

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO DEL RÍO SIURANA (TARRAGONA)

JOSEP MARIA FRANQUET BERNIS

DR. INGENIERO AGRÓNOMO, EUR-ING.

DR. CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES

ACADÉMICO NUMERARIO DE LA REAL ACADEMIA EUROPEA DE DOCTORES

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
Resumen / Resum / Summary	2
I. Las previsiones del Plan Hidrológico Nacional.....	4
1. Las demandas de carácter ambiental	4
2. Los caudales ambientales.....	5
3. Programa de acción	6
4. El caudal para mínimos medioambientales	7
5. Marco normativo.....	10
II. Determinación del caudal mínimo medioambiental medio anual y del balance hídrico del embalse de Siurana	11
1. Determinaciones de otros autores.....	11
2. Ámbito geográfico y objeto del estudio.....	11
3. Nuestras propuestas	14
4. Comprobación teórica indirecta de la aportación media en régimen natural	26
5. Otros métodos de cálculo.....	27
6. Resumen de los diferentes valores obtenidos.....	28
7. Balance hídrico del embalse de Siurana	33
7.1. Las hipótesis adoptadas de cálculo.....	33
7.2. Balance hídrico a escala anual.....	34
7.3. Balance hídrico a escala mensual.....	35
8. Fuentes de datos utilizadas.....	38
9. Conclusiones.....	39
Referencias bibliográficas y fondos documentales.....	40
Relación de figuras / Relación de tablas	42

RESUMEN

La Directiva 2000/60/CE por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas entró en vigor el 22 de diciembre del 2000, representando un hito importante en la gestión de los recursos hídricos y sus ecosistemas relacionados.

La trasposición de la Directiva 2000/60/CE en España se realizó mediante la Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social que incluye, en su artículo 129, la modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por la que se incorpora al derecho español la Directiva 2000/60/CE, estableciendo un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

Surge, pues, la obligación de asignar y reservar recursos de los embalses para la recuperación o conservación del medio natural, siendo ello considerado como una demanda a satisfacer en la gestión de los embalses. Para la estimación racional del volumen a reservar en el embalse de Siurana para la consecución de dicho fin, resulta necesario conocer el caudal ecológico del río Siurana entre la salida de dicho embalse y su desembocadura en el río Ebro, lo que constituye el objeto del presente estudio.

Palabras clave: caudal, río, embalse, demanda, normativa, esorrentía, cuenca, lluvia, hidrograma, trasvase.

RESUM

La Directiva 2000/60/CE per la qual s'estableix un marc comunitari d'actuació a l'àmbit de la política d'aigües va entrar en vigor el 22 de desembre del 2000, representant una fita important en la gestió dels recursos hídrics i els seus ecosistemes relacionats.

La transposició de la Directiva 2000/60/CE a Espanya es va realitzar mitjançant la Llei 62/2003, de 30 de desembre, de mesures fiscals, administratives i de l'ordre social que inclou, al seu article 129, la modificació del text refós de la Llei d'Aigües, aprovat pel Reial Decret Legislatiu 1/2001, de 20 de juliol, per la qual s'incorpora al dret espanyol la Directiva 2000/60/CE i s'estableix un marc comunitari d'actuació a l'àmbit de la política d'aigües.

Sorgeix, doncs, l'obligació d'assignar i reservar recursos dels embassaments per a la recuperació o conservació del medi natural, i això és considerat com una demanda a satisfer en la gestió dels embassaments. Concretament, per a l'estimació racional del volum a reservar a l'embassament de Siurana per a la consecució d'aquesta finalitat, cal conèixer el cabal ecològic del riu Siurana entre la sortida d'aquest embassament i la seva desembocadura al riu Ebre, cosa que constitueix l'objecte del present estudi.

Paraules clau: cabal, riu, embassament, demanda, normativa, escorrentia, conca, pluja, hidrograma, transvasament.

SUMMARY / ABSTRACT

Directive 2000/60/EC establishing a community framework for action in the field of water policy came into force on December 22, 2000, representing a milestone in the management of water resources and their related ecosystems.

The transposition of Directive 2000/60/EC in Spain was carried out through Law 62/2003, of December 30, on fiscal, administrative and social order measures, which includes, in its article 129, the modification of the consolidated text of the Water Law, approved by Royal Legislative Decree 1/2001, of July 20, which incorporates Directive 2000/60/EC into Spanish law, establishing a community framework for action in the field of water policy.

Therefore, the obligation arises to allocate and reserve resources from the reservoirs for the recovery or conservation of the natural environment, this being considered a demand to be satisfied in the management of the reservoirs. For the rational estimation of the volume to be reserved in the Siurana reservoir to achieve this goal, it is necessary to know the ecological flow of the Siurana River between the outlet of said reservoir and its mouth into the Ebro River, which constitutes the object of this present study.

Key words: *flow, river, reservoir, demand, regulations, runoff, basin, rain, hydrograph, transfer.*

I. LAS PREVISIONES DEL PLAN HIDROLÓGICO NACIONAL

1. LAS DEMANDAS DE CARÁCTER AMBIENTAL

Un componente básico de los caudales de cualquier río son las demandas de carácter ambiental que, por motivos de protección y recuperación del dominio público hidráulico, se impongan a los caudales mínimos circulantes. Los criterios utilizados en el Plan Hidrológico Nacional¹ para su evolución las incrementan de forma continua y de manera substancial. Debe tenerse en cuenta, a este respecto, que en un país semiárido como es España en sus áreas mediterráneas, y con recursos hídricos naturales escasos en muchas regiones, es preciso utilizar soluciones autóctonas más adecuadas que la simple extrapolación de criterios empleados en los países húmedos de Europa central. No puede olvidarse que se trata de recuperar los cauces, sus márgenes y riberas, y mantener láminas de agua de la calidad adecuada para cada ecosistema, lo que seguramente se puede conseguir con caudales y volúmenes razonables.

Aunque las exigencias de calidad ambiental constituyen, básicamente, una limitación para la asignación de recursos, los caudales que se requieren con ese fin pueden considerarse prioritarios después del abastecimiento a la población. La determinación de los caudales ambientales depende de múltiples parámetros y de la calidad fijada al agua en cada tramo de río y cada acuífero, en función del uso al que se destine y del escenario ambiental previsto, por lo que, como es obvio, estos datos no deberían ser definitivos hasta que no estuvieran realizados los estudios correspondientes a cada caso. En consecuencia, en el Plan Hidrológico Nacional se ha supuesto que, a efectos de balance, la demanda ambiental que debe ser satisfecha desde los sistemas de regulación destinados a usos consuntivos -es decir, con recursos disponibles con garantía de suministro- es, como mínimo, el uno por ciento de los recursos naturales de la cuenca. Este porcentaje se ha incrementado al dos por ciento en la mayor parte de las cuencas e incluso a cifras superiores en alguna, como la del Duero, donde existen grandes tramos de ríos salmonícolas. Por otra parte, se han destinado importantes volúmenes específicos para resolver problemas actuales bien localizados: Tablas de Daimiel, Doñana, Albufera de Valencia, delta del Ebro, etc.

Dado que la demanda ambiental no es consuntiva, este caudal de recursos garantizados se añadiría, donde sea necesario y posible -por estar dominados los tramos del río en cuestión desde un sistema de explotación de recursos-, a los caudales circulantes por los cauces en régimen natural, a los retornos de

¹ El Plan Hidrológico Nacional (PHN), aprobado por la ley 10/2001, de 5 de julio, fijaba los elementos básicos de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca, la solución para las posibles alternativas que aquellos ofrezcan, la previsión y las condiciones de las transferencias de recursos hidráulicos entre ámbitos territoriales de distintos Planes Hidrológicos de cuenca (PHC) y las modificaciones que se prevean en la planificación del uso del recurso y que afecten a aprovechamientos existentes para abastecimiento de poblaciones y regadíos. Posteriormente fue modificado por el R.D. Ley 2/2004 de 18 de junio de Modificación del Plan Hidrológico Nacional y por la Ley 11/2005 de 22 de junio por la que se modifica la mencionada ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional.

otros usos -con los requisitos que se derivan de los objetivos de calidad exigidos por el Plan de cada cuenca en cada tramo de río-, y a los caudales turbinados en las centrales hidroeléctricas. Así pues y aunque, por supuesto, las cifras ahora utilizadas deberán ser revisadas a lo largo del proceso flexible, abierto y continuado de profundización en el conocimiento del ciclo hidrológico y de evolución y mejora de la propia planificación hidrológica, se puede adelantar que, desde el punto de vista global que interesaba al Plan Hidrológico Nacional, se creían suficientemente adecuadas (Franquet, 2009).

2. LOS CAUDALES AMBIENTALES

A partir de lo establecido en el artículo 40 de la Ley de Aguas, donde se indica que los Planes Hidrológicos de cuenca deben incluir... *la asignación y reserva de recursos... para la conservación o recuperación del medio natural...* se generó una expectativa sobre el caudal ecológico como una especie de caudal mínimo que debería circular por los cauces para mantener sus condiciones ambientales y ecológicas; en las pocas ocasiones en que se ha tratado de cuantificar dicho caudal, se ha acudido a la transposición de normativas extranjeras sobre pesca y protección de las aguas que deben ser adaptadas a las circunstancias climáticas del país.

A fin de organizar y coordinar los trabajos que se deben realizar a este respecto en los Planes Hidrológicos de cuenca es necesario tener en cuenta, en primer lugar, que las características ambientales de los ríos han evolucionado a lo largo del tiempo desde su estado estrictamente natural -que probablemente ni siquiera se conoce hoy en día-, hasta el que presentan actualmente que es consecuencia, en cierto modo, de los efectos positivos y negativos de las obras de regulación -presas y embalses- construidas fundamentalmente a lo largo del siglo XX, y, sobre todo, de la degradación de la calidad del agua por la contaminación orgánica e inorgánica que se ha producido en los últimos años.

Así pues, lo primero que hay que acometer es decidir, para cada tramo de río, cual es el necesario objetivo que se quiere obtener. En realidad, lo único que se añade a las tareas de planificación es un uso adicional a los convencionales; en consecuencia, sus características, como ocurre con las de aquellos, deberán definirse *a priori*. Es bien cierto que, en este caso, la determinación de las características necesarias de calidad y cantidad -normalmente no consuntivas-, será mucho más complicada porque involucra el conocimiento de aspectos tales como las especies bióticas que existen, o que se quieren introducir, la estructura del cauce, lecho y márgenes e incluso a sus parámetros hidráulicos: calado, pendiente, velocidad, radio hidráulico de la sección transversal, etc.

Se destaca, sin embargo, que, aunque su investigación es ciertamente más complicada, se trata de unas necesidades muy variables, que tienen unos condicionantes respecto a la calidad y cantidad del agua que se necesitan para satisfacerlas, y que, por supuesto, también debe tener definido legalmente el orden de preferencia de uso que ocupa respecto al resto de demandas del recurso.

Puesto que, así definida, esta demanda es semejante a las demás, se comprende lo absurdo que resultaría fijar un caudal mínimo, con carácter general

en todos los ríos, con el objetivo de satisfacerla. Lo lógico es analizar cada sistema de explotación -mediante los obligados modelos matemáticos de simulación-, y comprobar si con los recursos disponibles y la calidad que tendrán se puede satisfacer la demanda en cuestión que, por supuesto, puede ser muy diferente, incluso en cada tramo del mismo río, en función, entre muchos factores, de la tipología de la flora y de la fauna (especialmente piscícola) que se pretende conservar e introducir. Si los recursos previstos no son suficientes, en cantidad y/o calidad, deberán, como en cualquier otro caso, complementarse y mejorarse.

Puede muy bien ocurrir, por ejemplo, que los caudales regulados con fines hidroeléctricos proporcionen un caudal más que suficiente para conseguir los objetivos ambientales; es posible también que la explotación hidroeléctrica produzca unas variaciones bruscas en el caudal y/o la temperatura del agua que resulten incompatibles con la satisfacción de esta demanda, por lo que deberá estudiarse y proponerse la solución más adecuada. En cualquier caso, es evidente que la solución en este caso -relativamente frecuente en muchas regiones de la España húmeda-, no sería nunca la adición de un caudal mínimo regulado con este fin.

También es necesario dilucidar la calidad que deben tener las aguas para satisfacer la demanda correspondiente a cada escenario elegido. Es posible que, en algunos casos, la que se consigue para otras demandas sea suficiente, pero también puede ocurrir, en ocasiones, que haya que forzar el tratamiento de los vertidos para conseguir que determinado parámetro tenga los valores límites necesarios. Es previsible incluso que se llegue a la conclusión que las pretensiones iniciales para el tramo en cuestión eran demasiado exigentes para las condiciones que se pueden lograr, con inversiones razonables, y sea más aconsejable modificar las características de la demanda (Franquet, 2009).

3. PROGRAMA DE ACCIÓN

Con el fin de conseguir que todos los Planes Hidrológicos de cuenca utilicen procedimientos similares, de manera que sean coordinables posteriormente, en el Plan Hidrológico Nacional se indica la metodología general que se deberá utilizar al respecto. Debe tenerse en cuenta que las diferencias que se pueden producir si se emplean procedimientos esencialmente distintos, tanto en los resultados finales como en condicionantes sobre los recursos hidráulicos y económicos necesarios, son de tal naturaleza que su coordinación es completamente obligada. Resulta, en definitiva, que los Planes Hidrológicos de cuenca deberán analizar los siguientes aspectos:

- a) Delimitación de los diferentes tramos de los cauces de los ríos donde los escenarios medio-ambientales deseados sean distintos entre sí.
- b) Determinación de los objetivos pretendidos en cada tramo y definición de los condicionantes de cantidad y calidad de agua que se precisa para satisfacer esta demanda.
- c) Definición de las actividades complementarias necesarias -a partir de la situación actual-, ya sean de incorporación infraestructural o de medias de gestión.

- d) Estudio, mediante la simulación del comportamiento de cada sistema hidráulico, de las necesidades adicionales respecto a cantidad y calidad que precisará el sistema para satisfacer esta demanda, conjuntamente con las restantes identificadas para este tramo.
- e) Valoración económica de las actividades adicionales citadas.

A partir de este punto se puede entrar en un ciclo, que comienza de nuevo en el punto b), si de los resultados se deduce que los escenarios preseleccionados son demasiado onerosos o bien afectan de manera notable a la satisfacción de otras demandas. En cualquier caso, después de los ciclos necesarios se elegirá una solución que implicará conocer no sólo los condicionantes de cantidad y calidad que debe tener el agua en el tramo en estudio, sino también las eventuales labores de corrección que es preciso realizar en los cauces, márgenes, vegetación de ribera, etc.

Se destaca el hecho de que, en muchos casos, será suficiente con disponer de una lámina de agua estable, con variaciones acotadas del calado, que precise de un caudal de reposición mínimo. Existen soluciones estructurales adecuadas que pueden conseguir este objetivo cuando los calados son relativamente pequeños, como es habitual en el tramo inferior del río Siurana que nos ocupa, y que, además, son susceptibles de ser manejadas adecuadamente en el caso de avenidas o incrementos bruscos del caudal aguas arriba del tramo considerado a través de la regulación que proporciona el embalse del mismo nombre.

4. EL CAUDAL PARA MÍNIMOS MEDIOAMBIENTALES

En relación a los caudales mínimos medioambientales, el PHN se atiene siempre a los criterios establecidos en el actual Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro, en que dicho concepto subsumía el denominado "caudal de compensación" (que atiende solamente a la preservación de los ecosistemas fluviales), además del "hidrológico" (régimen de aportaciones naturales del tramo en cuestión), "sanitario" (en concordancia con los objetivos de calidad), "paisajístico" y otros.

No parecen aceptables, a este respecto y en pleno siglo XXI, las propuestas iniciales en el sentido que, en tanto no estén fijados dichos caudales mínimos, se tendrá en cuenta, con carácter general, un caudal mínimo injustificado o aleatorio del 10% de la aportación media interanual.

Más correcto nos parecería el actuar contra la contaminación mediante un aumento de los caudales disponibles para dilución, merced a la aportación artificial de un cierto caudal adicional de una cuantía tal que el caudal global resultante ("caudal de compensación") permitiese el grado de dilución suficiente como para obtener, con suficiente garantía, el objetivo de calidad predeterminado (C2).

Por la misma definición de caudal adicional, su magnitud en cada subtramo del río debería ser función de cuatro factores básicos, a saber (Franquet, 2009):

- El estado actual de la calidad de las aguas del río.

-Los objetivos de calidad que se pretende alcanzar, definidos en dos fases de mejora progresiva asociadas a los usos actuales y futuros que las aguas del río deben satisfacer.

-Las nuevas obras de depuración que se consideren en funcionamiento.

-La garantía que se exige al objetivo de calidad, es decir, la garantía que se considere para los caudales propios del río que van a ser incrementados mediante la aportación adicional.

En relación con este último punto, es evidente que cuanto mayor sea la garantía que se exija al objetivo de calidad, más disminuirá el caudal diluyente propio del río, y por tanto, el caudal adicional aportado deberá ser mayor. Esta "garantía de calidad" resulta de difícil definición, ya que el grado de exigencia puede variar según el uso que el agua deba satisfacer, tanto a nivel de calidad general como en relación con los diversos parámetros que la definen.

En efecto, la garantía de calidad con que debe obtenerse un agua destinada al riego puede ser inferior a la exigida para el abastecimiento público. Asimismo, la garantía con que la concentración de un elemento tóxico (por ejemplo, un metal pesado) debe mantenerse por debajo del máximo tolerado debe ser superior que si se trata de una sustancia con menor incidencia sanitaria, como por ejemplo el anión cloruro Cl^- (aunque sí, en este caso, de mayor incidencia agronómica).

Ahora bien, para transformar el caudal de compensación en una demanda anual (expresada en $\text{hm}^3/\text{año}$) es necesario tener en cuenta el régimen hidrológico de cada río. Es decir, a medida que aumenta el caudal propio del río con un 95% de garantía (en períodos húmedos), el aporte adicional necesario es menor y llega a anularse cuando el flujo circulante es suficiente, por sí solo, para diluir la contaminación vertida hasta los niveles que marca el objetivo de calidad.

Por tanto, la ley de caudales adicionales a lo largo del año, de cuya integración resulta la demanda ecológica, depende directamente de la curva anual de caudales propios del río, que se obtiene en nuestro estudio, con una garantía del 95%. Esta curva varía con las características hidrológicas de cada río; a su vez es variable en un mismo río según la selección que se considere y depende, además, de la pluviometría anual y de su reparto espacial y temporal. De ahí también la conveniencia de considerar años húmedos, medios o bien secos, tal como propugna el IRTA (2007) en el estudio referente a las dotaciones medioambientales precisas para el tramo inferior del Ebro, río del cual es afluente el Siurana por su margen izquierdo.

Sin embargo, esta complicación intrínseca al cálculo de la demanda ecológica anual puede obviarse con la suficiente exactitud si se tiene en cuenta que los principales problemas de calidad se producen en aquellas corrientes de agua con una hidrología marcadamente torrencial, o bien en las cuencas bajas de ríos más regulares, en zonas de pendiente suave y baja o media pluviometría, como es precisamente el caso del tramo inferior del río Siurana.

Concretamente, el artículo 103.4 de la ley de Aguas de 1985 establece que "...los Organismos de cuenca y la Administración medioambiental competente coordinarán sus actuaciones para una protección eficaz de las zonas húmedas de interés natural o paisajístico". Así mismo, el artículo 279.4 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico reza que "la Administración controlará particularmente los vertidos y el peligro de disminución de aportación de agua en la zona. En ambos casos se adoptarán las medidas necesarias en orden a preservar la cantidad y calidad de las aguas que afluyen a la zona, todo ello sin perjuicio de las prohibiciones y medidas generales establecidas en la Ley de Aguas", mientras que el artículo 280.1 insiste en los mismos términos del ya mencionado art. 103.4 de la Ley. En este sentido, veamos que dicho artículo dice que "los organismos de cuenca y la Administración medioambiental competente coordinarán sus actuaciones para una protección eficaz de las zonas húmedas de interés natural o paisajístico" (Artículo 111.4 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, publicado en el BOE nº: 176 de 24/07/2001).

Veamos, en fin, que el artículo 280.2 del expresado Reglamento (**Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas**) advierte expresamente que "los organismos de cuenca podrán promover la declaración de determinadas zonas húmedas como de especial interés para su conservación y protección, de acuerdo con la legislación medioambiental" (Artículo 111.5 del mencionado Texto Refundido de la Ley de Aguas).

No es correcto hablar sobre promedios de caudales y volúmenes pues obviamos importantes características de un régimen hidrológico, como momento y variabilidad, o sea, **irregularidad intra e interanual**. Los caudales fluctúan mediante una distribución con probabilidad estadística. El régimen hidrológico de un río como el Siurana tiene periodos de **flujo base** que son los mínimos y temporadas de **riadas** en las cuales el curso del río ocupa un lecho más ancho. Los caudales máximos o extremos de aguas altas pueden inundar algunas áreas en las planicies de las riberas del río.

A efectos orientativos, veamos que el borrador de la "Documentación previa para el análisis del Plan hidrológico del eje del río Ebro desde el río Martín hasta su desembocadura" (noviembre de 2008) incluye en su tramo final (que nosotros entendemos como tal el comprendido entre la presa de Flix y la desembocadura en el mar Mediterráneo (véase posterior Artículo 12), diversas masas de agua, a saber:

- Masa nº: 459 Presa de Flix – río Cana
- Masa nº: 460 Río Cana – **río Siurana**
- Masa nº: 461 **Río Siurana** – río Sec
- Masa nº: 462 Río Sec – río Canaleta
- Masa nº: 463 Río Canaleta – E. A. 027 (Tortosa)
- Masa nº: 891 E. A. 027 (Tortosa) - Desembocadura

Por otra parte, en dicho tramo final del río Ebro desembocan, por su margen izquierda, el río Cana (21 km de recorrido), el río Siurana (51 km de recorrido del río principal) y el barranco de Riera Comte (14 km) y por la derecha los ríos Sec (32 km) y Canaleta (37 km).

5. MARCO NORMATIVO

El marco normativo existente en el ordenamiento jurídico europeo y español para la determinación de los regímenes de los caudales ecológicos de los ríos viene establecido por las siguientes disposiciones:

- Directiva Hábitat (92/43/CEE) del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (DMA).
- Texto Refundido de la Ley de Aguas, Real Decreto 1/2001.
- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (PHN).
- Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, del PHN.
- Directiva sobre Aguas Subterráneas (2006/118/CE) del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12/12/2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.
- Directiva sobre Inundaciones (2007/60/CE).
- Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Planificación Hidrológica (RPH).
- Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, que desarrolla la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH).
- Directiva - Normas de Calidad Ambiental (2008/105/CE).
- Reglamento del Dominio Público Hidráulico (R.D. 9/2008)
- Directiva Aves (2009/147/CE).
- Requerimientos de la Comisión Europea al España para que incluya un régimen de caudales ecológicos a todas las masas de agua a través de los respectivos Planes de cuenca (PILOT/7835/2015/ENVI).
- Sentencia del Tribunal Supremo nº: 856, de 11/03/2019, estableciendo que todas las masas de agua superficiales fluviales deben contar con un régimen establecido de caudales ecológicos para alcanzar los objetivos de la DMA.
- Transposición de las Directivas europeas.
- Restantes disposiciones concordantes y/o complementarias.

II. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÍNIMO MEDIOAMBIENTAL MEDIO ANUAL Y DEL BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE DE SIURANA

1. DETERMINACIONES DE OTROS AUTORES

Para la realización del presente trabajo, se ha efectuado previamente la recopilación de algunos estudios e informes técnicos que pudieran aportar información útil acerca de la determinación del caudal ecológico/medioambiental del río Siurana aguas abajo del embalse del mismo nombre. Han sido los siguientes:

- Propuesta de caudales ecológicos CHE (Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro, PHE, 2021-27).

- “Aspectes ambientals i cabals de manteniment”. Taula del Siurana. Antoni Munné (ACA). Diciembre, 2019.

- “Estudio de caudales ecológicos en el río Ciurana en el término municipal de Cornudella de Montsant (Tarragona)”. CIMERA, Febrero, 2019.

- “El esquema provisional de Temas Importantes en la demarcación hidrográfica del Ebro y el caudal ecológico en el río Ciurana”. M. A. García Vera. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. Marzo, 2020.

- “Estudi d’actualització de l’avaluació de recursos hídrics de les conques internes de Catalunya”. Document de síntesi. ACA. Maig, 2002.

- “Propuesta de proyecto de Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro”. Documento resumen. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. Junio, 2011.

- *El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro*. J. M. Franquet Bernis. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Centro Asociado de Tortosa. Campus del Nordeste. Colección Cadup-Estudios. Tortosa, mayo de 2009.

- Informaciones varias.

2. ÁMBITO GEOGRÁFICO Y OBJETO DEL ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en el río Siurana a su paso por el término municipal de Cornudella de Montsant en la provincia de Tarragona, afectando a las comarcas catalanas del Priorat y el Baix Camp, aguas abajo del pantano de Siurana y, más concretamente, aguas abajo del azud de derivación del trasvase de aguas al pantano de Riudecanyes (ETRS89 41° 14' 2.09" N; 0°53' 17,52" W), propiedad de la Comunidad de Regantes del mismo Pantano, según la correspondiente concesión administrativa.

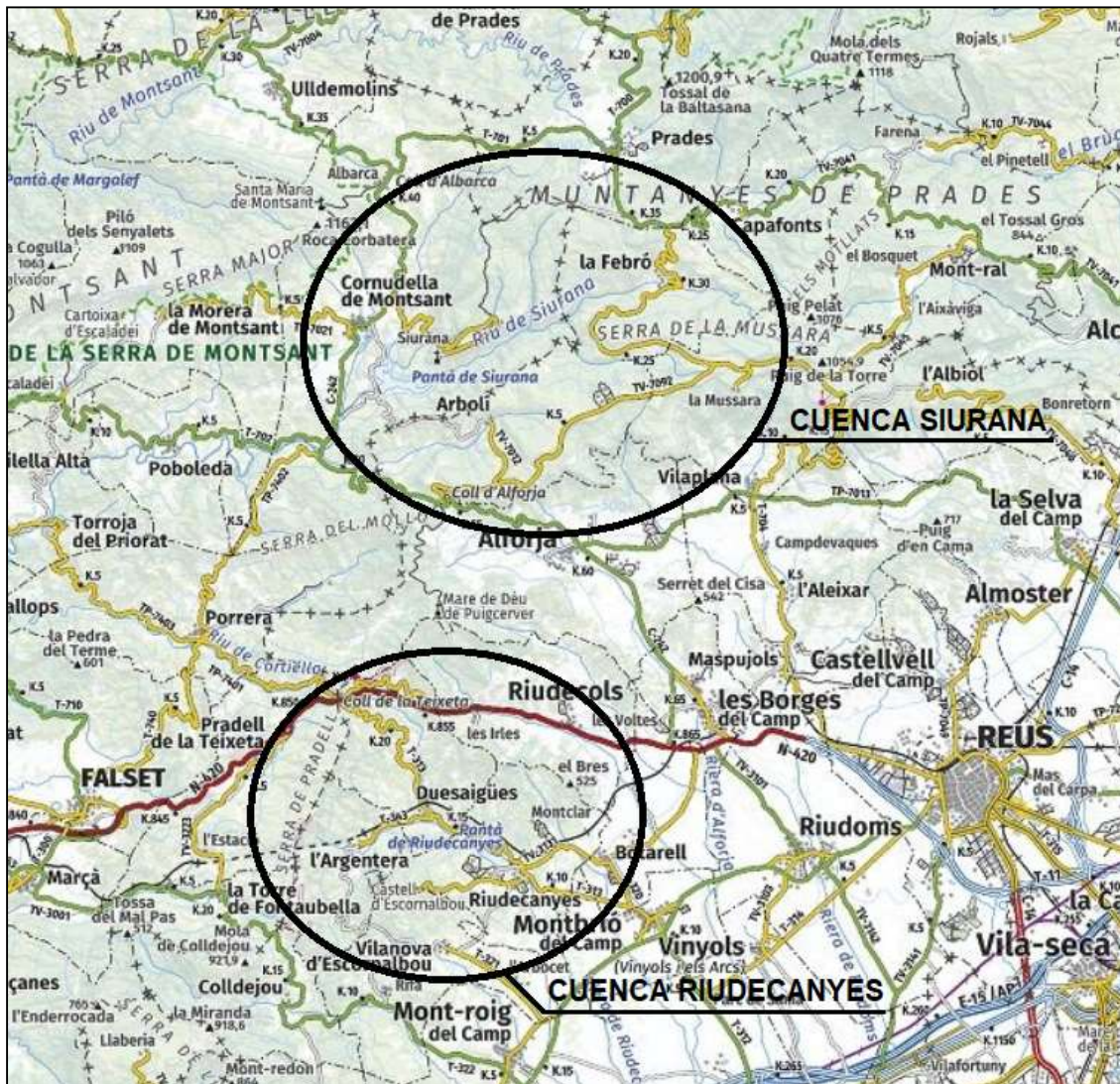


Fig. 1. Localización general de la zona de estudio.

Por otra parte, los objetivos del presente estudio son los siguientes:

- 1) Determinar el caudal ecológico del río Siurana aguas abajo de la presa de Siurana y, particularmente, aguas abajo del azud de derivación al túnel del trasvase hasta el embalse de Riudecanyes.
- 2) Realizar el balance hídrico del embalse de Siurana en diferentes hipótesis de estudio, incorporando el caudal ecológico como una nueva demanda a satisfacer, así como las demandas/concesiones de la propia cuenca del río Siurana.
- 3) Analizar las implicaciones que supone la introducción de la demanda del caudal ecológico del río Siurana sobre la concesión administrativa de la “Comunitat de Regants del Pantà de Riudecanyes”.

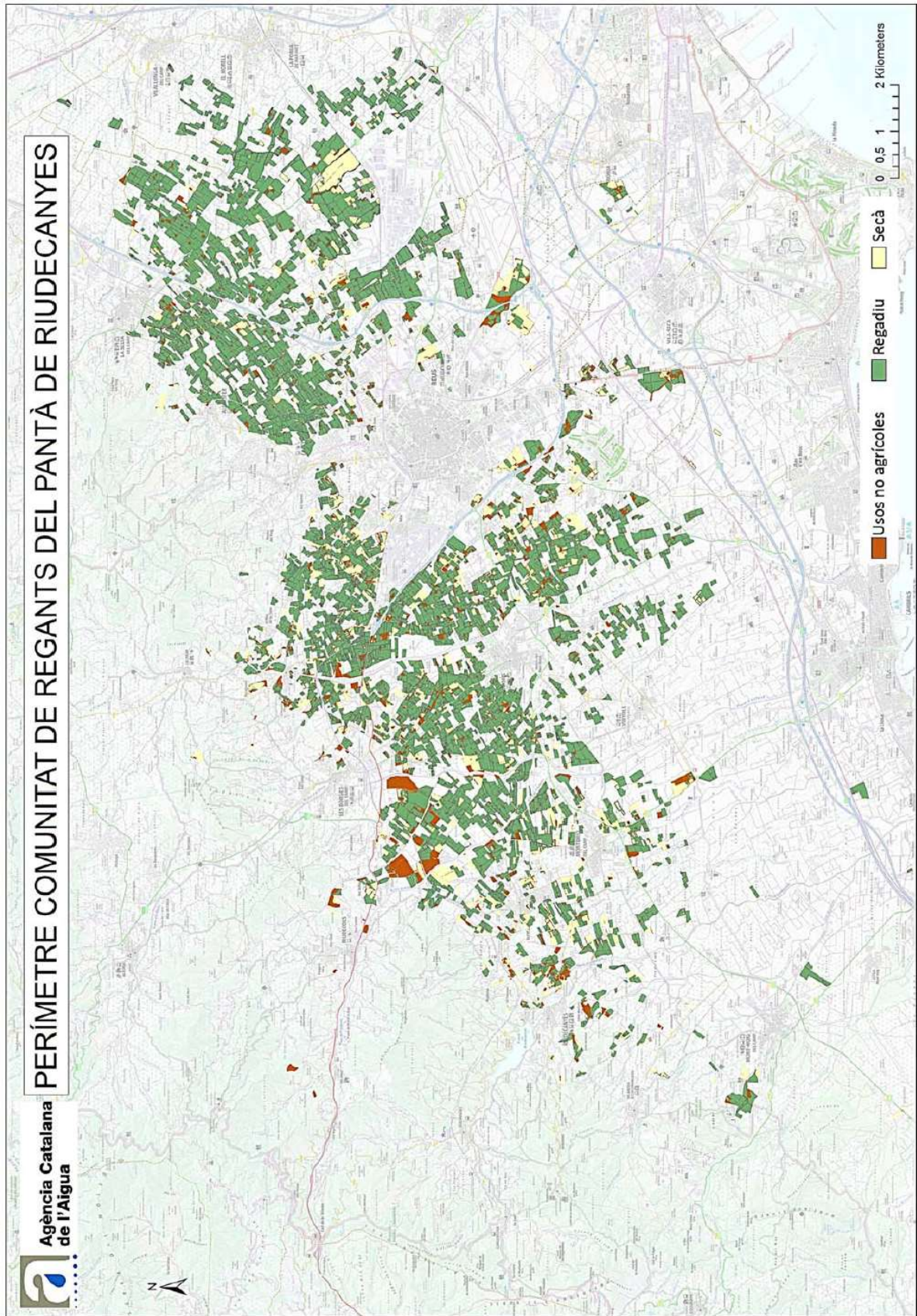


Fig. 2. Localización de los usos agrícolas y urbanos del agua procedente del pantano de Riudecanyes.

3. NUESTRAS PROPUESTAS

Una vez expuestos estos conceptos fundamentales e introductorios, vamos a pasar a realizar una descripción más exhaustiva del método que aquí se ha seguido para evaluar el caudal mínimo medioambiental necesario para el tramo inferior del río Siurana, considerando como tal el comprendido entre la presa del mismo nombre y su desembocadura en el río Ebro. Este caudal es el que debería circular, según las diferentes épocas del año, aguas abajo de la presa de Siurana (cuenca del Ebro) y aproximadamente junto al punto de toma del trasvase de agua al pantano de Riudecanyes (cuenca interna de Cataluña), situado a unos 3,12 km aguas abajo del primer embalse relacionado.

En anteriores estudios ya se ha ido apuntando la diversidad de metodologías existentes para la estimación de los caudales ecológicos mínimos de los cauces naturales. La metodología que aquí se desarrolla no pretende, ni mucho menos, ni ser la única o exclusiva ni la mejor de todas ellas: constituye sólo una propuesta más que creemos digna de ser comparada con las otras y posteriormente, del conjunto de ellas -cuantas más mejor- poder extraer unas conclusiones suficientemente válidas y aceptables, que deberán pasar también por el complicado tamiz del consenso social y político de los territorios afectados (fundamentalmente, la propia subcuenca hidrográfica del Siurana). Y ello es así porque, con frecuencia, la simple cuantificación o variabilidad de los coeficientes empleados en las diversas formulaciones o modelos nos pueden alterar substancialmente los resultados a obtener, razón por la cual se expondrán, alternativamente, los resultados según se deduzcan de las diferentes variables empleadas en otros estudios que ya se han relacionado en el primer apartado del presente Artículo.

Establecidos ya en los epígrafes anteriores los principios o definiciones previas referentes al caudal mínimo medioambiental, conviene fijar su cuantía media anual y distribuirla posteriormente según el hidrograma del año hidráulico que viene observándose, a lo largo de una suficientemente extensa serie histórica o cronológica, en el río Siurana.

La escorrentía es un proceso físico consistente en el escurrimiento del agua de lluvia por la red de drenaje hasta alcanzar la red fluvial. La escorrentía es uno de los procesos básicos que se incluye en el ciclo del agua.

Se pueden distinguir varios tipos de escorrentía:

- Superficial o directa: es la precipitación que sobre la superficie del terreno discurre por la acción de la gravedad sin infiltrarse en el suelo.
- Hipodérmica: es el agua de precipitación infiltrada en el suelo, que se mueve sobre los horizontes superiores del mismo y reaparece almacenada como manantial o bien se incorpora a la red de drenaje superficial.
- Subterránea: es la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático circulando hasta alcanzar la red de drenaje.

Cuando se verifica una precipitación, al aproximarse el agua al suelo, una parte de ella se evapora; del resto, una fracción se infiltra y percola en el terreno y otra discurre por la superficie del mismo. La parte que se infiltra alimenta los acuíferos y mantiene los niveles piezométricos, con lo que, bajo nuestro punto de vista, sólo tiene interés en lo que afecta a la regulación de las aguas subterráneas cuando se trata de aplicar el sistema de infiltración-percolación. La fracción que discurre por la superficie del suelo está ligada a la escorrentía, definiendo GARCÍA NÁJERA el coeficiente de escorrentía ϵ para una cuenca a intervalo determinado, como la relación existente entre el caudal total desaguado en aquel intervalo y el volumen de precipitaciones caídas en la cuenca durante el mismo.

Si el coeficiente ϵ se toma en valores anuales, KÉLLER indica la fórmula:

$$\epsilon = \frac{1'000}{0'942 - \frac{0'884}{N}} - \frac{350}{405 - \frac{400}{N}}, \text{ donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon = \text{Coeficiente de escorrentía.} \\ N = \text{Altura anual de lluvia (en mm).} \end{array} \right.$$

Las cifras indicadas son los valores medios y extremos entre los que pueden variar los coeficientes expresados. Cuando se trata de aguaceros, varía mucho según sea el suelo que los recibe. Si se trata de suelos secos, habrá una gran diferencia con los suelos saturados o en su capacidad de campo² (por vertidos o precipitaciones anteriores), dependiendo todo ello de la capacidad de infiltración del momento.

Es muy interesante observar los valores de un coeficiente relacionado con los **caudales mínimos de las cuencas** y con sus regímenes de lluvias. Nos referimos al coeficiente λ en la fórmula de ISZKOWSKI:

$$Q_{\min} = 6,3 \cdot \lambda \cdot \epsilon \cdot N \cdot F \text{ (asimilable al caudal ecológico), donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon = \text{Coeficiente de escorrentía anual.} \\ N = \text{Precipitación media de la cuenca tributaria (en m)} \\ F = \text{Superficie de la cuenca (en km}^2\text{)} \\ Q_{\min} = \text{Gasto mínimo de estiaje (en l/s)} \\ \lambda = \text{Coeficiente que depende de la naturaleza de la cuenca aportadora.} \end{array} \right.$$

² La **Capacidad de Campo (CC)** es el contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo luego de saturación o de haber sido mojado abundantemente y después dejado drenar libremente, evitando pérdida por evapotranspiración hasta que el Potencial hídrico del suelo se estabilice (alrededor de 24 a 48 horas después de la lluvia o riego). El término se introdujo en 1922 por los autores Israelson y West. Corresponde aproximadamente al contenido de agua que retiene una muestra de suelo saturada y luego sometida a una tensión de -0,33 bares (Richards y Weaver, 1944). Aunque es dependiente del tipo de suelo que tan representativo de la realidad sea este método de laboratorio, por lo que otros autores han propuesto diferentes tensiones para diferentes suelos.

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía se divide el caudal real por el caudal teórico, y el valor resultante sería una magnitud adimensional, comprendiendo el resultado entre 0 y 1.

El último coeficiente λ , como decimos, varía con la naturaleza de la superficie de la cuenca (es decir, del suelo receptor de la precipitación estudiada), como se observa en el cuadro adjunto (Franquet, 2009).

Tabla 1. Valores del coeficiente λ para diferentes tipos de suelo.

TIPO DE SUELO	Valores de λ
Terreno normal por su naturaleza y vegetación	1,0
Ríos regulados por lagos naturales o embalses	1,5
Terreno permeable con poca vegetación	0,4
Terreno poco permeable con vegetación	0,8
Terreno impermeable en las partes llanas	entre 1,0 y 1,5
Terreno impermeable en cerros	entre 0,8 y 0,5
Terreno impermeable en las montañas, decreciendo con la vegetación	entre 0,6 y 0,3
Arroyos y barrancos	entre 0,3 y 0

En nuestro caso, debe tenerse en cuenta que la precipitación media de la cuenca del Siurana (de la mayor serie histórica de datos que se dispone) es de 547 mm anuales, según el *Servei Meteorològic de Catalunya*, con lo que, siempre por el lado de la prudencia, el coeficiente de escorrentía medio de la cuenca alcanzaría un valor de:

$$C = 0'942 - 405/547 = 0'202 \approx 0'20,$$

o bien considerando una precipitación media alternativa de 499 mm anuales:

$$C = 0'884 - 350/499 = 0'183 \approx 0'18,$$

que podría modificarse a falta de otras estimaciones más precisas y particularizadas, teniendo en cuenta las determinaciones de la vigente Instrucción de Carreteras y otras reglamentaciones técnicas que resulten de aplicación al caso.

Teniendo en cuenta, además, que la cuenca del río Siurana está regulada aguas abajo del embalse del mismo nombre, adoptaremos un valor $\lambda = 1,50$ en base a la tabla anterior, con lo que se tendría un caudal mínimo de (en base al primer coeficiente de escorrentía estimado) y considerando las afecciones dimanantes por el cambio climático siguiendo la Instrucción de Planificación (con carácter provisional se evalúan en una cuantía de reducción global de las aportaciones naturales del 5%):

$$Q_{\min} = 6,3 \times 1,50 \times 0,202 \times 0,547 \times 87,419 = 91,3 \text{ l/s},$$

$$91,3 \times 0'95 = 86'74 \text{ l/s}, \text{ o sea: } 0'08674 \times 31'536 = 2'74 \text{ hm}^3/\text{año}.$$

Tabla 2. Valores de precipitación bruta, escorrentía total, coeficiente de escorrentía de la cuenca del Siurana (captación Riudecanyes).

Superficie de la cuenca del río Siurana (m ²) = 87.419.833					
MES	PRECIPITACIÓN BRUTA MEDIA MENSUAL (mm)	VOLUMEN MENSUAL PRECIPITACIÓN BRUTA (m ³)	ESCORRENTÍA TOTAL MEDIA (mm)	VOLUMEN ESCORRENTÍA TOTAL MENSUAL (m ³)	COEFICIENTE ESCORRENTÍA MEDIO (€)
1. Enero	31,53	2.756.347	10,56	923.153	0,335
2. Febrero	25,86	2.260.677	6,18	540.255	0,239
3. Marzo	42,69	3.731.953	10,43	911.789	0,244
4. Abril	42,54	3.718.840	13,87	1.212.513	0,326
5. Mayo	56,02	4.897.259	11,07	967.738	0,198
6. Junio	38,62	3.376.154	5,95	520.148	0,154
7. Julio	13,33	1.165.306	3,66	319.957	0,275
8. Agosto	26,59	2.324.493	2,81	245.650	0,106
9. Septiembre	62,52	5.465.488	4,69	409.999	0,075
10. Octubre	67,12	5.867.619	10,28	898.676	0,153
11. Noviembre	51,44	4.496.876	8,58	750.062	0,167
12. Diciembre	40,69	3.557.113	10,45	913.537	0,257
MEDIA ANUAL	41,58	3.634.844	8,21	717.790	0,197
TOTAL ANUAL	499	43.618.126	--	8.613.476	--

que también se expresa en el siguiente diagrama de barras:

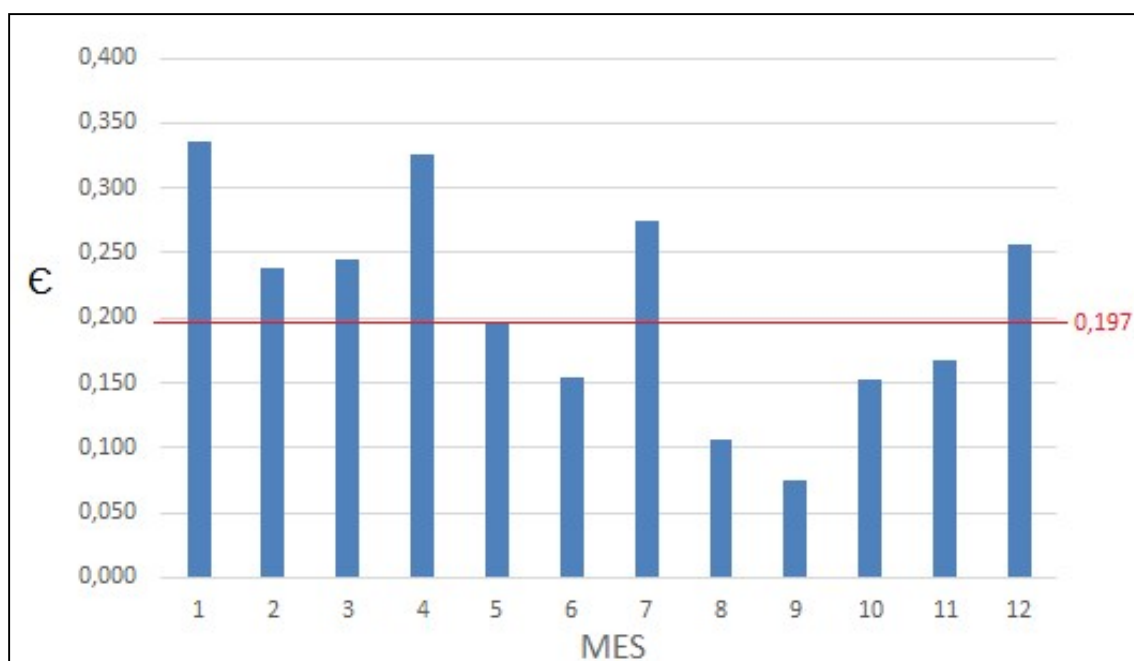


Fig. 3. Evolución anual del coeficiente de escorrentía (cuenca del Siurana).

Alternativamente, teniendo en cuenta los datos de escorrentía y precipitación procedentes de la tabla y gráfico anteriores, dicho caudal sería:

$$Q_{\min} = 6,3 \times 1,50 \times 0,197 \times 0,499 \times 87,419 = 81,2 \text{ l/s,}$$

$$81'2 \times 0'95 = 77'14 \text{ l/s, o sea: } 0'07714 \times 31'536 = 2'43 \text{ hm}^3/\text{año.}$$

En otro orden de ideas, veamos que según los datos procedentes del estudio relacionado llevado a cabo por la Agencia Catalana del Agua (ACA, 2019), se tiene que la precipitación media anual sobre la cuenca del Siurana en el período analizado de 61 años, comprendido entre 1940-1941 y 1999-2000, fue de $P_n = 57 \text{ hm}^3$ (ver tabla 2 del Documento de síntesis del denominado *Estudi d'actualització de l'avaluació de recursos hídrics de les conques internes de Catalunya i conques catalanes de l'Ebre*)³, lo que supone una altura anual media de lluvia de:

$$N = \frac{P_n}{F} = \frac{57}{87'419} = 0'652 \text{ m} = 652 \text{ mm,}$$

(en este estudio queda establecida en 650 mm) cantidad ésta sensiblemente superior a la considerada en nuestro estudio (547 mm) como se ha visto, según los datos procedentes del Servei Meteorològic de Catalunya. Otras fuentes, como se verá, señalan una precipitación media de 573 mm, pero siempre resultan oscilantes entre 500 y 600 mm.

En este último caso, la precipitación media anual cayente sobre la cuenca debería alcanzar un valor de:

$$P_n = N \times F = 0'547 \times 87'419 = 47'82 \text{ hm}^3 < 57 \text{ hm}^3, \text{ o bien:}$$

$$P_n = N \times F = 0'499 \times 87'419 = 43'62 \text{ hm}^3 < 57 \text{ hm}^3,$$

considerándose el valor que se juzga como más adecuado el primero de ellos, teniendo en cuenta, incluso, las consideraciones restrictivas que, en las décadas futuras, puede representar el efecto del cambio climático sobre la subcuenca en estudio.

Del estudio de las aportaciones anuales sobre las cuencas del río Siurana y de la riera de Riudecanyes, se deduce el siguiente gráfico:

³ L'Agència Catalana de l'Aigua actualitza diàriament la gota amb informació de l'estat dels recursos hídrics de les conques internes de Catalunya. A més, si es consulta l'informe de l'estat dels embassaments s'hi troba tant les dades de les conques internes com les de la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre, que també s'actualitzen cada dia (hora actualització: 12:00h - dades agregades del dia anterior). Els documents que conformen la planificació hidrològica de les Conques Internes de Catalunya tenen el seu fonament tècnic en estudis detallats realitzats als anys setanta i principis dels vuitanta del segle passat, sobre la demanda d'aigua i l'oferta de recursos per satisfer-la. Aquests estudis detallats s'han actualitzat parcialment en anys posteriors, incorporant noves informacions sobre l'evolució de demandes i recursos i la resta de paràmetres que incideixen en la planificació hidrològica. El període de temps transcorregut ha suposat l'aparició de noves dades, així com una millora substancial de les tecnologies de tractament de les mateixes, la qual cosa aconsella, no només una actualització parcial, sinó programada, coordinada i integrada de les bases tècniques que suporten l'esmentada planificació.

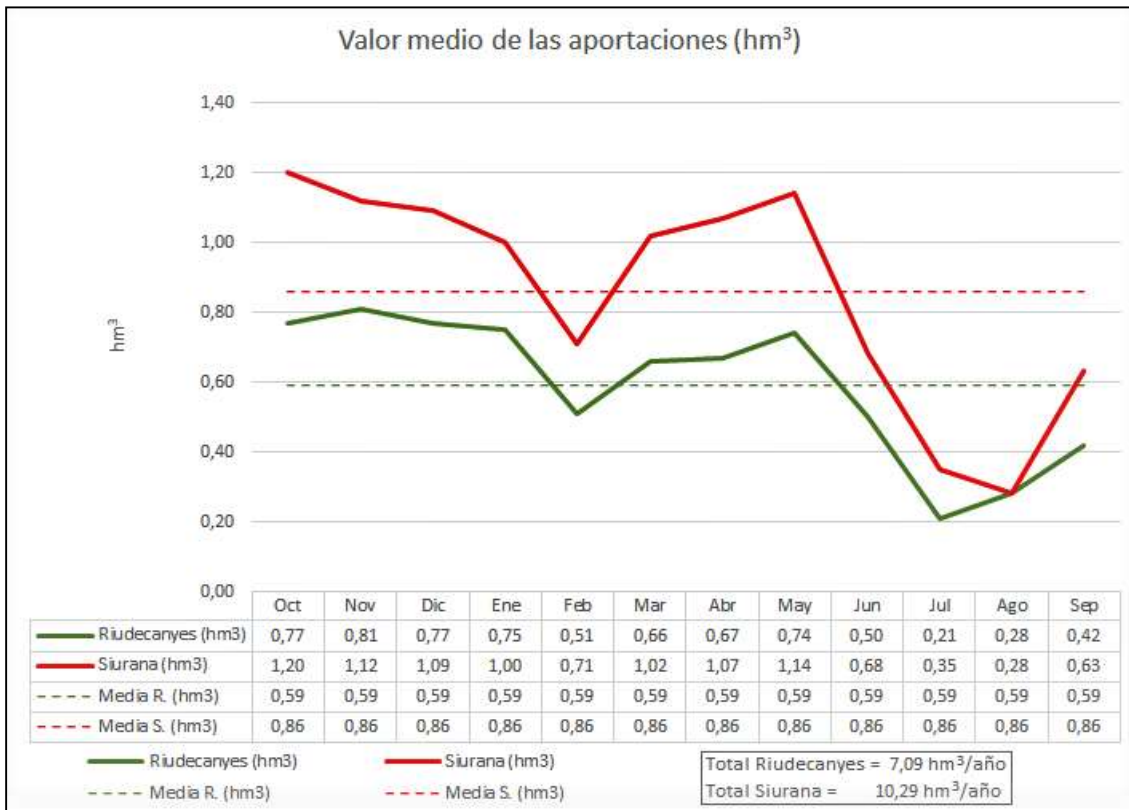


Fig. 4. Aportaciones en las cuencas del Siurana y Riudecanyes.

Así pues, la aportación media anual sobre la cuenca, en el mismo período considerado, fue de $A_n = 10'29 \text{ hm}^3$, de lo que se deduce una escorrentía media de:

$$L_n = \frac{1.000 \times A_n}{F} = \frac{1.000 \times 10'29}{87'419} = 117'7 \text{ mm} ,$$

lo que implica un coeficiente de escorrentía anual de:

$$\epsilon = \frac{L_n}{N} = \frac{117'7}{547} = 0'215 \cong 0'22 .$$

De este modo, se tendrá un déficit anual de escorrentía de:

$$D = N - L_n = 547 - 117'7 = 429'3 \text{ mm} .$$

Es posible, complementariamente, contrastar los cálculos efectuados hasta ahora con los dimanantes de la formulación de Turc, que proporciona el valor del coeficiente de escorrentía medio anual sobre datos de la precipitación media expresada en mm (N) y la temperatura media anual en °C (T) de la cuenca aportadora (Franquet, 1995), de valor: $T = 15'3 \text{ }^\circ\text{C}$.

El déficit hidrológico o déficit anual de escorrentía, en este caso, vendrá dado por la siguiente fórmula aproximada, en contraste con la determinación anteriormente efectuada:

$$D = \frac{N}{\sqrt{0'9 + \left(\frac{N}{L}\right)^2}}, \text{ donde:}$$

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0'05 \cdot T^3 = 300 + 25 \cdot 15'3 + 0'05 \cdot 15'3^3 = 861'6,$$

con lo que se tendrá un déficit hidrológico de:

$$D = \frac{547}{\sqrt{0'9 + \left(\frac{547}{861'6}\right)^2}} = 479'2 \text{ mm} > 429'3 \text{ mm},$$

valor éste, pues, mayor que el anteriormente obtenido y procedente de la aplicación de la mencionada aproximación de Turc, razón por la que seguiremos considerando un $D = 429'3$ mm, de lo que resultará un coeficiente de escorrentía medio de:

$$\epsilon = \frac{N - D}{N} = \frac{547 - 429'3}{547} = 0'215,$$

que resulta coincidente con las determinaciones que figuran en el mencionado estudio del ACA (véase tabla 5 del Documento de síntesis de dicho trabajo).

Partiendo, por otra parte, de un valor medio supuesto de $T = 15'3$ °C, resulta interesante aplicar, para el cálculo de la evapotranspiración real media de la cuenca, la formulación de Coutagne, en que:

$$\lambda = \frac{1}{0'8 + 0'14 \cdot T} = \frac{1}{0'8 + 0'14 \cdot 15'3} = 0'34,$$

y siendo $P = 0'9 \cdot N = 0'9 \cdot 547 = 492'3$ mm $\approx 0'49$ m, que es la “precipitación neta” (precipitación total menos la infiltración en el terreno que puede evaluarse, con carácter general, en un 10% de N). Debe cumplirse que:

$$\frac{1}{8 \cdot \lambda} \leq P \leq \frac{1}{2 \cdot \lambda}, \text{ o sea : } \frac{1}{8 \cdot 0'34} \leq 0'49 \leq \frac{1}{2 \cdot 0'34},$$

o sea: $0'37 \leq 0'49 \leq 1'47$, luego resulta aceptable.

Entonces, la evapotranspiración real media de la cuenca, en metros, viene dada por la expresión:

$$ETR = P - \lambda \cdot P^2 = 0'49 - 0'34 \cdot 0'49^2 = 0'408 \text{ m},$$

valor que resulta inferior al determinado en el estudio del ACA (que es de $ETR = 0'513$ m), según puede verse de la contemplación de la expresada tabla 5.

La fórmula anteriormente aplicada tiene el interés de resultar independiente de las series cronológicas de caudales disponibles (que son, a veces, discrepantes en su temporalidad y/o cuantía). No obstante, se ha preferido contrastarla con las aplicables según la Resolución del Principado de Asturias, basadas en la legislación suiza.

Para ello, resulta necesaria la elaboración de las siguientes tablas y gráfico:

Tabla 3. E18. Caudal de salida del embalse de Siurana (m³/s).

Promedio de Media	MES												
AÑO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Media
1996	0,4865	0,7731	0,0004	0,1343	0,1353	0,0048	0,0355	0,7781	0,0841	0,0008	0,0000	0,9360	0,2805
1997	1,9056	0,3584	0,3882	0,0695	0,0032	0,0061	0,0217	0,8372	0,0043	0,0031	0,0010	0,0000	0,3024
1998	0,0254	0,4283	0,0018	0,0022	0,0019	0,0044	0,1104	0,9746	0,0374	0,0013	0,0170	0,0002	0,1326
1999	0,0000	0,0000	0,0011	0,0006	0,5944	0,0035	1,1514	0,6237	0,0151	0,0009	0,0000	0,0007	0,2031
2000	0,0000	0,0004	0,0006	0,0006	0,0024	0,9738	1,2170	0,0973	0,5152	0,0000	0,0000	0,0000	0,2337
2001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0030	0,0289	0,0305	0,7774	0,0036	0,0000	0,0000	0,0000	0,0716
2002	0,0000	0,0008	0,0011	0,0008	0,0017	0,0159	0,3362	0,4004	0,0040	0,0007	0,0008	0,0000	0,0647
2003	0,0000	0,0000	0,0007	0,0002	0,0015	0,0033	0,0136	0,6355	0,0322	0,0231	0,4982	0,0210	0,1029
2004	0,0355	0,2114	0,5900	1,2189	0,5306	0,1657	0,1240	0,8456	0,0596	0,0629	0,0644	0,0405	0,3292
2005	0,0393	0,0417	0,0397	0,0274	0,0420	1,0401	1,1087	0,0474	0,0464	0,0276	0,0240	0,0210	0,2093
2006	0,0208	0,0209	0,0215	0,0216	0,0308	0,0367	0,5719	0,5759	0,0341	0,0221	0,0208	0,0206	0,1182
2010	0,2484	0,2083	0,1833	0,0213	0,2040	0,1225	0,0340	0,4297	0,0383	0,3790	0,0292	0,0315	0,1627
2011	0,0333	0,0348	0,0345	0,0646	0,0489	0,0419	0,0351	0,0203	0,0289	0,0421	0,0298	0,0215	0,0365
2012	0,0202	0,0200	0,0212	0,0211	0,0235	0,0287	0,0458	0,0442	0,0512	0,2082	0,0200	0,0194	0,0441
2013	0,0226	0,0181	0,2797	0,2136	0,2246	0,0562	0,0391	0,2228	0,2688	0,0676	0,2687	0,1715	0,1550
2014	0,0200	0,0200	0,0208	0,7729	0,0711	0,0509	0,1473	0,4089	0,1897	0,0336	0,2154	0,0646	0,1676
2015	0,0242	0,0200	0,3575	0,0257	0,0243	0,5283	0,3549	0,7117	0,1021	0,0778	0,0310	0,0208	0,1915
2016	0,0268	0,0214	0,0200	0,0202	0,0260	0,9011	0,5448	0,3777	0,0494	0,0431	0,0312	0,0285	0,1742
2017	0,0262	0,0197	0,0358	0,0338	0,3120	0,1438	0,6799	0,3397	0,0488	0,0406	0,0362	0,0342	0,1481
2018	0,0309	0,0277	0,0233	0,0210	0,0239	0,3550	0,2800	0,2777	0,0507	0,0331	0,0213	0,0204	0,0975
2019	0,0279	0,0317	0,0349	0,0390	0,0453	0,0454	0,4776	0,4393	0,0552	0,0320	0,0277	0,0216	0,1078
2020	1,3229	0,0647	0,4563	0,1696	0,5720	0,2343	0,0758	0,1044	0,2551	0,0534	--	--	0,3576
Media	0,1965	0,1065	0,1142	0,1309	0,1328	0,2178	0,3380	0,4586	0,0897	0,0524	0,0640	0,0705	0,1661

NOTA: Estimación del Q₃₄₇ (95% del tiempo anual) efectuada sobre 21 años naturales (1996-2019) menos los años 2007-2009 (resulta un Q₃₄₇ = 0,0369 m³/s).

En la elaboración de la tabla anterior deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

a) se han registrado dos lecturas diarias en la estación mencionada, con un total de 17.120 observaciones a lo largo del período, y

b) se adjunta la siguiente tabla que muestra el número de días muestreados en el período antedicho, por años y meses.

A saber:

Tabla 4. Días muestreados por meses de cada año del período 1996-2020.

AÑO	MES												Media
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1996	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
1997	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1998	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1999	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2000	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2001	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2002	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2003	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2004	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2005	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2006	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2010	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	27	31	362
2011	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	27	27	358
2012	30	27	31	30	31	30	31	22	30	31	30	31	354
2013	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2014	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2015	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2016	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2017	31	28	31	30	31	30	31	31	30	30	30	31	364
2018	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2019	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2020	31	29	31	30	31	30	31	31	30	7			281
Total general	681	620	682	660	682	660	682	673	660	657	624	647	7928

Tabla 5. Caudales medios mensuales en orden ascendente.

AÑO	CAUDAL MEDIO MENSUAL (m³/s)
2011	0,0365
2012	0,0441
2002	0,0647
2001	0,0716
2018	0,0975
2003	0,1029
2019	0,1078
2006	0,1182
1998	0,1326
2017	0,1481
2013	0,1550
2010	0,1627
2014	0,1676
2016	0,1742
2015	0,1915
1999	0,2031

$Q_{347} = 0,0369$

(continúa)

AÑO	CAUDAL MEDIO MENSUAL (m ³ /s)
2005	0,2093
2000	0,2337
1996	0,2805
1997	0,3024
2004	0,3292

De la que se deduce, en definitiva, un $Q_{347} = 36,9$ l/s, correspondiente al percentil P_5 de esta distribución de frecuencias.

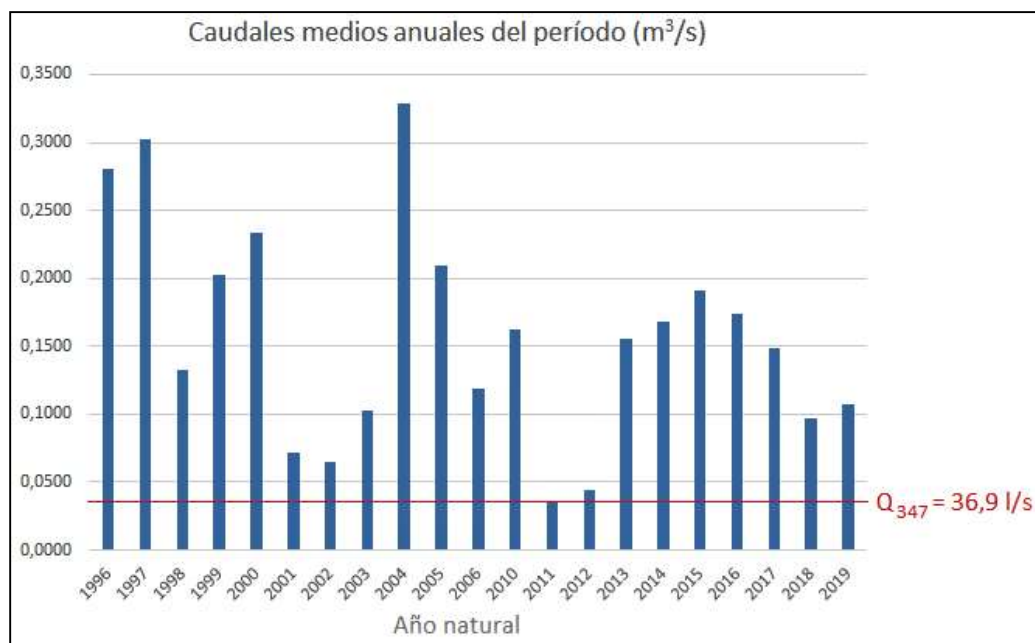


Fig. 5. Caudales medios anuales en el período 1996-2019.

Partiendo, pues, de un $Q_{347} = 36,9$ l/s, que es el caudal superado durante 347 días del año hidráulico (correspondiente al percentil 5 de la correspondiente distribución de frecuencias, véase la tabla de cálculo anterior), según se explica posteriormente, se definen tres zonas diferentes en función de las comunidades piscícolas existentes, útiles para la determinación del denominado “caudal de acondicionamiento”, a saber:

A) *Zonas trucheras* (nivel de protección mínimo, base I). Será el mayor caudal de los resultantes de la aplicación de las siguientes fórmulas:

$$a) Q_{\text{mín.}} = 0'35 \times Q_{347} = 0'35 \times 36'9 = 12'921 \text{ l/s.}$$

$$b) Q_{\text{mín.}} = \frac{15 \times Q_{347}}{(\ln Q_{347})^2} = \frac{15 \times 36'9}{\ln^2 36'9} = 42'511 \text{ l/s.}$$

$$c) Q_{\text{mín.}} = 0'25 \times Q_{347} + 75 = 0'25 \times 36'9 + 75 = 84'231 \text{ l/s.}$$

Estos caudales pueden resultar útiles para efectuar la determinación que se pretende.

B) *Zonas de interés piscícola* (nivel de protección medio, base II). Será el resultante de sumar al caudal mayor de los anteriormente obtenidos 2 l/s y km² de la cuenca aprovechada. Esto es:

$$Q_{\text{mín}} = 84'23 + (2 \times 87'419) = 259'07 \text{ l/s,}$$

siempre considerando como aprovechable, a efectos piscícolas, la totalidad de la cuenca aguas arriba del tramo en estudio. Constituye un criterio acorde con el Informe de la Universidad de Berkeley para la Fundación de la Universidad Politécnica de Cartagena (AA.VV, 2003), así como con el objetivo de categoría de calidad de las aguas superficiales C2 que ya hemos expuesto anteriormente (ICG = 75-85). No obstante, creemos más adecuado aplicar a esta subcuenca la calificación anterior de “zona truchera”, por lo que se expone únicamente a título orientativo.

C) *Zonas salmoneras* (nivel de protección máximo, base III). Será el resultante de sumar al caudal mayor de los obtenidos en el apartado A) 4 l/s y km² de cuenca aprovechada. Esto es:

$$Q_{\text{mín}} = 84'23 + (4 \times 87'419) = 433'91 \text{ l/s.}$$

A todos ellos habrá que aplicar la reducción tentativa del 5% por efecto previsible del cambio climático en las décadas futuras. Tampoco se tendrá en cuenta por la razón anteriormente expresada.

La ictiofauna es uno de los elementos de calidad biológica cuyo estudio es requerido por la DMA. Existen como antecedente, las experiencias realizadas en Europa, EE.UU y otros países, que señalan a los peces como buenos indicadores de la calidad medioambiental. En Europa se comenzó a utilizar la ictiofauna para la vigilancia de la calidad de las aguas en el ámbito de aplicación de diferentes Directivas europeas: Directiva de tratamiento de aguas urbanas residuales (91/271/EEC), Directiva de nitratos (91/676/EEC) y de las normativas de diferentes países. En los EE.UU. la ictiofauna se usa para la vigilancia de la calidad de las aguas de forma habitual y se han desarrollado procedimientos estandarizados para el muestreo y el procesado de las muestras.

En el estudio citado realizado por Eurofins-CIMERA, 2019, para determinar las especies piscícolas existentes en el río Siurana en el tramo objeto de su estudio, se llevó a cabo un muestreo en el propio tramo mediante pesca eléctrica. Se capturaron 34 ejemplares de madrilla -*Parachondrostoma miegii* Steindachner 1866- con una longitud furcal comprendida entre los 6 cm y los 21 cm, y 6 ejemplares de carpa común -*Cyprinus carpio* Linnaeus 1758 - de longitud furcal o LH (o sea, la medida del pez que va desde el extremo del hocico hasta la hendidura o ángulo de la aleta caudal o cola) comprendida entre 29 cm y los 41 cm. En la bibliografía existente, se consideraba que el río Siurana en el tramo de estudio, es hábitat potencial del barbo colirrojo -*Barbus haasi*, Mertens 1924-, sin embargo, en el muestreo realizado no se capturó ningún ejemplar de esta especie.

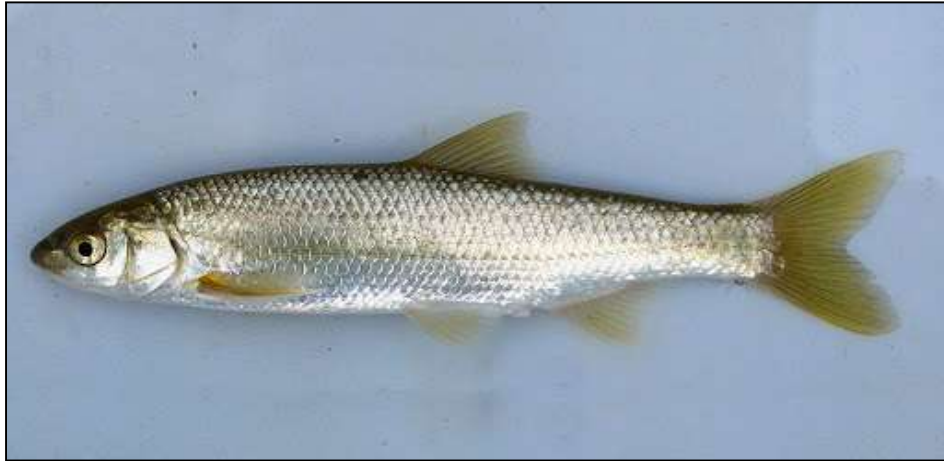


Fig. 6. Ejemplar de madrilla (*Parachondrostoma miegii*). Fuente: ittiofauna.org.



Fig. 7. Ejemplar de carpa (*Cyprinus carpio*). Fuente: portal.ct.gov.



Fig. 8. Ejemplar de barbo colirrojo (*Barbus haasi*). Fuente: vertebradosibericos.org.

De las tres especies mencionadas, la carpa es introducida, por lo que no se tuvo en consideración, y de las otras dos, que sí son autóctonas, se consideró la madrilla como especie objeto de estudio por ser la que se halló presente en el tramo estudiado.

Por último, recalcamos la consideración, en nuestro trabajo, de “zona truchera” como aceptable para la cuenca en estudio.



Fig. 9. Ejemplar de trucha común (*Salmo trutta*). Fuente: paxala.com.

El “caudal base” se aplica mediante simulación a una serie de secciones transversales definidas, bajo unas condiciones concretas, a su vez determinadas por el componente a conservar. De esta aplicación se deduce la necesidad o no de establecer un cierto caudal de acondicionamiento (adicional).

El componente a conservar fija también las referencias en cuanto al nivel exigible de calidad del agua. El “caudal base” más el “caudal de acondicionamiento” definen el “caudal estándar”, sobre el que se aplica el factor de variabilidad estacional, obteniéndose el “caudal de mantenimiento”, que completa ya el régimen de mantenimiento a establecer.

El “caudal de acondicionamiento” se obtiene a partir de la simulación del caudal base sobre una serie de secciones transversales representativas del tramo afectable.

4. COMPROBACIÓN TEÓRICA INDIRECTA DE LA APORTACIÓN MEDIA EN RÉGIMEN NATURAL

Como se ha visto, la aportación media aceptada en régimen natural sobre la cuenca del río Siurana es de: $A_n = 10'29 \text{ hm}^3/\text{año}$, según los datos suministrados por el ACA (2002). Ello puede conducir a la consideración o contrastación con la conocida fórmula de Becerril, que proporciona directamente la aportación anual, que se suele aplicar en anteproyectos de grandes cuencas (cuestión ésta que no se corresponde con la realidad de la cuenca en estudio, por lo que las determinaciones que siguen lo son sólo a título meramente orientativo) y cuya mayor dificultad estriba en la apreciación del tipo de pluviometría ya que, en ocasiones, no resulta fácil encajar la cuenca hidrográfica en estudio, de una manera clara, en una de las cinco categorías del coeficiente de escurrimiento medio β que se relacionan a continuación (Franquet, 2009):

Tabla 6. Valores del coeficiente β .

Tipos de zona	β
Regiones muy secas (tipo La Mancha)	0'0060 - 0'0089
Regiones secas (tipo Páramos)	0'0090 - 0'0119
Regiones medianamente húmedas (tipo Guadarrama)...	0'0120 - 0'0139
Regiones lluviosas (tipo Cantábrico)	0'0140 - 0'0169
Regiones muy lluviosas (tipo Pirenaico)	0'0170 - 0'0200

En definitiva, la fórmula de Becerril ofrece la siguiente configuración analítica:

$$A_n = \beta \cdot N^{1.5} \cdot F, \text{ en la que:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_n = \text{Aportación media anual de la cuenca (en Dm}^3\text{)}. \\ \beta = \text{Coeficiente de escorrentía anteriormente tabulado.} \\ N = \text{Precipitación media de la cuenca (en mm = litros/m}^2\text{)}. \\ F = \text{Superficie de la cuenca aportadora (en km}^2\text{)}. \end{array} \right.$$

Considerando prudentemente, ahora, en nuestro caso, un coeficiente de valor: $\beta = 0'0092$, se tendría una aportación media en régimen natural de:

$$A_n = 0'0092 \times 547^{1.5} \times 87'419 \equiv \mathbf{10'29 \text{ hm}^3/\text{año}},$$

lo que supondría la consideración de un valor del coeficiente $\beta = 0'0092$, propio de las regiones secas que se ajusta adecuadamente a la realidad de la cuenca mediterránea que nos ocupa. En el caso de haberse adoptado un valor alternativo de la precipitación media de la cuenca de $N = 499 \text{ mm}$, se tendría que:

$$A_n = 0'0092 \times 499^{1.5} \times 87'419 \equiv \mathbf{8'96 \text{ hm}^3/\text{año}},$$

aunque, como ya se ha dicho, adoptaremos el primer valor de los expresados en consonancia con lo expuesto en el estudio de la ACA al que hemos hecho referencia.

5. OTROS MÉTODOS DE CÁLCULO

a) Tienen en cuenta las aportaciones medias en régimen natural como base para la estimación del caudal mínimo medioambiental, con lo que, considerando las dos cifras obtenidas de esta variable en el epígrafe anterior, se tendrá en caudal ficticio continuo:

$$\left\{ \begin{array}{l} 10'29 \text{ hm}^3/\text{año} = 0'326 \text{ m}^3/\text{s} = 326 \text{ l/s} \\ 8'96 \text{ hm}^3/\text{año} = 0'284 \text{ m}^3/\text{s} = 284 \text{ l/s} \end{array} \right.$$

Adoptaremos el primero de ellos siguiendo los criterios establecidos en el epígrafe anterior. Considerando un caudal ecológico medio deseable del orden del 15% de las aportaciones y distribuido temporalmente de acuerdo al hidrograma natural de los caudales fluyentes del río Siurana, en una simplificación propia de los ríos mediterráneos. También deberá tenerse en cuenta el efecto reductor del 5% en años sucesivos por efecto del cambio climático, con lo que se tendrá:

$$0'95 \times 326 \times 0'15 = 46'46 \text{ l/s} .$$

En el caso de considerar, como en otros estudios consultados un caudal aceptable del 20% de dichas aportaciones, se tendrá:

$$0'95 \times 326 \times 0'20 = 61'94 \text{ l/s} .$$

b) A título meramente orientativo, el cálculo realizado para la riera de Riudecanyes arrojaría el siguiente resultado:

$$7'09 \text{ hm}^3/\text{año} = 0'225 \text{ m}^3/\text{s} = 225 \text{ l/s} .$$

En este caso, con los mismos supuestos establecidos para el río Siurana, se tendría:

$$0'95 \times 225 \times 0'15 = 32'06 \text{ l/s} .$$

En el caso de considerar un caudal aceptable del 20% de dichas aportaciones, se tendría:

$$0'95 \times 225 \times 0'20 = 42'75 \text{ l/s} .$$

6. RESUMEN DE LOS DIFERENTES VALORES OBTENIDOS

El criterio de adopción ya expuesto del caudal mínimo medioambiental para el tramo inferior del río Siurana, viene reforzado si se analiza el conjunto de los valores obtenidos aplicando las diferentes opciones que, como se recordará de nuestro estudio precedente, así como de la consulta efectuada a los estudios relacionados de otros autores, son las siguientes:

Tabla 7. Caudales mínimos según los diferentes criterios empleados.

CRITERIO	Q_{mín.} (l/s)
A-1) Base I	12'27
A-2) Base I	40'38
A-3) Base I	80'02
ISZKOWSKI (1)	86'74
ISZKOWSKI (2)	77'14
Aportaciones medias (1)	46'46
Aportaciones medias (2)	61'94
CHE (1)	22'80
CHE (2)	35'15
ACA (1)	50'35
CIMERA	19'00

Las cifras señaladas en color rojo de la tabla precedente se consideran “outliers” a efectos estadísticos, ya que superan incluso a las que se deducen de las

aportaciones de la cuenca en régimen natural estimadas por diferentes procedimientos, por lo que deben no ser tenidas en cuenta para la estimación definitiva del caudal mínimo a proponer.

En la práctica estadística, tales como en el empleo de muestras estratificadas, un **valor atípico** (en inglés *outlier*) es una observación que es numéricamente distante del resto de los datos. Las estadísticas derivadas de los conjuntos de datos que incluyen valores atípicos serán frecuentemente engañosas. La mediana o segundo cuartil de la correspondiente distribución de frecuencias (Me o Q_2), como estadígrafo robusto, suele reflejar mejor el valor de la variable aleatoria estadística que la media aritmética. Los valores atípicos pueden ser indicativos de datos que pertenecen a una población diferente del resto de las muestras establecidas.

Los valores atípicos son, en ocasiones, una cuestión subjetiva, y existen numerosos métodos para clasificarlos. El método más impartido académicamente, por su sencillez y resultados, es el test de Tukey, que toma como referencia la diferencia existente entre el primer cuartil Q_1 y el tercer cuartil Q_3 , también denominado “rango intercuartílico”. En un diagrama de caja se considera un valor atípico el que se encuentra 1,5 veces esa distancia de uno de esos cuartiles (“atípico leve”) o bien a 3 veces esa distancia (“atípico extremo”).

Ordenados, pues, de menor a mayor, las cifras de los caudales mínimos correspondientes a los diversos criterios expuestos, resulta lo siguiente:

Tabla 8. Caudales mínimos considerados en orden ascendente.

CRITERIO	Q_{min.} (l/s)
A-1) Base I	12,27
CIMERA	19,00
CHE (1)	22,80
CHE (2)	35,15
A-2) Base I	40,38
Aportaciones medias (1)	46,46
ACA (1)	50,35
Aportaciones medias (2)	61,94
Media	36,04
Mediana	37,77

Se corresponde ello con el siguiente gráfico:

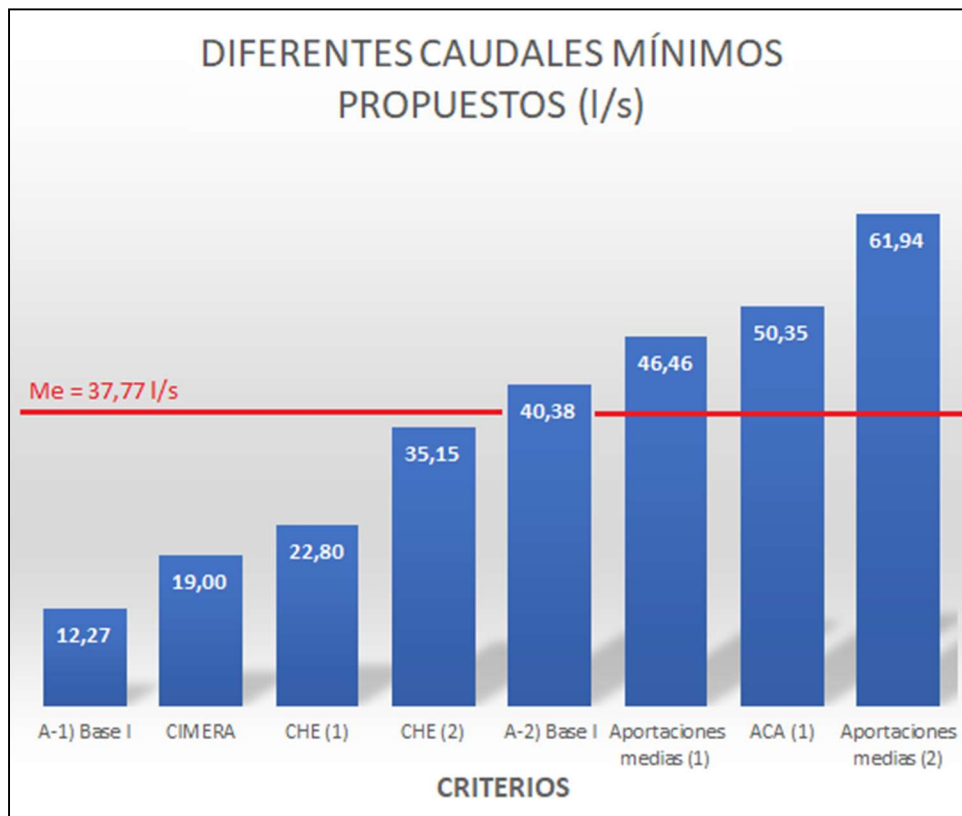


Fig. 10. Caudales mínimos propuestos y su mediana.

Los valores de los cuartiles de esta distribución de frecuencias son: $Q_1 = 21'85$ l/s y $Q_3 = 47'43$ l/s. Las medidas robustas de la tendencia central son estadísticos o estadígrafos que tratan de paliar los problemas de estimación asociados a distribuciones anómalas. Cabe señalar, entre ellas, las denominadas medias “k-recortadas” o “k-winsorizadas”, así como la “trimedia” que, en nuestro caso, vendrá dada por la expresión:

$$T = \frac{Q_1 + 2Q_2 + Q_3}{4} = \frac{21'85 + 2 \times 37'77 + 47'43}{4} = 36'21 \text{ l/s} .$$

La mediana o segundo cuartil de esta distribución unitaria de frecuencias es de 37'77 l/s (que es un estadístico robusto de medida de la tendencia central), equivalente a 39'76 l/s sin tener en cuenta la reducción del 5% en concepto del efecto reductor del cambio climático previsible, que resulta ser el valor finalmente adoptado, teniendo en cuenta también su buena proximidad a la media aritmética (36'04 l/s) y a la trimedia (36'21 l/s) de los resultados ofrecidos por los diversos criterios anteriormente expuestos.

De este modo, la distribución mensual de dichos caudales mínimos aguas abajo del azud de derivación del trasvase Siurana-Riudecanyes debería distribuirse mensualmente, de acuerdo al hidrograma natural de las aportaciones del río Siurana acaecidas a lo largo de una serie histórica suficientemente larga y representativa, así:

Tabla 9. Aportaciones y caudales mínimos mensuales.

Cuencas	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Riudecanyes (hm ³)	0,77	0,81	0,77	0,75	0,51	0,66	0,67	0,74	0,50	0,21	0,28	0,42
Siurana (hm ³)	1,20	1,12	1,09	1,00	0,71	1,02	1,07	1,14	0,68	0,35	0,28	0,63
Media R. (hm ³)	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Media S. (hm ³)	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Coefficiente R.	1,31	1,37	1,31	1,27	0,86	1,12	1,14	1,25	0,85	0,36	0,47	0,71
Coefficiente S.	1,40	1,30	1,27	1,16	0,83	1,19	1,24	1,33	0,79	0,41	0,33	0,73
Caudal Riudecanyes (l/s)	41,84	44,01	41,84	40,75	27,71	35,86	36,41	40,21	27,17	11,41	15,21	22,82
Caudal Siurana (l/s)	52,70	49,19	47,87	43,92	31,18	44,80	46,99	50,07	29,86	15,37	12,30	27,67

Tabla 10. Aportaciones totales anuales y medias mensuales.

Cuencas Hidrográficas	Total anual	Media mensual
Riudecanyes (hm ³)	7,09	0,59
Siurana (hm ³)	10,29	0,86

NOTA: En la anterior tabla 9 así como en la posterior figura 11, también se ha incluido, estimativamente, el caudal mínimo mensual a suministrar aguas abajo del pantano de Riudecanyes por la riera del mismo nombre.

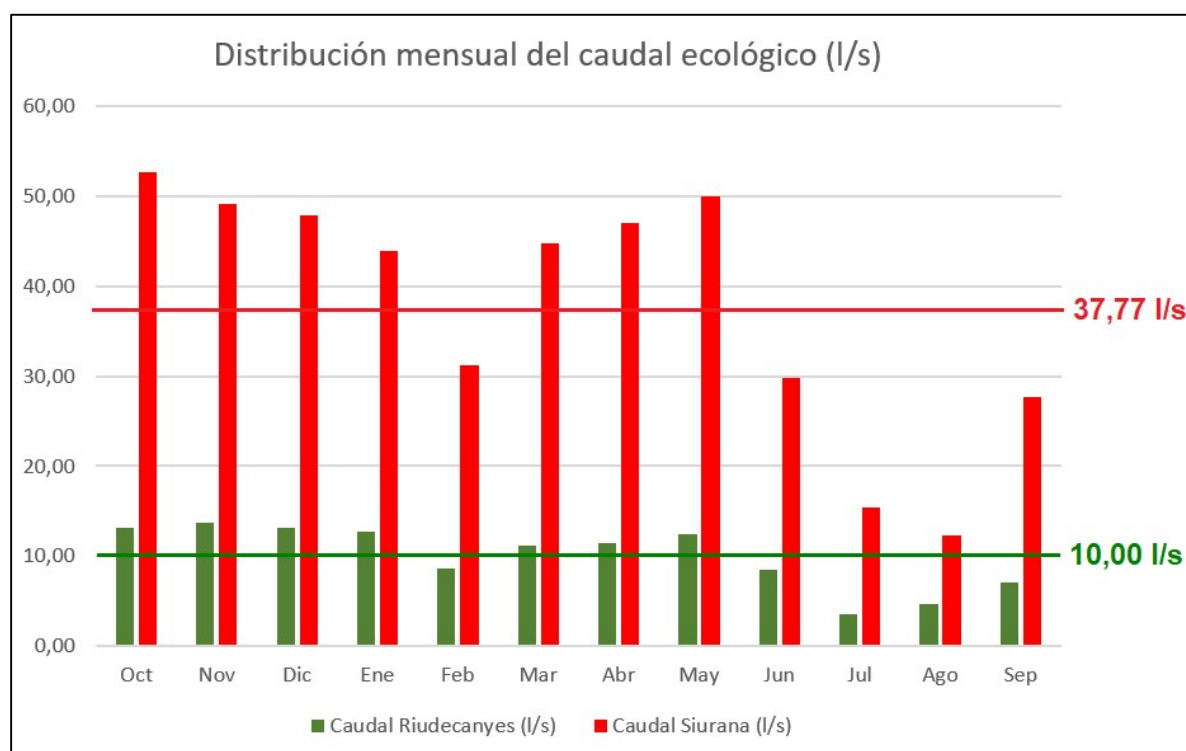


Fig. 11. Distribución mensual del caudal ecológico aguas abajo de los embalses de Siurana y Riudecanyes.

Al respecto, procede efectuar la comparación de nuestras determinaciones referentes al río Siurana (tanto en base a las aportaciones como a los caudales medios mensuales) con el régimen de caudales ecológicos mínimos propuesto en el Esquema Provisional de Temas Importantes (EpTI) del tercer ciclo de planificación hidrológica 2021-2027, efectuado por la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro, de 9 de marzo de 2020, que arroja un promedio anual de 36,78 l/s (en base a los caudales medios mensuales de otra serie histórica), prácticamente similar al adoptado en nuestro trabajo de 37,77 l/s aunque con algunas pequeñas diferencias por lo que se refiere a su distribución mensual, según puede verse en la siguiente tabla y gráfico. Esto es:

Tabla 11. Caudales ecológicos mensuales (l/s) según los diferentes criterios aplicados.

Criterio de base	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Medias
Aportaciones	52,70	49,19	47,87	43,92	31,18	44,80	46,99	50,07	29,86	15,37	12,30	27,67	37,77
Caudales medios mensuales	13,10	13,70	13,10	12,70	8,60	11,20	11,40	12,50	8,50	3,60	4,70	7,10	10,00
Caudales medios mensuales CHE	35,00	48,00	40,00	49,00	41,00	43,00	47,00	40,00	29,00	24,00	24,00	25,00	36,78

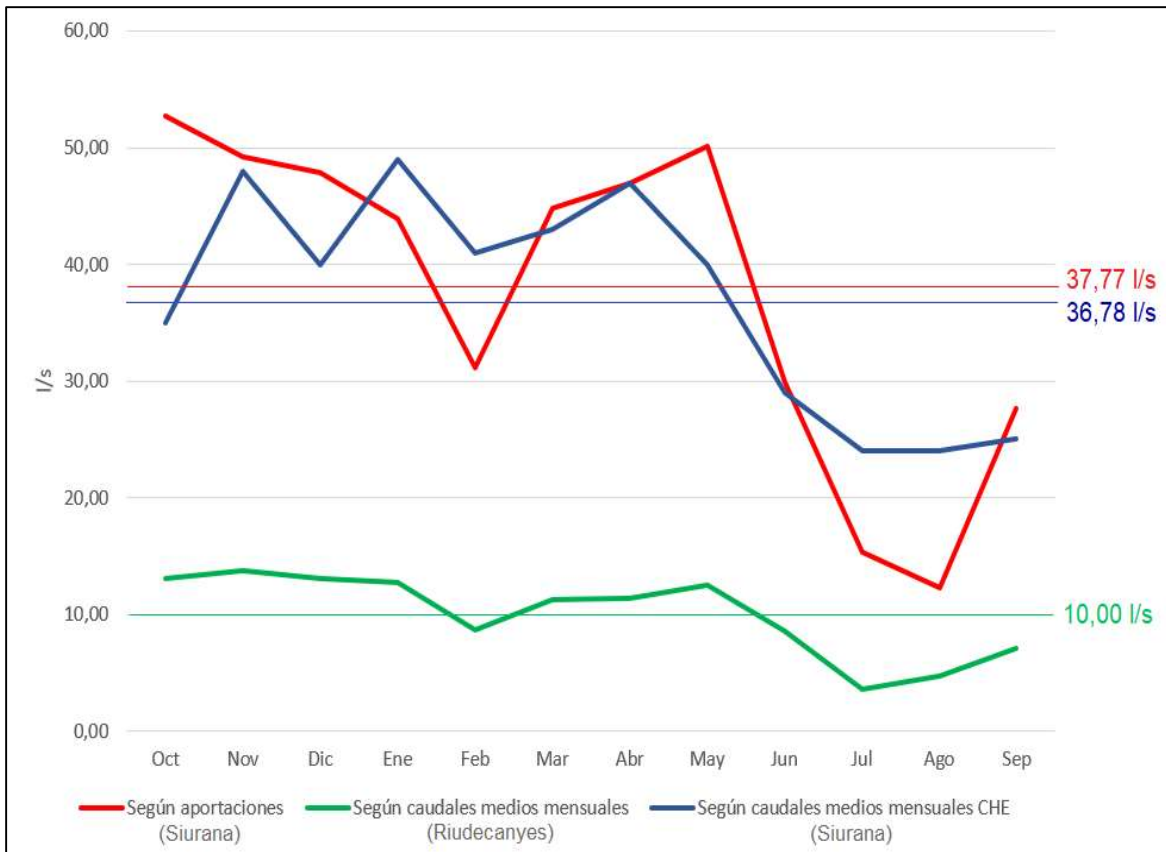


Fig. 12. Diferentes propuestas alternativas (CHE y presente estudio) de distribución mensual de los caudales ecológicos del río Siurana (aguas abajo del azud de derivación del trasvase) y de la riera de Riudecanyes (aguas abajo del embalse del mismo nombre).

7. BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE DE SIURANA

7.1. Las hipótesis adoptadas de cálculo

La función principal del embalse de Siurana es regular el caudal del río Siurana, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos para el riego y el abastecimiento de su cuenca y el trasvase concedido al embalse de Riudecanyes. Dicha regulación se estudia para un determinado período de tiempo que en nuestro caso será de 1 año (año hidrológico) ya que el volumen útil del embalse de Siurana 12.210.000 m³ solo podría satisfacer la demanda máxima del embalse 10.711.230 m³/año durante 1,138 años = 416 días.

Al igual que se verá en el posterior Artículo 15 de este mismo manual recopilatorio para la realización del balance hídrico del embalse de Riudecanyes, así como también aquí para el caso del embalse de Siurana, utilizaremos dos escalas temporales de estudio, concretamente:

- Escala anual (año hidrológico): nos permitirá determinar si las aportaciones hídricas de la propia cuenca del embalse son suficientes para satisfacer las demandas del embalse. En caso de que el balance sea negativo, nos indicaría una insuficiencia de recursos hídricos propios de la cuenca para satisfacer la demanda requerida. Por el contrario, en el caso de que el balance resulte positivo, indicaría que los recursos hídricos de la cuenca del embalse son suficientes para satisfacer sus propias demandas.
- Escala mensual: nos permitirá comprobar si el volumen útil del embalse es suficiente para regular los caudales propios del río.

Estas dos escalas temporales se aplicarán a una serie de hipótesis de estudio en función del funcionamiento operativo del embalse y del comportamiento de su cuenca. Debido a que las cuencas tributarias del embalse de Siurana y de Riudecanyes son contiguas, presentarán un comportamiento similar, siendo las hipótesis de cálculo para la cuenca del embalse de Siurana las mismas que las consideradas para el embalse de Riudecanyes, a saber:

- Hipótesis 1. El embalse dará suministro a todas sus demandas a partir de sus aportaciones propias de la cuenca para la lluvia promedio y el coeficiente de escurrimiento promedio. Esta hipótesis se asocia a las condiciones habituales de aportación de la cuenca.
- Hipótesis 2. El embalse dará suministro a todas sus demandas a partir de sus aportaciones propias de la cuenca para la lluvia promedio y el coeficiente de escurrimiento mínimo. Esta hipótesis se asocia a las condiciones habituales de lluvia, una vez superado un período de sequía.
- Hipótesis 3. El embalse dará suministro a todas sus demandas a partir de sus aportaciones propias de la cuenca para la lluvia promedio y el coeficiente de escurrimiento máximo. Esta hipótesis se asocia a las condiciones habituales de lluvia de una cuenca, después de producirse un período de abundante lluvia.

- Hipótesis 4. El embalse dará suministro a todas sus demandas a partir de sus aportaciones propias de la cuenca para la lluvia mínima registrada y el coeficiente de escorrentía mínimo. Esta hipótesis se asocia a las condiciones de sequía de la cuenca.
- Hipótesis 5. El embalse dará suministro a todas sus demandas a partir de sus aportaciones propias de la cuenca para la lluvia máxima registrada y el coeficiente de escorrentía máximo. Esta hipótesis se asocia a la máxima aportación posible de la cuenca. A pesar de disponer de la máxima aportación posible, puede suceder que el embalse no sea capaz de almacenar los excedentes, vertiéndolos por el aliviadero de la presa, no pudiéndolos utilizar en los períodos de máxima demanda.

Las demandas del trasvase al embalse de Riudecanyes dependerán de las hipótesis de estudio consideradas, ya que el volumen anual y su distribución mensual es diferente en función de la hipótesis tenida en cuenta. En la tabla 25 se muestra la distribución mensual del trasvase, así como el volumen anual a trasvasar para cada hipótesis de estudio.

Determinadas las demandas para los tres grupos considerados, en la tabla 12 se resumen las demandas anuales para las 5 hipótesis de cálculo consideradas, obteniéndose mediante su suma el volumen anual total de las demandas del embalse de Siurana.

Tabla 12. Determinación de las demandas anuales del embalse de Siurana para las 5 hipótesis de estudio consideradas.

HIPÓTESIS DE ESTUDIO	VOLUMEN ANUAL DEMANDAS (m ³)			
	USOS PROPIOS CUENCA	CAUDAL ECOLÓGICO	TRASVASE RIUDECANYES	TOTAL
1	696.870	1.191.115	5.763.552	7.651.536
2	696.870	1.191.115	7.447.956	9.335.940
3	696.870	1.191.115	3.297.743	5.185.727
4	696.870	1.191.115	8.823.246	10.711.230
5	696.870	1.191.115	2.267.642	4.155.627

7.2. Balance hídrico a escala anual

En la tabla 13 realizamos el balance para la escala temporal anual para las 5 hipótesis de estudio. Podemos ver como el balance es negativo en las hipótesis 2 y 4 indicando falta de recursos hídricos de la cuenca propia del embalse para satisfacer las demandas del embalse.

En las hipótesis 1, 3 y 5 el balance anual es positivo, indicando que los recursos propios de la cuenca serían suficientes para satisfacer las demandas de la cuenca. La escala de estudio utilizada no tendría en cuenta la capacidad de regulación del embalse, pudiéndose producir el caso que el volumen útil del embalse de Siurana sea insuficiente para poder regular las entradas y se produzca un vertido por el aliviadero de la presa no pudiéndose utilizar dicho volumen para satisfacer las demandas del embalse. Es necesaria en las

hipótesis 1, 3 y 5 la realización del balance mensual para determinar si en dicha hipótesis sucede dicha pérdida de recursos. No obstante, en el siguiente apartado realizamos el balance mensual para todas las hipótesis de cálculo. A partir de este punto, ya es posible elaborar la siguiente tabla:

Tabla 13. Cálculo del balance hídrico anual del embalse de Siurana para las 5 hipótesis.

HIPÓTESIS DE ESTUDIO	VOLUMEN ANUAL (m ³)		
	ENTRADAS	SALIDAS	BALANCE (ENTRADAS-SALIDAS)
1	8.583.082	7.651.536	931.545
2	4.603.024	9.335.940	-4.732.917
3	14.258.990	5.185.727	9.073.263
4	2.128.798	10.711.230	-8.582.432
5	23.789.869	4.155.627	19.634.242

7.3. Balance hídrico a escala mensual

Obtenida en los puntos anteriores del presente apartado la distribución mensual de las entradas y salidas del embalse de Siurana, ya nos encontramos en condiciones de realizar el balance hídrico a escala mensual. A continuación, vamos a comentar, caso por caso, los resultados obtenidos.

En cuanto al balance mensual para la hipótesis 1, que corresponde a las condiciones habituales de aportación de la cuenca o condiciones medias, vemos como, entre los meses de octubre a abril, el balance es positivo, indicando que las demandas del embalse son abastecidas por los propios recursos de la cuenca, produciéndose almacenamiento de los sobrantes en el embalse. Al final del mes de abril se han acumulado en el embalse un total de 4.270.661 m³. A partir del mes de mayo hasta septiembre el balance resulta negativo, indicando que los recursos propios de la cuenca no son suficientes para satisfacer las demandas del embalse, siendo necesario acudir al volumen almacenado en el embalse para satisfacerlas. Con el volumen almacenado hasta el mes de abril podemos satisfacer las demandas de los restantes meses del año, llegando al final del mes de septiembre con un volumen en el embalse de 931.544 m³. Por tanto, vemos que en la hipótesis de estudio 1 el embalse de Siurana puede satisfacer sus demandas, incluido el caudal ecológico estimado, llegando a fin de año con una cierta reserva. Por tanto, se observa como en las condiciones habituales de aportación de la cuenca o condiciones medias, el embalse de Siurana puede satisfacer sus demandas, incluida la nueva demanda de caudal ecológico estimado.

En cuanto al balance mensual para la hipótesis 2, que se asocia a las condiciones habituales de lluvia una vez superado un período de sequía, vemos como el balance es negativo en todos los meses, a excepción de los meses de octubre y noviembre. Entre los meses de octubre y noviembre se produce almacenamiento de los sobrantes de agua en el embalse hasta alcanzar un volumen, al final del mes de noviembre, de 882.363 m³. El volumen almacenado solamente podrá satisfacer completamente las demandas del embalse hasta el

mes de febrero. A partir de dicho mes hasta septiembre, las demandas del embalse no serán cubiertas. Por tanto, vemos que, en la hipótesis de estudio 2, el embalse de Siurana no puede satisfacer sus demandas.

En cuanto al balance mensual para la hipótesis 3 que se asocia a las condiciones habituales de lluvia de una cuenca después de un período de abundante lluvia, vemos como entre los meses de octubre a mayo el balance es positivo, indicando que se pueden satisfacer las demandas del embalse con los recursos de la propia cuenca, pudiendo almacenar los sobrantes en el embalse hasta un volumen, al final del mes de mayo, de 11.571.486 m³. A partir del mes de junio hasta septiembre, el balance es negativo, indicando que las entradas al embalse no pueden satisfacer sus demandas, siendo necesario recurrir al volumen almacenado para satisfacer las demandas. No obstante, el volumen almacenado sirve para satisfacer las demandas de dicho período llegando al final del mes de septiembre con un volumen almacenado de 9.073.262 m³. Por lo tanto, se concluye que, en la hipótesis de estudio 3, el embalse de Siurana puede satisfacer sus demandas, llegando al final del año con una importante reserva de agua.

En cuanto al balance mensual para la hipótesis 4, que se asocia a las condiciones de sequía de la cuenca, vemos como el balance mensual es negativo en todos los meses del año, indicando que el embalse de Siurana no puede satisfacer las demandas del embalse con sus recursos propios.

Por último, en cuanto al balance mensual para la hipótesis 5 que se asocia a la máxima aportación posible de la cuenca, vemos como el balance mensual es positivo entre los meses de octubre a mayo, indicando que se pueden satisfacer las demandas del embalse con los recursos de la propia cuenca, pudiendo almacenarse los sobrantes en el embalse hasta la capacidad máxima del mismo, concretamente 12.000.000 m³. Si analizamos la gestión del embalse se observa como el embalse alcanza su máxima capacidad en el mes de febrero, produciéndose vertido de recursos por el aliviadero de la presa entre los meses de febrero a mayo, perdiendo un volumen total de 8.809.878 m³. Entre los meses de junio y septiembre el balance es negativo, indicando que no se pueden satisfacer las demandas del embalse, siendo necesario recurrir al volumen almacenado para satisfacer las demandas. El volumen almacenado podrá satisfacer dichas demandas, llegando al final del mes de septiembre con un volumen en el embalse de 10.824.363 m³. La capacidad actual del embalse nos permite regular adecuadamente las entradas al embalse para satisfacer las demandas mensuales, con balance negativo para esta hipótesis de estudio. Por tanto, vemos que en la hipótesis de estudio 5 el embalse de Siurana puede satisfacer sus demandas, llegando al final del año con una importante reserva de agua.

Analizadas, en fin, todas las hipótesis de estudio, se concluye que el embalse de Siurana, con el volumen útil de almacenamiento de que dispone en la actualidad, puede cubrir sus demandas en la hipótesis 1 que corresponde a las condiciones habituales de aportación de la cuenca o condiciones medias. Hemos de tener presente que existen demandas de la propia cuenca que no se han podido cuantificar al no disponer de datos de caudal o volumen anual, aunque se

consideran pequeñas y que podrían ser absorbidas por el volumen acumulado al final de año por el embalse de 931.544 m³. La disminución de los recursos debido al cambio climático se estima que será alrededor de 5%, lo que supondría una disminución de los recursos en la hipótesis 1 de 429.154 m³, que también sería absorbido por dicho volumen acumulado a final de año.

No obstante, se considera que un caudal ecológico superior al calculado en los epígrafes anteriores pondría en aprietos la gestión del embalse de Siurana, teniendo que dejar de satisfacer las demandas del trasvase al embalse de Riudecanyes.

En condiciones de sequía, correspondiente a la hipótesis 4, el embalse de Siurana no podría satisfacer las demandas de la cuenca, siendo necesario disponer, al inicio del año hidrológico, de un volumen almacenado en el embalse de 8.582.432 m³, siendo ello posible si previamente al año de sequía se hubieran dado las hipótesis 3 y 5, lo que parece improbable.



Fig. 13. Fotografías del autor del Artículo junto al embalse de Siurana.



Fig. 14. Fotografías del autor del Artículo junto al embalse de Riudecanyes.

8. FUENTES DE DATOS UTILIZADAS

Para la elaboración del presente trabajo, además de los estudios previos analizados cuya relación se expone en el apartado II.1 anterior, se han consultado las siguientes fuentes de datos indirectos acerca de la temática que nos ocupa:

Tabla 14. Fuentes secundarias de datos utilizados.

DATOS:	FUENTE:
Superficie de las cuencas hidrográficas del embalse de Riudecanyes y de la captación del trasvase de agua procedente del río Siurana.	Modelo de elevaciones del terreno de Cataluña 2x2metros (MET-2 v1.0) del <i>Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)</i> . https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Elevacions/Model-d-elevacions-del-terreny-de-2x2-m
Precipitaciones mensuales.	Series climáticas históricas de las estaciones meteorológicas (desde el año 1950) del <i>Servei Meteorològic de Catalunya</i> . https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/serveis-i-dades-climatiques/series-climatiques-historiques/
Caudal a la salida del embalse de Siurana.	Consulta de datos de control de la calidad y la cantidad del agua en el medio de la <i>Agència Catalana de l'Aigua (ACA)</i> . Aforo: 430496-001_2/AFORAMENT-EST. http://aca-web.gencat.cat/sdim21/seleccioXarxes.do;jsessionid=C19985CCC4C6BCD48D6A739E2052C4AD
Temperatura media mensual.	Normales climáticas periodo de referencia 2007-2016 del <i>Servei Meteorològic de Catalunya</i> . https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/serveis-i-dades-climatiques/normals-climatiques-recents/
Escorrentía total en el embalse de Siurana.	Geodatos de la página web de la Confederación Hidrográfica del Ebro (SITEbro), concretamente los archivos en formato <i>shapefile</i> correspondientes a la Escorrentía Total Mensual del período 1940/41-2017/18. http://iber.chebro.es/geoportal/

9. CONCLUSIONES

Las conclusiones alcanzadas en el presente estudio son las siguientes:

- El caudal ecológico del río Siurana entre la salida el embalse de Siurana y su desembocadura en el río Ebro se estima en 37,77 l/s, equivalente a 39'76 l/s sin tener en cuenta la reducción del 5% en concepto del efecto reductor a causa del cambio climático previsible, que resulta ser el valor finalmente adoptado.
- Es necesario realizar un trasvase de recursos hídricos desde la cuenca del Siurana al embalse de Riudecanyes para poder cubrir sus demandas, ya sea por falta de recursos propios de la cuenca o por falta de capacidad del embalse de poder regular los excedentes en años con abundantes precipitaciones. Todo ello de acuerdo con la concesión administrativa en vigor.
- El embalse de Siurana puede cubrir sus demandas, incluida la del caudal ecológico calculado de 37,77 l/s y las necesidades de trasvase promedio del embalse de Riudecanyes, del orden de 5.763.552 m³ anuales (véase, al respecto, el Artículo 15 de este mismo manual), en las condiciones habituales de aportación de la cuenca o condiciones medias, acumulando un cierto volumen al final del año hidrológico⁴. Dicho volumen se destinaría a cubrir las demandas no cuantificadas en la propia cuenca del Siurana debido a la falta de datos, la posible reducción de recursos hídricos debida a los efectos del cambio climático y las pérdidas del sistema de embalses.
- Un aumento significativo del caudal ecológico calculado pudiera provocar que las demandas del embalse de Siurana no fueran cubiertas, afectando negativamente a las concesiones de riego de esta subcuenca principalmente y, en concreto, a la concesión vigente de riego del embalse de Riudecanyes.
- En caso de sequía en la cuenca del Siurana, las demandas no podrían ser atendidas, a no ser que se disponga, al inicio del año hidrológico, de un volumen almacenado mínimo en el embalse de 8.582.432 m³. Dicho volumen se puede almacenar si, previamente al año de sequía, se produjera el valor de la máxima precipitación anual registrada en la cuenca o la media, con el máximo coeficiente de esorrentía de la cuenca. También se podría almacenar agua de tener lugar una serie de años consecutivos con precipitación superior a la media y un valor del coeficiente de esorrentía también superior al medio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y FONDOS DOCUMENTALES

⁴ El volumen anual del trasvase de agua al embalse de Riudecanyes a realizar se halla comprendido entre los 2.267.642m³ y los 8.823.246 m³, siendo, en condiciones normales, de 5.763.552 m³.

AA.VV. *Informe Berkeley (Un estudio técnico del Plan Hidrológico Nacional español)*. Fundación de la Universidad Politécnica de Cartagena. Enero de 2003.

ACA (Agència Catalana de l'Aigua). "Estudi d'actualització de l'avaluació de recursos hídrics de les conques internes de Catalunya". Document de síntesi. Maig, 2002.

ACA (Agència Catalana de l'Aigua). "Aspectes ambientals i cabals de manteniment". Taula del Siurana. Antoni Munné (ACA). Diciembre, 2019.

CIMERA. "Estudio de caudales ecológicos en el río Ciurana en el término municipal de Cornudella de Montsant (Tarragona)". Febrero, 2019.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO. "Propuesta de proyecto de Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro". Documento resumen. Zaragoza. Junio, 2011.

FRANQUET, J. M. Teoría, diseño y construcción de terrazas-voladizo. Asociación de Ingenieros Agrónomos de Cataluña. Barcelona, 1995. 778 p.

FRANQUET, J. M. *El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) – Centro Asociado de Tortosa (Campus del NE). Colección CADUP-Estudios. Tortosa, 2009. 342 p.

GARCÍA, M. A. "El esquema provisional de Temas Importantes en la demarcación hidrográfica del Ebro y el caudal ecológico en el río Ciurana". Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. Marzo, 2020.

ISRAELSON, O.W. and WEST, F.L. "Water holding capacity of irrigated soils". Utah State Agricultural Experiment Station Bull 183: 1–24, 1922.

JEFATURA DEL ESTADO. Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. Publicada en el BOE nº: 161, de 6/7/2001.

JEFATURA DEL ESTADO. Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. Publicada en el BOE nº: 149, de 23 de junio. 11 p.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Publicado en el BOE nº: 176, de 24/07/2001.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. Publicado en el BOE nº: 162, de 7 de julio.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, Y MEDIO RURAL Y MARINO. Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica. BOE nº: 229, de 22 de septiembre de 2008. 111 p.

PARLAMENTO EUROPEO Y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. DOCE nº: 327, de 22 de diciembre de 2000. 73 p.

RICHARDS, L.A. and WEAVER, L.R. "Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension". Journal of Agricultural Research 69: 215–235, 1944.



RELACIÓN DE FIGURAS

Fig. 1. Localización general de la zona de estudio.

- Fig. 2. Localización de los usos agrícolas y urbanos del agua procedente del pantano de Riudecanyes.
- Fig. 3. Evolución anual del coeficiente de escorrentia (cuenca del Siurana).
- Fig. 4. Aportaciones en las cuencas del Siurana y Riudecanyes.
- Fig. 5. Caudales medios anuales en el período 1996-2019.
- Fig. 6. Ejemplar de madrilla (*Parachondrostoma miegii*). Fuente: ittiofauna.org.
- Fig. 7. Ejemplar de carpa (*Cyprinus carpio*). Fuente: portal.ct.gov.
- Fig. 8. Ejemplar de barbo colirrojo (*Barbus haasi*). Fuente: vertebradosibericos.org.
- Fig. 9. Ejemplar de trucha común (*Salmo trutta*). Fuente: paxala.com.
- Fig. 10. Caudales mínimos propuestos y su mediana.
- Fig. 11. Distribución mensual del caudal ecológico aguas abajo de los embalses de Siurana y Riudecanyes.
- Fig. 12. Diferentes propuestas alternativas (CHE y presente estudio) de distribución mensual de los caudales ecológicos del río Siurana (aguas abajo del azud de derivación del trasvase) y de la riera de Riudecanyes (aguas abajo del embalse del mismo nombre).
- Fig. 13. Fotografías del autor del Artículo junto al embalse de Siurana.
- Fig. 14. Fotografías del autor del Artículo junto al embalse de Riudecanyes.

RELACIÓN DE TABLAS

- Tabla 1. Valores del coeficiente λ para diferentes tipos de suelo de la cuenca.
- Tabla 2. Valores de precipitación bruta, escorrentia total, coeficiente de escorrentia de la cuenca del Siurana (captación Riudecanyes).
- Tabla 3. E18. Caudal de salida del embalse de Siurana (m^3/s).
- Tabla 4. Días muestreados por meses de cada año del período 1996-2020.
- Tabla 5. Caudales medios mensuales en orden ascendente.
- Tabla 6. Valores del coeficiente β .
- Tabla 7. Caudales mínimos según los diferentes criterios empleados.
- Tabla 8. Caudales mínimos considerados en orden ascendente.
- Tabla 9. Aportaciones y caudales mínimos mensuales.
- Tabla 10. Aportaciones totales anuales y medias mensuales.
- Tabla 11. Caudales ecológicos mensuales (l/s) según los diferentes criterios aplicados.
- Tabla 12. Determinación de las demandas anuales del embalse de Siurana para las 5 hipótesis de estudio consideradas.
- Tabla 13. Cálculo del balance hídrico anual del embalse de Siurana para las 5 hipótesis.
- Tabla 14. Fuentes secundarias de datos utilizados.