valores y se selecciona para cada mes, el valor más exigente de caudal, que como se ha expuesto anteriormente, pasará a formar parte del régimen preliminar de caudales.

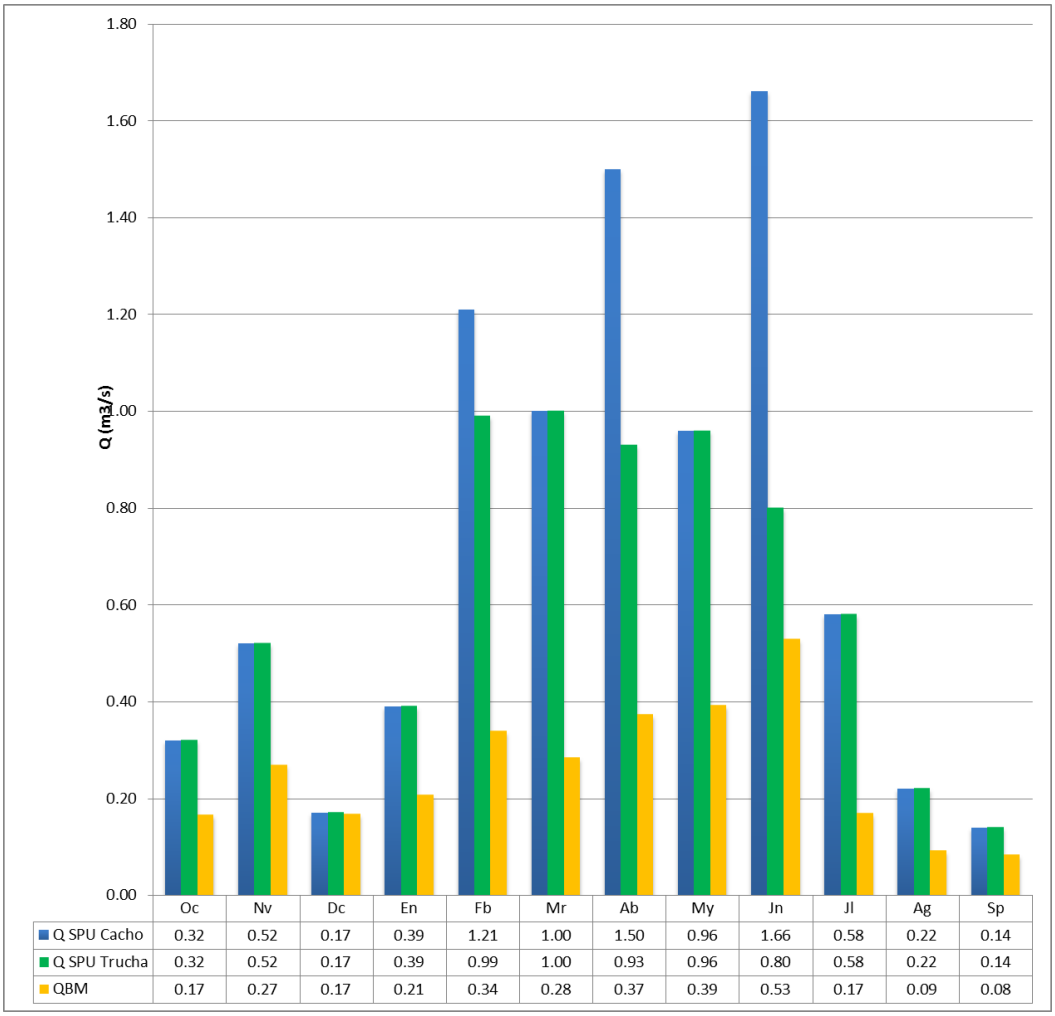



**Figura 5.15.- Comparación de caudales de cada método del río Trevélez**

| | QBM | TRUCHA | CACHO | MAYOR VALOR |
|---|---|---|---|---|
| Oc | 0.166 | 0.32 | 0.32 | 0.320 |
| Nv | 0.269 | 0.52 | 0.52 | 0.520 |
| Dc | 0.167 | 0.17 | 0.17 | 0.170 |
| En | 0.207 | 0.39 | 0.39 | 0.390 |
| Fb | 0.338 | 0.99 | 1.21 | 1.210 |
| Mr | 0.284 | 1.00 | 1.00 | 1.000 |
| Ab | 0.373 | 0.93 | 1.50 | 1.500 |
| My | 0.392 | 0.96 | 0.96 | 0.960 |
| Jn | 0.529 | 0.80 | 1.66 | 1.660 |
| Jl | 0.169 | 0.58 | 0.58 | 0.580 |
| Ag | 0.091 | 0.22 | 0.22 | 0.220 |
| Sp | 0.083 | 0.14 | 0.14 | 0.140 |

**Tabla 5.11.- Comparación de caudales de cada método del río Trevélez**

A continuación se muestra un gráfico representando el régimen natural de caudales y el régimen preliminar de caudales ecológicos para el tramo del río Trevélez.

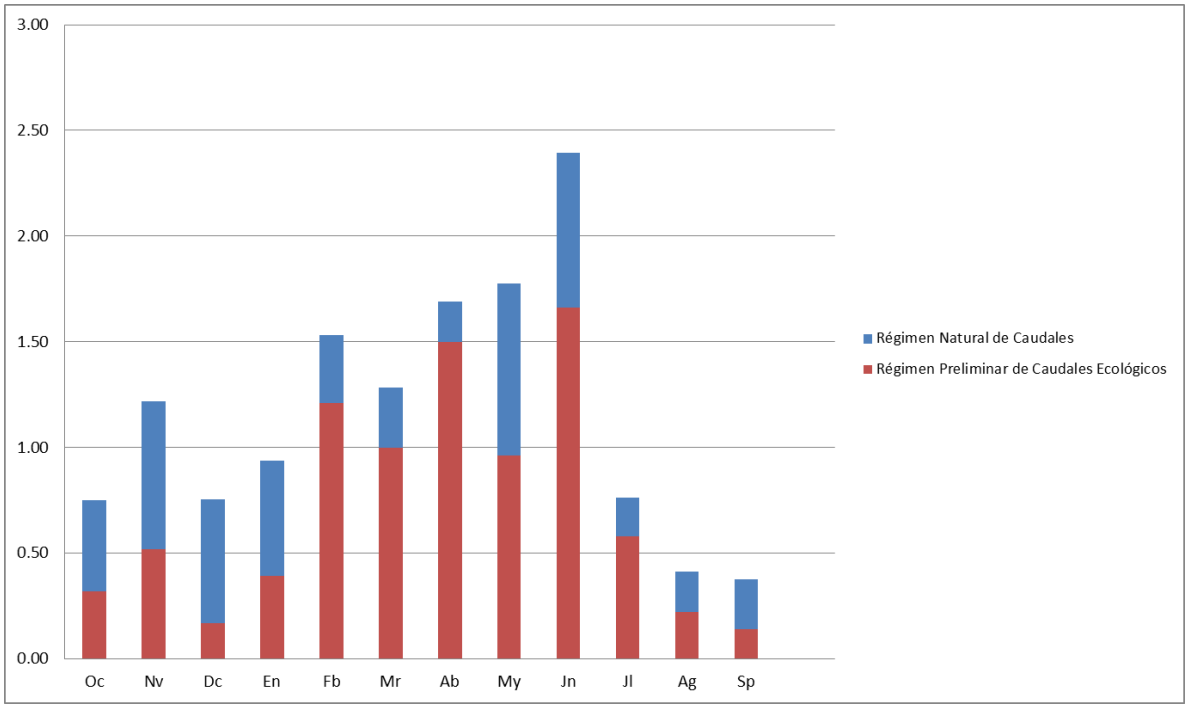
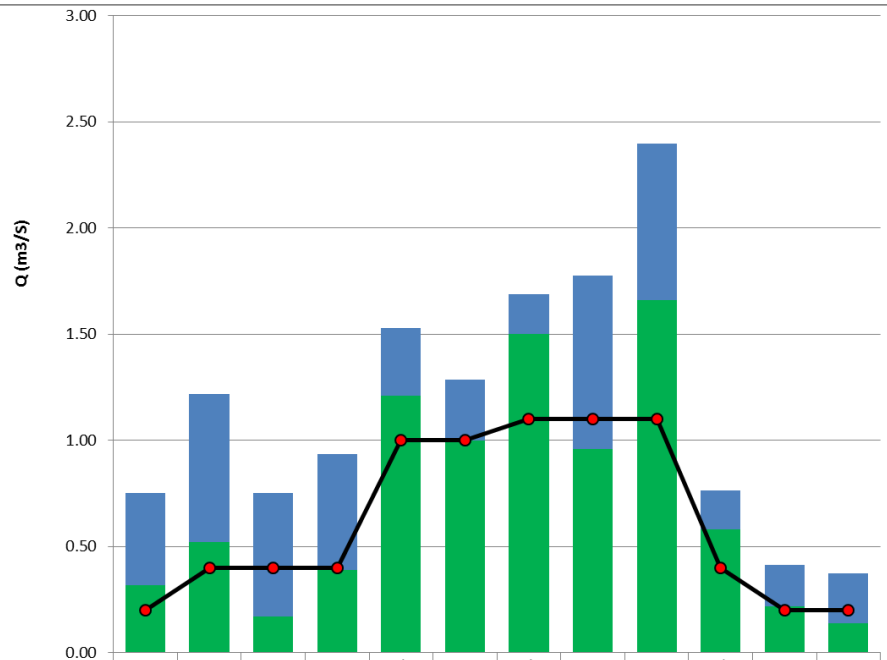



**Figura 5.16.- Régimen preliminar de caudales ecológicos del río Trevélez**

Una vez obtenido el régimen preliminar de caudales ecológicos, y en base a los criterios y consideraciones que ya se han descrito, ***se propone el siguiente régimen de caudales ecológicos, por períodos, para el río Trévelez.***




| | Oc | Nv | Dc | En | Fb | Mr | Ab | My | Jn | Jl | Ag | Sp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Régimen Natural de Caudales | 0.75 | 1.22 | 0.75 | 0.94 | 1.53 | 1.28 | 1.69 | 1.77 | 2.40 | 0.76 | 0.41 | 0.37 |
| Régimen Preliminar de Caudales Ecológicos | 0.32 | 0.52 | 0.17 | 0.39 | 1.21 | 1.00 | 1.50 | 0.96 | 1.66 | 0.58 | 0.22 | 0.14 |
| Régimen propuesto | 0.20 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 1.00 | 1.00 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 0.40 | 0.20 | 0.20 |

**Figura 5.17.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Trevélez**

| CAUDALES ECOLÓGICOS PROPUESTOS POR PERÍODOS (m3/s) | |
|---|---|
| Período Seco | 0.02 |
| Período Intermedio A | 0.40 |
| Período Intermedio B | 1.00 |
| Período Húmedo | 1.10 |

**Tabla 5.12.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Trevélez**

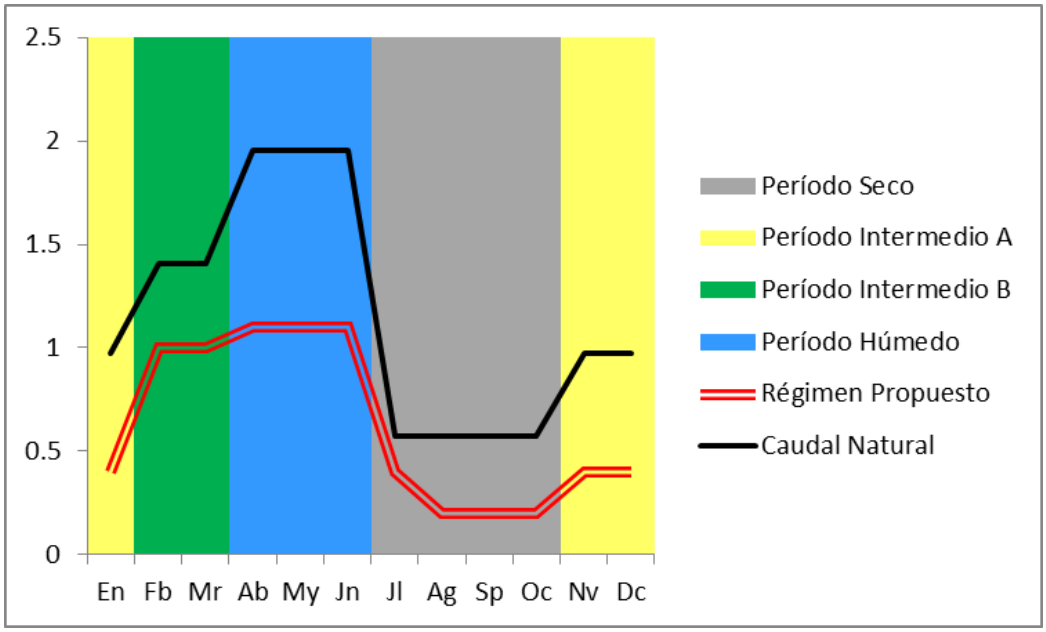



**Figura 5.18.- Régimen propuesto de caudales ecológicos por períodos del río Trevélez**

## 5.4.- Mecina

*-Aplicación y resultados del método QBM*

Los caudales medios mensuales junto con los cocientes de proporcionalidad de cada mes, resultado de dividir cada caudal medio entre el caudal medio de menos valor, para el tramo del río Mecina son los que se indican en la siguiente tabla:

| *Q med mensuales* | m3/seg | Coc. Proporc |
|---|---|---|
| OCTUBRE | 0.110 | 2.734 |
| NOVIEMBRE | 0.206 | 5.149 |
| DICIEMBRE | 0.161 | 4.019 |
| ENERO | 0.185 | 4.607 |
| FEBRERO | 0.204 | 5.079 |
| MARZO | 0.159 | 3.968 |
| ABRIL | 0.221 | 5.501 |
| MAYO | 0.318 | 7.929 |
| JUNIO | 0.289 | 7.205 |
| JULIO | 0.085 | 2.127 |
| AGOSTO | 0.063 | 1.572 |
| SEPTIEMBRE | 0.040 | 1 |
| Qmesmin | 0.040 | |

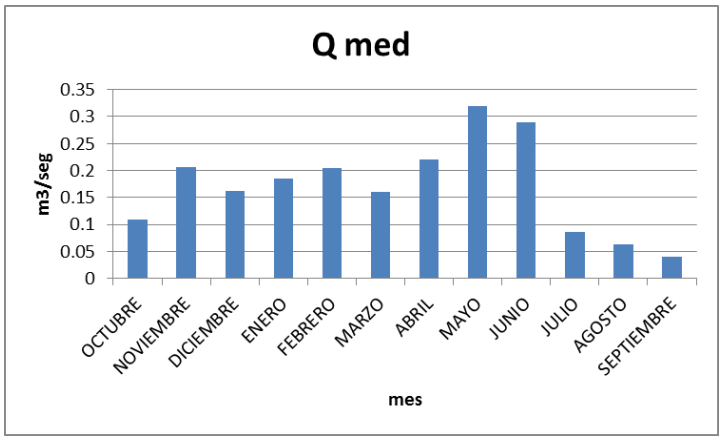



**Figura 5.13.- Caudales medios mensuales y cocientes de proporcionalidad del río Mecina**

Una vez introducidos los datos en el programa, y obtenido entonces el caudal base para el tramo del río Mecina, que resulta ***0.004 m3/s*** los caudales de mantenimiento que se obtienen se muestran a continuación.

| Q base ( $m^3$/seg) | 0.004 |
|---|---|
| *Q mantenimiento ($m^3$/seg)* | (Qb+Qa)*CocP |
| OCTUBRE | 0.011 |
| NOVIEMBRE | 0.021 |
| DICIEMBRE | 0.016 |
| ENERO | 0.019 |
| FEBRERO | 0.021 |
| MARZO | 0.016 |
| ABRIL | 0.023 |
| MAYO | 0.033 |
| JUNIO | 0.030 |
| JULIO | 0.009 |
| AGOSTO | 0.006 |
| SEPTIEMBRE | 0.004 |

**Tabla 5.14.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Mecina**

A continuación se representa en una gráfica la distribución de los caudales de mantenimiento para cada mes, junto con el caudal base obtenido para el tramo del río Mecina.

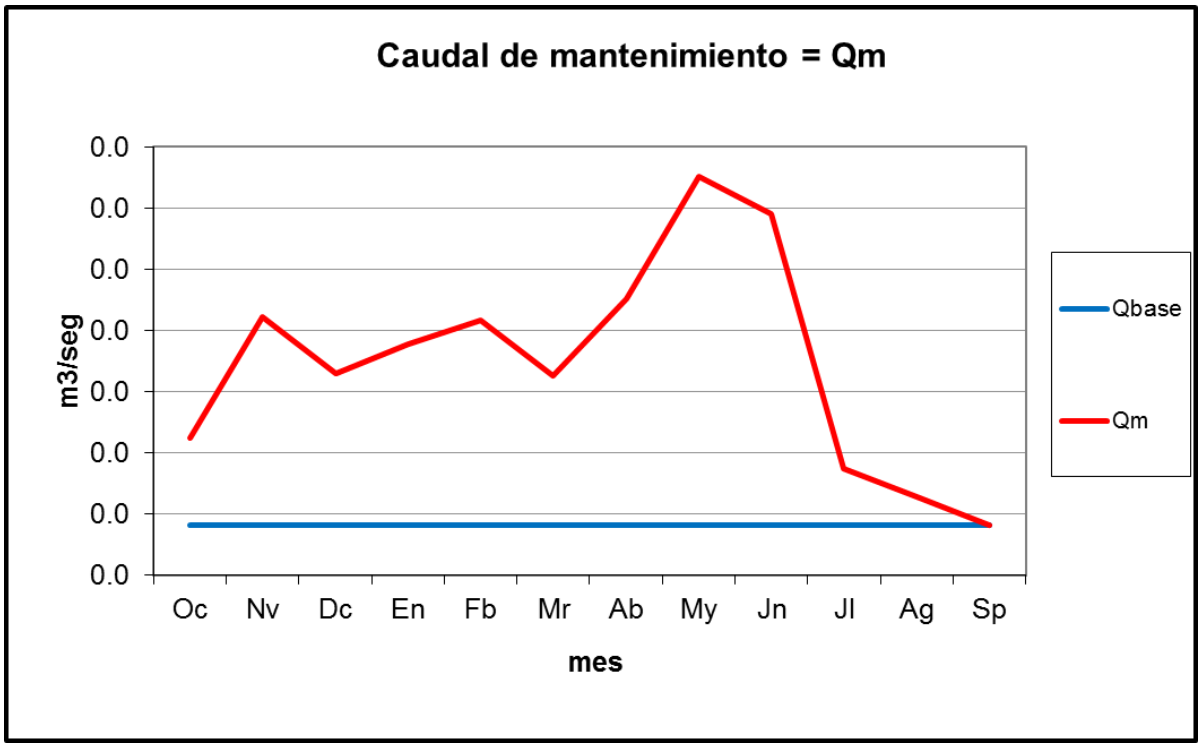



**Figura 5.20.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Mecina**

*-Aplicación y resultados del método de los microhábitats (RHYHABSIM)*

A continuación se muestran los gráficos obtenidos mediante los resultados de la aplicación del método hidrobiológico de los microhábitats; ejecutado este, por el programa RHYHABSIM, y siguiendo los pasos del método Bovee, para el tramo del río Mecina. Los datos exactos se muestran más adelante, en la comparación de caudales.

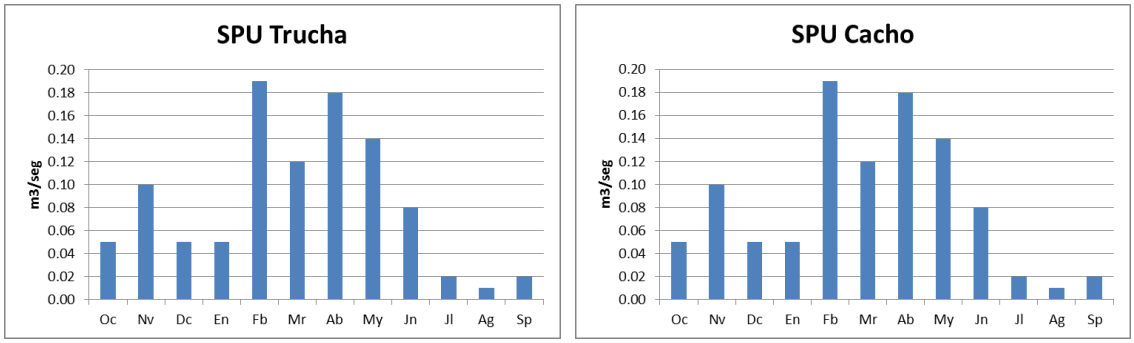



**Figura 5.21.- Exigencias mensuales del cacho y de la trucha del río Mecina**

En el siguiente gráfico se representa la comparación de las exigencias de caudal de cada método y en la siguiente tabla se muestran dichos valores y se selecciona para cada mes,

el valor más exigente de caudal, que como se ha expuesto anteriormente, pasará a formar parte del régimen preliminar de caudales.

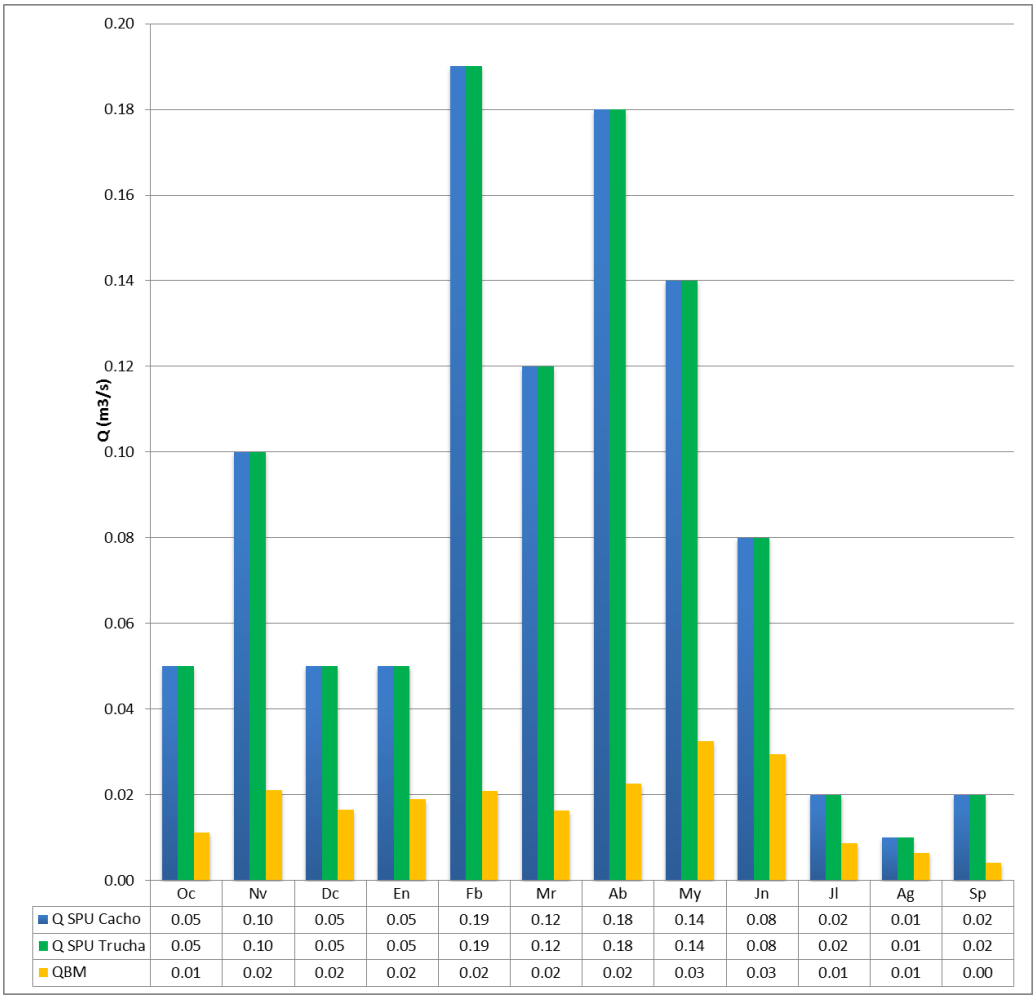



**Figura 5.22.- Comparación de caudales de cada método del río Mecina**

| | QBM | TRUCHA | CACHO | MAYOR VALOR |
|---|---|---|---|---|
| Oc | 0.0112 | 0.05 | 0.05 | 0.0500 |
| Nv | 0.0211 | 0.10 | 0.10 | 0.1000 |
| Dc | 0.0165 | 0.05 | 0.05 | 0.0500 |
| En | 0.0189 | 0.05 | 0.05 | 0.0500 |
| Fb | 0.0208 | 0.19 | 0.19 | 0.1900 |
| Mr | 0.0163 | 0.12 | 0.12 | 0.1200 |
| Ab | 0.0226 | 0.18 | 0.18 | 0.1800 |
| My | 0.0325 | 0.14 | 0.14 | 0.1400 |
| Jn | 0.0295 | 0.08 | 0.08 | 0.0800 |
| Jl | 0.0087 | 0.02 | 0.02 | 0.0200 |
| Ag | 0.0064 | 0.01 | 0.01 | 0.0100 |
| Sp | 0.0041 | 0.02 | 0.02 | 0.0200 |

**Tabla 5.15.- Comparación de caudales de cada método del río Mecina**

A continuación se muestra un gráfico representando el régimen natural de caudales y el régimen preliminar de caudales ecológicos para el tramo del río Mecina.

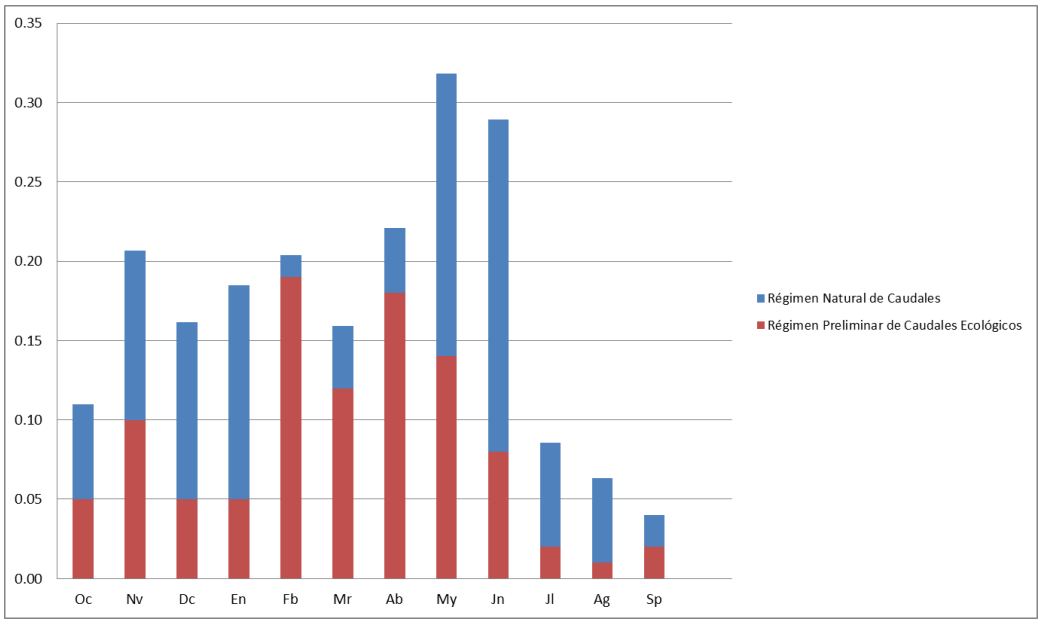
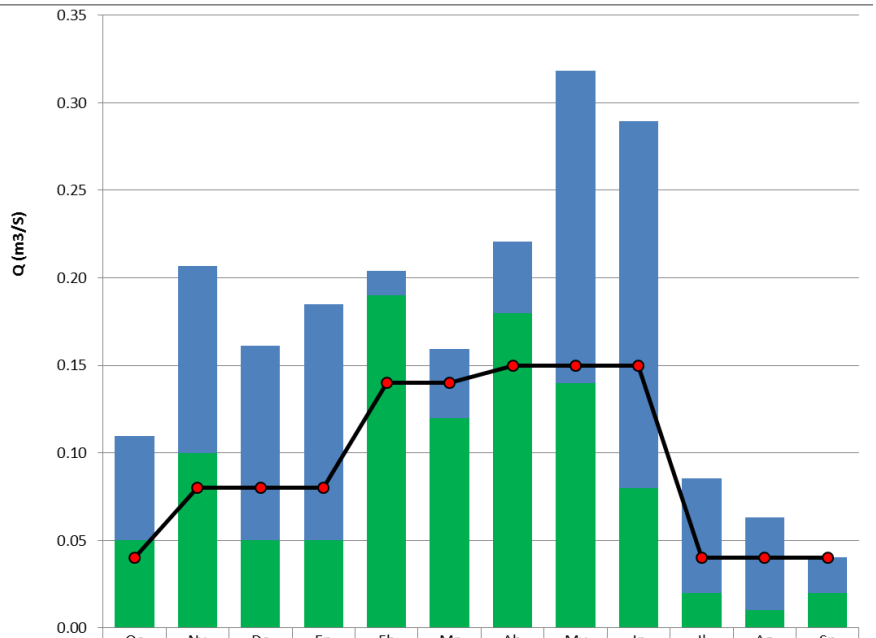



**Figura 5.23.- Régimen preliminar de caudales ecológicos del río Mecina**

Una vez obtenido el régimen preliminar de caudales ecológicos, y en base a los criterios y consideraciones que ya se han descrito, ***se propone el siguiente régimen de caudales ecológicos, por períodos, para el río Mecina.***




| | Oc | Nv | Dc | En | Fb | Mr | Ab | My | Jn | Jl | Ag | Sp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Régimen Natural de Caudales | 0.11 | 0.21 | 0.16 | 0.19 | 0.20 | 0.16 | 0.22 | 0.32 | 0.29 | 0.09 | 0.06 | 0.04 |
| Régimen Preliminar de Caudales Ecológicos | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.05 | 0.19 | 0.12 | 0.18 | 0.14 | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |
| Régimen propuesto | 0.04 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |

**Figura 5.24.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Mecina**

| CAUDALES ECOLÓGICOS PROPUESTOS POR PERÍODOS (m3/s) | |
|---|---|
| Período Seco | 0.04 |
| Período Intermedio A | 0.08 |
| Período Intermedio B | 0.14 |
| Período Húmedo | 0.15 |

**Tabla 5.16.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Mecina**

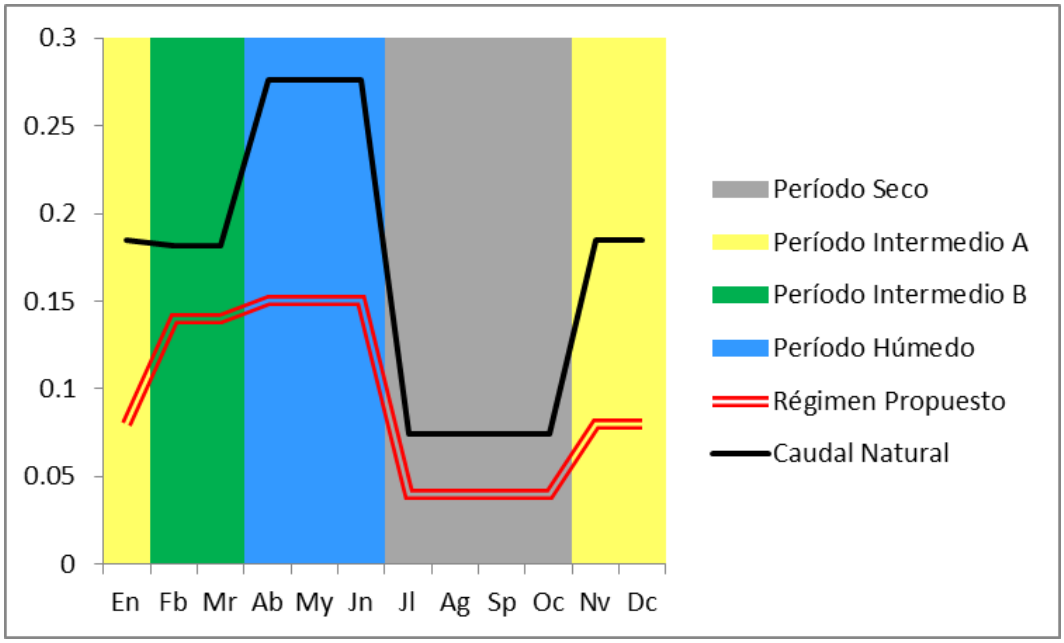



**Figura 5.24.- Régimen propuesto de caudales ecológicos por períodos del río Mecina**

## 5.5.-Chico de Soportujar

*-Aplicación y resultados del método QBM*

Los caudales medios mensuales junto con los cocientes de proporcionalidad de cada mes, resultado de dividir cada caudal medio entre el caudal medio de menos valor, para el tramo del río Chico de Soportujar son los que se indican en la siguiente tabla:

| *Q med mensuales* | m3/seg | Coc. Proporc |
|---|---|---|
| OCTUBRE | 0.11394708 | 9.07200663 |
| NOVIEMBRE | 0.12373539 | 9.8513122 |
| DICIEMBRE | 0.13717242 | 10.9211144 |
| ENERO | 0.15378057 | 12.2433889 |
| FEBRERO | 0.18778498 | 14.9506828 |
| MARZO | 0.13150792 | 10.4701297 |
| ABRIL | 0.15299688 | 12.1809939 |
| MAYO | 0.21790618 | 17.3488106 |
| JUNIO | 0.1833844 | 14.6003258 |
| JULIO | **0.01256029** | 1 |
| AGOSTO | 0.03226741 | 2.56900074 |
| SEPTIEMBRE | 0.03921697 | 3.12229682 |
| Qmesmin | 0.01256029 | |

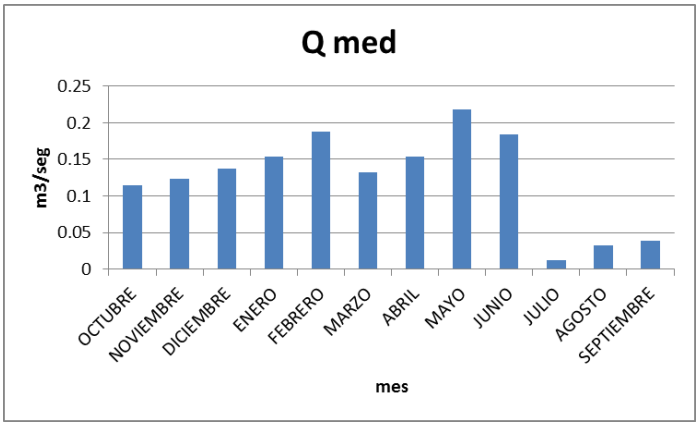



**Figura 5.17.- Caudales medios mensuales y cocientes de proporcionalidad del río Chico de Soportujar**

Una vez introducidos los datos en el programa, y obtenido entonces el caudal base para el tramo del río Chico de Soportujar, que resulta ***0.003 m3/s*** los caudales de mantenimiento que se obtienen se muestran a continuación.

| Q base ( $m^3$/seg) | 0.003 |
|---|---|
| *Q mantenimiento ($m^3$/seg)* | (Qb+Qa)*CocP |
| OCTUBRE | 0.024 |
| NOVIEMBRE | 0.027 |
| DICIEMBRE | 0.029 |
| ENERO | 0.033 |
| FEBRERO | 0.040 |
| MARZO | 0.028 |
| ABRIL | 0.033 |
| MAYO | 0.047 |
| JUNIO | 0.039 |
| JULIO | 0.003 |
| AGOSTO | 0.007 |
| SEPTIEMBRE | 0.008 |

**Tabla 5.18.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Chico de Soportujar**

A continuación se representa en una gráfica la distribución de los caudales de mantenimiento para cada mes, junto con el caudal base obtenido para el tramo del río Chico de Soportujar.

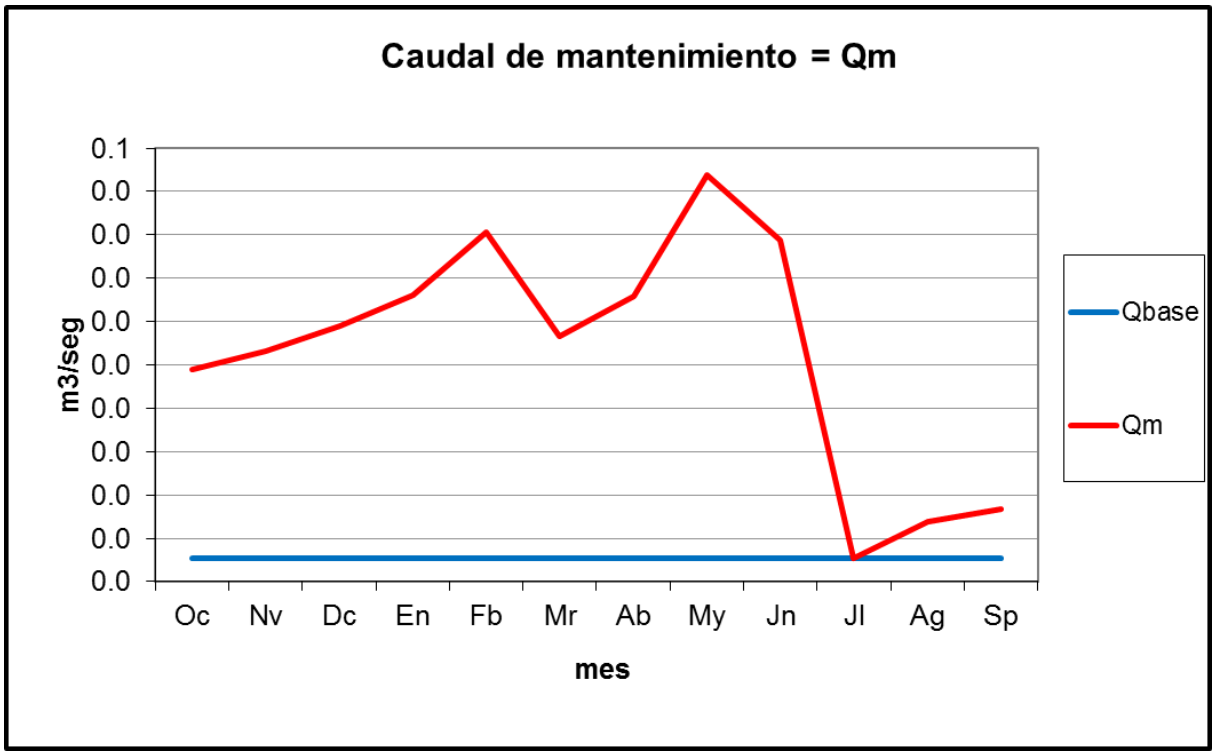



**Figura 5.25.- Caudales de mantenimiento y caudal base del río Chico de Soportujar**

*-Aplicación y resultados del método de los microhábitats (RHYHABSIM)*

A continuación se muestran los gráficos obtenidos mediante los resultados de la aplicación del método hidrobiológico de los microhábitats; ejecutado este, por el programa RHYHABSIM, y siguiendo los pasos del método Bovee, para el tramo del río Grande de Soportujar. Los datos exactos se muestran más adelante, en la comparación de caudales.

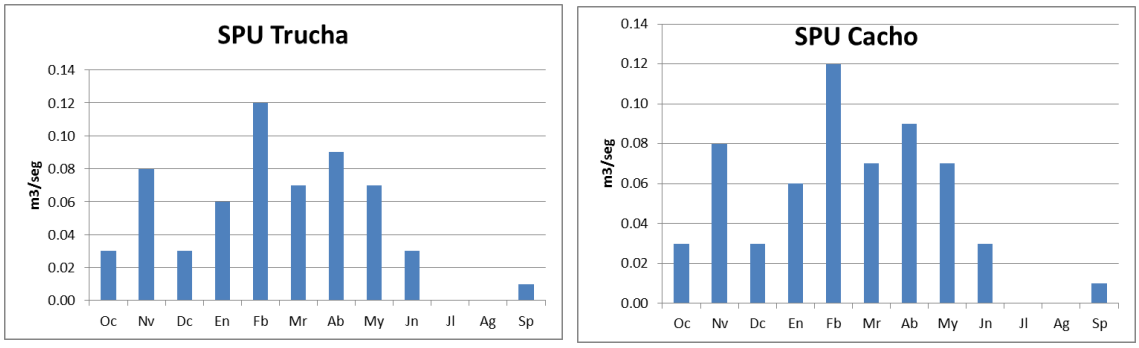



**Figura 5.26.- Exigencias mensuales del cacho y de la trucha del río Chico de Soportujar**

En el siguiente gráfico se representa la comparación de las exigencias de caudal de cada método y en la siguiente tabla se muestran dichos valores y se selecciona para cada mes,

el valor más exigente de caudal, que como se ha expuesto anteriormente, pasará a formar parte del régimen preliminar de caudales.

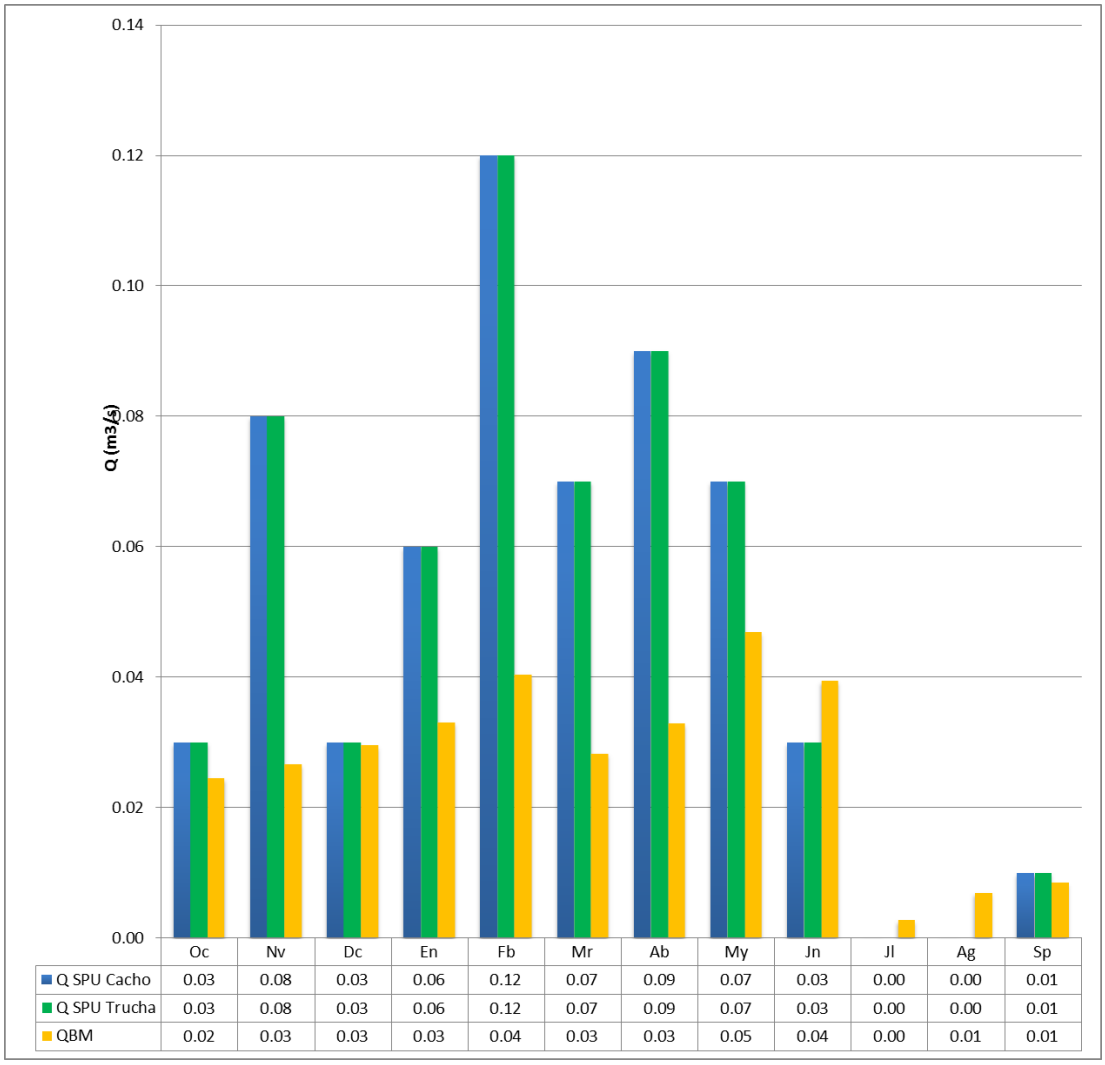



**Figura 5.27.- Comparación de caudales de cada método del río Chico de Soportujar**

| | QBM | TRUCHA | CACHO | MAYOR VALOR |
|---|---|---|---|---|
| Oc | 0.024 | 0.030 | 0.030 | 0.030 |
| Nv | 0.027 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| Dc | 0.029 | 0.030 | 0.030 | 0.030 |
| En | 0.033 | 0.060 | 0.060 | 0.060 |
| Fb | 0.040 | 0.120 | 0.120 | 0.120 |
| Mr | 0.028 | 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| Ab | 0.033 | 0.090 | 0.090 | 0.090 |
| My | 0.047 | 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| Jn | 0.039 | 0.030 | 0.030 | 0.039 |
| Jl | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.003 |
| Ag | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.007 |
| Sp | 0.008 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |

**Tabla 5.19.- Comparación de caudales de cada método del río Chico de Soportujar**

A continuación se muestra un gráfico representando el régimen natural de caudales y el régimen preliminar de caudales ecológicos para el tramo del río Chico de Soportujar.

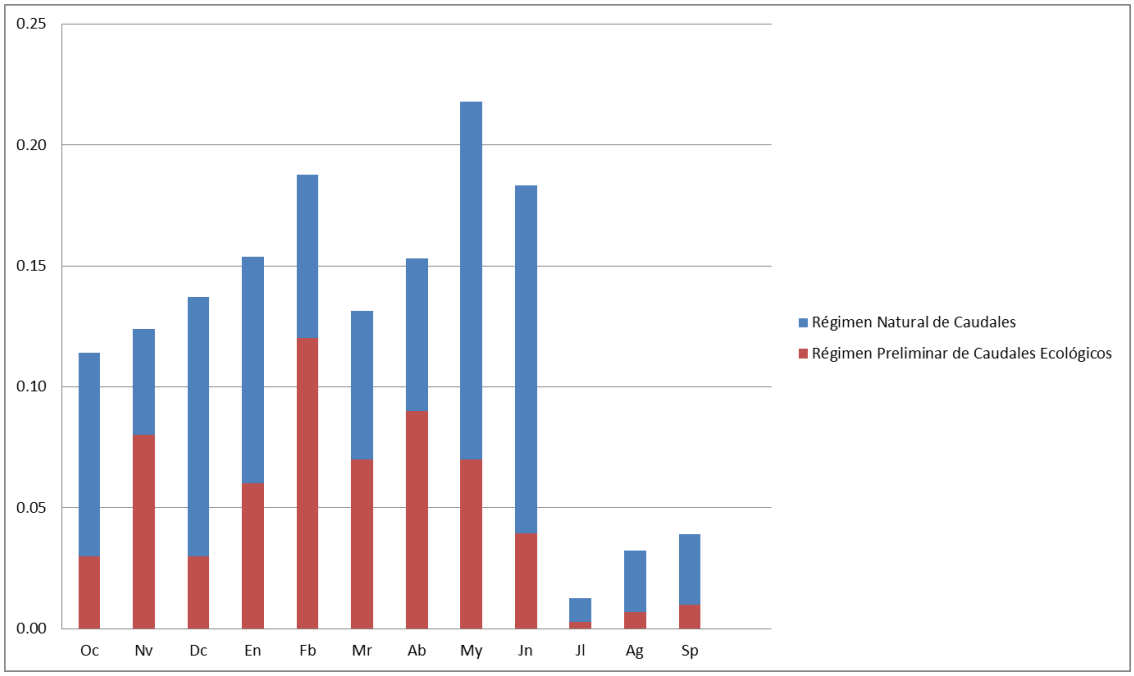
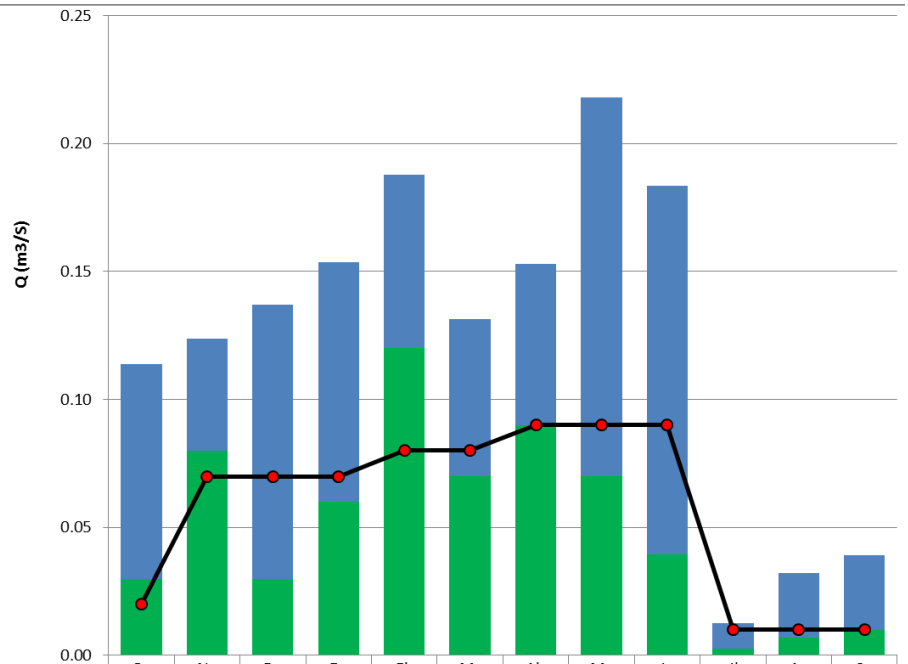



**Figura 5.28.- Régimen preliminar de caudales ecológicos del río Chico de Soportujar**

Una vez obtenido el régimen preliminar de caudales ecológicos, y en base a los criterios y consideraciones que ya se han descrito, ***se propone el siguiente régimen de caudales ecológicos, por períodos, para el río Chico de Soportujar.***




| | Oc | Nv | Dc | En | Fb | Mr | Ab | My | Jn | Jl | Ag | Sp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Régimen Natural de Caudales | 0.11 | 0.12 | 0.14 | 0.15 | 0.19 | 0.13 | 0.15 | 0.22 | 0.18 | 0.01 | 0.03 | 0.04 |
| Régimen Preliminar de Caudales Ecológicos | 0.03 | 0.08 | 0.03 | 0.06 | 0.12 | 0.07 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| Régimen propuesto | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

**Figura 5.29.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Chico de Soportujar**

| CAUDALES ECOLÓGICOS PROPUESTOS POR PERÍODOS (m3/s) | |
|---|---|
| Período Seco | 0.02 |
| Período Intermedio A | 0.07 |
| Período Intermedio B | 0.08 |
| Período Húmedo | 0.09 |

**Tabla 5.20.- Régimen propuesto de caudales ecológicos del río Chico de Soportujar**

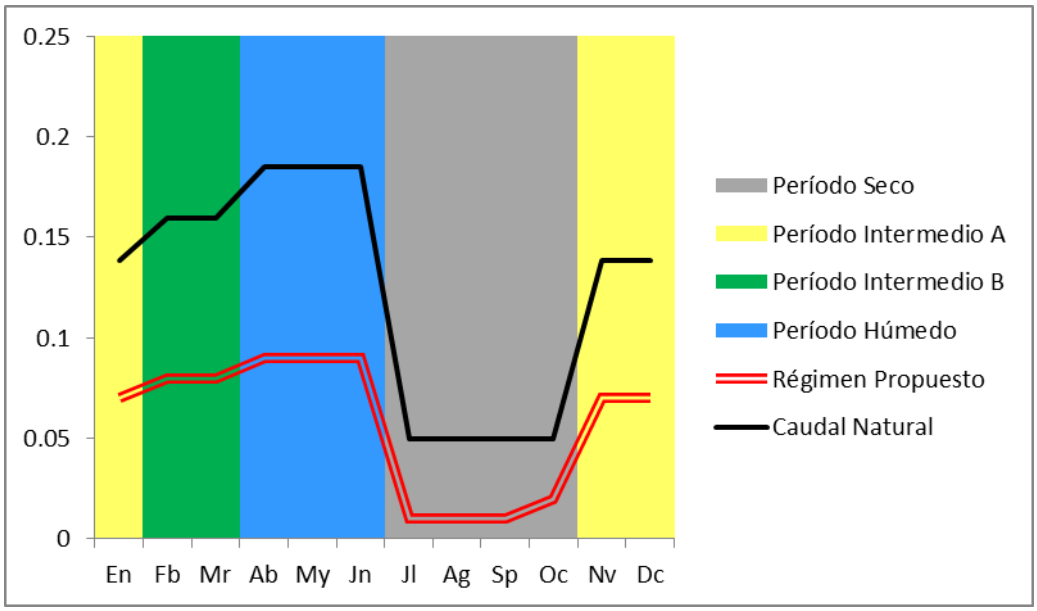



**Figura 5.30.- Régimen propuesto de caudales ecológicos por períodos del río Chico de Soportujar**

# 7.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

## 7.1.- Síntesis de los resultados obtenidos

En primer lugar se presenta un pequeño análisis de los resultados obtenidos y anteriormente presentados. Dicho análisis se realiza por cada tramo de río estudiado.

**-Chico de Bérhules**

Para este río, respecto a las exigencias de caudal obtenidas por el método de los microhábitats, observamos que predomina la exigencia de la especie de la trucha sobre la del cacho. En los meses de Julio y agosto (los meses más secos), los caudales obtenidos a partir de dicho método tienden a cero. Con los valores propuestos para cada río se mejora que casi todos los meses las condiciones idóneas para ambas especies piscícolas, a excepción de mayo y abril que se reduce un poco pero en ningún caso, sin exceder de una bajada del 15%.

**-Grande de Bérchules**

Para este río nos encontramos que de una manera discreta predominan las exigencias debidas a la especie del cacho sobre la trucha. En julio y agosto nos volvemos a encontrar con exigencias mínimas que tienden a ser nulas, en los cuales se considera como preferencia, el caudal obtenido por el método hidrológico (QBM). De la misma forma que en el Chico de Bérchules, con los valores propuestos para cada río se mejora que casi todos los meses las condiciones idóneas para ambas especies piscícolas, a excepción de mayo y abril que se reduce un poco pero en ningún caso, sin exceder de una bajada del 15%.

**-Trevélez**

En este río, al igual que ocurre en el Grande de Bérchules, la especie piscícola que exige un mayor valor de caudal es el cacho. De la misma forma que ocurre en los tramos de río analizados hasta ahora, los valores de caudal obtenidos por el método hidrológico QBM, no superan a las exigencias obtenidas por el método de los microhábitats, pero a diferencia de los anteriores, no hay ninguna excepción para ningún mes.

**-Mecina**

Curiosamente, para este río, las exigencias de la trucha y del cacho presentan los mismos valores; y de igual forma que ocurre con los demás ríos, dichas exigencias sobrepasan a las obtenidas por el método hidrológico (QBM). Se observan dos valores muy elevados en febrero y abril, correspondientes con la época de la freza de la trucha, la cual se respeta como en todos los ríos, determinando un valor de caudal ecológico que garantice las mejores condiciones.

**-Chico de Soportujar**

En este tramo de río estudiado vuelve a darse la misma coincidencia en cuanto a exigencias de valor de caudal respecto a las dos especies piscícolas estudiadas, el cacho y la trucha. Además, en los meses más secos de julio y agosto se vuelve a producir esa tendencia a cero de los valores obtenidos por el método de los microhábiats, la cual, obviamente es superada por la exigencia presenta por el método hidrológico QBM.

## 7.2.- Conclusiones

A continuación, se recogen las conclusiones a las que se ha llegado durante la realización del presente estudio.

• El cacho es la especie, entre las dos consideradas, que más requerimiento de caudal tiene, aunque con escasa diferencia respecto a la trucha.

• A la vista de de los resultados en todos los tramos de río estudiados, el método más restrictivo o más condicionante, es el método de los microhábitats. Por lo que se llega a conclusión, tomando como referencia dicho estudio, y consultando alguno más en el que se hayan empleado estos métodos, de que es un hecho, y no solo se hace presente en este estudio, el que el método hidrobiológico siempre sea más restrictivo. En otros estudios consultados, eso ocurre en casi todos los meses salvo en el estiaje, que se igualan bastante o solicita algo más de agua el QBM. En este caso pasa parecido, pero con volúmenes tan escasos de agua, en la actualidad no existen modelos que tenga la sensibilidad para determinar dichas cantidades. Por lo que dados los reducidos caudales de estos tributarios, los modelos nos indican que el objetivo durante el estiaje es mantener un mínimo flujo de “agua corriente” si es que se puede llamar agua corriente a esa cantidad. Debido a que la principal función en estos casos, es que se mantengan unas ciertas condiciones de humedad

• Tanto para la trucha como para el cacho se ha observado a partir de las curvas de habitabilidad que no siempre un mayor caudal aumenta la SPU que necesitan las especies piscícolas. A menudo un caudal grande implica que los peces se tengan que refugiar en los laterales del río. Por lo tanto esto pone de manifiesto que un caudal ecológico no ha de estar siempre restringido por un valor mínimo, si no por un rango de valores en los que se consiga el mejor estado para el ecosistema del respectivo tramo de río.

• En los meses más secos se aprecia una bajada considerable de caudal en el régimen propuesto. Esto es debido a que en estos meses es cuando más escasea el recurso y, por tanto, hay que adaptarse a las circunstancias.

• El caudal que se ha considerado necesario y, por tanto, el que se ha propuesto es en muchos casos superior a los datos históricos que poseemos de los mismos meses.

• Dado que para dicho estudio se han empleados los caudales SIMPA II, modificados por una corrección, la cual tiene en cuenta los aportes del deshielo, el valor del caudal aumenta, por consiguiente en primavera. Por este hecho, el régimen de caudales resulta diferente de lo que a priori podría esperarse (mayores en otoño-invierno que en primavera). Esto es debido a que los ríos que se han estudiado tienen un régimen nival.

• En todos los tramos estudiados se observa que el mes de diciembre es el más irregular en cuanto a aportaciones y valores de caudal. Esto se puede deber, en parte, a los diferentes cambios de condiciones atmosféricas que se producen alrededor de esta época del año y que condicionan las aportaciones a los tramos fluviales.

En vista a los resultados obtenidos y a los posibles escenarios futuros, se llega a la conclusión de que la posibilidad de almacenar aguas en los acuíferos durante los momentos de recarga o la recarga artificial de los mismos, y la flexibilidad para utilizar esta agua (que fluye a unas velocidades comparativamente mucho más bajas que las superficiales), en los lugares o momentos del año en los que los usos están descompensados con respecto a las reservas superficiales, posibilita mantener unos caudales ecológicos en tramos de ríos, que de otra forma se verían sobreexplotados, muy afectados o secos.

# 8.- BIBLIOGRAFÍA

A continuación se citan las referencias que se han utilizado para la elaboración del presente estudio, tanto para consulta de otras obras como para soporte de información.

-Castillo, A. (1985). Aguas superficiales y subterráneas en Sierra Nevada. En Sierra Nevada y La Alpujarra. Ed. Andalucía, S.A. Ferrer, M. Granada

-Castillo, A. (1993). Aguas de Sierra Nevada. En Aguas de Sierra Nevada. EMASAGRA. Ferrer, M. y Fernández Durán, E. Granada

-Castillo, A.; Gisbert, J. y Al-Alwani, G. (1996b). Caudales específicos característicos de Sierra Nevada (Granada y Almería); metodología de estimación de recursos hídricos. Geogaceta, 20 (6). 1.255-1.257

-Castillo Requena, J.M. (1981). Mecanismos de la precipitación en Sierra Nevada. Rev. Cuad. Geográficos, 11

- Antonio Castillo Martín, (2000) PARQUE NACIONAL DE SIERRA NEVADA, de Canseco editores.

- Manuel Pezzi Cretto; Mª Elena Martín-Vivaldi; Mª Jesús Con Martín, (1997); La red hidrográfica de Sierra Nevada (Granada): relación con las pendientes, análisis cuantitativo, determinación de caudales y regímenes.

<http://hispagagua.cedex.es/instituciones/confederaciones/sur>

<http://dma.medioambientecantabria.es/PasPisuena/pas.htm>

<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua/textos_legislativos.aspx>

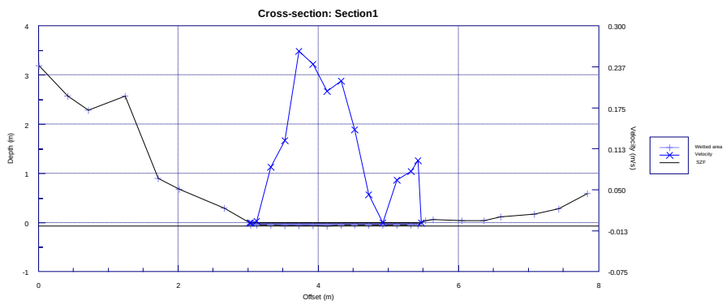
< http://es.wikipedia.org/wiki/Media_m%C3%B3vil>

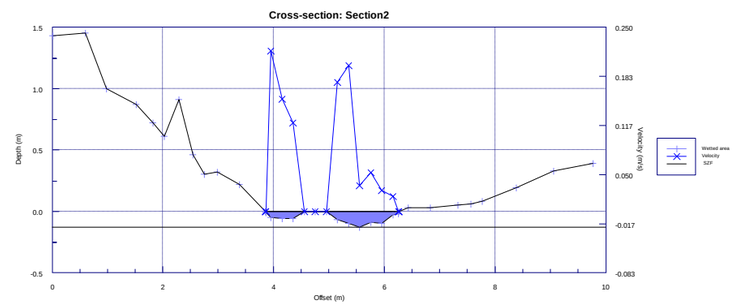
< http://exceltotal.com/convertir-datos-de-una-matriz-en-columnas-en-excel/>

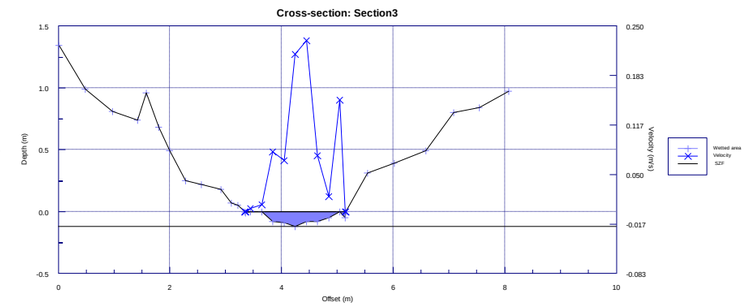
# ANEJO 1.- PERFILES TRANSVERSALES

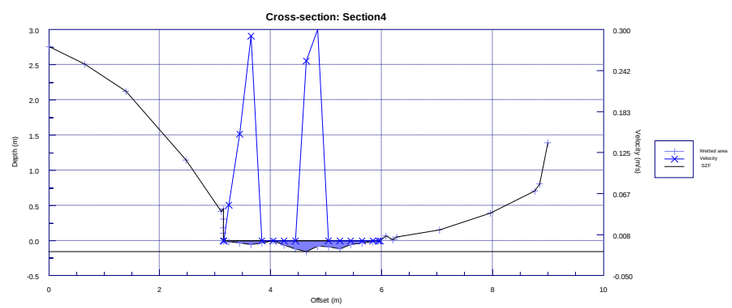
En el presente anexo se muestran secciones transversales de cada tramo de río de estudio, en concreto nueve de cada tramo, obtenidas con el programa RHYHABSIM. En cada sección se representa la profundidad de agua media de cada punto en la sección y la velocidad media del río en dichos puntos.

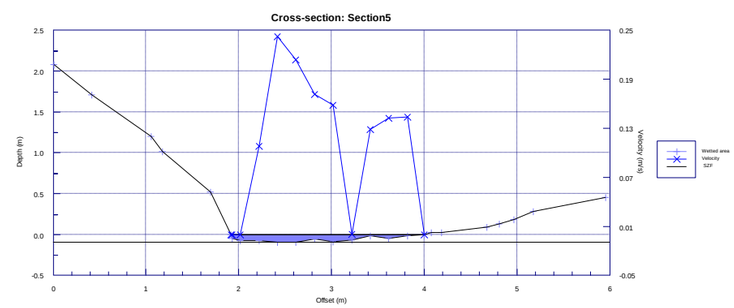
## -Chico de Bérchules

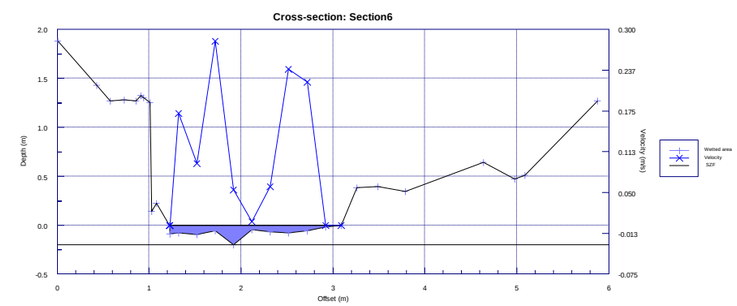


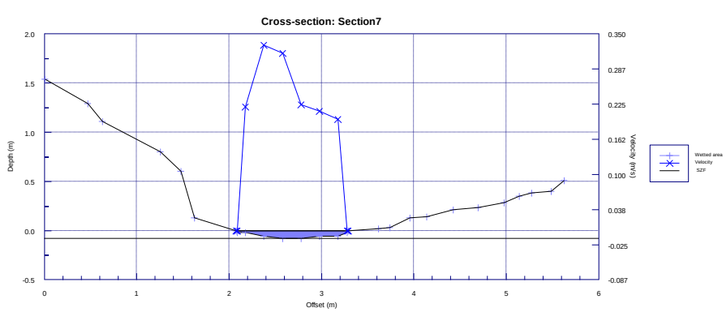



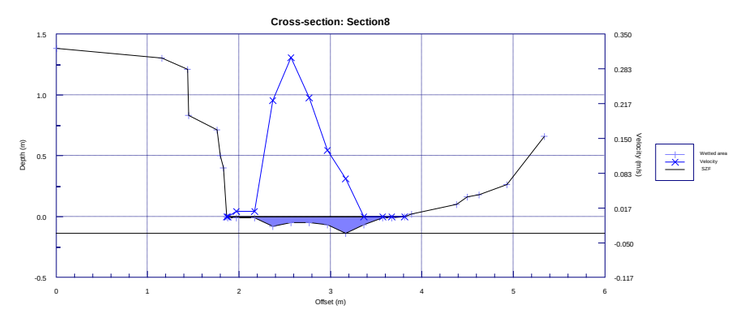



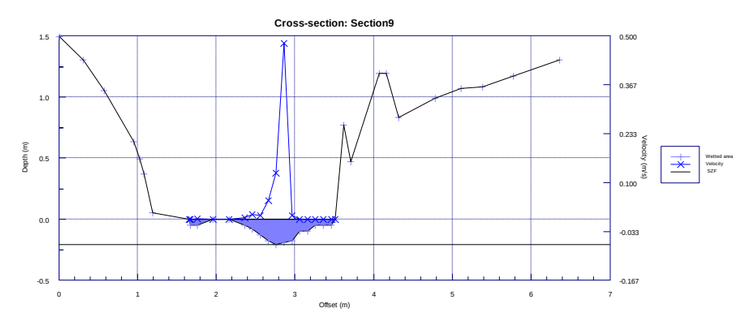



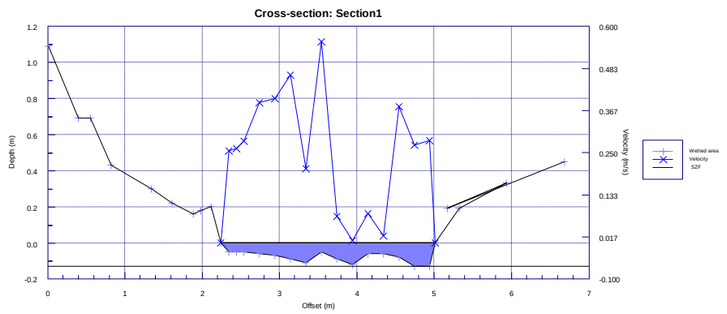



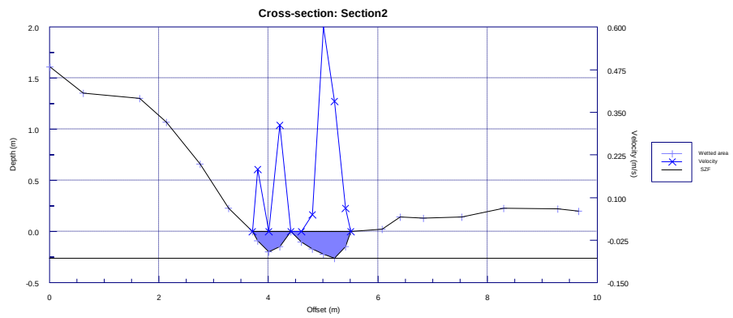



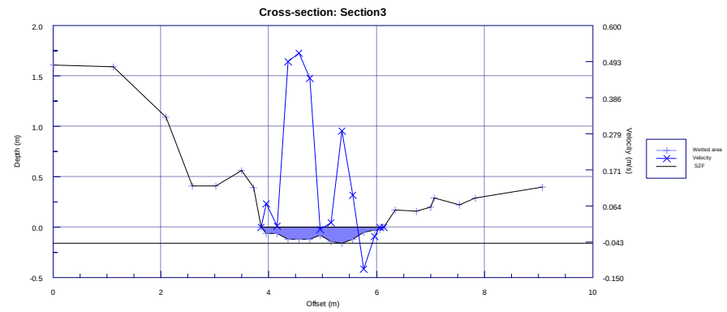



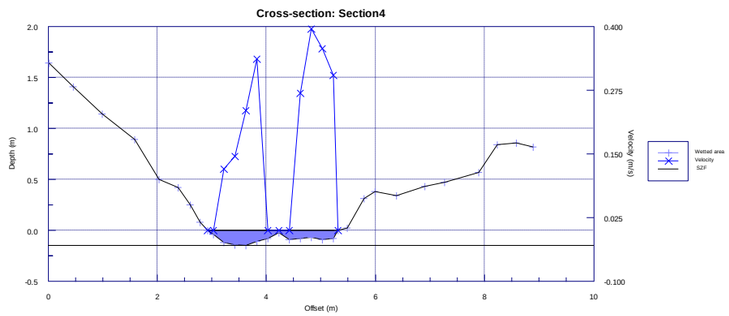



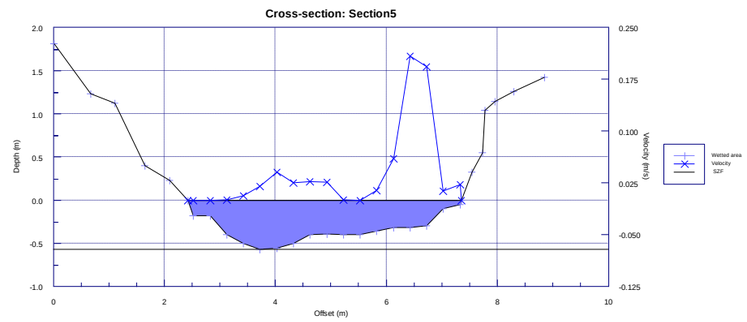
## *-Grande de Bérchules*

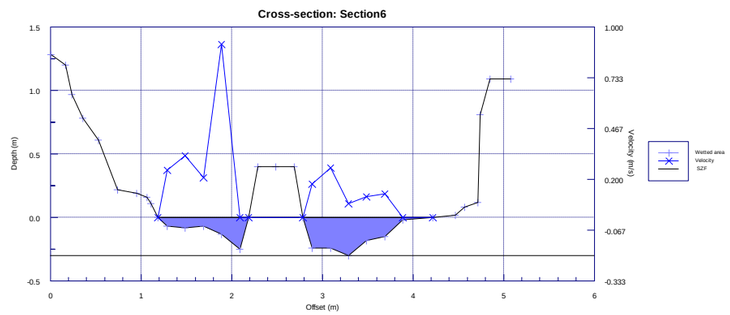


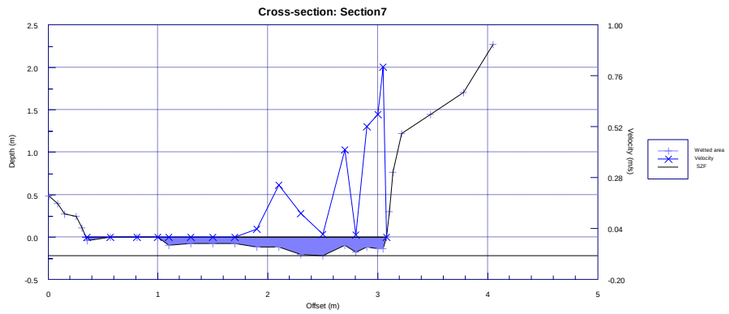



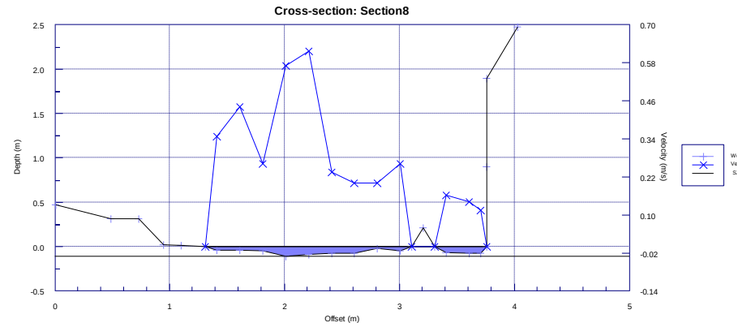



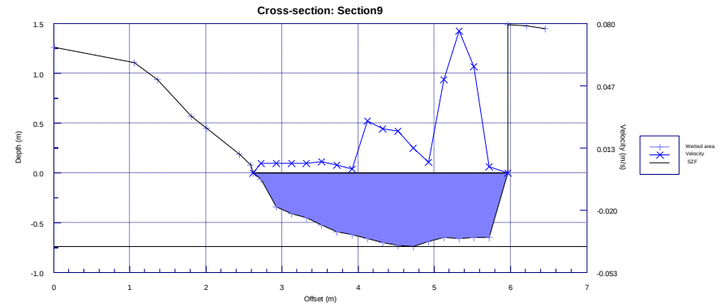



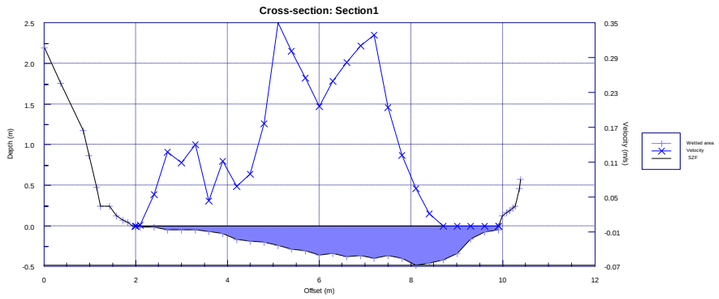



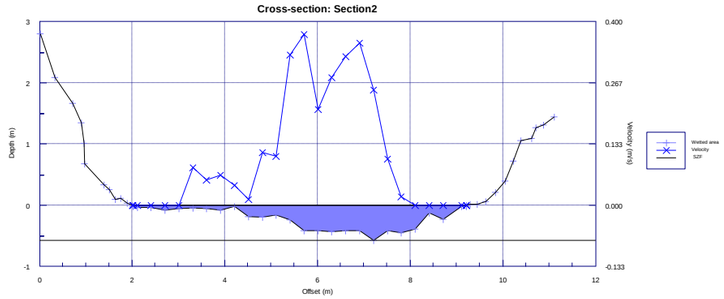



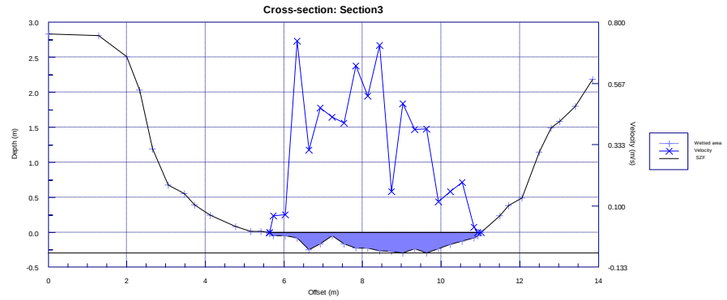



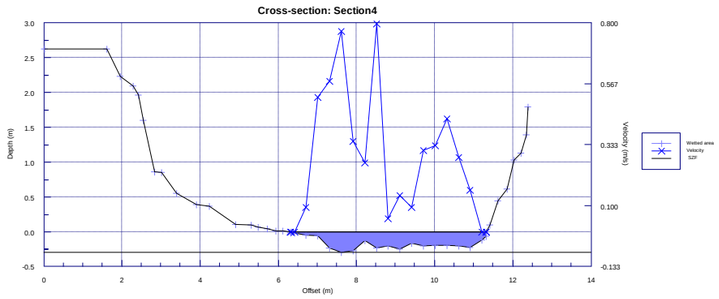



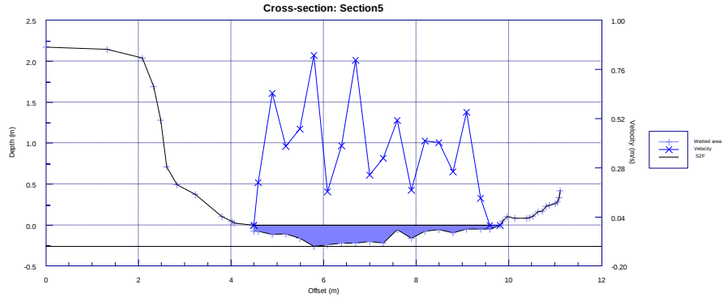
*-Trevélez*

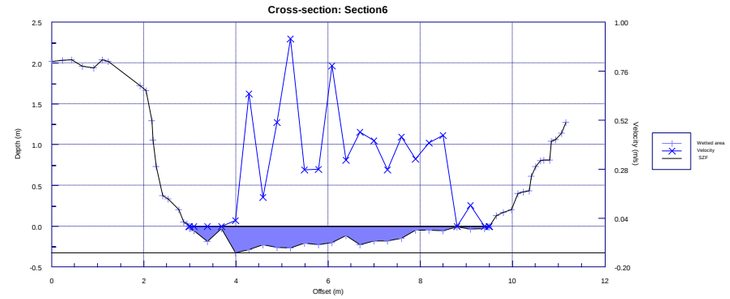

Cross-section: Section1
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

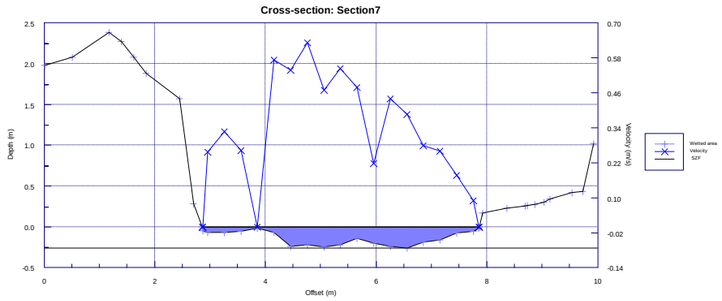

Cross-section: Section2
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

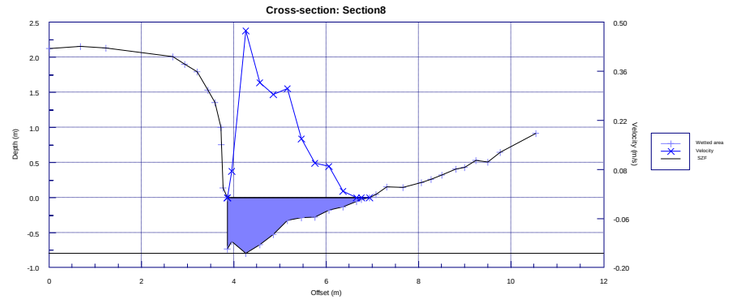

Cross-section: Section3
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

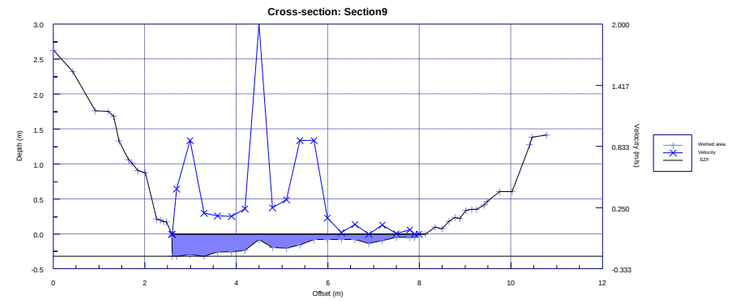

Cross-section: Section4
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF


Cross-section: Section5
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

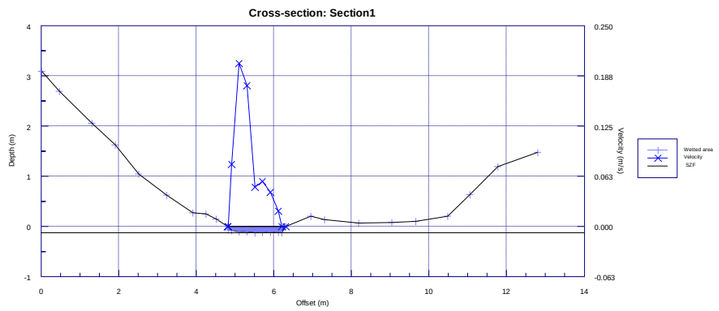

Cross-section: Section6
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

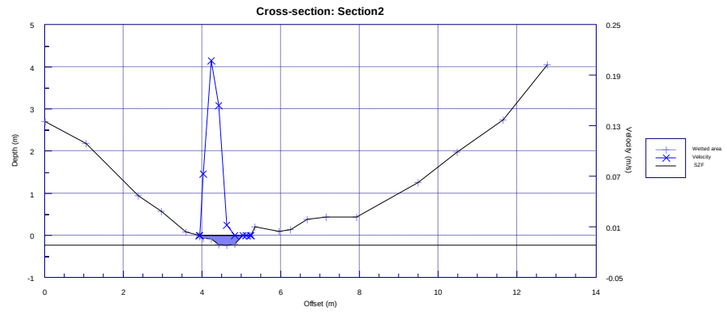

Cross-section: Section7
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

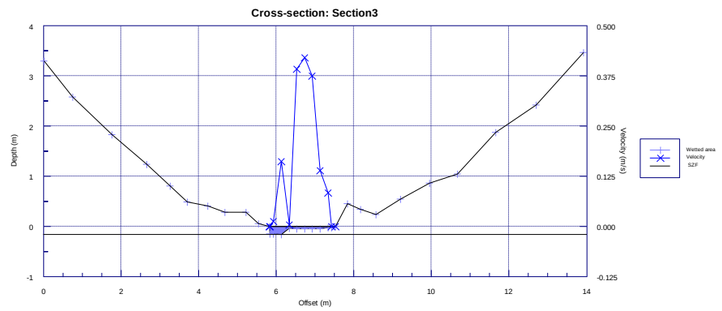

Cross-section: Section8
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

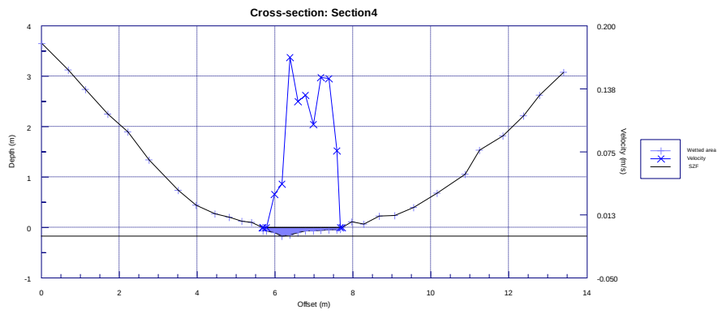

Cross-section: Section9
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

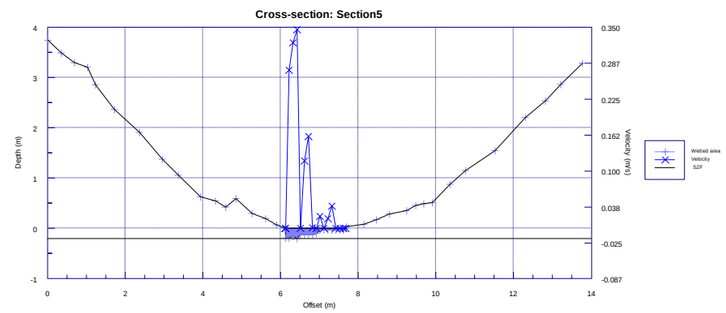
*-Mecina*

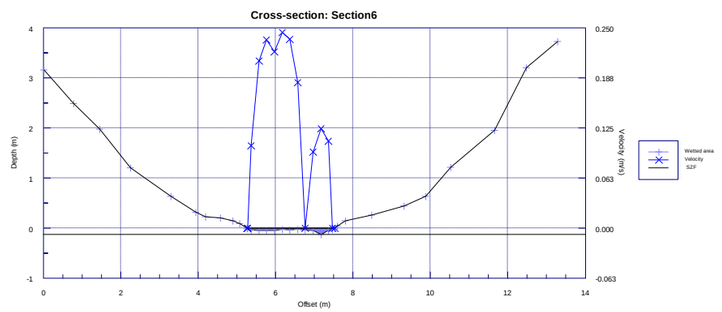

Cross-section: Section1
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

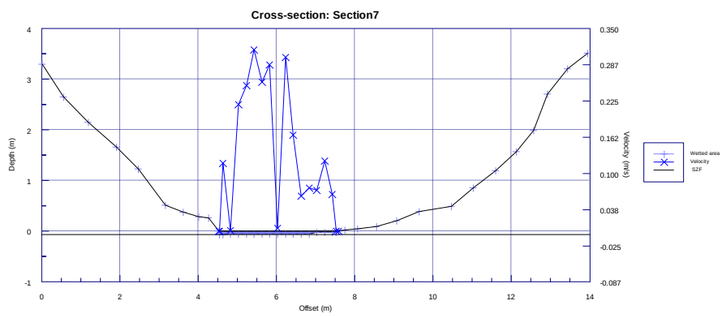

Cross-section: Section2
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

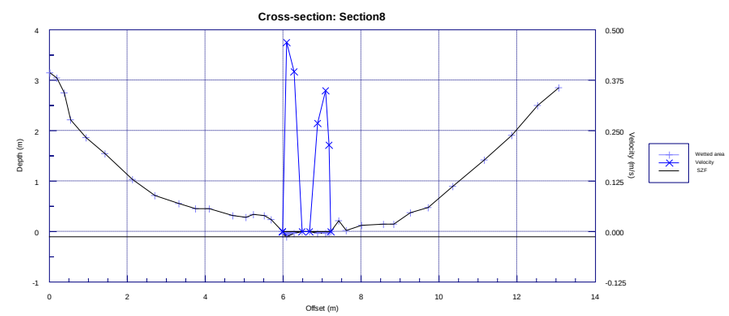

Cross-section: Section3
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

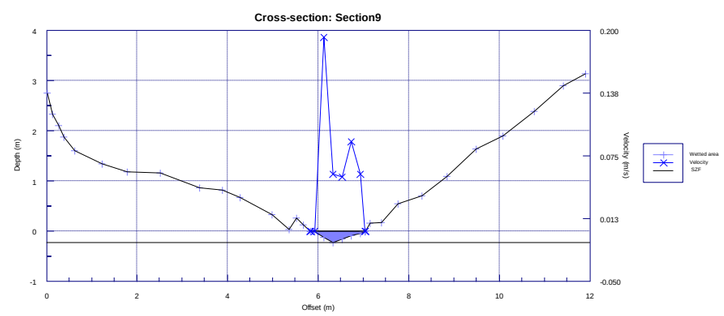

Cross-section: Section4
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF


Cross-section: Section5
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

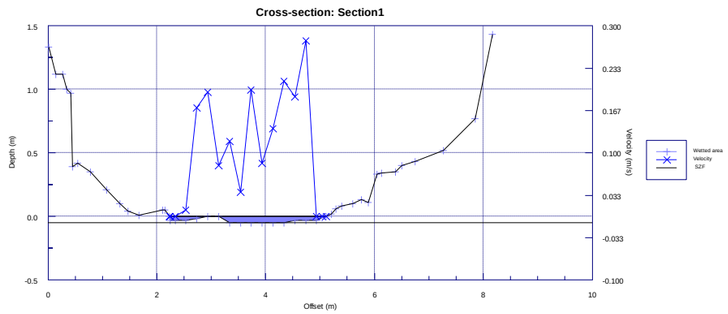

Cross-section: Section6
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

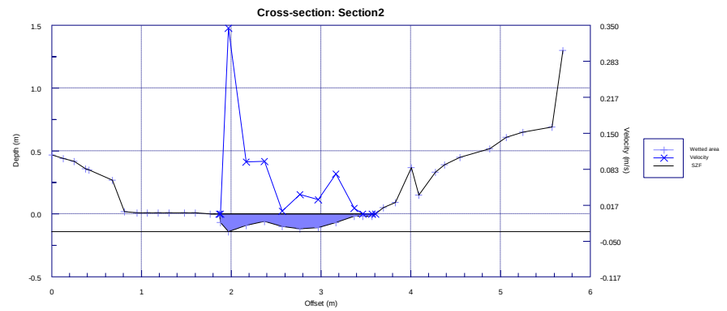

Cross-section: Section7
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

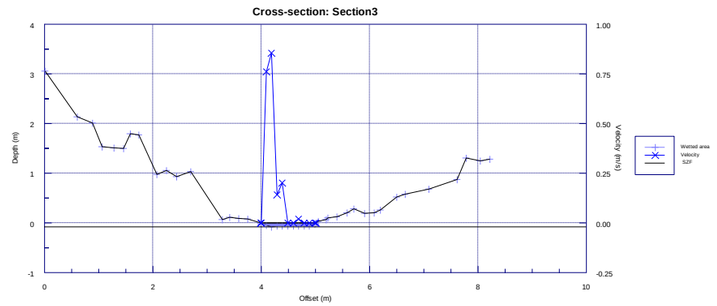

Cross-section: Section8
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

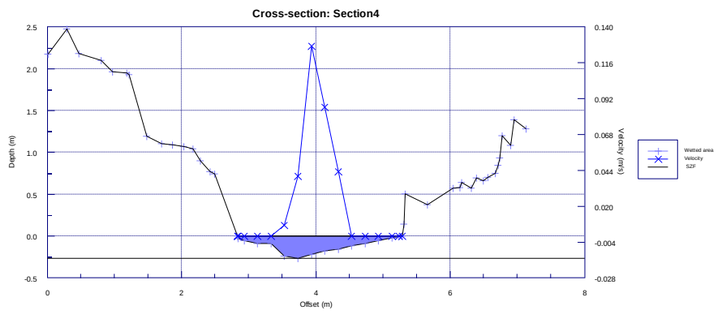

Cross-section: Section9
Depth (m)
Velocity (m/s)
Offset (m)
Wetted area
Velocity
SZF

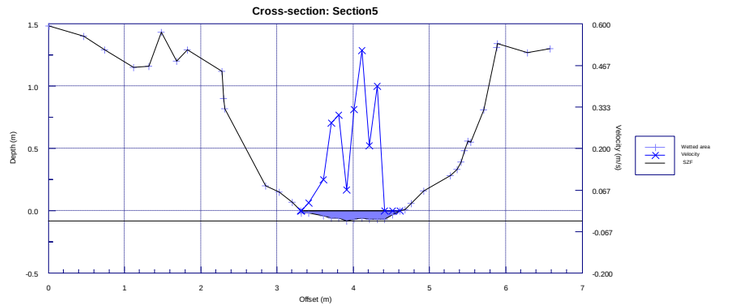
## *-Chico de Soportujar*

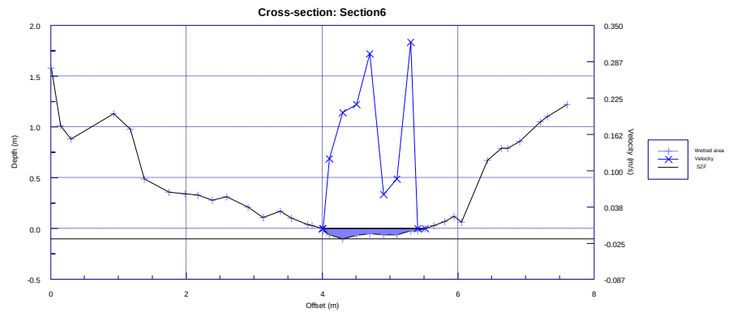


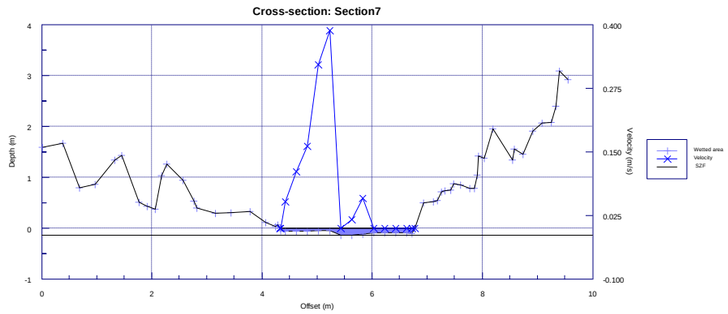



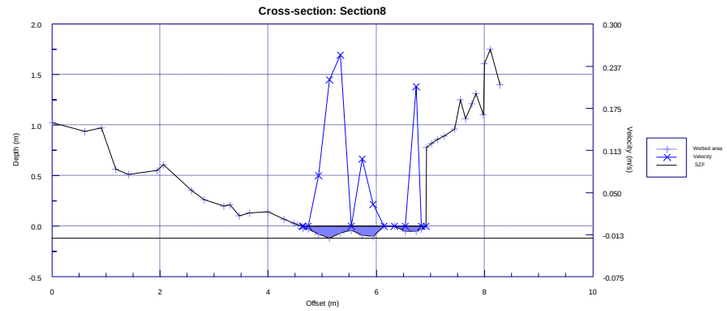



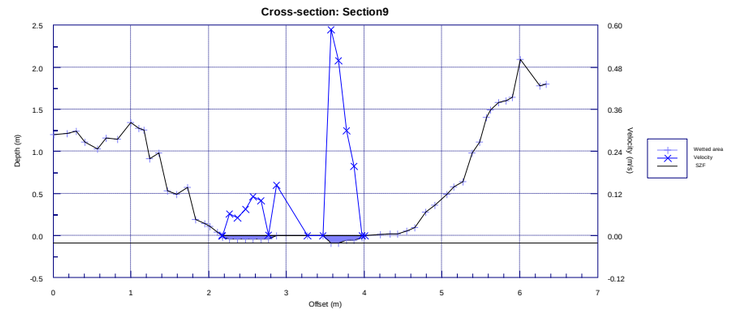



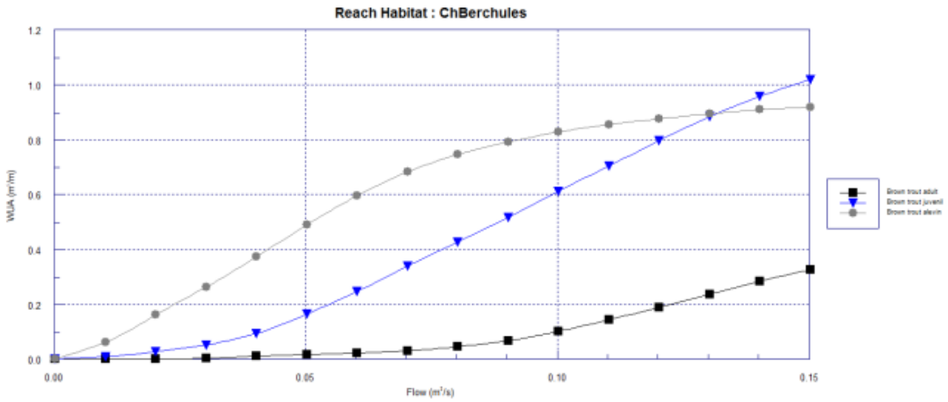
# ANEJO 2.- GRÁFICAS SPU-Q

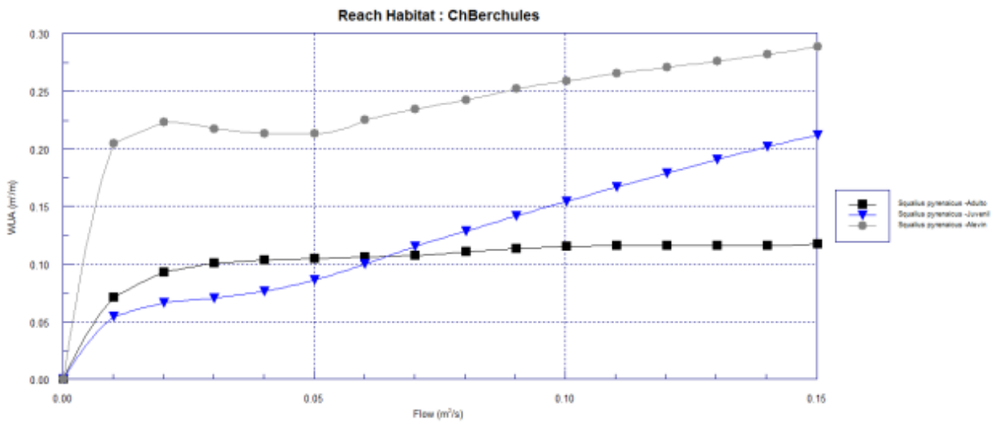
En el presente anejo, se muestran las gráficas SPU-Q de cada especie piscícola para cada tramo de río, obtenidas con el programa RHYHABSYM. Se muestran las gráficas de cada especie por separado y a continuación en conjunto.

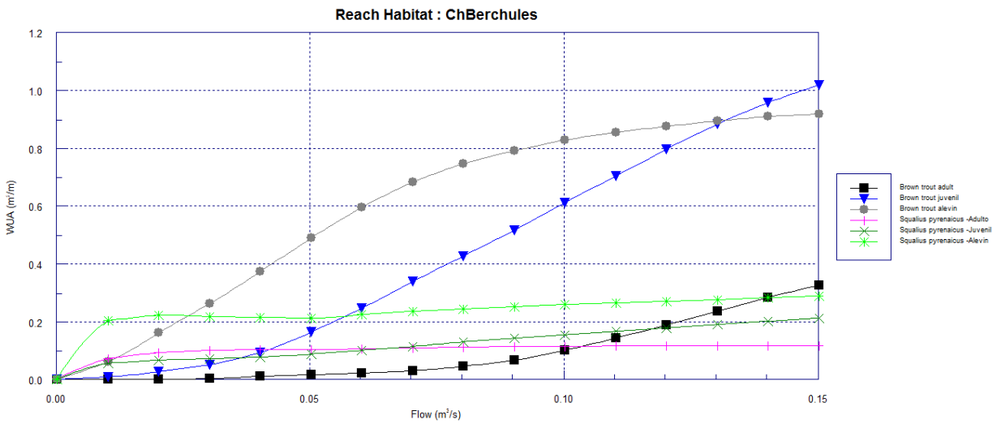
Se representan dichas gráficas para el intervalo de caudal en el que está comprendido el tramo de río de estudio a lo largo de los 30 años hidrológicos, y otro intervalo de mayores dimensiones para ver la evolución de cada curva.

## *-Chico de Bérchules*

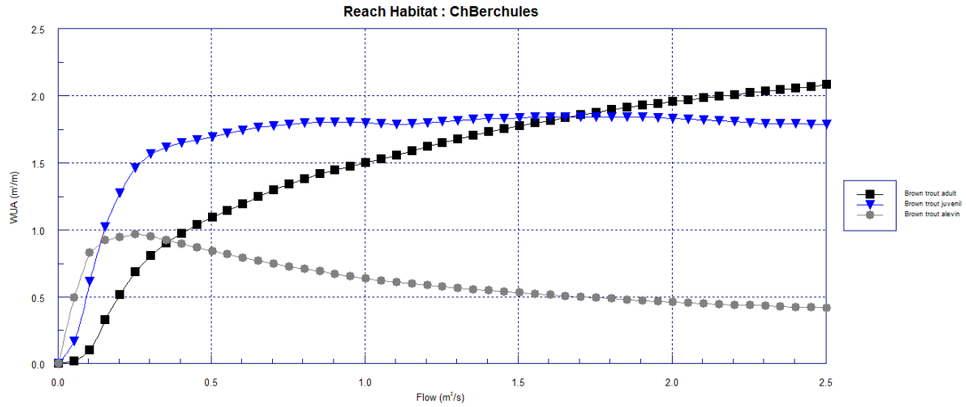
### *Intervalo de caudal de estudio*

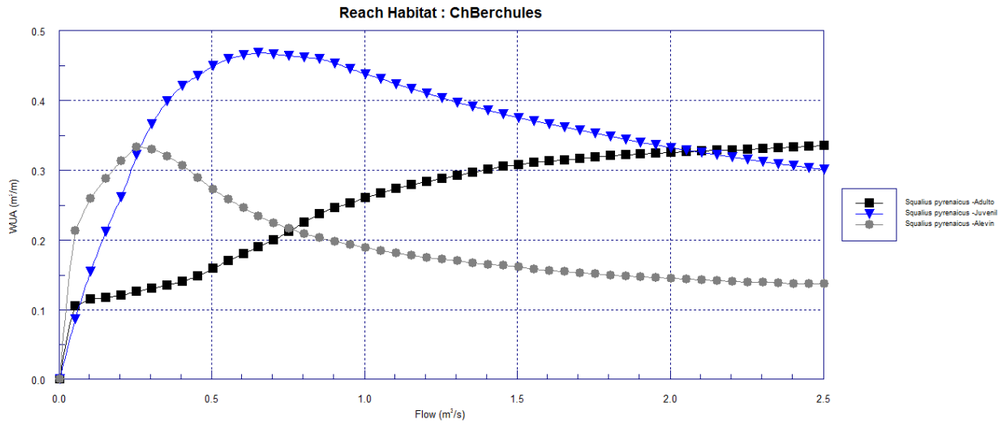


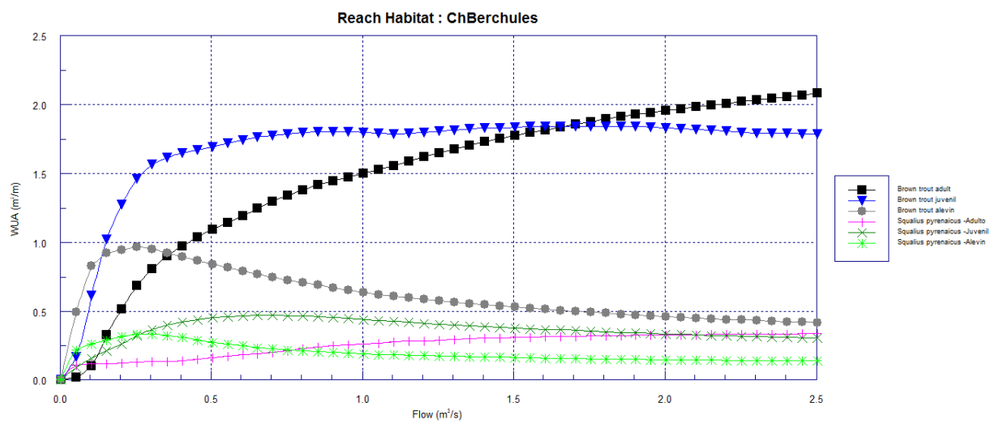




### *Intervalo de caudal más amplio*

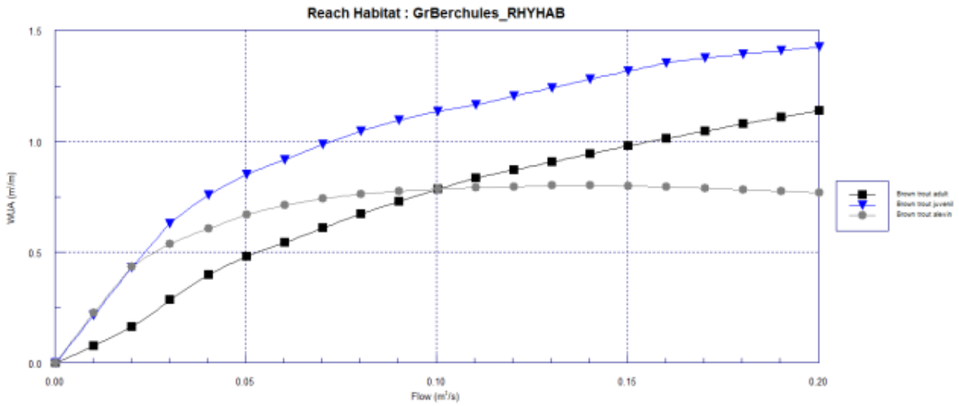


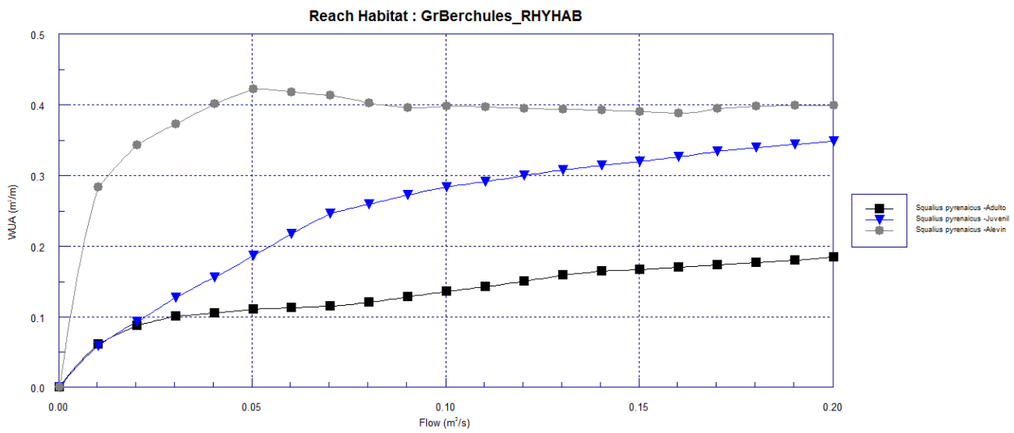



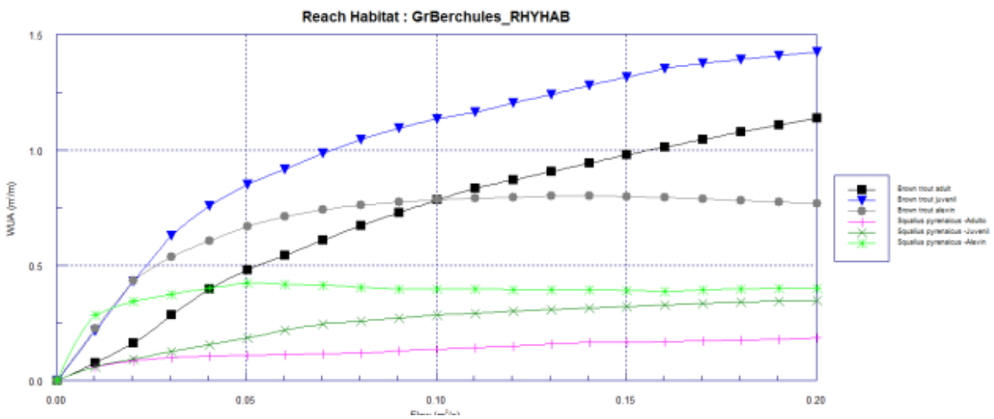



## *-Grande de Bérchules*

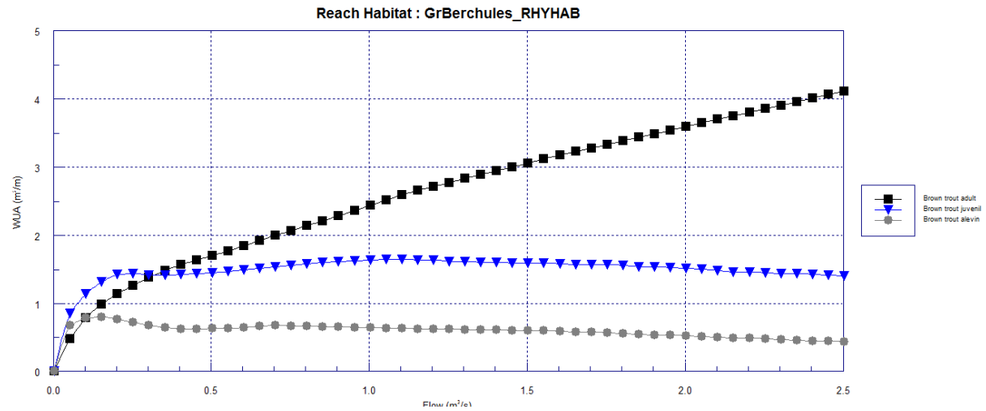
*Intervalo de caudal de estudio*

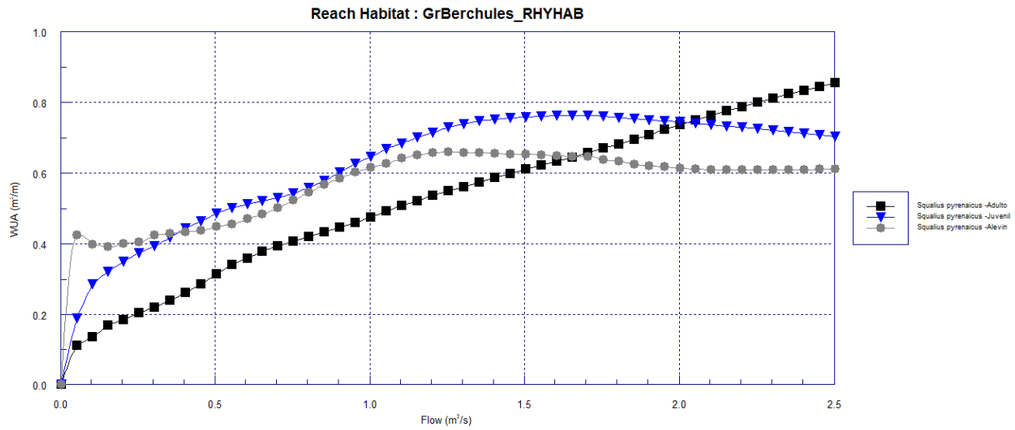


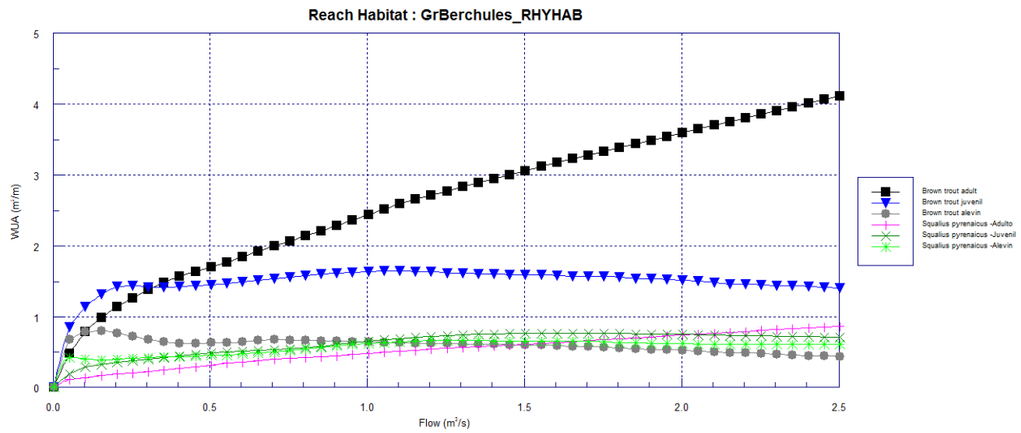




*Intervalo de caudal más amplio*

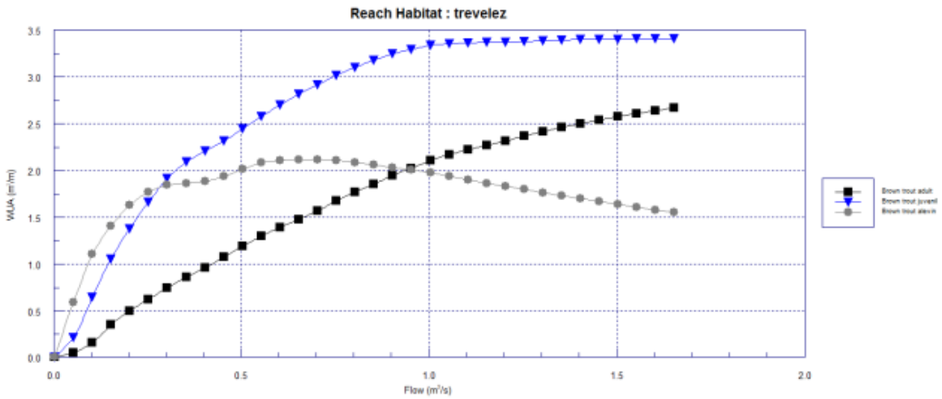


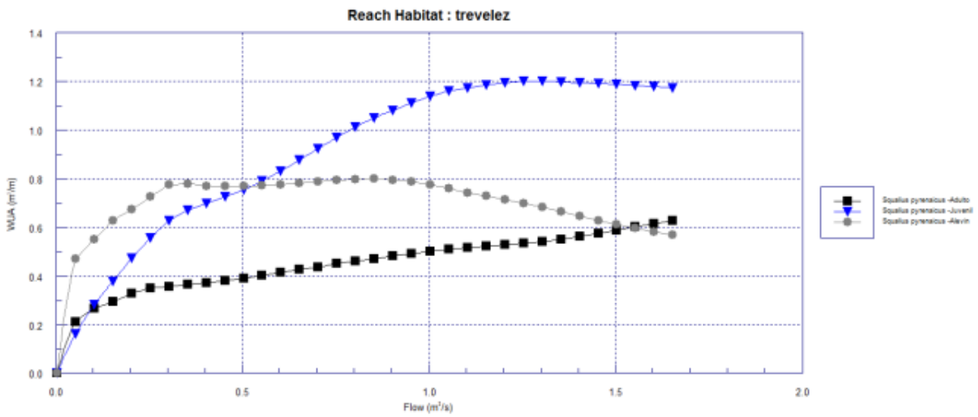



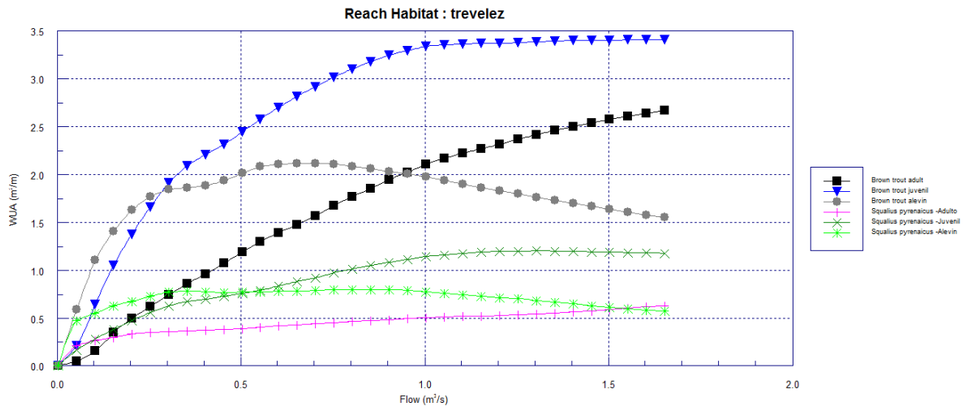



***-Trevélez***

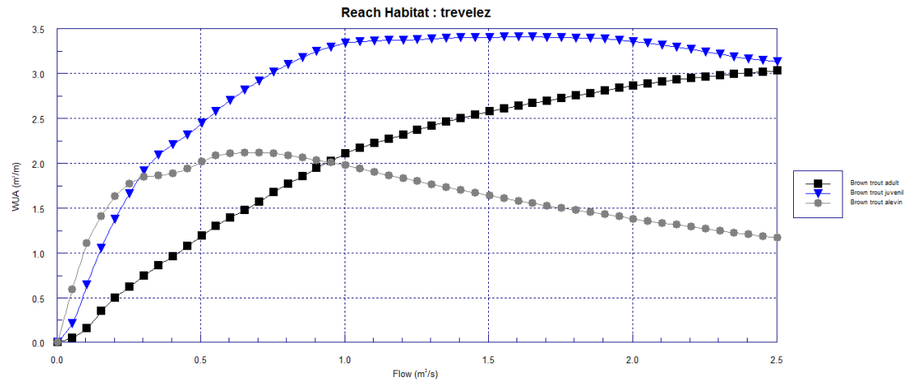
*Intervalo de caudal de estudio*

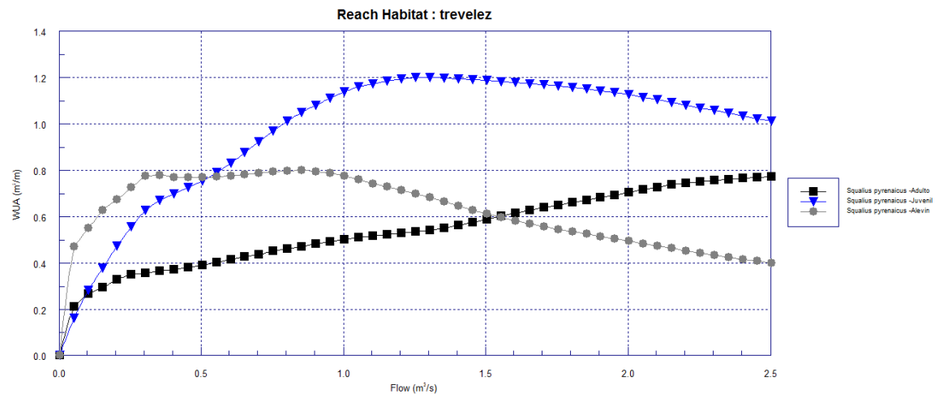


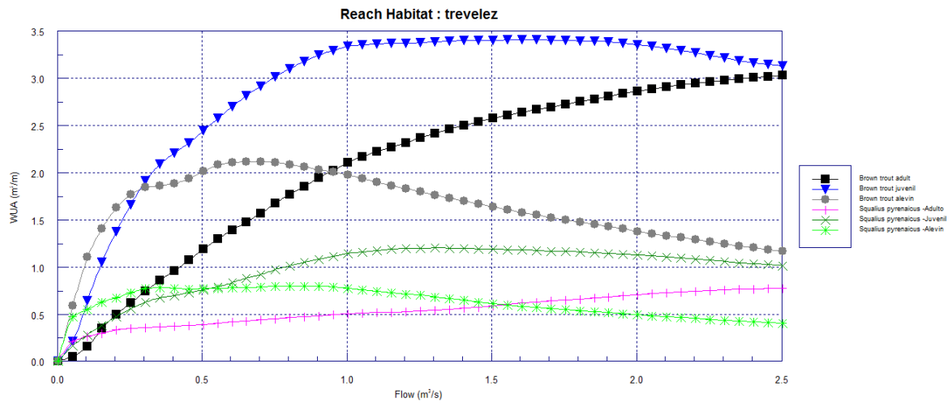




*Intervalo de caudal más amplio*

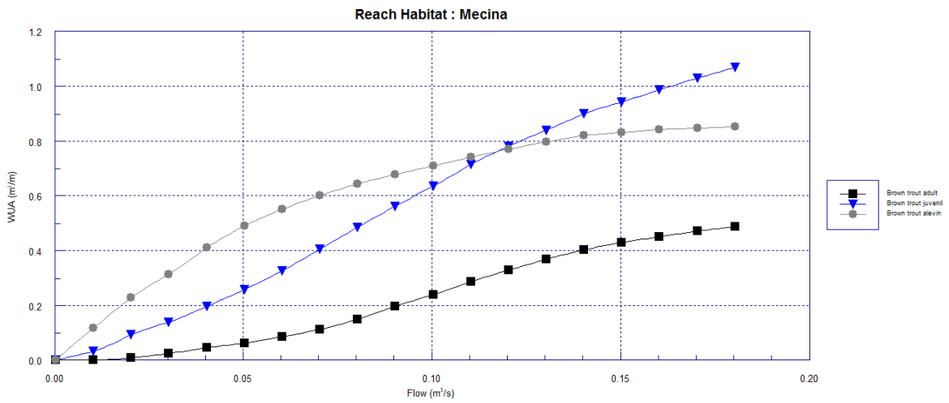


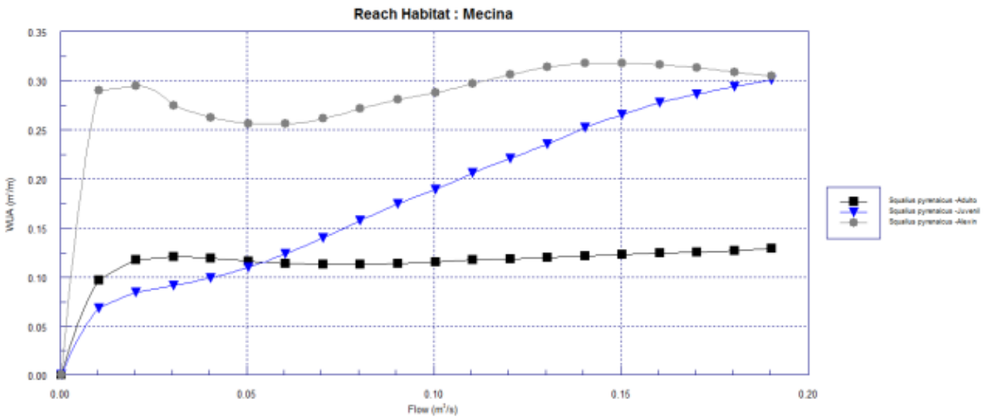



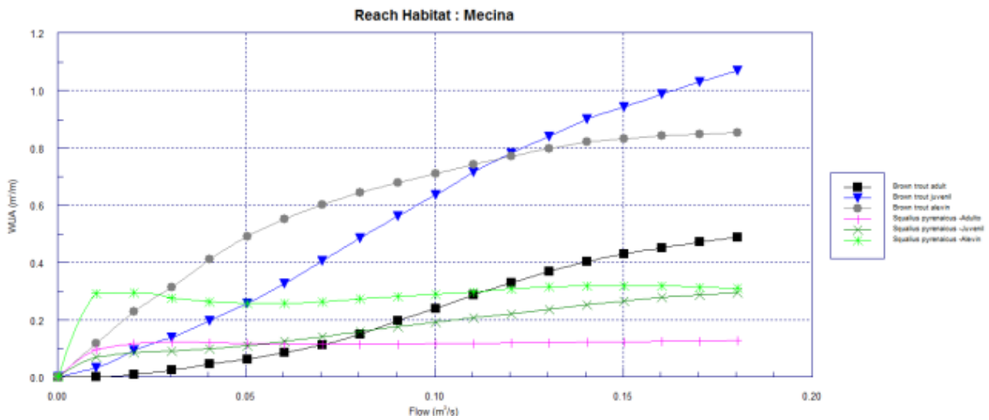



## *-Mecina*

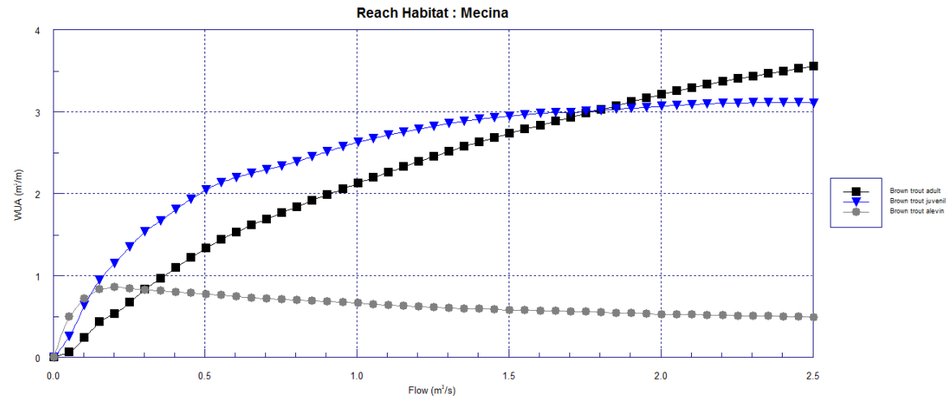
*Intervalo de caudal de estudio*

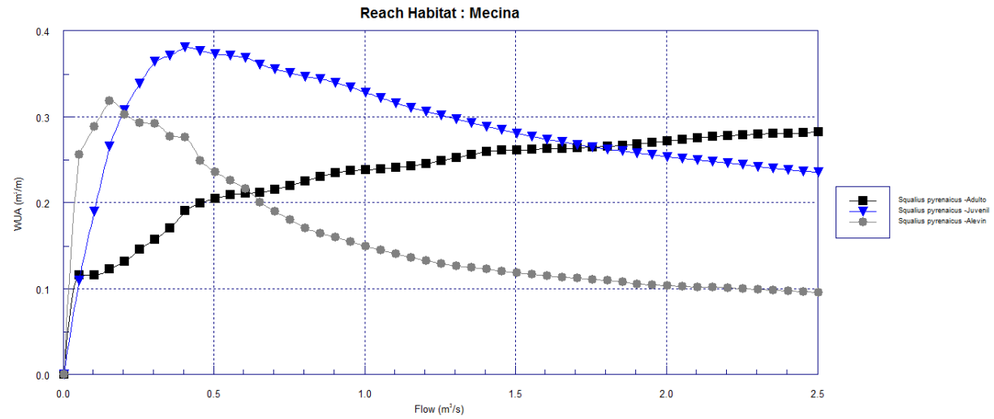


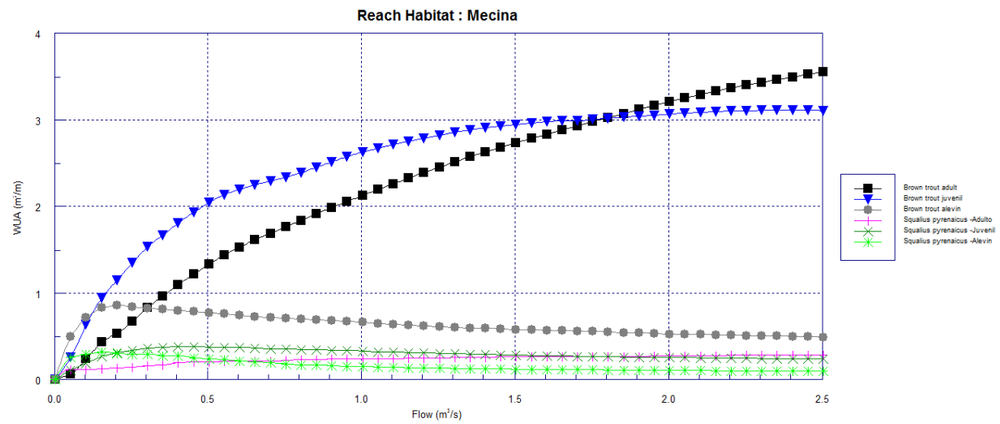




*Intervalo de caudal más amplio*

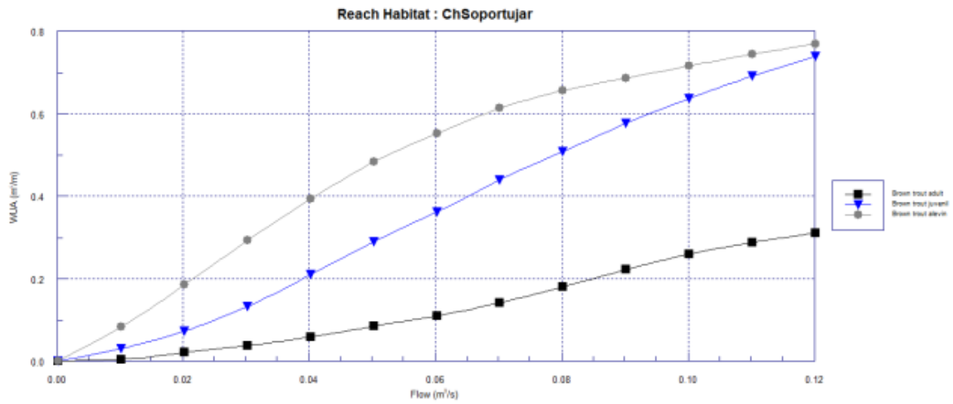


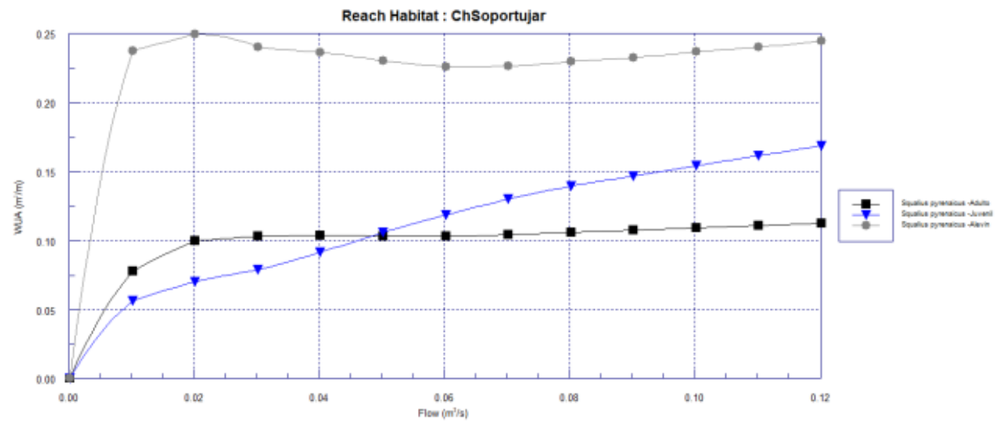



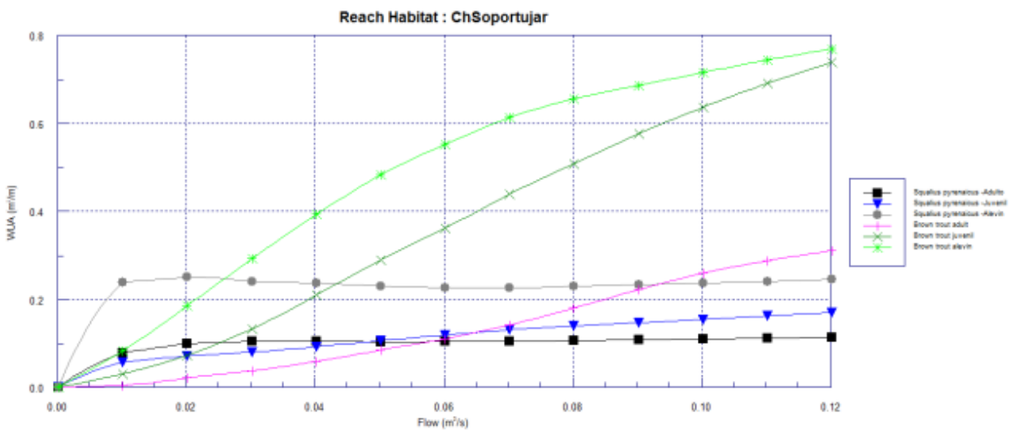



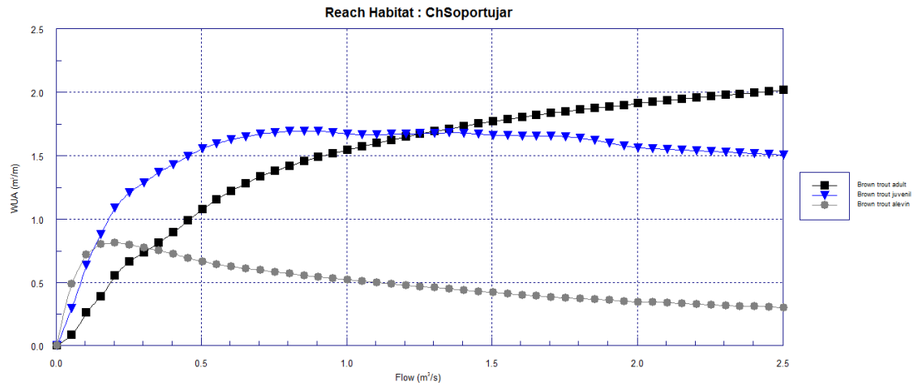
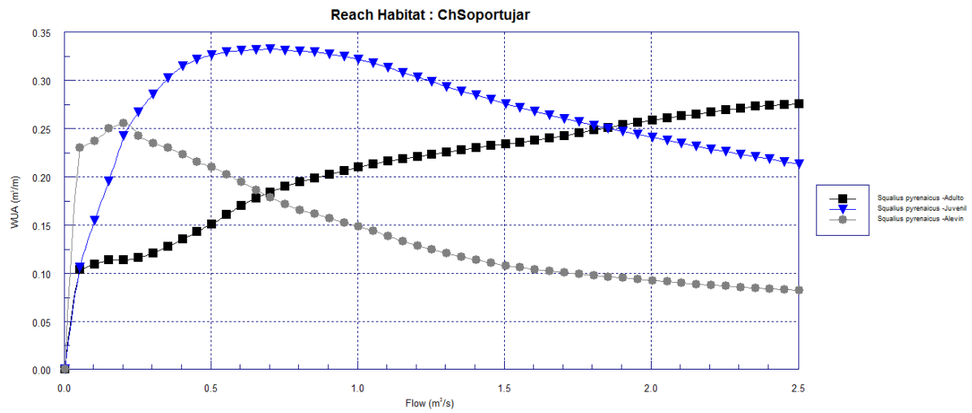
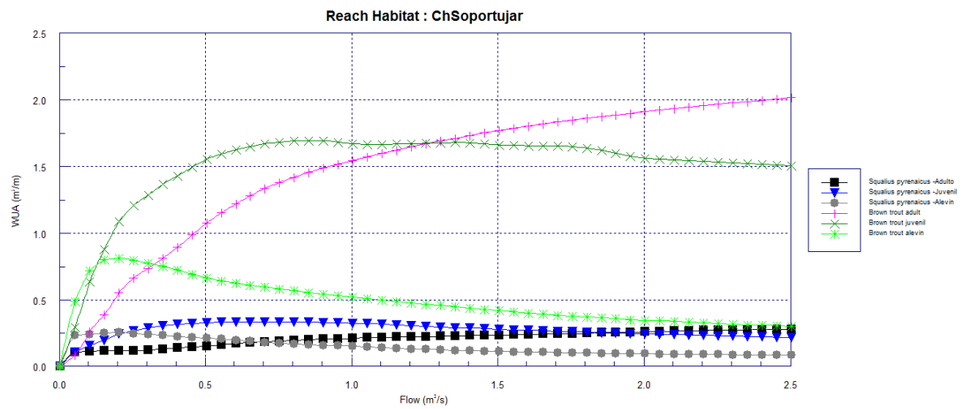
## *-Chico de Soportujar*

*Intervalo de caudal de estudio*




*Intervalo de caudal más amplio*