



## Trabajo Fin de Grado

Análisis hidrológico del embalse de Barasona  
(Huesca) durante el periodo 2000-2018.  
Hydrological analysis of the Barasona reservoir  
(Huesca) during the period 2000-2018.

Autor

Pablo Buetas Guardingo

Directora

Pilar Brufau García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2018





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. Pablo Buetas Guardingo

con nº de DNI 18066121-N en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado en Ingeniería Mecánica (Título del Trabajo)

Análisis hidrológico del embalse de Barasona (Huesca) durante el periodo  
2000-2018

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 29 de Agosto del 2018

Fdo: Pablo Buetas Guardingo



## Resumen

En este trabajo se recoge el análisis hidrológico que se ha llevado a cabo en el embalse de Barasona (Huesca) durante el periodo 2000-2018 enfocándolo a conocer la respuesta de la capacidad de este embalse frente a factores meteorológicos (precipitación y temperatura), demanda de agua y producción hidroeléctrica. El objetivo fundamental se centra en conseguir un buen estudio empírico de las observaciones realizadas durante los últimos años para posteriormente realizar una predicción de los efectos del Cambio Global sobre la capacidad de almacenamiento de este embalse. Para ello se ha contado con los datos diarios de caudal y altura de agua durante el periodo 2000-2015 de los ríos Ésera e Isábena que son los que nutren al embalse, cedidos por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). También con los datos diarios de temperaturas, precipitaciones, entradas y salidas de agua y producción hidroeléctrica del embalse, cedidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) durante el periodo 2000-2018. En primer lugar se ha realizado un análisis anual de temperaturas, precipitaciones, caudales y alturas de agua en los ríos y en el embalse, demandas destinadas al canal de Aragón y Cataluña, río y central hidroeléctrica, así como producción energética y capacidad de almacenamiento del embalse. En segundo lugar se ha realizado un estudio de las mismas variables durante todo el periodo tomando como dato el valor medio anual para poder analizar la tendencia anual a lo largo de todo el periodo de estudio. Posteriormente se han calculado algunos parámetros específicos de caracterización del embalse como son el déficit, la garantía volumétrica de capacidad de almacenamiento, así como el índice de escasez en épocas de sequía; por ser estos periodos complicados los que podrían producirse con más asiduidad en un contexto de Cambio Global.



## Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Objetivos.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>3. Análisis hidrológico de los datos .....</b>                                     | <b>4</b>  |
| <b>3.1 Análisis individual .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>3.2 Análisis de tendencia evolutiva de los datos en el periodo 2000-2018 .....</b> | <b>12</b> |
| <b>4. Parámetros relevantes .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>4.1 Déficit .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>4.2 Garantía volumétrica .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>4.3 Índice de escasez .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>5. Conclusiones .....</b>  | <b>19</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>  | <b>21</b> |

## Listado de Anexos

Anexo I. Descripción de la zona de estudio

Anexo II. Análisis hidrológico de los datos

Anexo III. Cálculo de parámetros relevantes

Anexo IV. Tabla de resultados

## Índice de figuras y tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Datos de demanda y recursos disponibles en los distintos países de la UE .....   | 2  |
| Figura 1. Caudal registrado en la estación de aforo de Campo a lo largo del año 2014 .....  | 5  |
| Figura 2. Caudal registrado en la estación de aforo de Graus a lo largo del año 2014 .....  | 5  |
| Figura 3. Evolución de las temperaturas mínima, media y máxima y precipitación caída<br>mensuales en el embalse de Barasona durante el año 2016 .....                     | 7  |
| Figura 4. Evolución de la aportación de agua al embalse y diferencia entre valores<br>registrados y obtenidos mensualmente en el embalse de Barasona en el año 2014 ..... | 8  |
| Figura 5. Evolución de la salida de caudal del embalse por diferentes conductos a lo largo<br>del mes de junio del año 2010 .....   | 9  |
| Figura 6. Evolución temporal mensual de caudales de entrada y salida y volumen de agua<br>almacenado en el embalse a lo largo del año 2008 .....                          | 11 |
| Figura 7. Evolución del caudal de entrada al embalse de Barasona durante el periodo 2000-<br>2015 .....   | 12 |
| Figura 8. Temperaturas mínima, media y máxima junto a precipitaciones en el periodo<br>2000-2017 en el embalse de Barasona .....  | 13 |
| Figura 9. Porcentajes medios de salida de agua del embalse en el periodo 2000-2018.....   | 14 |
| Figura 10. Valores medios de agua destinada al Canal y al río en el periodo 2000-2018 ....  | 14 |
| Figura 11. Valor medio de entradas, salidas y volumen de agua almacenado en el embalse<br>durante el periodo 2000-2018 .....  | 15 |
| Figura 12. Garantía volumétrica obtenida en el embalse de Barasona a lo largo del periodo<br>2000-2018 .....  | 17 |
| Tabla 2. Índice de escasez anual en el periodo 2000-2018 .....  | 18 |

## 1. Introducción

Los embalses son grandes acumulaciones de agua utilizadas con distintos fines. Centrándonos en el embalse de Barasona, la finalidad de éste consiste en el almacenamiento de agua durante las épocas en la que los ríos transportan un mayor caudal, para, más adelante, ser aprovechada para la producción de energía hidroeléctrica, abastecimiento del canal de riego de Aragón y Cataluña, así como los distintos usos lúdicos que se le dan al embalse.

España es uno de los países, dentro de la Unión Europea, en los que la necesidad de regulación es vital para aprovechar los recursos naturales. Sin esta regulación, solamente un 10% de las demandas podrían ser cubiertas, un valor muy bajo si es comparado con el resto de los países de Europa, en los que este porcentaje ronda el 40%. La tabla 1 muestra cómo España lidera el ranking de ratio entre demandas y recursos de países de la Unión. Los recursos per cápita en nuestro país son de 2829 m<sup>3</sup>/hab/año, mientras que en la UE ascienden hasta los 3199 m<sup>3</sup>/hab/año. La diferencia fundamental entre los valores de ratio radica en las demandas. España es el país de la UE con mayor demanda per cápita, 530 m<sup>3</sup>/hab/año, muy superior a los 207 m<sup>3</sup>/hab/año de la UE.

Estas elevadas demanda de agua, junto con la irregularidad de los recursos naturales, establecen un marco en el que la gestión de los embalses es un factor determinante a la hora de aprovechar los recursos hídricos disponibles.

El embalse de Barasona está situado en la comarca de la Ribagorza, concretamente en el municipio de Graus, y recoge el agua de los dos ríos principales que conforman la cuenca, el Ésera y el Isábena. La naturaleza de éstos determinará la forma de gestionar los recursos hídricos disponibles, así como el aprovechamiento de los caudales de entrada, provenientes de ambos. Una buena gestión de estos recursos es crucial para ofrecer el mejor servicio y sacar el máximo rendimiento al agua acumulada.

En un contexto de Cambio Global, la variación de los caudales de los ríos, diferenciando entre épocas de mayor o menor afluencia, tendrán una repercusión más que notable en la gestión del embalse, con las consecuencias que esto deriva tanto en el propio embalse, como aguas abajo. Además, la toma de decisiones para anteponerse a un futuro incierto en el que las condiciones pueden cambiar dando escenarios extremos, véase fuertes sequías o inundaciones, complica aún más el reto de cumplir con todos los requerimientos de agua actuales.

| País            | Población<br>(habs) | Recursos<br>renovables<br>(hm <sup>3</sup> /año) | Demanda<br>consuntiva<br>(hm <sup>3</sup> /hab/ año) | Recursos<br>cápita<br>(hm <sup>3</sup> /hab/ año) | per<br>cápita | Demandas<br>per<br>cápita<br>(hm <sup>3</sup> /hab/ año) | Ratio<br>demanda/<br>recursos |
|-----------------|---------------------|--|--|---|---------------|--|-------------------------------|
| Alemania        | 82400000            | 164000   | 5857   | 1990  | 71            |  | 3,6 %                         |
| Austria         | 7968000             | 84000  | 460  | 10542   | 58            |  | 0,5 %                         |
| Bélgica         | 10141000            | 16000  | 504  | 1578  | 50            |  | 3,2 %                         |
| Dinamarca       | 5225000             | 6000   | 414  | 1148  | 79            |  | 6,9 %                         |
| España          | 39238000            | 111000   | 20784  | 2829  | 530           |  | 18,7 %                        |
| Finlandia       | 5115000             | 110000   | 457  | 31505   | 89            |  | 0,4 %                         |
| Francia         | 58251000            | 188000   | 7204   | 3227  | 124           |  | 3,8 %                         |
| Grecia          | 10480000            | 60000  | 3502   | 5725  | 334           |  | 5,8 %                         |
| Irlanda         | 3575000             | 52000  | 303  | 14545   | 85            |  | 0,6 %                         |
| Italia          | 56126000            | 175000   | 29356  | 3118  | 523           |  | 16,8 %                        |
| Países Bajos    | 15534000            | 91000  | 957  | 5858  | 62            |  | 1,1 %                         |
| Portugal        | 9915000             | 66000  | 3362   | 6657  | 339           |  | 5,1 %                         |
| Reino Unido     | 58204000            | 145000   | 2974   | 2491  | 51            |  | 2,1 %                         |
| Suecia          | 8852000             | 174000   | 628  | 19657   | 71            |  | 0,4 %                         |
| <b>TOTAL UE</b> | <b>371024000</b>    | <b>1187000</b>                                   | <b>76762</b>   | <b>3199</b>                                       | <b>207</b>    |  | <b>6,5 %</b>                  |

Tabla 1: Datos de demanda y recursos disponibles en los distintos países de la UE

## 2. Objetivos

El objetivo del estudio que se presenta en esta memoria es conocer cuáles son los recursos con los que cuenta el pantano y conocer la finalidad de éstos, para así poder comprobar que se está realizando una buena gestión del recurso y si esta gestión satisface todas las demandas que derivan de este embalse.

Se considera que existe una buena gestión del embalse cuando a partir de los flujos de agua provenientes de los dos ríos principales de la cuenca, se consigue la máxima producción de energía hidroeléctrica, así como el abastecimiento del Canal de riego de Aragón y Cataluña.

Ligado a esta gestión actual del agua del embalse, se encuentra la problemática de los períodos de sequía a los que se dedicará un atención detallada de cara a anticiparnos a los cambios que se puedan producir en el contexto de un Cambio Global, donde estos períodos pueden ser más abundantes; así como al procedimiento de gestión de situaciones de avenida, también más frecuentes en el futuro; de forma que podamos comprobar si el embalse podría gestionar ambas de una forma eficiente, sin sufrir repercusiones en su capacidad de almacenamiento.

Como resumen podemos concluir que, los objetivos finales que se plantean en este TFG son los siguientes:

- Realizar un análisis hidrológico de los datos recogidos para caracterizar el pantano y conocer tanto las entradas como salidas que derivan del mismo.
- Conocer la respuesta del pantano ante fenómenos de especial importancia, como bien pueden ser las avenidas, o los períodos de elevada escasez.
- Estudiar el nivel de servicio del embalse, a partir de los parámetros calculados.

Además de estos objetivos señalados, se quiere dar una visión de la problemática del Cambio Global y de cómo este puede afectar a la gestión del pantano, dado el gran impacto que tiene en los recursos de los cuales se nutre el embalse.

### 3. Análisis hidrológico de los datos

#### 3.1 Análisis individual

En esta memoria principal del TFG se va a exponer el conjunto de directrices principales a las que se ha llegado, después de analizar los datos referentes al periodo comprendido entre el año 2000 y el 2018. Este análisis individual, realizado cada año por separado, se presenta en el Anexo II, así como una evaluación del periodo completo, que se encuentra al final del mismo.

La metodología utilizada para la realización de este análisis se ha basado en primer lugar, en el seguimiento de los flujos de agua, comenzando por el río Ésera. En él se han evaluado los datos de caudal y nivel de agua recogidos diariamente de las tres estaciones de aforo localizadas durante su recorrido.

En la primera estación, situada en Eriste, los valores medidos se encuentran próximos a cero durante la mayor parte de los años. Solamente en dos épocas concretas éstos llegaban a ascender, en días puntuales, y tomaban valores significativos. De esta primera estación solamente se podría obtener una primera aproximación de cuáles van a ser las jornadas en las que estará presente el riesgo de sufrir una avenida.

De la segunda estación de aforo ya se van obteniendo valores de caudal que se acercan a los que finalmente conformarán las entradas al pantano. A su paso por Campo, los valores tanto de caudal como de altura de agua han aumentado. En las gráficas realizadas, como la que se representa en la figura 1, se aprecian las dos épocas de mayores aportes, la primera está situada durante finales de la primavera y la segunda durante el otoño. Este comportamiento se repite en muchos de los años analizados.

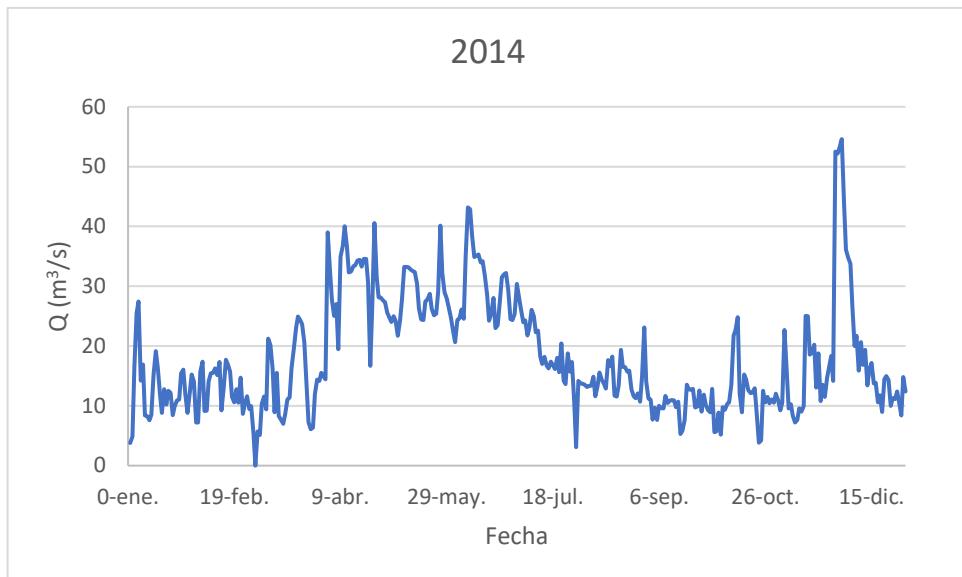


Figura 1: Caudal registrado en la estación de aforo de Campo a lo largo del año 2014.

Con todo esto se llega a la conclusión de que el río Ésera presenta un régimen nival de transición caracterizado por dos máximos y dos mínimos (Marín, 1981).

En la última estación situada en el transcurso del río los valores medidos suelen ser muy similares a los que se recogen en Campo. En la figura 2 se muestra el caudal medido, por ejemplo, en la estación de Graus durante el mismo año 2014.

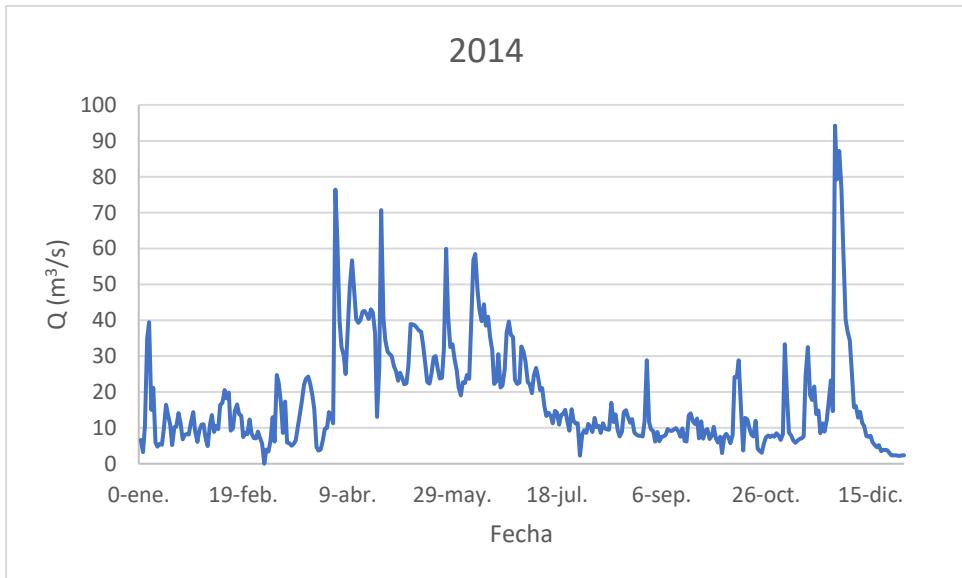


Figura 2: Caudal registrado en la estación de aforo de Graus durante el año 2014.

Estas medidas de caudal en el río Ésera, junto con las del río Isábena, conformarán las entradas de caudal al pantano.

El valor máximo de caudal que suele aparecer en los datos registrados en las estaciones de aforo durante la época primaveral es fruto del deshielo nival que tiene lugar en las cumbres del Pirineo; y el segundo valor máximo de caudal suele deberse las abundantes precipitaciones que se recogen durante el otoño. Durante la época del deshielo, tanto el caudal como el nivel de agua de los ríos sufren grandes fluctuaciones. El aumento de los aportes durante esta época será aprovechado para la recuperación del volumen perdido en el embalse, como se verá más adelante. La segunda época de máximos tiene una duración más corta y, puesto que se da a raíz de las precipitaciones, suele estar concentrada en días muy concretos en los que se alcanzan elevados valores de caudal.

Una vez evaluado el río Ésera, se ha realizado el mismo análisis sobre los datos recogidos del río Isábena, en la estación situada en Capella.

Los valores recogidos, en comparación con los observados en el río Ésera, son menores, pero se observa que ambos comparten la misma naturaleza. Puesto que forman parte de la misma cuenca, ambos se nutren del deshielo nival y de las precipitaciones abundantes en períodos cortos, dando lugar a las dos épocas de máximos anteriormente citadas. El resto del año, los valores son menores y conforman las dos épocas de mínimos. Estos últimos serán los que desempeñen un papel más importante a la hora de gestionar los recursos hídricos en períodos de sequía, que, normalmente, se suelen dar en estas épocas de mínimos caudales.

El caudal que constituye la entrada de agua al pantano ha sido calculado en primera instancia como la suma de los caudales provenientes de ambos ríos. Para dar una mayor fiabilidad al cálculo realizado, los valores a sumar han sido los de las dos estaciones más próximas a la entrada del embalse, es decir los de la estación de Graus y Capella, para los ríos Ésera e Isábena respectivamente.

Los valores obtenidos guardan cierta similitud con los observados en Graus, puesto que el primer río evaluado, el Ésera, toma mucha más importancia en la cuenca que su afluente.

Los caudales diarios de entrada al embalse han sido representados gráficamente en cada uno de los análisis anuales (ver Anexo II).

Una vez analizados los caudales de entrada al embalse, el análisis se centra en los datos recogidos en las propias instalaciones del mismo. Los parámetros seleccionados para el análisis han sido: temperaturas y precipitaciones; caudales de entradas y salidas, diferenciando entre los usos que se le dan a estas últimas; reparto de caudales entre el Canal de Aragón y Cataluña y el río Ésera, aguas abajo; producción de energía hidroeléctrica; y por último se ha realizado una comparación entre el volumen embalsado junto con las entradas y salidas registradas. En esta serie de datos se han realizado ciertas operaciones para adecuarlas y mejorar su compresión.

Comenzando por las temperaturas, se observa a lo largo de todo el periodo, que los inviernos son fríos, alcanzando con frecuencia valores de temperaturas por debajo de los 0ºC. Conforme avanza el año, los valores de máximas, mínimas, como de temperaturas medias van aumentando, hasta llegar el verano. Es en dicha época cuando se registran los máximos valores, en torno a los 30ºC.

En las precipitaciones registradas en el embalse de Barasona se aprecia una gran oscilación de este recurso, como podemos ver en la figura 3 del análisis realizado en el año 2016, destacan dos épocas claramente diferenciadas. La primera tiene lugar durante los meses de verano cuando se registran los valores mínimos de precipitación. Al llegar el otoño se revierte esta situación y se aprecia la influencia de las precipitaciones durante esta estación.

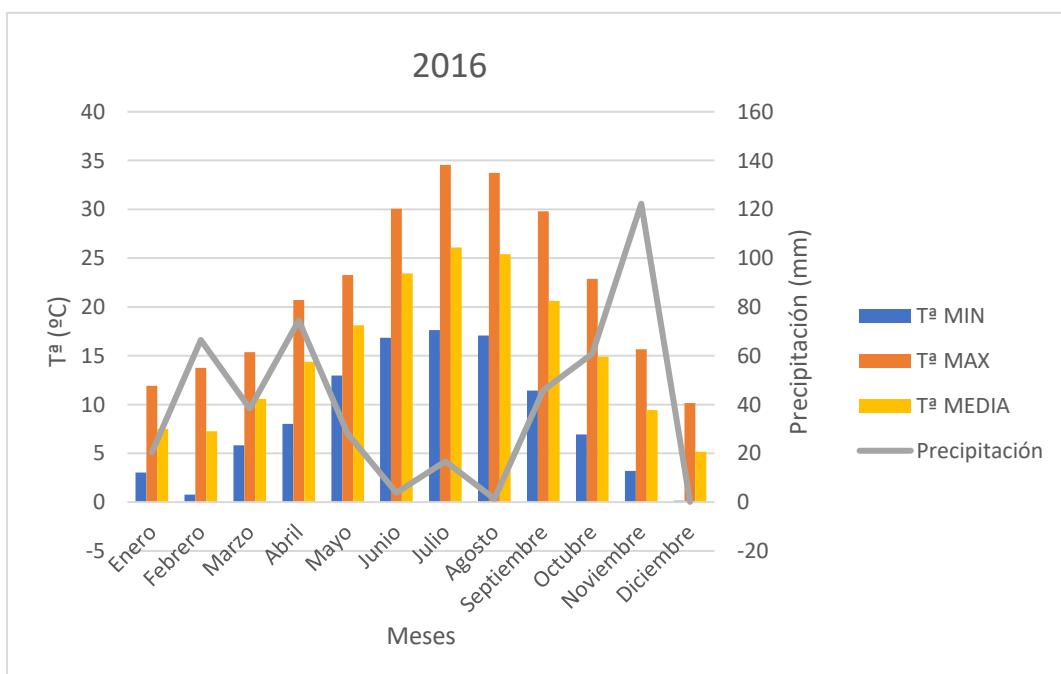


Figura 3: Evolución de las temperaturas mínima, media y máxima y precipitación caída mensuales en el embalse de Barasona durante el año 2016.

En cuanto a las entradas de caudal de agua registradas en el embalse, se ha realizado un cálculo entre los caudales registrados en las estaciones de aforo por ambos ríos, y los que conforman las entradas al pantano medidas en el mismo, para tener una visión del caudal que se pierde entre ambas mediciones. La fórmula seguida es la siguiente:

$$\text{Pérdidas} = \text{Entrada} - \text{Confluencia}$$

En ella, el término confluencia se refiere al caudal conjunto de ambos ríos, calculado como la suma de los caudales que circulan por las estaciones de Graus y Capella en cada uno de los días de estudio.

Como se muestra en la figura 4, el año comienza con valores escasos de aportaciones mensuales. Estos aumentan gracias al deshielo nival, para volver a descender en verano. A finales de año, y gracias a las precipitaciones otoñales, las entradas vuelven a aumentar.

Vemos que el parecido entre las entradas de caudal registradas en el embalse, y el valor de caudal de ambos ríos (confluencia) toman valores semejantes. Las pérdidas que aparecen se deben a usos del agua, como pueden ser usos industriales o de abastecimiento de agua, antes de su medición en el embalse. Aunque se muestra como ejemplo el análisis del año 2014, el comportamiento es similar el resto de los años del periodo de estudio y en el Anexo II se han señalado los comportamientos excepcionales observados.

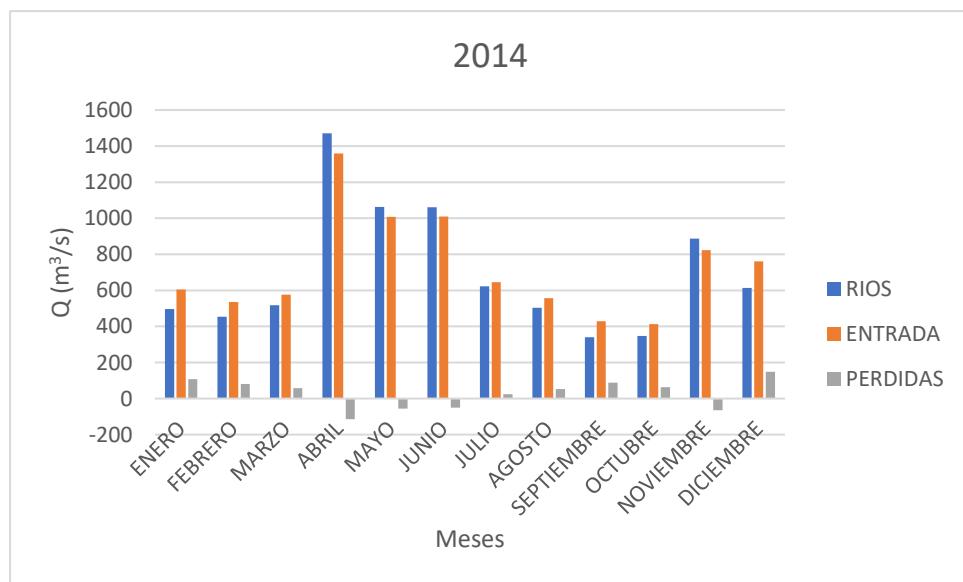


Figura 4: Evolución de la aportación de agua al embalse y diferencia entre valores registrados y obtenidos mensualmente en el embalse de Barasona en el año 2014.

Además de las entradas de caudal, se tienen medidas de las salidas que se realizan en el embalse. El uso mayoritario del agua abandona el embalse con destino a la Central se San José, para la producción de energía hidroeléctrica. Otras salidas son los desagües de fondo, los aliviaderos y por último las fugas, drenajes, etc., englobados en el concepto “Otros”.

Estas salidas guardan cierto parecido con las entradas registradas, ya que se busca en todo momento la mayor adecuación de unos y de otras.

A su vez, durante el análisis individual anual (Anexo II) se han evaluado las decisiones que se toman cuando aparece una situación de riesgo, como puede ser una avenida. De este tipo de acciones se derivan las salidas que fluyen por los aliviaderos y los desagües de fondo.

El protocolo básico que se ha seguido antes estas situaciones según los registros contempla dos situaciones. Si el embalse se encuentra vacío, el aumento repentino del caudal de entrada se aprovecha para la recuperación del almacenamiento de agua en el embalse. En cambio, si el embalse está próximo a su máximo, el agua sobrante se desaloja por los aliviaderos y los desagües de fondo, para evitar un desbordamiento que tendría consecuencias catastróficas para la presa. En la figura 5 se muestran los caudales de salida durante el mes de junio del año 2010 como ejemplo. Con este desembalse de agua se revirtió la situación correspondiente al segundo caso puesto que en una misma jornada llegó a fluir un caudal de 171 m<sup>3</sup>/s.

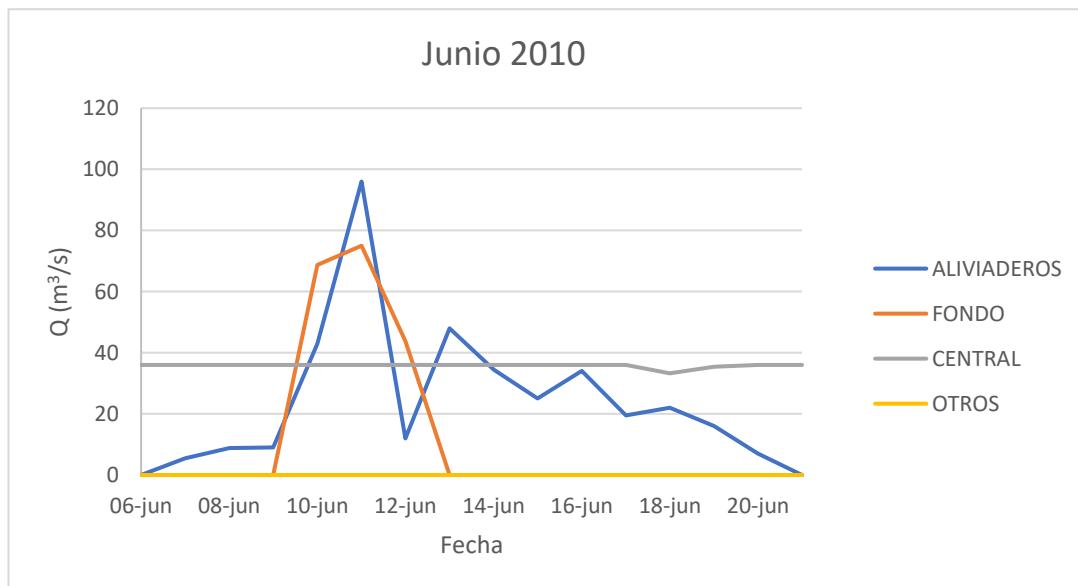


Figura 5: Evolución de la salida de caudal del embalse por diferentes conductos a lo largo del mes de junio del año 2010.

Una vez el agua ha abandonado el embalse y ha sido aprovechada para la producción de energía hidroeléctrica, se realiza el encauzamiento para el Canal de Aragón y Cataluña, obteniendo una distinción entre el agua que se deja fluir aguas abajo de nuevo por el río Ésera y la que es encauzada por el canal.

A lo largo del estudio se ha observado que esta distinción sigue un esquema claro. A comienzos de un año cualquiera, la mayor parte del caudal que abandona el embalse se deja fluir por el río. Con la llegada de la primavera, el caudal encauzado por el canal va aumentando progresivamente hasta alcanzar en verano la máxima diferencia entre ambos. Una vez termina la estación y comienza el otoño, ambos caudales se van igualando hasta terminar el año con valores similares a los de comienzo del mismo.

La explicación de este patrón radica en que el uso mayoritario que se le da al agua encauzada es el de abastecimiento de las tierras de regadío. Es por ello, que el máximo requerimiento de agua se da durante los meses de verano.

A lo largo de los años han existido excepciones, épocas en las que el caudal del río era mayor que el destinado al canal. Esto se daba en los meses en los que aparecía alguna avenida, como hemos nombrado. El excedente de agua era evacuado por los aliviaderos y los desagües de fondo, por lo que dicha cantidad de agua era incorporada directamente al río, sin posibilidad de ser encauzada.

Como hemos nombrado, la mayor parte del agua que abandona el embalse es aprovechada para la producción de energía hidroeléctrica. Esta producción depende de las salidas de caudal del embalse, por lo que ambos valores están fuertemente ligados. En los períodos en los que las salidas de caudal son máximas, la producción lo es también y durante los meses de verano, cuando existe una escasez de agua, la producción de energía se resiente, tomando valores mínimos, al igual que las salidas.

Por último, en cada uno de los análisis anuales se evalúa el volumen de agua almacenada en el embalse, junto con las entradas y salidas de caudales registradas.

Los datos recogidos durante el año 2008, y que se muestran en la figura 6, reflejan el comportamiento general del embalse a lo largo del periodo.

El año suele comenzar con un escaso volumen de agua almacenado. En este caso fue de 26 Hm<sup>3</sup>. Aprovechando la primera época de máximas aportaciones, en la que las entradas de caudal de agua superan a las salidas, se comienza a almacenar agua en el embalse. Con la llegada del verano, las entradas disminuyen, las salidas hacen lo propio, pero a un menor ritmo, ya que se utiliza el agua almacenada durante la primavera para aprovecharla durante esta época.

Al finalizar el verano, el pantano se suele encontrar en su nivel mínimo, y con la llegada de la segunda época de máximos se procura recuperar cierta cantidad de agua embalsada, para poder hacer frente con ella al tramo final de año y dejar el embalse con un volumen almacenado similar al de comienzos de año.

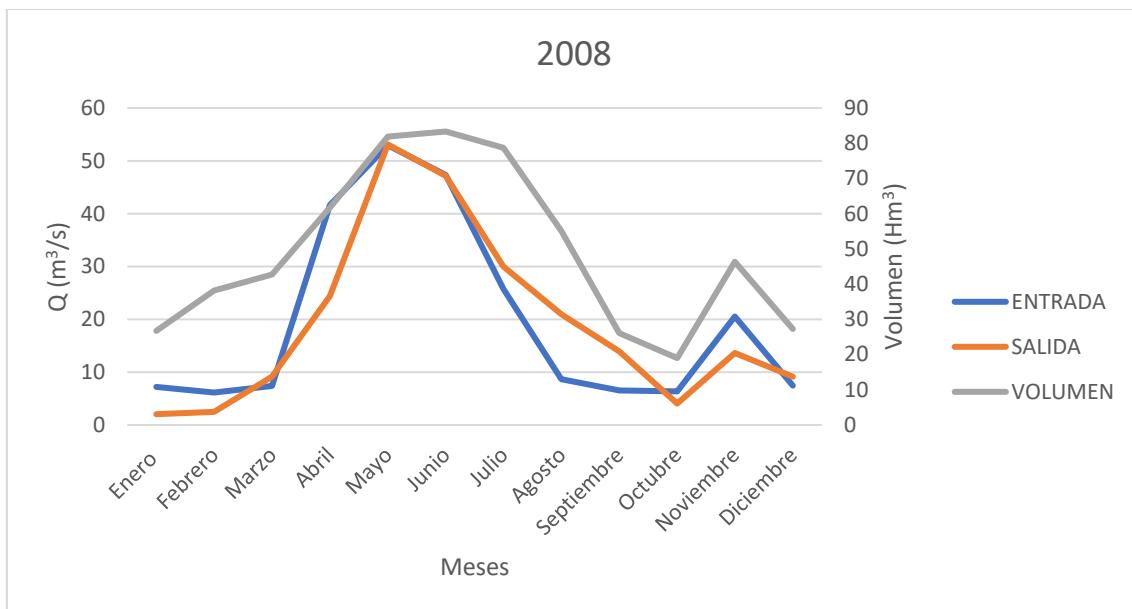


Figura 6: Evolución temporal mensual de caudales de entrada y salida y volumen de agua almacenada en el embalse a lo largo del año 2008.

Este es un ciclo que se repite anualmente. La diferencia entre los distintos años radica en fenómenos propios del año de estudio. Desde el año 2000, a lo largo de los años evaluados, se han tenido años de abundancia en los que las salidas por los aliviaderos fueron mayores, desaprovechando grandes cantidades de agua que, en años más secos, hubieran hecho falta para dar un mejor servicio.

### 3.2 Análisis de tendencia evolutiva de los datos en el periodo 2000-2018

Una vez realizado el análisis individual, se va a ver la evolución que han tenido los datos a lo largo de los años de estudio, para ver si se aprecia alguna tendencia en el comportamiento, y así poder predecir un futuro escenario.

Comenzando por el caudal de entrada al embalse, calculado a partir de la suma de ambos ríos, no se aprecia una tendencia clara en su comportamiento. La alternancia de años en los que los aportes fueron elevados, como es el caso del 2003 o del 2013, y de otros en los que los valores fueron menores, 2005, dificulta la posible anticipación del panorama con un año de antelación.

Como hemos nombrado anteriormente, esta irregularidad de los recursos naturales dota de una mayor importancia, y dificultad, a los procesos de gestión de los recursos hídricos.

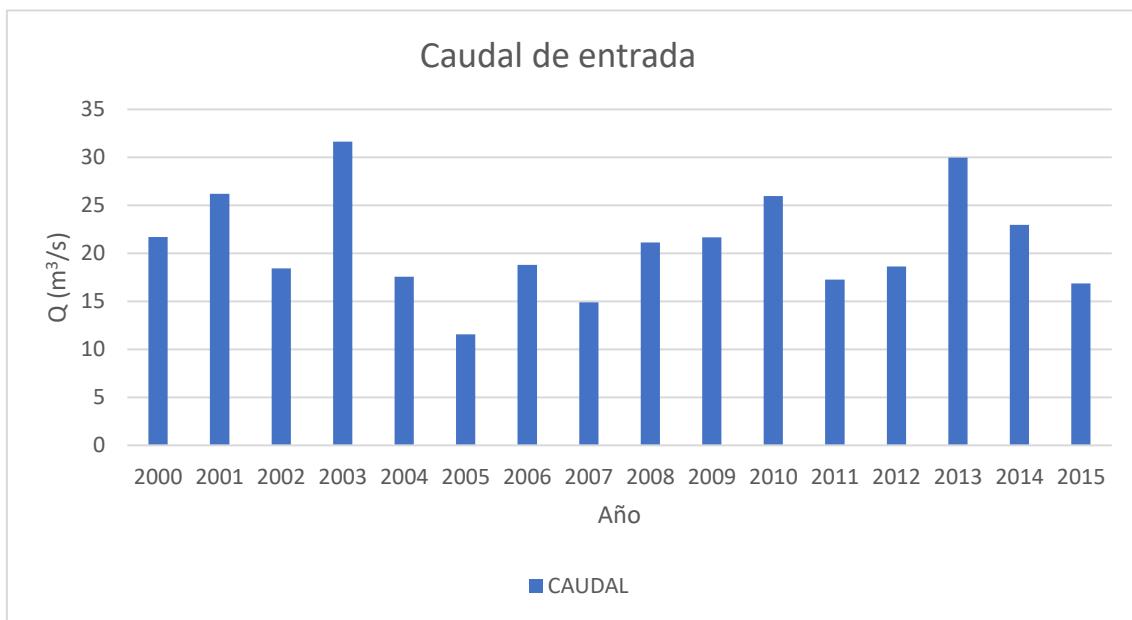


Figura 7: Evolución del caudal de entrada al embalse de Barasona durante el periodo 2000-2015.

Con las precipitaciones recogidas en las instalaciones del embalse ocurre un fenómeno parecido. En la figura 8 se aprecia una alternancia de años húmedos y secos. Podemos ver el hecho de que un año en el que se recogieron numerosas precipitaciones, coincide con un año de abundantes caudales de entrada, aunque la cuantía de estas precipitaciones en Graus es de magnitud mucho menor a los caudales de entrada. Esta coincidencia temporal es fruto de la naturaleza de los ríos; y las precipitaciones ocurridas en Graus están ligadas a las caídas más al norte, que son las causantes de los caudales de entrada.

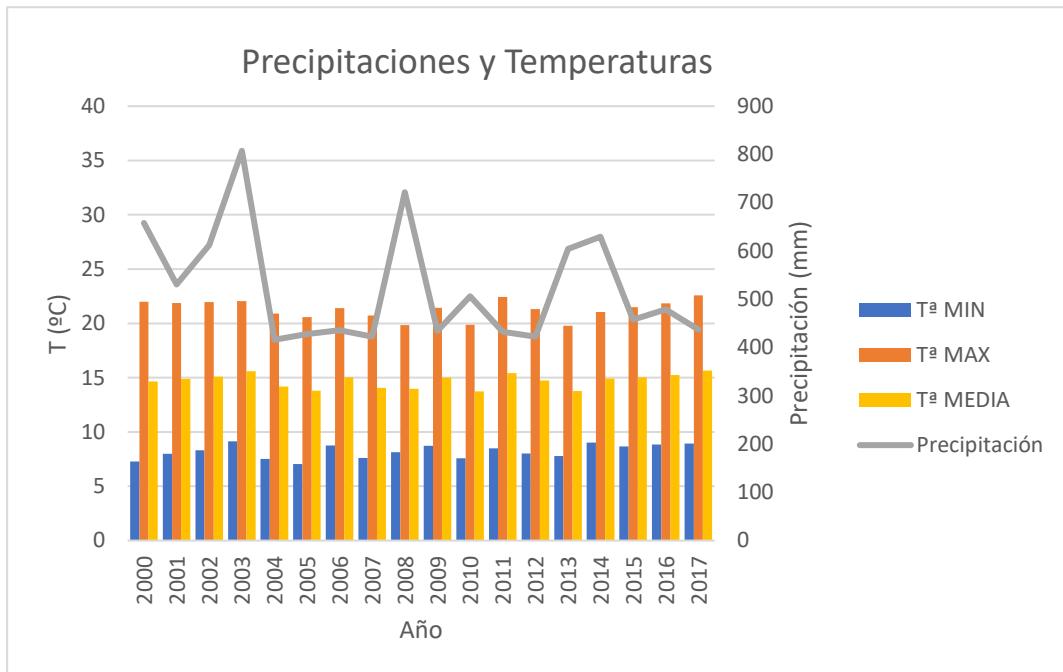


Figura 8: Temperatura mínima, media y máxima junto a precipitaciones en el período 2000-2017 en el embalse de Barasona.

Con las temperaturas reflejadas en la figura 8, se puede comenzar a ver un efecto de este Cambio Global y como desde el año 2013, las temperaturas han ido ascendiendo paulatinamente hasta situarse en unos valores que están dentro de los máximos observados en todo el período de estudio, aunque, es cierto que, haría falta un rango temporal más elevado para observar mejor este fenómeno.

Las salidas efectuadas en el embalse siguen un camino paralelo a las entradas, puesto que como hemos nombrado y veremos en los cálculos, se busca obtener cierta coincidencia de unas y otras, en la medida de lo posible.

En el total de años analizados, la salida mayoritaria es la destinada a la central para la producción de energía hidroeléctrica con un 92% del total desembalsado. Esto nos da una idea muy clara de las prioridades del embalse y del uso que se le da al agua.

La segunda salida con mayor repercusión son los aliviaderos, con un porcentaje del 5% del total, mucho menor que la salida principal, puesto que el agua que fluye por éstos no se aprovecha ni para la producción, ni es encauzada posteriormente para su utilización en el Canal de Aragón y Cataluña.

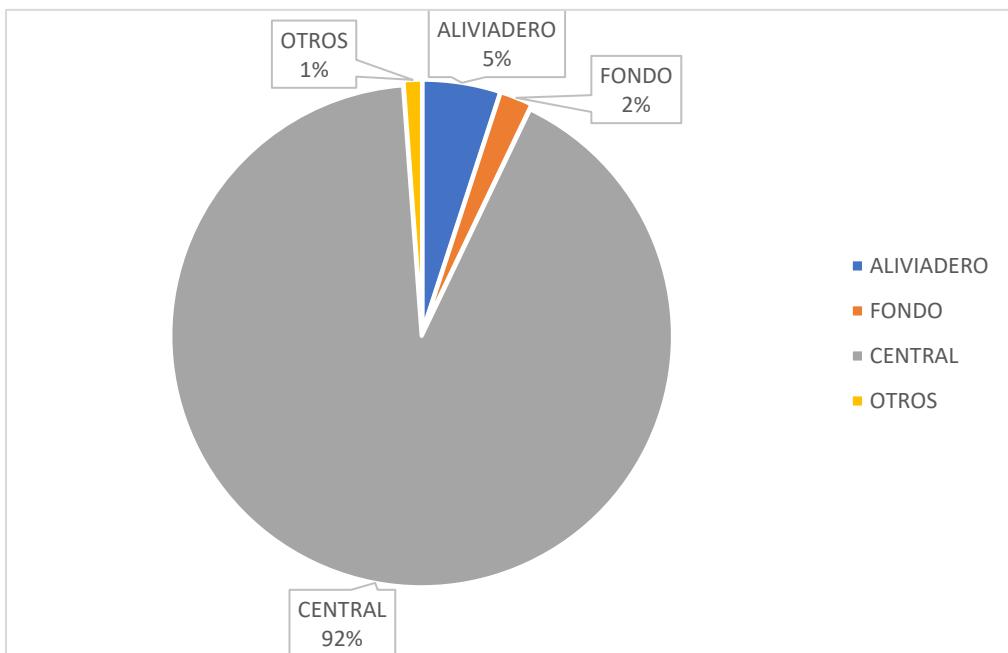


Figura 9: Porcentajes medios de salida de agua del embalse en el periodo 2000-2018.

En el reparto posterior entre los caudales destinados al canal y al río, en la mayoría de los años, es el canal quien toma más importancia. Los años en los que ambos valores estuvieron igualados coinciden con los de mayores entradas registradas, por lo que unas entradas excesivas derivan en un mayor desaprovechamiento del agua, al darse la necesidad de evacuar grandes caudales sin opción a ser aprovechados.

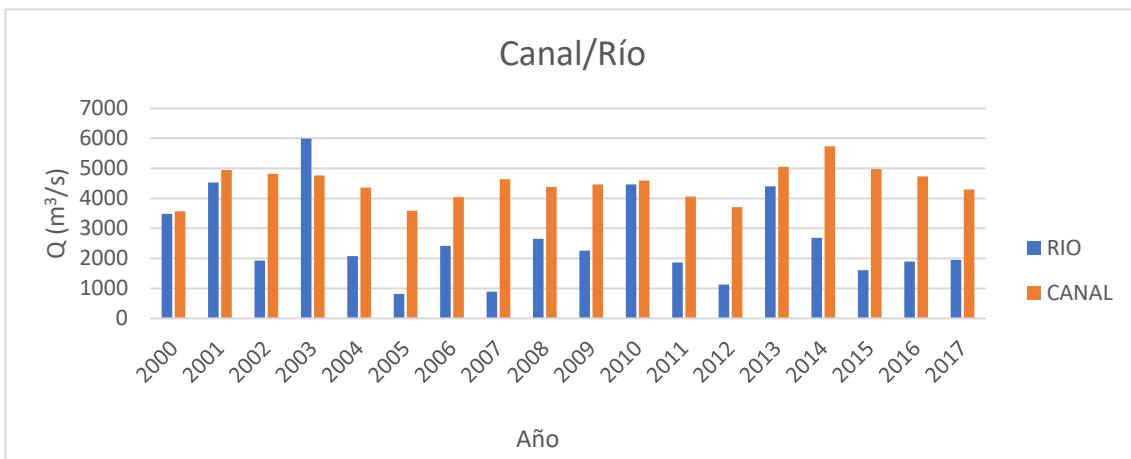


Figura 10: Valores medios de agua destinada al canal y al río en el periodo 2000-2018.

Con la producción de energía lo que ocurre es que, al depender de las salidas, los años de mayores aportes son los de mayor producción; ya que, aunque se de un mayor desaprovechamiento del agua, este fenómeno ocurre cuando ya se están explotando al máximo los recursos disponibles. En años de abundantes caudales de entrada la producción es máxima; en cambio, los años secos en los que las entradas escasean, los valores de potencia generados se resienten dada la poca disponibilidad de agua.

Para finalizar, la figura 11 nos muestra el volumen de agua almacenada en el embalse, junto a las entradas y salidas del mismo.

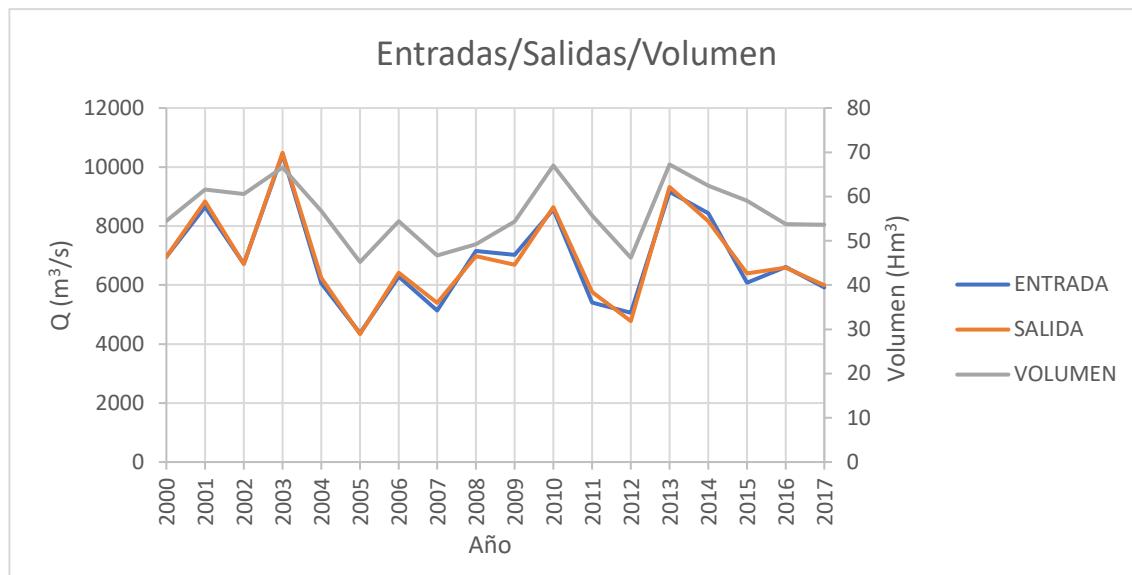


Figura 11: Valor medio de entradas, salidas y volumen de agua almacenada en el embalse en el periodo 2000-2018.

Los valores de entradas y salidas anuales son parejos en todo momento, dada la intención de adecuar ambos flujos de agua. Las tres líneas siguen un itinerario similar. La alternancia de años secos en los que el volumen embalsado disminuye, debido a la utilización de estas reservas para ofrecer el mejor servicio posible, es contrarrestada por años en los que unas entradas abundantes son utilizadas para recuperar la cantidad de agua perdida y, además, las abundantes salidas generan una mayor riqueza.

## 4. Parámetros relevantes

Los parámetros seleccionados en este TFG son tres: el déficit, la garantía volumétrica de capacidad de almacenamiento, así como el índice de escasez. Todos ellos se basan en la severidad de los fallos y nos darán otra visión de cómo es la relación entre las entradas y las salidas.

### 4.1 Déficit

Comenzamos por el déficit, cuya fórmula general es la siguiente:

$$d_i = D_i - A_i$$

Con  $d_i$  = Déficit del mes i;  $D_i$  = Demandas en el mes i; y  $A_i$  = Aportaciones del mes i

En este caso se ha realizado una modificación para identificar de una manera más sencilla los periodos en los que se incurrió en un déficit de agua, o periodos de sequía.

$$d_i = \begin{cases} D_i - A_i & \text{si } A_i > D_i \\ 0 & \text{si } A_i \leq D_i \end{cases}$$

Los resultados, reflejados en el Anexo IV, nos muestran una localización mayoritaria de dichos periodos a lo largo de los meses de verano. La causa de esto son las escasas entradas registradas durante dichos periodos, además el estudio individual de los años reflejaba dicho comportamiento, que se traducía en un descenso del volumen de agua almacenado.

Los valores de déficit anual calculado muestran una alternancia entre años de superávit de recursos y otros de sequía, aunque el déficit acumulado durante todo el periodo de estudio muestra una pérdida de 338,33 Hm<sup>3</sup>, a lo largo de los 18 años.

## 4.2 Garantía volumétrica

Este concepto nos muestra la fracción de demanda toral que se satisface durante un tiempo  $T$ , siguiendo la siguiente fórmula.

$$G_v = 1 - \frac{\int_{S < D} (D - S) dt}{\int_0^T D dt}$$

Los datos representados en la figura 12 muestran una gran adecuación de las entradas y las salidas, lo que se refleja en la alta concentración de puntos alrededor de la unidad.

Con esto se ratifica la premisa nombrada anteriormente, en la que afirmábamos la búsqueda de la mayor adecuación posible entre las entradas y las salidas del pantano, para la realización de una buena gestión de los recursos hídricos.

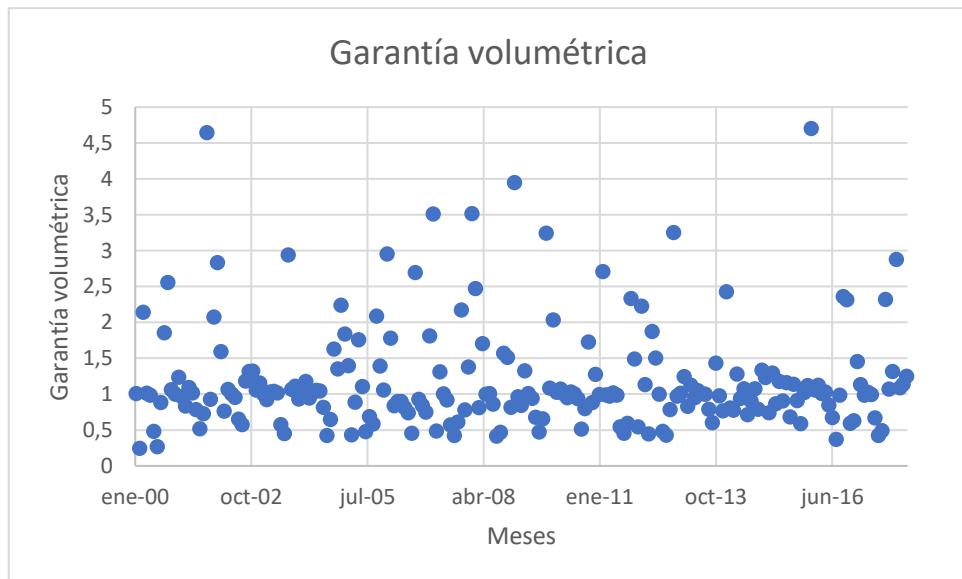


Figura 12: Garantía volumétrica obtenida en el embalse de Barasona a lo largo del periodo 2000-2018.

La búsqueda de dicha similitud entre ambos caudales no siempre es posible y es en los períodos de sequía, observados anteriormente, cuando una buena gestión de los recursos hídricos disponibles toma valor.

### 4.3 Índice de escasez

Por último, se ha analizado el índice de escasez, englobando al embalse de Barasona en una de las cuatro categorías reflejadas en la tabla 2, sacada del Anexo III.

$$e = \frac{100}{N} \sum_L^N \left( \frac{\text{Déficit Anual}}{\text{Demanda Anual}} \right)^2$$

El resultado obtenido, una vez aplicada la fórmula anterior nos indica que la mayoría de los años en los que hubo escasez esta fue de carácter bajo, lo que no incurre en un riesgo importante. En cambio, en valores por encima del 20%, es necesario realizar un mejor ordenamiento de las entradas y salidas, además de priorizar los distintos usos que derivan de la gestión.

En la tabla 2 se representan los valores de índice de escasez obtenidos para los años en los cuales se experimentó sequía, es decir, en los que se incurrió en un déficit.

| Año  | Índice de Escasez |
|------|-------------------|
| 2001 | 0.01              |
| 2003 | 0.00009           |
| 2004 | 0.09              |
| 2006 | 0.02              |
| 2007 | 0.29              |
| 2010 | 0.01              |
| 2011 | 0.29              |
| 2013 | 0.03              |
| 2015 | 0.35              |
| 2017 | 0.18              |

Tabla 2: Índice de escasez anual en el periodo 2000-2018.

## 5. Conclusiones

En primer lugar, la meteorología es el factor más importante a tener en cuenta a la hora de gestionar un embalse, ya que el pantano se nutre del agua proveniente tanto de las precipitaciones, como del deshielo nival. Estos dos factores están presentes a lo largo de los años de estudio y conforman, en primavera y otoño, las épocas de mayores aportaciones. Con las medidas de caudales recogidas en las estaciones de aforo de los ríos se puede realizar una primera aproximación al caudal con el que se tendrá que trabajar en el pantano a lo largo del año, teniendo siempre en cuenta la dificultad extra que deriva de la irregularidad de estos factores ambientales.

Entre los años estudiados hemos observado tres escenarios posibles, los cuales son: años de abundantes caudales de entrada, de caudales pobres y años de caudales medios.

Comenzando por los primeros, son en los que la gestión del pantano se hace, por lo general, más sencilla, puesto que no hay que realizar un control tan exhaustivo del agua. Estas abundantes entradas hacen que el caudal que abandone el pantano sea acorde, dando años de elevada potencia generada y un reparto más equitativo entre en Canal de Aragón y Cataluña y el río Ésera, aguas abajo. Por contra, la dificultad de estos años radica en la gestión de las avenidas, las cuales suponen un reto si se producen en épocas en las que el volumen contenido en el pantano es máximo. Es entonces cuando se tienen que activar otros mecanismos para la evacuación del agua, como son laertura de los aliviaderos o de los desagües de fondo. En cambio, si estas avenidas se producen en épocas en las que el volumen contenido es mínimo, la gestión se simplifica, puesto que este excedente de agua es almacenado para un aprovechamiento futuro, pudiendo a su vez, aumentar la generación de energía hidroeléctrica.

En el segundo supuesto, cuando los caudales de entrada son más bien escasos, la gestión cambia. El problema ya no es la actuación ante una avenida, sino conseguir el máximo aprovechamiento de los recursos hídricos para producir la máxima potencia y abastecer al canal de riego, sin descuidar el volumen almacenado en el embalse y teniendo muy en cuenta la situación de escasez.

En el último escenario, estamos en un punto intermedio, en el que se pueden llegar a contemplar los dos escenarios evaluados anteriormente. Lo que se perseguirá en todo momento será la adecuación de los caudales de entrada y salida procurando sacar el mayor rendimiento al agua para satisfacer los distintos usos que se le dan a ésta, procurando alcanzar la optimización de la gestión del recurso.

El cálculo de los parámetros, según las mediciones tomadas en las instalaciones, nos ha ayudado a identificar los períodos de déficit, que suelen ocurrir en torno a los meses de verano, cuando los aportes disminuyen. Además, nos puede ayudar a gestionar eficazmente el embalse a priori.

La predicción de los efectos ante un Cambio Global es difícil de concretar y quedará definido según la naturaleza del mismo. Lo que sí se puede afirmar es que éste condicionará las operaciones llevadas a cabo en el pantano dificultando las decisiones que se tengan que tomar, con la vista puesta, en todo momento, en ofrecer una respuesta lo más eficiente posible.

## BIBLIOGRAFÍA

ASCASO, A; CUADRAT, J M. El clima. *Geografía de Aragón*, 1981, vol. 1, p. 93-140.

CEA, L. *Presas y embalses Regulación de embalses*, Apuntes de la asignatura de Ingeniería Hidráulica, Universidad de La Coruña.

CHE. *Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la cuenca hidrográfica de Ebro. Embalse de Barasona*. Nota de prensa, 1996.

DEL VALLE MELENDO, J. El clima y la red fluvial. En DEL VALLE MELENDO, J. ESPONA VILA, J. (coord.) *Comarca de la Ribagorza*. Zaragoza: Centro del libro de Aragón, 2006, p.43-52.

DEL VALLE MELENDO, J. *La precipitación media anual en el sector alto de la cuenca del Cinca (Pirineo Aragonés, España)*. Pirineos, 1997, vol. 149, p. 121-144.

FERNÁNDEZ LARRAÑAGA, B. *Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. Ingeniería del agua*, 1997, vol. 4, núm. 4, 1997.

GONZALO, H; DOMINGUEZ, E; MARIN, R; VANEGAS, R. *Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial*. Lima, 2004.

HAN, Q, et al. *Analysis of long-term water level variation in Dongting Lake, China*. Water, 2016, vol. 8, no 7, p. 306.

IGLESIAS, A; ESTRELA, T; GALLART, F. *Impactos sobre los recursos hídricos. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*, 2005, p. 303-353.

Análisis hidrológico del embalse de Barasona (Huesca) durante el periodo 2000-2018.

JUNCOSA R., PADILLA F., *Recursos y planificación hidráulica*, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de La Coruña.

KONDOLF, G. Mathias; BATALLA, Ramon J. *Hydrological effects of dams and water diversions on rivers of Mediterranean-climate regions: examples from California*. Elsevier: Amsterdam, 2005.

LLORET, A; COSTELLO, C. *Optimal reservoir capacity for climate change*. 2011.

MARÍN, J.M., El clima. En: *Geografía de Aragón*, Tomo 1, Guara Editorial, Zaragoza, 1981, vol. 1, p. 161-184.

VALERO-GARCÉS, B; IZQUIERDO, A; GAYARRE, J. *Ánálisis sedimentológico del embalse de Barasona, Huesca*. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe: Revista de xeoloxía galega e do hercínico peninsular*, 1996, no 21, p. 483-493.

VALERO-GARCES, B; NAVAS, A; MACHIN, J. *Sediment deposition in the Barasona reservoir (central Pyrenees, Spain): temporal and spatial variability of sediment yield and land use impacts*. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 1997, vol. 245, p. 241-250.

VALERO-GARCÉS, B., et al. *Una aproximación sedimentológica al aterramiento de embalses y la erosión en cuencas de montaña: el embalse de Barasona y la cuenca de Esera-Isábera (Pirineos centrales, Huesca)*. 1997.



