



Universidad
Zaragoza

Trabajo de fin de Grado

*Caracterización del comportamiento
hidrológico del río Aragón en su parte alta.
Estudio de sus crecidas y su afección en
distintos núcleos de población*

Autor:

Miguel Lozano Castellón

Director:

Miguel Sánchez Fabre

Facultad de filosofía y letras

2017

Resumen.

Se realiza un estudio del comportamiento hidrológico del río Aragón en su parte alta (Huesca, España), es decir, desde su nacimiento al inicio de su curso medio. A partir de los datos de las estaciones de aforo de Canfranc-Estación, Canfranc y Jaca, se hace un análisis de las crecidas del río a lo largo del tiempo para evaluar el riesgo que han producido, y pueden producir, en las localidades de Canfranc-Estación, Canfranc, Castiello de Jaca y Jaca. Se incluyen una serie de mapas que señalan las áreas inundables del río a su paso por estas localidades. Finalmente, se ofrecen una serie de propuestas y sugerencias para reducir el riesgo al que están expuestos estos pueblos y evitar posibles consecuencias dramáticas.

Abstract.

The purpose of this paper is to carry out a research on the hydrological behavior of the Aragón River (Huesca, Spain) at its upper part, that is, from the headwaters to the beginning of its middle course. Data are gathered from three discharge stations placed at Canfranc-Estación, Canfranc and Jaca. Taking into account these data, a flood events analysis along the time is made to evaluate the risk situations that several riverside towns (Canfranc-Estación, Canfranc, Castiello de Jaca and Jaca) had suffered in the past and could suffer in the future. Moreover, a set of maps is presented just to show the flooding areas affecting all these urban settlements. Finally, the paper ends with some proposals and suggestions to reduce the flood risks and prevent possible dramatic consequences.

Índice

1. Introducción	5
2. Antecedentes	5
3. Objetivos	6
4. Metodología	6
5. Caracterización del medio natural de la cuenca de estudio	10
5.1 Localización de la zona de estudio.....	10
5.1.1 El rio Aragón.....	12
5.2 Caracterización del medio natural.....	15
5.2.1 Clima.....	15
5.2.2 Geomorfología y geología del alto valle del rio Aragón.....	17
5.2.3 Pendientes en la cuenca alta del rio Aragón.....	19
5.2.4 Usos de suelo y vegetación	20
6. Caracterización hidrológica de la cuenca de estudio	22
6.1 Caudal de un rio	22
6.1.1 Variación estacional del caudal.....	23
6.1.2 Irregularidad interanual y coeficiente de irregularidad.	26
7. Fenómenos extremos. Las crecidas	28
7.1 Numero de eventos de crecida	29
7.2 Volumen y reparto temporal de las crecidas.	31
7.3 Reparto de las crecidas por meses.....	34
7.4 Tipología de las crecidas	34
7.5 Problemática y consecuencias de las crecidas.....	38
7.5.1 Grandes crecidas	38
7.5.2 Consecuencias de las crecidas.....	40
8. Zonas inundables. Afección a núcleos de población	41
8.1 Zonas inundables y actuaciones en los distintos municipios.....	41
8.1.1 Canfranc-Estación.	41
8.1.2 Canfranc:	45
8.1.3 Castiello de Jaca.....	47
8.1.4 Jaca.....	51
8.2 Comparación de los caudales con el Sistema Nacional de Cartografía de zonas inundables (SNCZI)	51

8.3	Medidas para prevenir y mitigar los daños por crecida.....	52
9.	Conclusiones	54
10.	Bibliografía.....	56
11.	Anexo. Índice de figuras, tablas y fotografías.....	60
11.1	Índice de figuras.....	60
11.2	Índice de tablas.....	61
11.3	Índice de fotografías.....	61

1. Introducción

Como dijo Leonardo Da Vinci, “el agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza”. Efectivamente, la vida sin agua sería ficticia. Y son los ríos las corrientes que mueven esta fuerza vital, por lo que son esenciales para el desarrollo humano.

El vínculo entre el ser humano y el río es una estrecha brecha entre la dependencia y el maltrato: no hay existencia sin ríos, pero no siempre los hemos respetado al desviar sus trayectorias, al invadir sus cauces, domesticándolos con embalses..., acciones que nos dan una sensación de bienestar, progreso y seguridad, pero que pueden acabar en tragedia. Los ríos, la naturaleza, no entienden nuestros deseos de dominarlos. Un refrán popular dice: no llegamos a convencernos de que “el río siempre acaba sacando sus escrituras de propiedad” y reclamando lo que le queremos quitar.

Ejemplos de catástrofes producidas por la disputa entre el hombre y el río son sus crecidas (sus “escrituras”) en zonas de cultivo o núcleos de población que ocupan su llanura de inundación haciendo que se lleven por delante campos, instalaciones y casas, incluso llegando a destruirlas si el río lleva mucha fuerza.

En Aragón estamos acostumbrados a las crecidas: desde las del Ebro que afectan a su curso medio, a las más catastróficas como las del Barranco de Arás (afluente del río Gállego) en 1996 en Biescas (Huesca). En el río Aragón, a pesar de su regulación que condiciona su cauce, encontramos una serie de pueblos situados junto al lecho del río que tratan de ganarle terreno y en los que ya se han producido algunos episodios de crecida que han podido tener un desenlace trágico.

En este trabajo trataremos de hacer un estudio de este río, analizando su caudal y estudiando sus crecidas con los datos que nos aportan las estaciones de aforo de las localidades de Canfranc-Estación, Canfranc y Jaca, para luego hacer un estudio de sus zonas inundables en dichas localidades y en Castiello de Jaca, en tramos en los que podemos encontrar instalaciones públicas, viviendas y zonas de huerta ocupando su llanura de inundación

2. Antecedentes

La hidrología ha sido desde siempre objeto de estudio dentro de la organización territorial, la mayoría de estudios se centran en la necesidad del ser humano de convivir con el agua para lograr evitar desastres

Este trabajo se centra principalmente en el fenómeno de las crecidas e inundaciones del río Aragón en su cabecera. Publicaciones como ECOTER S.C. (2011), González del Tanago del Río (2008), Sanchez Fabre (2014) o Zbigniew W. Kundzewicz et al. (2012) realizan diversos estudios relacionados con las crecidas y precipitaciones de una forma más general.

En Aragón hay un gran número de estudios centrados en esta temática: Acín et al. (2012); Alvera (2000); Díaz et al. (2005); Doménech et al (2008); Elmoujahid, (1997); García Vera (2000); García Ruiz et al.(2001); García Ruiz et al. (2012); Jiménez (2014); Lana-Renault et al. (2013); López Moreno et al,(2000); Ollero (2000); Ollero et

al. (2007); Sanchez Fabre et al. (2004); Serrano Muela et al. (2013). Es necesario mencionar también el Plan hidrológico del río Aragón.

El estudio del comportamiento de los cursos fluviales y su posible afección a núcleos de población es fundamental en la ordenación territorial por lo que se pueden encontrar un gran número de trabajos relacionados con este tema en Aragón.

3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es análisis de las crecidas de la cuenca alta del río Aragón y el riesgo de inundación en diferentes poblaciones.

Para lograr este objetivo principal se han elaborado una serie de objetivos secundarios:

- Analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Aragón, haciendo un mayor énfasis en sus eventos de crecida
- Estudiar los componentes del medio natural que condicionan el comportamiento hidrológico del río Aragón en su cuenca alta.
- Estudiar las zonas afectadas con riesgo de inundación en localidades construidas a orillas del río Aragón (Canfranc, Canfranc-Estación y Castiello de Jaca)
- Plantear algunas posibles soluciones al problema de estas localidades

Antes de comenzar el trabajo, es necesario partir de una hipótesis. En nuestro caso, la hipótesis de partida es que en la cuenca alta del río Aragón, históricamente, ha existido, y sigue existiendo, un riesgo real de graves daños por fuertes inundaciones en diversos puntos. A partir de situaciones históricas de los registros de caudal y la cartografía de riesgos, se intentará confirmar o desmentir esta hipótesis

4. Metodología

Hemos seguido cuatro fases para la elaboración de nuestro trabajo, en cada una de las cuales ha sido necesario acudir a distintas fuentes y usar diferentes métodos de análisis:

Fase 1: Caracterización de la zona de estudio.

Fase 2: Caracterización hidrológica de la cuenca de estudio.

Fase 3: Fenómenos extremos las crecidas.

Fase 4: Estudio de las inundaciones y afección a núcleos de población.

Fase 1.

Para esta primera fase, en la que se describe la zona de estudio, se realizarán dos mapas de localización con el programa *ArcGis*, que posteriormente se colocarán en el trabajo como figuras. Así pues, descargaremos del Instituto Geográfico Nacional (IGN

en adelante) las siguientes capas, esencialmente procedentes de la Base Topográfica Nacional (BTN25):

- Capa de ríos
- Capa de localidades
- Capa de España (con divisiones por Comunidades autónomas)

Además también se ha utilizado una capa del Sistema Integrado de Información del Agua (SIA en adelante) del Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA en adelante):

- Capa de división de cuencas hidrográficas (con divisiones por grandes cuencas, de la que se tomará la del Ebro y subcuencas de la que se tomará la de la parte alta del río Aragón¹)

Para el estudio del río Aragón se ha elaborado un esquema de todos los aportes de agua que recibe el río Aragón hasta la localidad de Jaca. Este esquema se ha hecho con Microsoft Excell tomando los datos de Mapa topográfico Nacional de España elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (2014)².

Para el estudio del clima de la zona de estudio se ha elaborado dos climogramas (uno de Canfranc-Estación y otro de Jaca) con el programa Microsoft Excell tomando los datos del Instituto Aragonés de Estadística (IAEST) del periodo de 1982 a 2012 en ambas estaciones.

Cerramos esta fase con la realización de otros dos mapas para la caracterización del medio natural, uno relacionado con las pendientes y otro con los usos del suelo.

Para el mapa de pendientes se utilizaran las siguientes capas nuevamente descargadas del IGN:

- Capa de nuestra área de trabajo ya recortada del mapa de cuencas hidrológicas
- MDT25 (del modelo digital del terreno obtendremos la pendiente con la función Slope dentro del ArcToolBox³)
- Capa de ríos (mostrando únicamente el río Aragón en el área de trabajo)
- Capa de localidades (mostrando únicamente Canfranc-Estación, Canfranc, Castiello de Jaca y Jaca).
- Mapa de Aragón.

Para el mapa de usos del suelo hemos tomado datos del IGN, concretamente del proyecto Corine Land Cover de 2012, programa dirigido por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). Se utilizaran las mismas capas que el mapa de pendientes, teniendo el mismo diseño únicamente cambiando la capa del MDT por la de Corine Land Cover.

¹ Esta subdivisión de cuenca, Aragón (Tramo superior), se va a utilizar como nuestra “area de trabajo” sobre la que vamos a realizar el resto de mapas.

² Mapa a Escala 1:25.000. Hojas 144 – I, II, III y IV; 145 – I y III; 176 – I, II, III, IV; 177 – I y III.

³ Arctoolbox > spatial analyst tools > surface > slope

Fase 2.

Para comenzar con la caracterización hidrológica de la cuenca, en primer lugar se han de buscar los datos hidrológicos a analizar. Para ello hay que acudir a la herramienta del anuario de aforos donde se publican los datos de las distintas confederaciones hidrográficas. Esta herramienta de libre acceso, desarrollada por el ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) aporta una gran cantidad de información hidrológica recibida de las distintas estaciones de aforo, toda ella revisada periódicamente.

Una vez en la página se procede a la búsqueda de los datos. En nuestro caso se busca dentro de la cuenca hidrológica del Ebro las estaciones de Canfranc y Jaca, dos estaciones situadas en la parte alta del río Aragón. De cada una de estas estaciones se van a descargar en formato XML para poder trabajar con ellas en Microsoft Excel los siguientes datos expresados todos ellos en m³/seg:

- Caudal medio diario
- Caudal mínimo medio diario
- Caudal máximo medio diario
- Caudal medio mensual
- Caudal máximo instantáneo mensual
- Caudal medio anual
- Caudal máximo instantáneo anual

En la estación de aforo de Jaca hay datos desde el año 1931 hasta el 2014. En cuanto a los datos de Canfranc, se toman de dos estaciones de aforo distintas. Entre 1971 y 1990 la estación estaba situada en Canfranc-Estación, pero a partir de 1991 se abrió una nueva en Canfranc (pueblo), cerrándose la estación antigua. Esta nueva estación tiene datos desde 1991 hasta 2014.

Una vez se han descargado los datos, se da paso al estudio de las características hidrológicas del río Aragón mediante los datos obtenidos anteriormente del anuario de aforos. Todos los datos descargados eran para trabajar con el programa Microsoft Excel. De ahí, en primer lugar se realizará una serie de operaciones para calcular el módulo de cada estación, sus caudales específicos y otras de las que se obtendrán una serie de gráficos que ayuden a describir las características del río a modo general como pueden ser la de irregularidad interanual, el caudal medio anual, la curva de variación estacional o el coeficiente de caudal.

Fase 3

Una vez se han descrito las características generales del río se pasa a realizar un análisis de las crecidas. Para el análisis de este fenómeno extremo vamos a realizar dos tipos de gráficos, siempre a partir de los datos obtenidos en el Sistema del Anuario de Aforos de MAPAMA:

El primero se realiza utilizando los datos de caudal máximo instantáneo mensual, a partir de los cuales se obtiene una tabla y se clasifican los eventos de crecida dependiendo del número de veces por las que multipliquen al módulo anual (*3, *5, *10, *25 y *50). Así se obtiene un gráfico sintético de la intensidad y reparto de

las crecidas por meses. Este gráfico va acompañado de otros que únicamente muestran cuántos eventos de crecida hay por cada uno de los grupos

En segundo lugar se obtienen una serie de gráficos que reflejan el caudal medio diario del río. De los datos de la tabla base de los gráficos anteriores, escogeremos la serie de meses en los que se aprecien crecidas. Una vez escogido el mes a analizar, pasamos a los datos del caudal medio diario y realizaremos el gráfico de la crecida para poder analizar su forma, intensidad o duración. Obtenemos así una serie que permitirá la clasificación de las crecidas dependiendo de su tipología (crecidas cortas y crecidas largas).

El tratamiento de los datos y la elaboración de las gráficas que permiten analizar en detalle las crecidas, se vuelve a realizar con Excel (Microsoft Office).

Fase 4

Una vez analizadas todas las crecidas se pasa a la última fase, el estudio de las zonas inundables en los diferentes núcleos de población (Canfranc-Estación, Canfranc y Castiello de Jaca)

Para ello, se realizarán una serie de mapas con la aplicación *ArcGIS*, para ello descargaremos del IGN las siguientes capas:

- Ortofoto de máxima actualidad de la zona
- Zonas inundables con periodo de retorno (10, 50, 100 y 500 años)

El primero de los mapas que haremos de todas las localidades se realizará solapando las capas de los distintos periodos de retorno sobre la ortofoto del entorno del núcleo de población. En Canfranc y Castiello de Jaca se realizará otro mapa haciendo “zoom” en dos zonas en las que se ha edificado dentro del cauce.

Además, diferentes afirmaciones que se hagan se tratarán de apoyar en una serie de fotografías, tomadas directamente en el campo de estudio, de las localidades de Canfranc-Estación, Canfranc y de Castiello de Jaca.

Por último en esta fase, se realizará una comparación de los caudales máximos instantáneos de nuestros datos con los diferentes caudales de riesgo de inundación para diferentes periodos de tiempo que ofrece el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI en adelante) en cada localidad. Para esta comparación obtendremos el caudal máximo instantáneo medio de nuestros datos para los distintos periodos de tiempo mediante el método de la distribución de Gumbel; esta operación se realizará con una plantilla de Microsoft Excell donde se insertan los datos (numero de datos de la muestra, la media y la desviación típica) y se le asigna un periodo de retorno de un determinado número de años. La plantilla se encarga de hacer una serie de operaciones estadísticas que permiten, al final, determinar el caudal máximo instantáneo medio que se alcanza en ese periodo de retorno.

5. Caracterización del medio natural de la cuenca de estudio

5.1 Localización de la zona de estudio.

La zona a estudiar es el tramo alto de la cuenca del río Aragón, río que tiene su cabecera en los Pirineos y se ubica en la margen izquierda de la cuenca del río Ebro. En ella, las principales localidades y en cuyo estudio vamos a centrarnos, son Canfranc-Estación, Canfranc, Castiello de Jaca y Jaca, todas ellas se encuentran dentro de la comarca de la Jacetania, a orillas del río Aragón. Estas serán los lugares donde mayor afección puedan producir las crecidas.

Para el estudio de estos pueblos hemos realizado distintos mapas en el que hemos tomado una división de cuenca en su tramo superior establecida por la Confederación Hidrográfica del Ebro, que va desde el nacimiento del río hasta el entorno del embalse de Yesa, todo en la zona norte occidental de Aragón.

En la figura 1 se ve la ubicación de la zona de estudio en el mapa de España y en la cuenca del Ebro. La figura 2 nos da un mayor detalle, con la localización en Aragón y señalando las cuatro localidades sobre las que se ha analizado el comportamiento del río Aragón.

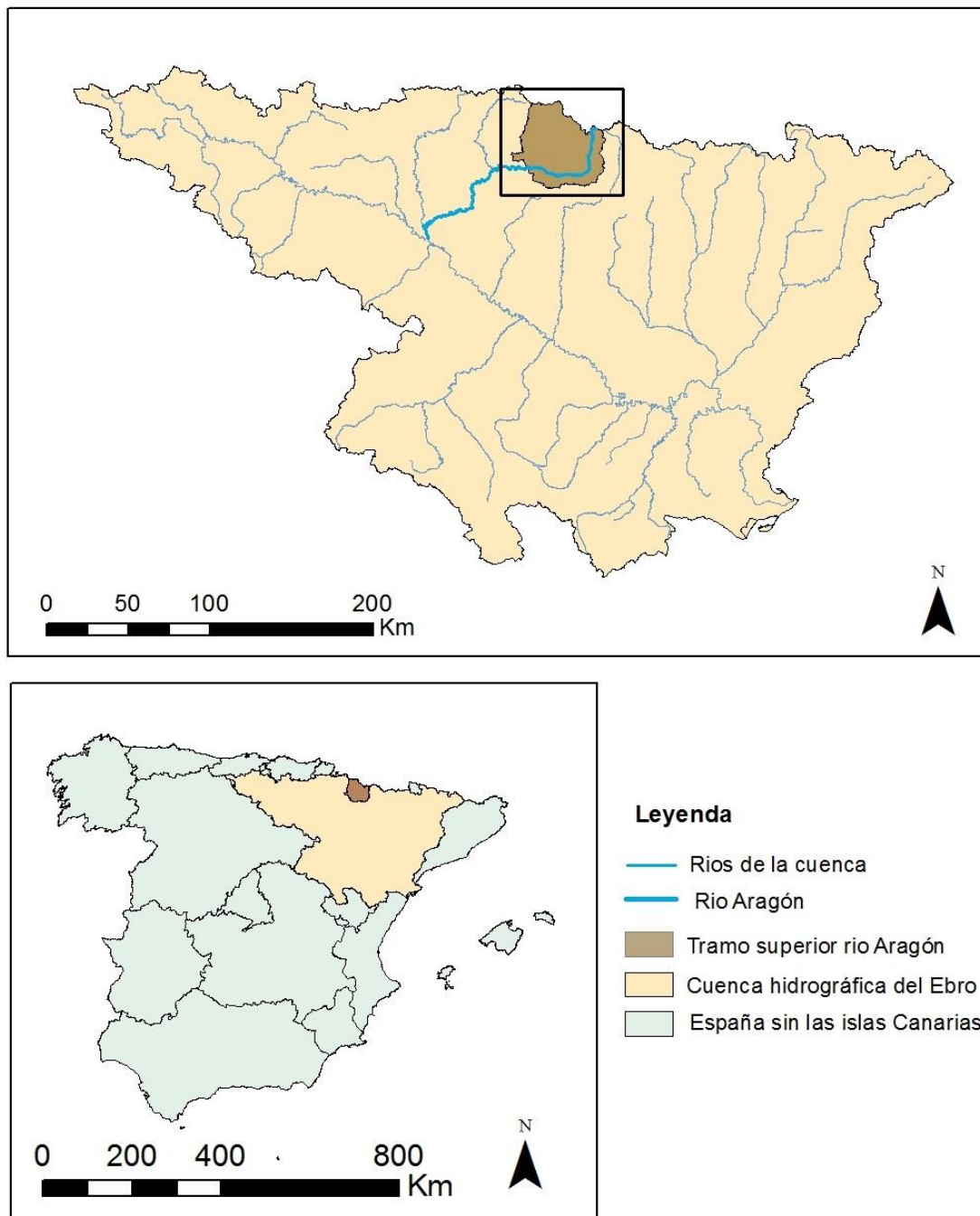


Figura 1. Mapa de localización del tramo superior del río Aragón en la cuenca de río Ebro y en España. Fuente: IGN. Elaboración: Miguel Lozano Castellón, 2017.

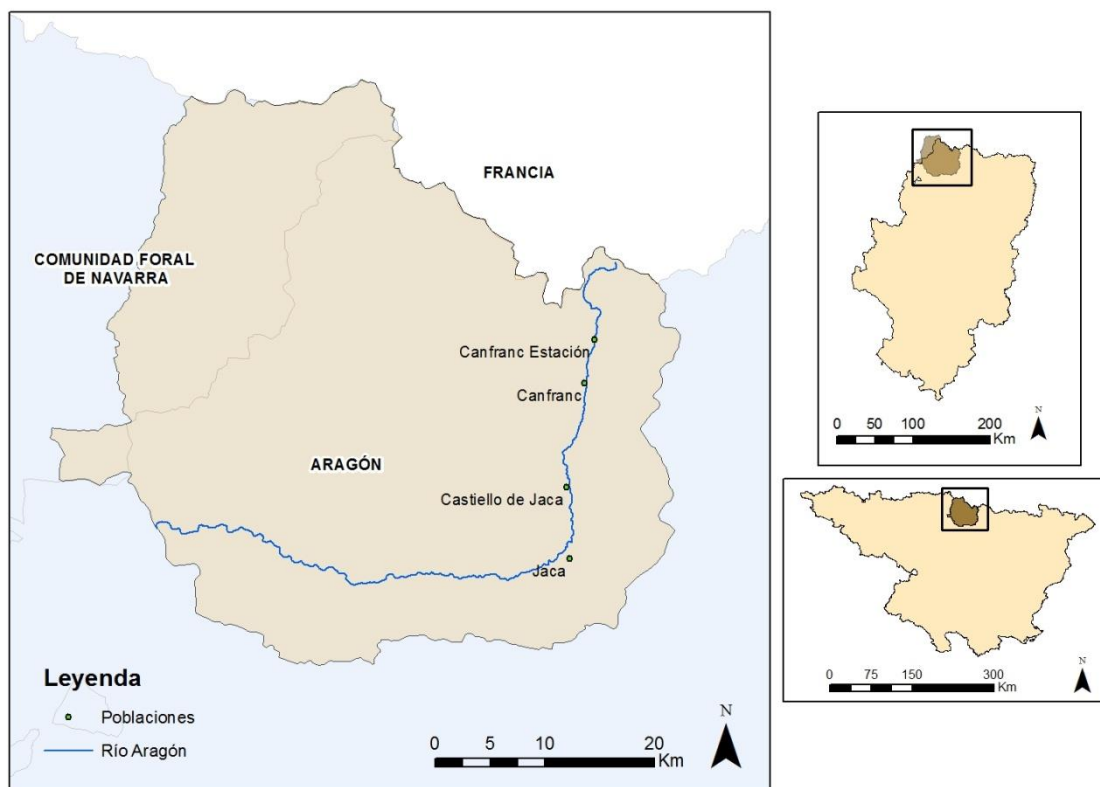


Figura 2. Cuenca hidrográfica del tramo superior del río Aragón y su localización dentro de Aragón y de la cuenca del Ebro. Fuente: IGN. Elaboración: Miguel Lozano Castellón, 2017.

5.1.1 El río Aragón

El río Aragón, como ya hemos indicado, es un afluente del río Ebro por su margen izquierda. Nace de los ibones de Escalar (2078 msnm) y Truchas (2144 msnm) en el valle de Astún⁴. En total drena una cuenca de 8524 km², tiene una longitud de 195 km y aporta al Ebro una media de 1300 hm³/año. La pendiente del curso propiamente dicho del tramo estudiado va desde los 2144 metros sobre el nivel del mar en su nacimiento hasta los 800 a su paso por Jaca⁵. La zona de la cuenca de estudio, el tramo alto del Aragón, drena una superficie de 2018 km²

En el área de estudio el río corta transversalmente las alineaciones pirenaicas (dirección N-S) hasta llegar a la Canal de Berdún, en la localidad de Jaca, donde cambia pasando a estar paralelo a estas con una dirección E-W.

La figura 3 muestra el esquema de la cuenca alta del río, señalando los principales aportes de agua (cursos continuos o intermitentes) junto con las conducciones forzadas que se le han realizado con fines de producción de energía o de abastecimiento a poblaciones.

⁴ Datos recogidos del Instituto Geográfico Nacional (IGN)

⁵ Datos recogidos de la Confederación hidrográfica del Ebro

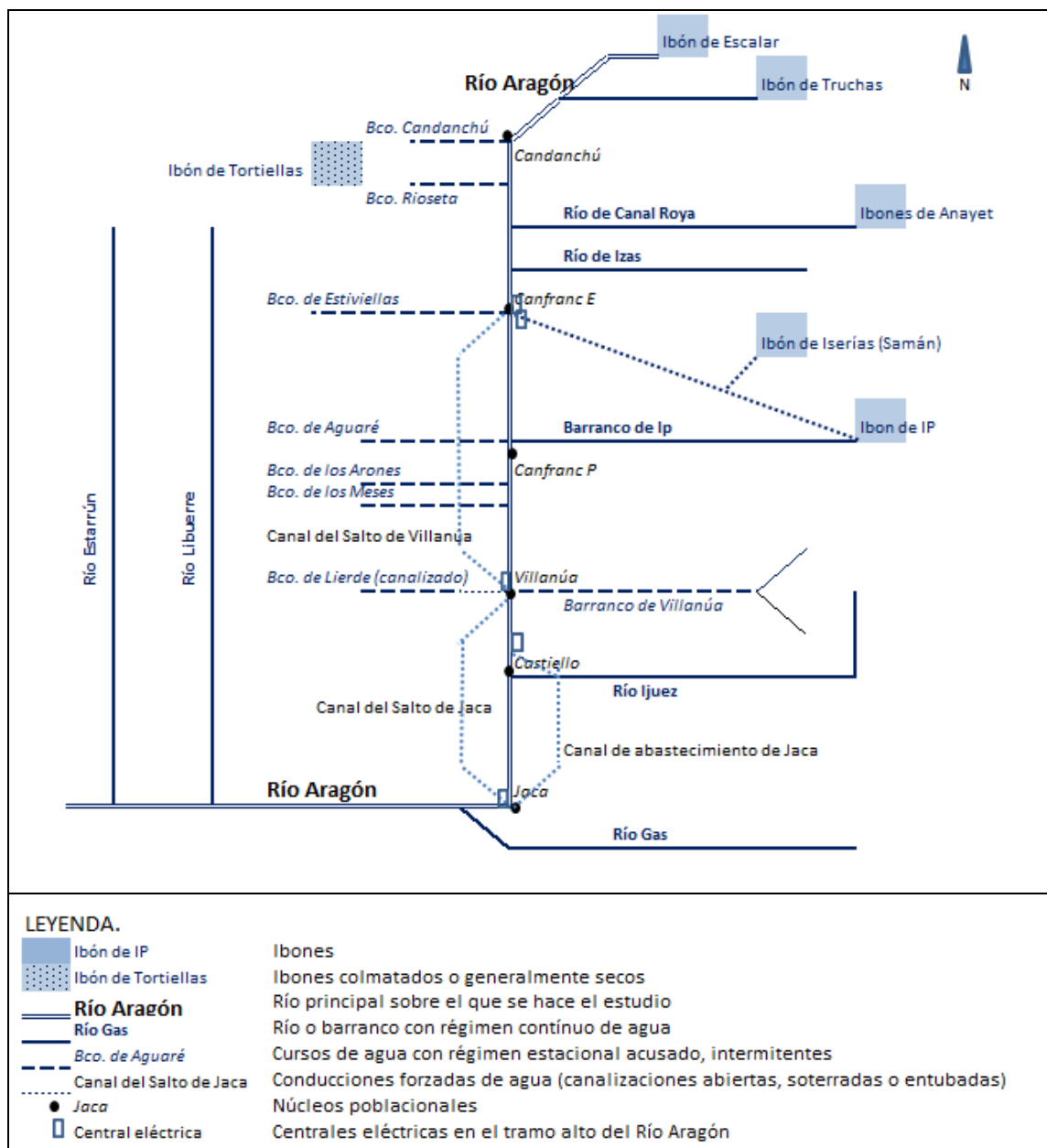


Figura 3. Esquema de la cuenca alta del río Aragón (elaboración: Miguel Lozano Castellón)⁶.

El esquema de la figura 3 muestra en la cabecera del río una orientación E –W que, casi inmediatamente, gira en dirección N – S al finalizar el valle de Astún. Esta primera parte del río comienza a estrecharse hasta casi Villanúa y recibe aportes importantes de los ríos y barrancos por sus dos márgenes. Desde el punto de vista hidrológico, la margen se caracteriza por la presencia de ibones de origen glaciar en la mayoría de los casos, que ocupan cubetas o pequeñas depresiones de excavación abiertas por las masas de hielo cuaternarias situadas en los circos de alimentación y en el fondo de los altos valles (ibones de Escalar, Astún, Samán, Anayet, Ip). Estos ibones

⁶ El esquema no es un mapa exacto hecho a escala. Recoge sólo los aportes más significativos del río. La fuente es la siguiente cartografía: Instituto Geográfico Nacional (2014). Mapa topográfico Nacional de España. Escala 1:25.000. Madrid, Centro Nacional de Información Geográfica. Hojas 144 – I, II, III y IV; 145 – I y III; 176 – I, II, III, IV; 177 – I y III.

almacenan agua también en los meses de verano, y desahogan mediante un torrente (Astún o Truchas), o bien a través de diques y canalizaciones artificiales (Samán, Ip).

Otra característica relevante de esta margen es el importante desarrollo altitudinal de las sierras interiores que atraviesa el río, alturas como la del Pico de Anayet (2559 m.) La Moleta (2564 m.) Pala de Ip (2776) o Collarada (2886). Esta circunstancia genera desniveles importantes en distancias muy cortas. Así, por ejemplo desde el ibón de Ip (casi a 2100 msnm) hasta Canfranc (1035) hay una caída de cerca de más de 1100 metros, con lo que esto puede suponer desde el punto de vista de la escorrentía, especialmente en primavera⁷, el arrastre de derrubios o los riesgos de aludes en épocas de invierno.

La margen derecha no presenta tantos ibones como la izquierda, estando el de Tortiellas casi colmatado y con agua sólo en épocas de primavera. Esto no quiere decir que en esta margen no se den los mismos procesos de escorrentía o que la acumulación de nieve en invierno no sea importante. Las características altitudinales son ligeramente más bajas que en la izquierda, pero con desniveles bruscos y considerables, como el barranco de Estiviellas con un descenso casi vertical desde los 2358 m.s.n.m. del pico Tortiellas hasta los 1190 de Canfranc-Estación.

A partir de Villanúa las alturas decrecen progresivamente y el valle se va abriendo hasta Jaca, disminuyendo las pendientes y la longitud de los barrancos y los valles. Hay que mencionar la excepción de la Garcipollera, valle en la margen izquierda del río Aragón, que acoge al río Ijuez que, en su tramo más alto, desciende bruscamente desde los más de 2000 metros del circo que cierran los dos picos Bacún y la Lera, con una agresividad de erosión que lleva a un aporte de gravas muy importante. Aparte de esta particularidad, el valle desciende de manera más suave hasta Jaca.

La acción antrópica ha condicionado el curso y la regulación de los aportes y de sus masas de agua. Sobre los barrancos superiores (Estiviellas, Los Meses en la margen derecha o Epifanio e Ip en la izquierda), se construyeron a partir de los años veinte del Siglo XX diques de contención (de los acúmulos de nieve, que provocan también retención de piedra y gravas), motivados por una exigencia de protección de asentamientos urbanos como Canfranc-Estación⁸.

Otro elemento destacable de alteración de las condiciones naturales del río es el aprovechamiento hidrológico que ha llevado a represar ibones como el de Ip o a canalizar su salida de agua. En algunos casos, como en Ip, la canalización es completa hasta una de las centrales hidroeléctricas situadas en Canfranc-Estación (ver imágenes 6 y 7 en el punto 8).

Además de esta regulación de los barrancos del tramo alto, es importante destacar las canalizaciones laterales del río Aragón (Canfranc Estación – Central de Villanúa; Villanúa - Central de Jaca por la margen derecha; central de Castiello – Jaca, para abastecimiento a esta última población, por la margen izquierda).

⁷ En esta Cuenca alta, como muestra Alvera (2000) con el ejemplo de la cuenca experimental de Izas, el 70 % de las escorrentías se producen en la primavera.

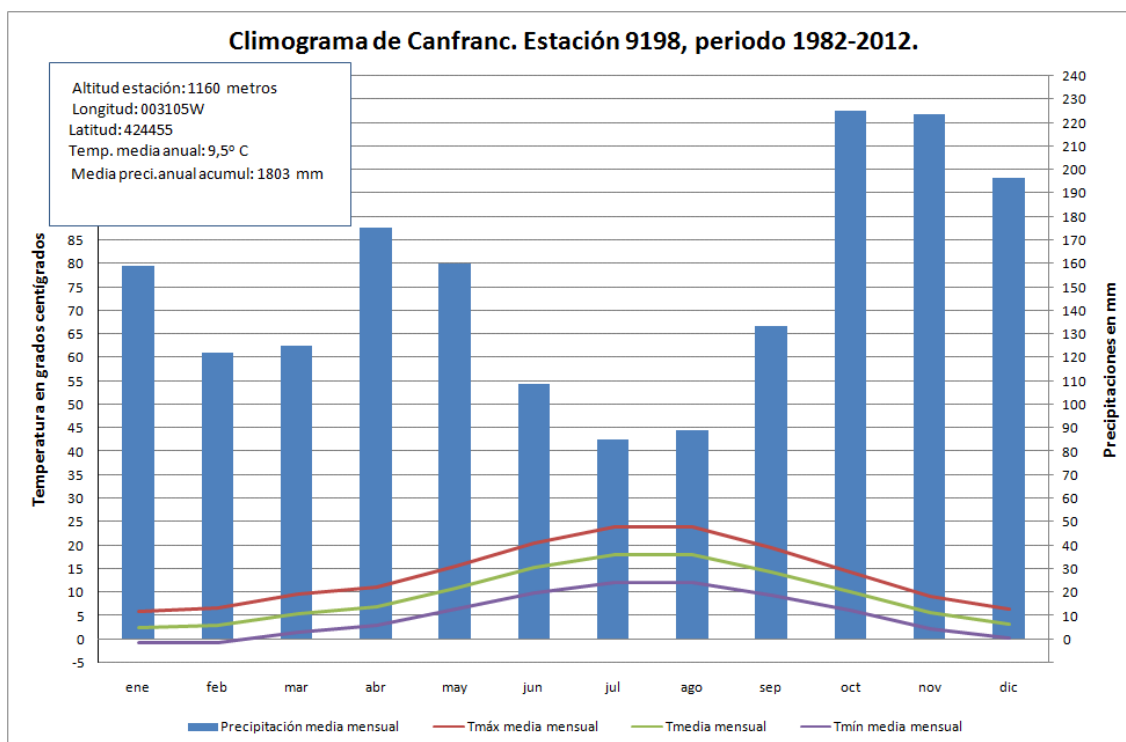
⁸ Otro elemento de protección mencionable es el de la repoblación forestal que de lo que originalmente fueron zonas de pasto, que supuso que se limitaba el terreno erosionable de los barrancos y provocó, en algunos casos, aterrazamientos artificiales del propio barranco (por ejemplo los meses), para viveros en es proceso de repoblación.

En esta descripción del alto valle del Aragón se ha pretendido simplemente dar una idea general para mostrar la existencia de variables antrópicas que han modificado su curso natural y que son especialmente relevantes para el tema del presente trabajo, las crecidas del río.

5.2 Caracterización del medio natural

5.2.1 Clima

La cuenca alta del río Aragón tiene influencia del dominio climático de montaña en su parte más septentrional, pero conforme vamos hacia el sur adquiere rasgos del clima mediterráneo continentalizado, además de cierta influencia oceánica. Si nos basamos en la clasificación climática de Köppen (Kottek et al, 2006), al menos una parte de la zona de estudio la podríamos incluir en el grupo “Cfb” (oceánico templado). Sin embargo, para este trabajo, preferimos quedarnos con la clasificación de Cuadrat (2004). Así, podríamos hablar de un clima de montaña⁹ en la parte alta del río (bajas temperaturas e importante pluviometría en forma de nieve mayoritariamente) que iría en transición hacia el sur hasta llegar a Jaca (820 metros) y canal de Berdún, punto de en el que se registra un clima más propio de los somontanos pirenaicos (con irregularidad pluviométrica y notable amplitud térmica). No toda la cuenca tiene un clima uniforme, estando muy influida por las diferencias de altura de las dos localidades: Canfranc-Estación, en tono a los 1200 metros y Jaca 828 metros. Para ver esto, comparamos la climatología de estos dos núcleos de población.



⁹ El Atlas Climático de Aragón coincide en parte con la clasificación de Köppen y sitúa en los Pirineos occidentales el clima de transición Mediterráneo-Oceánico. Por tanto, los en sentido estricto, el clima de montaña en el valle lo tendríamos que situar por encima de alturas de 1500-1800 metros (ver página 161 del Atlas).

Figura 4. Climograma de Canfranc Estación. Elaboración: Miguel Lozano Castellón¹⁰.

La figura 4 muestra las gráficas de precipitaciones y temperatura que caracterizarían el clima de **Canfranc Estación**. Se ha configurado el modelo a partir de una serie temporal de 30 años (1982-2012), tiempo suficiente para dibujar un perfil estándar del clima en Canfranc. En cuanto a la pluviometría, se puede considerar abundante, con máximos en dos periodos: noviembre-enero y abril-mayo, y con una cantidad media anual de precipitaciones de 1806 mm.

El perfil pluviométrico en series largas mantiene las características que hemos descrito para el periodo 1982-2012, pero analizando series más cortas no mantiene esa constancia tanto en la cantidad de las precipitaciones, como en el tipo de las mismas (más o menos nieve) o en el mes del año en el que se dan. Hay que destacar esta posibilidad de irregularidad por la importancia que puede tener en el estudio del fenómeno de las crecidas fluviales.

Las temperaturas son bajas en comparación con el resto de España. Las medias mensuales sitúan a Julio como mes más cálido con una media en torno a 17°, con máximas – mínimas medias entre los 21° y los 9°. Por su parte, diciembre y enero son los meses más fríos con medias que rondan los 2° y con máximas – mínimas medias entre 5° y -1°, lo cual no quiere decir que en algunos días no se registren mínimas mucho más extremas. En el año 2016, un año al parecer anómalo, registró una temperatura media en enero de 7,4° y diciembre de 10,6°.

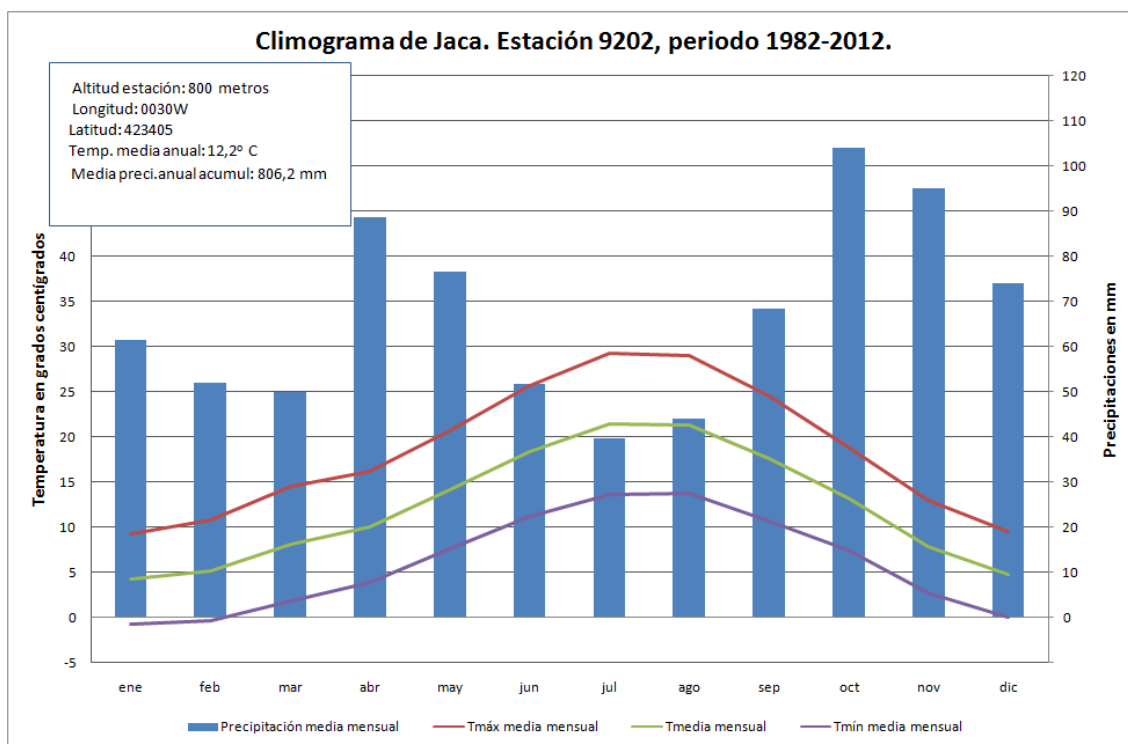


Figura 5. Climograma de Jaca. Elaboración del autor¹¹.

¹⁰ Fuente de los datos: IAEST. Información estadística de Aragón. Medio Ambiente. Clima. Precipitaciones y temperaturas medias mensuales y anuales en las estaciones climatológicas seleccionadas en el Atlas Climático de Aragón, por estación y año disponible. http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Institutos/InstitutoAragonesEstadistica/AreasTematicas/14_Medio_Ambiente_Y_Energia/ci.05_Clima_Datos_climatologicos.detalleDepartamento?channelSelected=ea9fa856c66de310VgnVCM2000002f551bacRCD.

Con la misma serie histórica que en el caso de Canfranc estación (1982-2012), Jaca tiene un perfil similar a Canfranc-Estación pero en transición hacia climas más propios del somontano pirenaico, mantiene buen nivel de humedad con precipitaciones durante todo el año (ver figura 5). Coinciden los periodos húmedos en los meses de noviembre (95 mm) - diciembre (74 mm), y abril (88 mm) - mayo (más de 76 mm), pero hay mucha diferencia con las cantidades de precipitación en los mismos meses en Canfranc. La precipitación media anual en Canfranc en el periodo estudiado es de 1803 mm, mientras que en Jaca tan sólo de 779 mm.

El perfil de temperaturas es semejante al de Canfranc, pero cualquiera de los valores medias de los meses está ligeramente por encima, tanto en el caso de los meses más fríos como en el de los más cálidos.

En resumen, climatológicamente hablando, en el valle alto del Aragón se da una transición de norte a sur desde un clima de montaña hasta otro más propio de los somontanos pirenaicos, aunque manteniendo humedad, cierta irregularidad pluviométrica y considerable amplitudes térmicas.

Con estas abundantes cantidades de precipitación cabe esperar que los caudales del tramo alto del río Aragón sean abundantes, con fluctuaciones mensuales marcadas por las precipitaciones, pero con buena disponibilidad de agua durante todo el año.

5.2.2 Geomorfología y geología del alto valle del río Aragón

Para identificar los principales rasgos de la geomorfología de la cuenca alta del Aragón, nos podemos apoyar en diferentes estudios. (Lampre Vitaller, 1990; Peña et al., 2002; García Ruiz et al., 2011)

El área presenta unas características de alta montaña con relieves escarpados y fuertes pendientes. Nos hacemos una idea viendo que la localidad de Jaca se encuentra a 818m de altura y a 17 kilómetros en línea recta esta el pico más alto del valle, el Collarada a 2886m (2000 metros de desnivel).

Se establecen 5 grupos de unidades morfoestructurales para el estudio geomorfológico de nuestra área de estudio:

-Cabecera del río Aragón. Es la zona del Pirineo Axial donde se encuentra Astún, Candanchu y Canal Roya. Está formada sobre sedimentos paleozoicos. Se observan calizas devónicas que crean macizos en resalte (Tobazo y Los Arañones) sobre los que se sitúan materiales del carbonífero (esquistos, pizarras, arcillas y areniscas) que podemos ver en la zona de Izas. El Paleozoico termina en el permotriásico, ya cerca del mesozoico donde destacan las areniscas y conglomerados rojizos que podemos apreciar en La Raca y el vértice del Anayet.

Observamos que este conjunto muestra por lo general una tectónica muy apretada con diversos pliegues-falla generando morfologías apalachenses dejando en resalte calizas y areniscas.

¹¹ Se utiliza la misma fuente de datos (IAEST) para la misma serie histórica 1982-2012 (ver nota 10).

-Las sierras interiores. La zona del Aspe, el Collarada, la pala de Ip, Izas. Estas sierras forman una barrera de una morfología muy distinta a la anterior formada por dos tipos de calizas: calizas compactas blanquecinas del Campaniense y otras calizas arenosas marrones del Maestrichtense, ambas del Cretácico.

Corresponden a sedimentaciones marinas en un periodo de reposo orogénico que más tarde se plegarán con la tectónica alpina formando pliegues que se observan mayoritariamente con fuertes escarpes hacia el norte (Aspe, Garganta de Borau, Pala de Ip o Collarada). Un ejemplo de un relieve escarpado a partir de los afloramientos de calizas paleozoicas es la alineación del Tobazo (Candanchu).

-El *flysch*. El *flysch* es una sedimentación del Eoceno (terciario) con estratos de arcillas o margas y areniscas, formando una serie de pliegues disarmónicos orientados al sur. Destacamos en esta unidad la sierra de la Estiba, la Garcipollera o La Espata.

Las sierras del Flysch presencian una ausencia de relieves derivados de la estructura y, en cambio, hay un predominio de formas alomadas o de vertientes rectilíneas, mientras las laderas muestran las huellas de diferentes procesos de erosión.

-La depresión media. En nuestra área representada por la Canal del Berdún, recorrida de E a W y donde se encuentra la localidad de Jaca. Está formado por margas eocenas de un color gris azulado y, como veremos en el siguiente punto, es una zona con fuerte potencial agrícola.

Esta depresión queda hundida por la mayor erodabilidad de la roca, creándose una serie de depósitos cuaternarios (glacis y terrazas)

- El reborde meridional. No es una unidad que influya en nuestra cuenca pero cabe destacar de esta unidad la Peña Oroel, una serie de conglomerados eocenos y oligocenos que queda en resalte al tener a sus pies los materiales blandos del Canal de Berdún. Esta unidad, también llamada la zona de las molasas prepirenaicas en el extremo meridional de nuestra zona de estudio, se define generalmente por su discontinuidad.

Por último, habría que destacar la actividad glaciar pirenaica que, durante el cuaternario, ha moldeado la estructura en las zonas de cumbres, ha abierto grandes valles y ha depositado importantes volúmenes de *till* glaciar.

La cabecera del Aragón y la vertiente norte del Anayet constituyen un importante sector de circo glaciar. En el caso de los valles de Canalroya y Astún, los glaciares aparecen sobre materiales paleozoicos, aunque conforme nos vamos hacia el sur siguiendo al río Aragón, a su paso por las sierras interiores (gargantas de Villanúa), el glaciario aparece sobre materiales mesozoicos y cenozoicos.

5.2.3 Pendientes en la cuenca alta del río Aragón

Pendientes en la cuenca alta del río Aragón

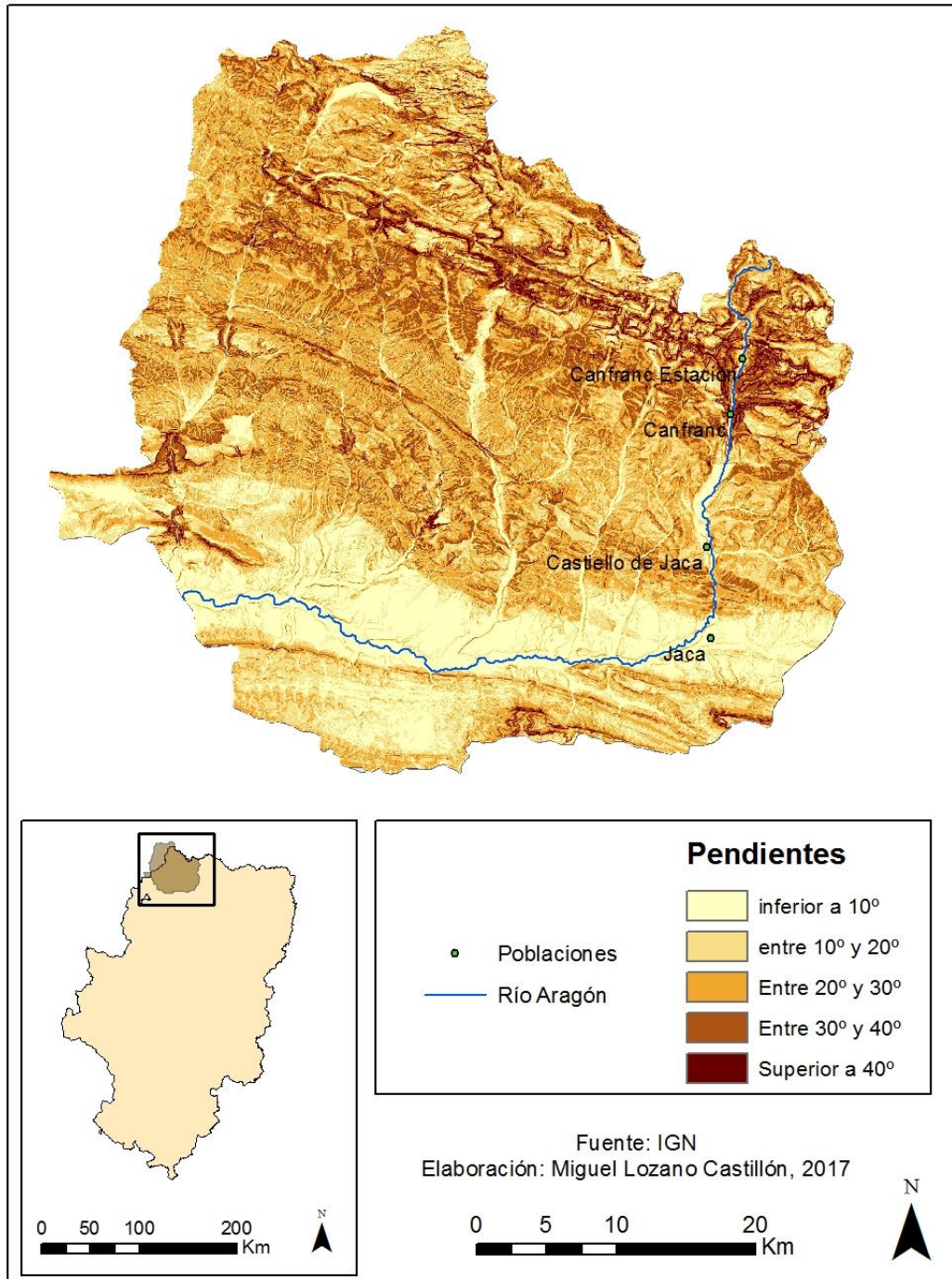


Figura .6 Pendientes en la cuenca del río Aragón

Como ya se indicó en el apartado de metodología, a partir del BTN25 y con el uso del programa ArcGIS se ha elaborado el mapa de pendientes de este tramo alto de la cuenca (figura 6). Se han establecido cinco grupos dependiendo del grado de inclinación del terreno.

En este mapa observamos que la pendiente es mayor cuanto más al norte nos encontramos, en zonas cercanas al nacimiento del río hasta Canfranc encontramos fuertes pendientes en algunos casos superiores a 40 °, mientras que en la depresión del canal de Berdún la pendiente es mucho menor estando en su mayoría en valores inferiores al 10°. Por todo esto se deduce que la velocidad de las aguas del río Aragón será mucho más rápida en Canfranc-Estación o Canfranc que en Castiello de Jaca o Jaca.

Se observa también que en Canfranc-Estación y Canfranc el valle está mucho más cerrado, encajado, es decir no hay una zona “llana” sino que la pendiente es muy fuerte en zonas cercanas al río. Al llegar a la localidad de Villanúa, municipio que se encuentra entre Canfranc y Castiello de Jaca, el valle se va abriendo un poco dejando una pequeña “llanura” formándose la llamada “cubeta de Villanúa” convirtiéndose más en un valle de fondo plano hasta que llega a Jaca donde definitivamente se abre cambiando la dirección del río.

Las elevadas pendientes dominantes en la mayor parte de la superficie de la cuenca alta del río Aragón favorece la actuación del proceso de escorrentía superficial. Sin considerar el resto de factores este, junto a las abundantes precipitaciones, se convertiría en el principal proceso del ciclo hidrológico en la zona.

5.2.4 Usos de suelo y vegetación

Nuestra área de estudio se encuentra en la región eurosiberiana en la provincia pirenaica, con influencia Alpina, donde el clima favorece el desarrollo de la vegetación. Al sur de nuestra área, en la localidad de Jaca puede realizarse más una clasificación en una zona más de transición con la región mediterránea.

En el entorno del nacimiento del río, en las zonas de mayor altitud encontramos sectores de roca desnuda correspondientes a las cumbres pirenaicas intercaladas con zonas de pasto natural. En toda el área del valle de Astún donde nace el río hay una gran cantidad de pastizales muy propicios para el ganado

En el tramo medio destaca la superficie boscosa, tanto bosques de coníferas, de frondosas como un bosque mixto, alterado con matorrales tanto esclerófilos como mesófilos formando en muchas zonas un matorral boscoso de transición.

En la parte baja del río de nuestra zona, cuando el río entra en el Canal de Berdún, cambia completamente el terreno, donde destacan los campos de cultivo, de regadío pero sobre todo de secano ya que la pendiente es menor y se aprovechan las terrazas formadas por el río.

Usos de suelo en la cuenca alta del río Aragón

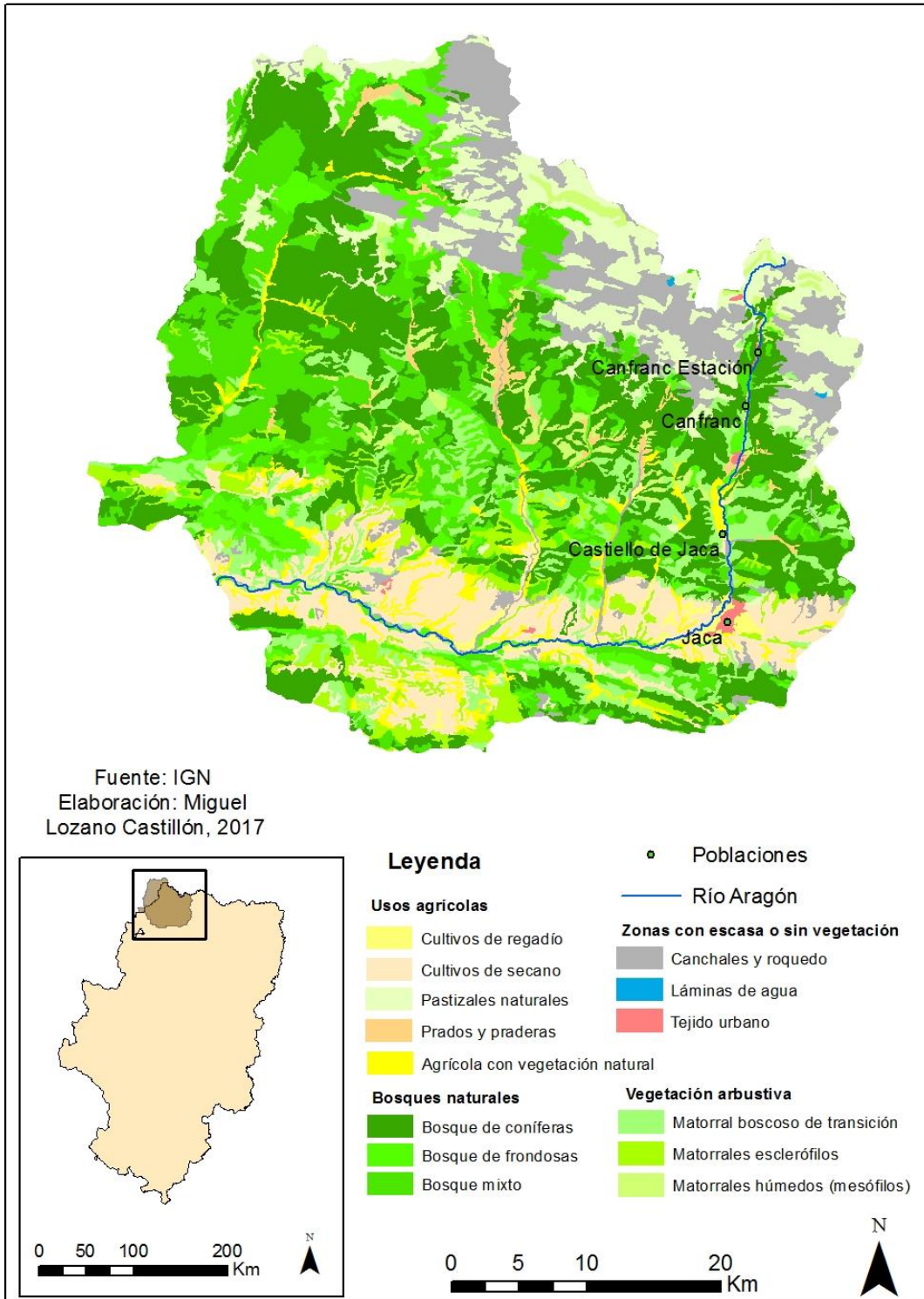


Figura 7. Usos del suelo en la cuenca alta del río Aragón

El estudio del uso del suelo tiene mucha influencia en los procesos hidrológicos que pueda tener el río. Por ejemplo, la presencia de cubierta vegetal ralentiza la llegada del agua de las precipitaciones al suelo haciendo que haya una mayor infiltración. Por el contrario, sin cubierta vegetal se produciría el llamado efecto “*splash*” con el que hay una menor infiltración.

En resumen, si consideramos aisladamente este factor, la zona de canchales y roquedos será proclive al funcionamiento prioritario de la escorrentía superficial, con un ritmo temporal condicionado por el tipo de precipitación y la retención nival. Por su parte ese amplio sector cubierto por bosques y matorrales supondrá un elevado consumo del agua de las precipitaciones a través de la interceptación neta y un funcionamiento habitual de la infiltración, de modo que la escorrentía superficial sólo será importante en los periodos de lluvias intensas en que el suelo se sature de agua. Finalmente, los cultivos de la Depresión Pirenaica favorecen el funcionamiento de la infiltración, viéndose favorecidos por la misma.

6. Caracterización hidrológica de la cuenca de estudio

6.1 Caudal de un río

Uno de los elementos fundamentales del régimen fluvial es la **caudaloidad**, es decir, la cantidad de agua que discurre por un río. Se puede valorar a través de varios indicadores: el caudal absoluto, el caudal específico y las aportaciones. De estos indicadores es el caudal específico el que expresa mejor el concepto de caudaloidad al poner en relación la cantidad de agua con el territorio necesario para su concentración. En el ámbito de este trabajo, este término lo relacionamos con los siguientes conceptos:

- **Caudal:** Es la cantidad de agua que discurre por un río en un lugar (donde se encuentra la estación de aforo) y un tiempo determinado. Se expresa en m^3/s . y es la medida más habitual.
- El **Módulo o caudal medio anual**, que se obtiene con el promedio del caudal medio de cada año. Este dato será muy importante, con una especial relevancia en los cálculos que contiene el presente trabajo. Los Módulos medidos en las estaciones de aforo de la cabecera del Río Aragón son:
 - Módulo Canfranc-Estación: $1,638 \text{ m}^3/\text{seg}$
 - Módulo Canfranc (Pueblo): $2,391 \text{ m}^3/\text{seg}$
 - **Módulo Canfranc¹² : $2,033 \text{ m}^3/\text{seg}$**
 - **Módulo Jaca: $6,861 \text{ m}^3/\text{seg}$**
- **Caudal específico:** Es el caudal puesto en relación con la extensión superficial de la cuenca. Se expresa en $\text{l}/\text{km}^2/\text{seg}$. La caudaloidad está mejor representada con el caudal específico al ponerse en relación con la superficie de la cuenca, se podría decir que la mejor forma de saber la caudaloidad de un río es con el cálculo del caudal medio específico anual.

Con estas premisas y los datos vistos, pasamos a calcular el caudal específico de las mencionadas estaciones del Río Aragón. Para ello, lo primero que haremos es pasar los m^3/seg . del módulo a l/seg , para lo cual se multiplica por 1000. Así, en Canfranc se obtiene la cifra de 2033 l/seg y en Jaca la de 6861 l/seg .

Después de este paso, se divide el dato obtenido por la superficie de terreno en km^2 aguas arriba de la estación. En el caso de Canfranc se toma la referencia de la

¹² Módulo medio con las dos estaciones de aforo de Canfranc (estación y pueblo)

estación de Canfranc (Pueblo) por ser más actual y por tener una mayor extensión de terreno aguas arriba con un total de 101 Km²; en el caso de Jaca, por su parte, se acumulan 238 Km².

Con estos datos, los caudales específicos medios anuales, es decir los módulos anuales, del río Aragón en las dos estaciones de aforo referidas serán los siguientes:

- **Caudal específico Canfranc: 20,12 l/km²/seg**
- **Caudal específico Jaca: 28,82 l/km²/seg**

Si se analizan estos resultados se determina que los caudales de ambas estaciones están en el grupo caudaloso fuerte (de 15 a 40 l/km²/seg)¹³. Es mayor la caudaloso del río en Jaca tal y como muestra su caudal específico, que es más del triple que el de Canfranc. Así, en su conjunto, se puede decir con estos resultados que el río Aragón en su cabecera es un río caudaloso, estando sometido a una fuerte influencia del régimen de precipitaciones, tanto líquidas como sólidas (procesos de deshielo), tal y como han apuntado estudios como el de Beguería et al. (2003). El régimen de precipitaciones, permite identificar en el tramo de río que nos ocupa, tres regiones que han de tenerse en cuenta a la hora de explicar las diferencias de caudales específicos del Aragón: i) desde el nacimiento a Villanúa; ii) desde Villanúa hasta Castiello de Jaca; iii) Jaca y Canal de Berdún¹⁴. Es muy evidente la estrecha y directa relación entre la abundancia de precipitaciones y los elevados caudales del río Aragón en este tramo alto de su cuenca, nuestra zona de estudio.

6.1.1 Variación estacional del caudal

Los caudales en un determinado punto del río sufren una variación estacional a lo largo de los doce meses del año. Estas variaciones son un reflejo de las variaciones climáticas, sobre todo el régimen de precipitaciones tanto líquidas como sólidas (incluido el deshielo), además de la influencia de los factores que condicionan el trazado de la red de drenaje (acumulación, permeabilidad, usos del agua, permeabilidad de los suelos, evaporación, etc.).

¹³ Según escala recogida en Sánchez Fabre (2014, 29).

¹⁴ Ver Elmoujahid (1997).



Figura 8. Curva de variación estacional del río Aragón en Canfranc.

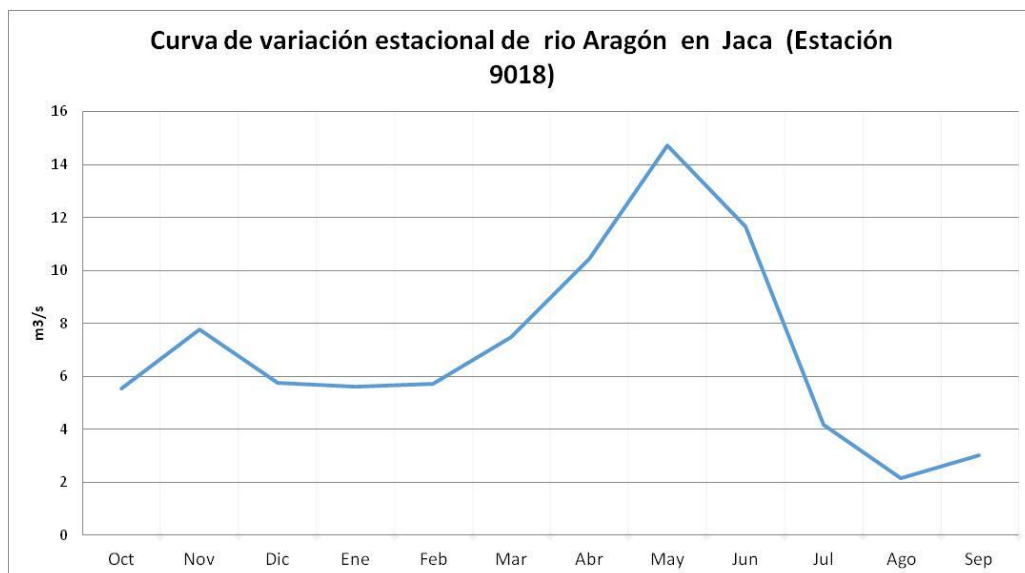


Figura 9. Curva de variación estacional del río Aragón en Jaca.

A partir de los datos recopilados en el Sistema del Anuario de Aforos se han podido elaborar estas gráficas de variación estacional del caudal del río Aragón en Canfranc (Figura 8) y en Jaca (Figura 9). Los datos recopilados en el aforo de Canfranc se extienden desde el año hidrológico 1971/1972 al 2013/2014. Por su parte, los datos de Jaca abarcan desde 1930/1931 a 2013/2014. En dichas figuras se puede apreciar con claridad el ritmo de los caudales y establecer el tipo de régimen fluvial del Aragón en esta zona.

Dentro de la clasificación establecida por García Ruiz y otros (2001) de los regímenes fluviales dependiendo de las curvas de variaciones estacionales, el río Aragón en su cabecera tiene un régimen fluvial que podríamos clasificar dentro del grupo mixto o complejo original. Ambos son regímenes donde vemos un máximo y un mínimo principal y otro secundario.

Se trata de regímenes nivo-pluviales, con un máximo en el mes de mayo a causa de las abundantes precipitaciones primaverales y, esencialmente, del deshielo de la nieve acumulada en la cuenca en los meses de invierno, en los que, desde final de noviembre hasta marzo se encuentra el mínimo secundario motivado por el hecho de que muchas de las precipitaciones en el valle son en forma sólida y quedan retenidas en las zonas más altas del mismo. Por otra parte, el mínimo principal se encuentra en verano, en el mes de agosto donde ya no hay aportes del deshielo y las precipitaciones son escasas. Un máximo secundario se da en noviembre fruto de las precipitaciones propias de otoño.

Muy frecuentemente el análisis de la variación estacional de caudal se realiza a través del coeficiente de caudal que permite establecer comparaciones de los regímenes fluviales de cursos de muy distintos ámbitos geográficos y caudales muy diferentes. La curva de coeficiente de caudal es la relación entre el caudal medio de cada mes y el módulo anual de una larga serie de años. Se obtienen valores comprendidos entre 0,1 y 3. Los valores inferiores a 1 indican caudales medios mensuales por debajo del módulo, y los mayores a 1, meses cuyo caudal está por encima del módulo. Por encima de 2 los valores duplican el módulo.

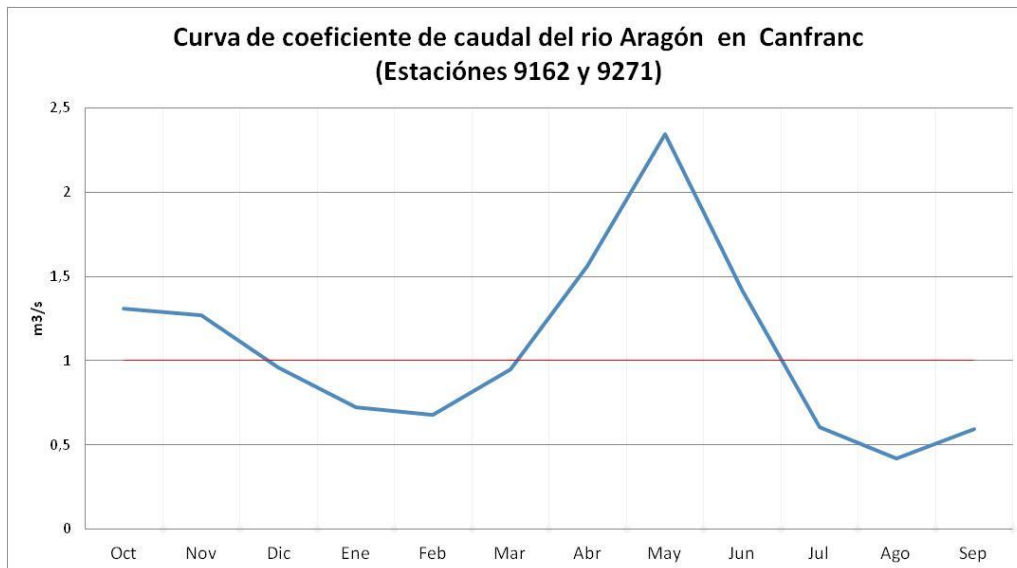


Figura 10. Curva de coeficiente de caudal del río Aragón en Canfranc

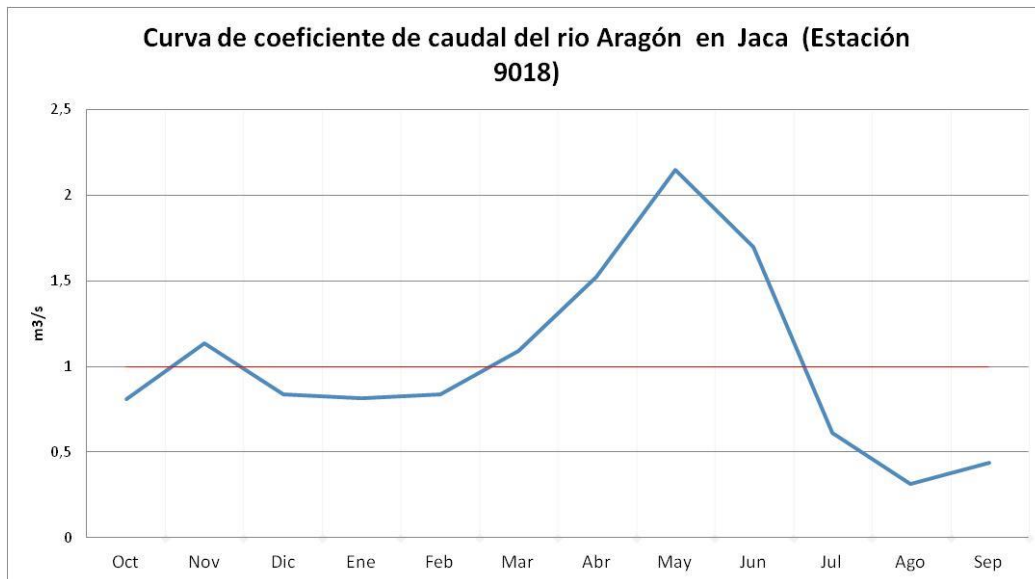


Figura 11. Curva de coeficiente de caudal del río Aragón en Jaca

En las figuras 10 y 11 se puede apreciar como las curvas de coeficiente de caudal en Jaca y en Canfranc son muy similares. Ambos perfiles muestran una irregularidad anual con dos periodos donde los valores están por debajo de 1, es decir valores donde no se supera el módulo que corresponde en ambas estaciones al periodo invernal, los meses de diciembre, enero y febrero (también marzo en el caso de Canfranc) y el periodo de verano, los meses de Julio, Agosto y Septiembre (también Octubre en el caso de Jaca). Las épocas de aguas altas (abril, mayo, junio) en las que se llega a un coeficiente de caudal cercano a 2,5, también coincide en ambas estaciones.

6.1.2 Irregularidad interanual y coeficiente de irregularidad.

Se llama irregularidad de un río a las variaciones entre los valores del caudal medio anual que se registran durante una serie de años. Se puede expresar por medio del coeficiente de irregularidad, que se obtiene dividiendo el caudal medio anual máximo de la serie por el caudal medio anual mínimo ($C_i = C_{max} / C_{mín}^{15}$). Los valores bajos de este cociente ($<4 \text{ m}^3/\text{s}$) indican un régimen más estable, los valores $>10 \text{ m}^3/\text{s}$ son indicativos de grandes irregularidades, mientras que los que se encuentran entre 6 y 8 m^3/s muestran una irregularidad media.

Con las referencias medidas en la estación de aforo de Jaca, al dividir el caudal máximo de la serie correspondiente ($19,34 \text{ m}^3/\text{s}$) por su caudal mínimo ($1,87 \text{ m}^3/\text{s}$), nos da un valor de $10,34 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir una irregularidad realmente muy alta del río Aragón en este punto de aforo, de acuerdo con los valores de la escala referida anteriormente.

Para el caso de la estación de aforo de Canfranc, y aplicando el mismo criterio de cálculo que en Jaca, tenemos un coeficiente de irregularidad de 9,80 resultado de dividir el valor máximo de la serie ($5,49 \text{ m}^3/\text{s}$) por el mínimo ($0,56 \text{ m}^3/\text{s}$).

¹⁵ C_i = Coeficiente de irregularidad; C_{max} = Caudal máximo de la serie; C_{min} = Caudal mínimo de la serie.

Estos coeficientes tan altos en ambos puntos del río Aragón, en torno a diez, dan una irregularidad impropia de los ríos pirenaicos en su tramo alto, y más propia de otros ramos más bajos de los mismos o de otros ríos de la margen derecha del Ebro (ver Sánchez et al., 2004, pp. 61 y siguientes). Esta incongruencia aparente puede estar explicada por los sesgos que introducen, en el caso de Canfranc, las crecidas extraordinarias de año 2012/2014 y, en el caso de Jaca, de 1935-1936.

A modo de ejemplo para comparación, los autores citados daban para el Aragón Subordán (afluente del río Aragón), en la estación de Javierregay, y para una serie comprendida entre 1965/66 y 1992/93, un coeficiente de 2,8, es decir, una irregularidad baja que nada tiene que ver con la que obtenemos para el río Aragón en su tramo alto (estación de Canfranc) en la serie estudiada. Sin embargo, si limitamos la serie temporal a los mismos años, los datos sí que son semejantes y compatibles, en ambos casos (Aragón y Aragón-Subordán), con los rasgos de regularidad de los ríos pirenaicos.

Sacamos de esto unas conclusiones. La primera es la variabilidad del coeficiente de irregularidad de un río depende mucho de la serie temporal que se analice y que los fenómenos extremos que suponen las crecidas extraordinarias de los ríos influyen en el coeficiente de irregularidad

La irregularidad se suele representar por medio de un histograma de barras, en el que el eje X de abscisas representa cada uno de los años hidrológicos que componen la serie; el eje Y (ordenadas), los valores de caudal (caudaloidad) expresado en m³/seg. La línea recta roja que aparece es el módulo (el caudal medio anual teórico calculado como si el río llevara siempre el mismo caudal), y que nos ayuda a ver como se distribuye el caudal anualmente según los valores de cada año se sitúen por encima o por debajo del módulo. La irregularidad en el río Aragón, a partir de datos de dos series históricas que van desde 1931 a 2014 (en el caso de Jaca, estación de aforo 9018) y de 1971 a 2014 en el caso de Canfranc, la hemos representado en los histogramas que muestran figuras 12 y 13.

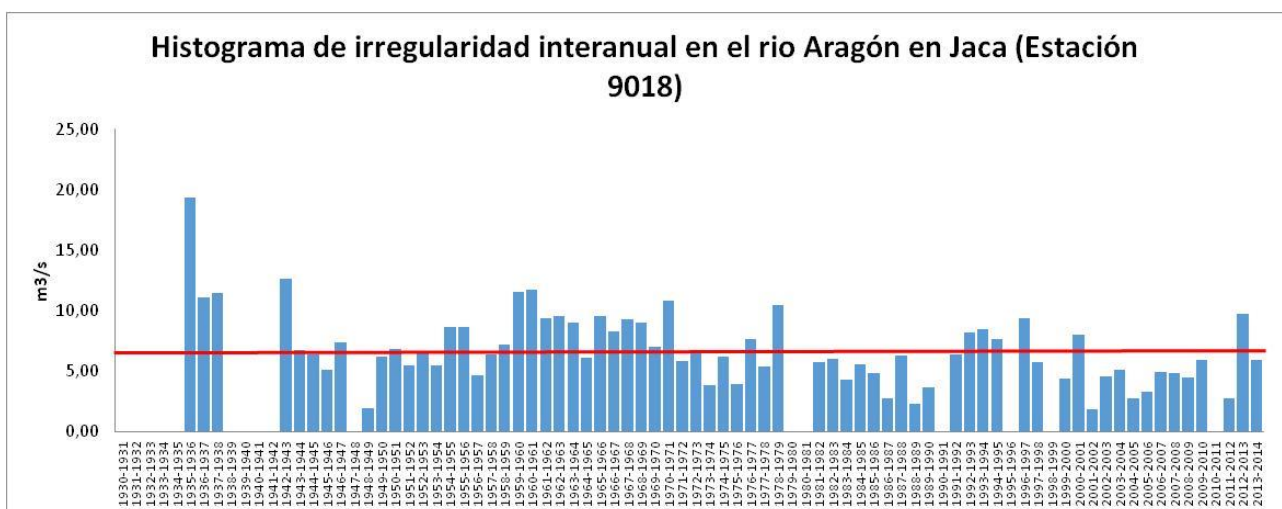


Figura 13. Histograma de irregularidad interanual en el río Aragón en Jaca.

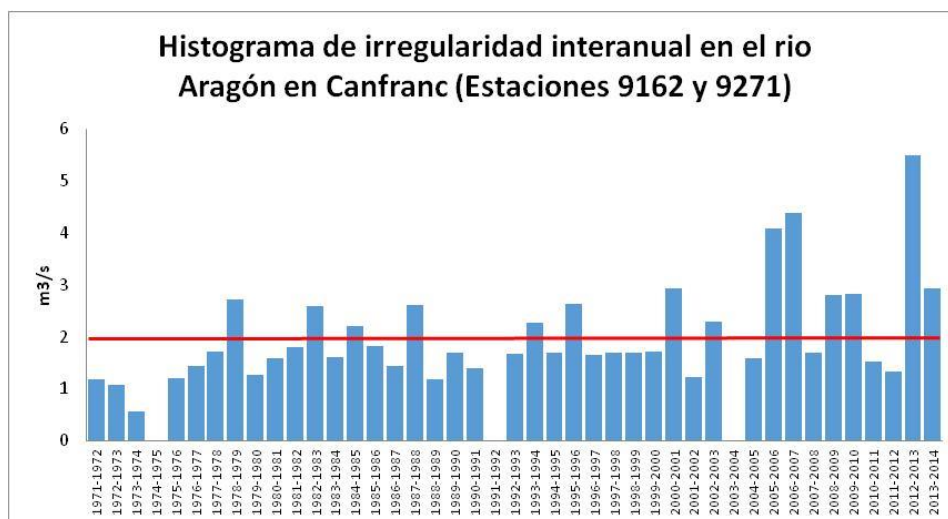


Figura 14. Histograma de irregularidad interanual en el río Aragón en Canfranc¹⁶.

En ambas figuras encontramos que hay más años por debajo del módulo que por encima de este, en Jaca encontramos 28 años por encima del módulo (41 % del total de los años) y 39 por debajo (59 %); mientras que en Canfranc únicamente 14 años se encuentran por encima del umbral del módulo (35 %) y 26 por debajo (65 %).

En el caso de Jaca, llama la atención la distribución de la gráfica, ya que hasta 1980 se puede decir que hay más años por encima del módulo que por debajo, pero después de esta fecha únicamente 6 años de los 29 que hay con datos hasta 2014 se encuentran por encima del módulo. En cambio en Canfranc la distribución es distinta, ya que desde el 2000 hay un mayor número de años por encima del módulo (8 años) que por debajo (5 años).

7. Fenómenos extremos. Las crecidas

Una vez que ya se han analizado las características del medio físico de la cuenca y se ha visto el régimen fluvial del Aragón en su tramo alto, estamos en disposición de abordar la parte central de nuestro trabajo que son las crecidas. Así pues, definimos crecida como un aumento rápido y acentuado del caudal de un río.

Con todo, no siempre un aumento del caudal debe entenderse como crecida. Aunque tradicionalmente se decía que el umbral de una crecida se establecía cuando el caudal duplicaba el módulo del río, actualmente este criterio se ha modificado según el tipo de río, por lo que se tiende a considerar crecida cuando su caudal se triplica, o se multiplica por 5, 10, 25 o 50 veces el módulo (Sánchez Fabre, 2014, 30)¹⁷, lo que permite, de entrada, diferenciar diferentes rangos de este fenómeno extremo.

También se pueden diferenciar los tipos de crecida en función de la frecuencia de los eventos. Las crecidas “ordinarias” son aquellos caudales máximos que suponen

¹⁶ Desde 1971 a 1991 los datos pertenecen a la antigua ubicación de la estación de aforo en Canfranc Estación; a partir de la última fecha, los datos pertenecen a su ubicación en Canfranc pueblo.

¹⁷ En el trabajo se ha considerado crecida los eventos que al menos triplican el Módulo.

un aumento del caudal habitual del río relativamente menor y que suceden con cierta frecuencia (periodos de retorno inferiores a 10 años) y las “extraordinarias” cuando los caudales son de mayor magnitud y se suceden cada más tiempo.

Normalmente, el origen de las crecidas se encuentra en precipitaciones de gran intensidad, aunque también hay otras causas como puede ser el deshielo (aunque la crecida no es tan repentina y es más previsible), la ruptura de arcos morrénicos, bloques de hielo, desprendimiento de laderas o por la dinámica costera. No obstante, las causas no siempre son naturales, también suelen producirse por causas antrópicas, como la presencia de zonas urbanizadas que pueden generar una mala infiltración, la deforestación, las causas agrícolas, la canalización de cauces o la ruptura de presas. Aquí, cabe esperar que tanto las precipitaciones de fuerte intensidad como los deshielos bruscos sean las causas habituales de las crecidas del río Aragón.

Las crecidas son predecibles en su magnitud y en la probabilidad de que sucedan cada año a partir de modelos hidrológicos y considerando series largas de registros históricos y tienen su origen fundamentalmente en precipitaciones máximas también de carácter extraordinario.

Sin embargo, no todas las crecidas producen inundaciones y no todas las inundaciones proceden de crecidas fluviales. La inundación se refiere a la ocupación de terrenos por el agua debida a desbordamientos de los cauces fluviales, habitualmente como consecuencia de las crecidas, no necesariamente extraordinarias: puede darse que avenidas ordinarias puedan generar inundaciones de carácter extraordinario. En estos casos, el origen de las inundaciones puede ser un mal estado de los cauces o por otros factores antrópicos como roturas de estructuras de control de aguas.

Hecha esta aclaración pasamos a la caracterización de las crecidas de la parte alta del río Aragón, de nuevo con los observatorios de Canfranc y Jaca como puntos de referencia. Es un buen río para realizar el estudio ya que ha registrado un gran número de crecidas de gran intensidad y que pueden afectar a varios núcleos urbanos.

7.1 Numero de eventos de crecida

En relación con los eventos de crecida e inundación en el tramo alto del río Aragón hay un gran número de estudios. En primer lugar se puede citar el trabajo de Ollero (2000) en el que analiza los principales eventos en la cuenca del Ebro (a la que pertenece el río Aragón) desde 1980. Las crecidas de los afluentes pirenaicos del río Ebro fueron analizadas por García Ruiz et al, (1984; 2001). Más centrados en eventos recientes del río Aragón, se pueden ver Acín et al. (2012), Lana-Renault et al. (2013) y Serrano Muela et al. (2013).

En el presente trabajo, lo primero que vamos a hacer es, a partir de los caudales máximos instantáneos mensuales, contar el número de eventos de crecida evidenciados por los datos de los dos observatorios, clasificarlos dependiendo del número de veces que los picos de estas crecidas superan al módulo del río. Hay que recordar que el Módulo en Canfranc es 2,033 m³/seg, mientras que el Módulo Jaca es 6,861 m³/seg. (ver apartado “Caudal de un río”, en este trabajo).

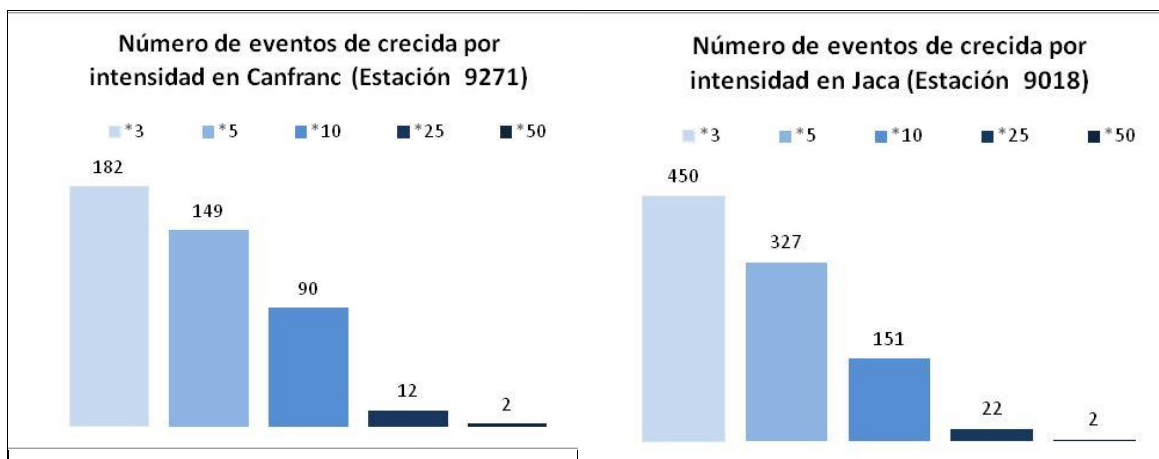


Figura 15. Número de eventos de crecida en el río Aragón, por intensidad (estaciones de aforo de Canfranc y Jaca).

Los datos sobre crecidas de las dos estaciones de aforo pertenecen a series históricas de duración diferente, por lo que hay que tener cuidado al hacer comparaciones en cuanto a las frecuencias de eventos en cada una de ellas. En el caso de la estación de Jaca, hemos estado manejando datos desde el año 1943. La estación de Canfranc nos ha aportado datos desde 1991. En la gráfica 9 se recogen los valores absolutos de los dos casos, así pues, el número de crecidas de Canfranc hacen un total de 182 eventos que al menos triplican el módulo en el periodo 1991 – 2014, que hace un promedio de 7.9 crecidas cada año. En el caso de Jaca, los eventos que se recogen son 450, pero en un periodo de tiempo mayor (1943 – 2014) lo que supone 6,3 crecidas anuales. Para ver las diferencias de los comportamiento del río en cada estación vamos a separar los datos de la gráfica 9 por cada uno de los tipos de crecida (ver figura 15).

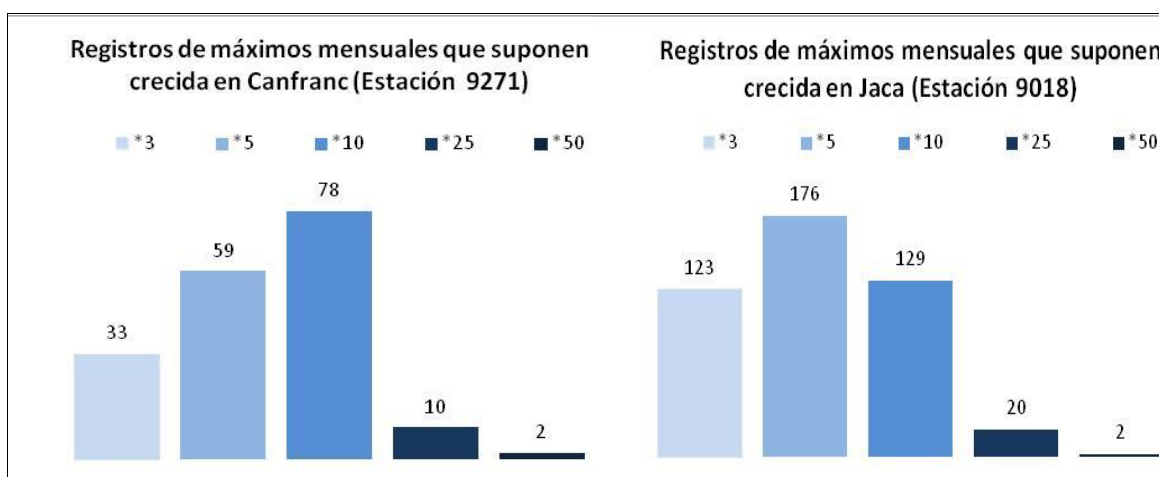


Figura 16. Registros de máximos de caudal mensuales que suponen crecida en el río Aragón. Estaciones de Canfranc y Jaca.

Estos datos permiten ver que la tipología de las crecidas por su intensidad es diferente en ambas estaciones. En Canfranc predomina el tipo de crecida que supera en 10 veces el módulo mientras que en Jaca las crecidas más frecuentes son más moderadas, las que multiplican el módulo por cinco.

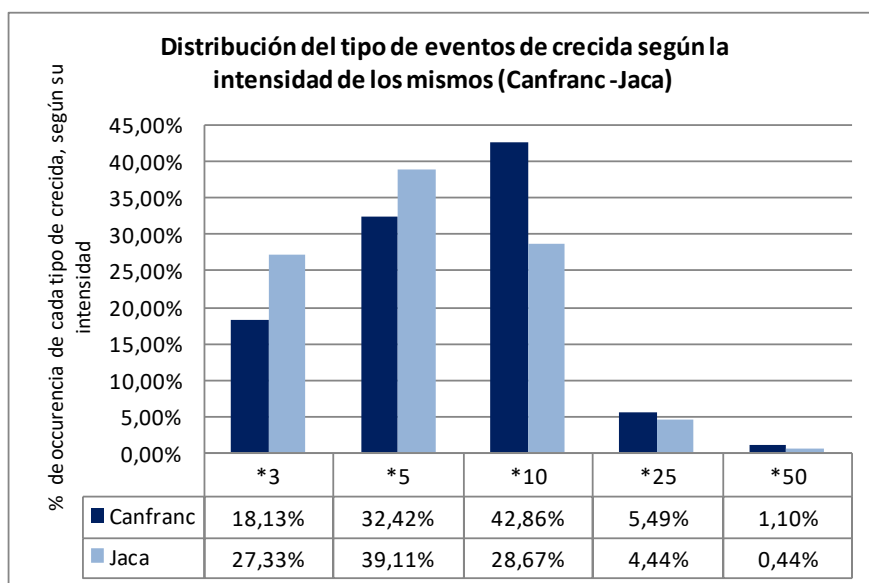


Figura 17. Registros de máximos de caudal mensuales que suponen crecida en el río Aragón. Estaciones de Canfranc y Jaca.

7.2 Volumen y reparto temporal de las crecidas.

Para conocer más a fondo las crecidas del río Aragón utilizamos el dato del máximo instantáneo mensual. En primer lugar, se han generado 6 grupos diferentes según correspondan los máximos mensuales con el módulo o con el módulo multiplicado por *3, *5, *10, *25 y *50 (ver tabla 1).

Canfranc		Jaca	
Módulo	2,03	Módulo	6,86
*3	6,09	*3	20,57
*5	10,15	*5	34,29
*10	20,3	*10	68,58
*25	50,75	*25	171,44
*50	101,5	*50	342,89

Tabla 1. Grupos en los que clasificar los datos de máximos instantáneos mensuales en m³/s.

Estaciones de Canfranc y Jaca.

Una vez sacados los umbrales de cada grupo hay que ir a la búsqueda de los máximos instantáneos mensuales en cada uno de los años. En la estación de Canfranc, los valores van desde el año 1991 hasta el 2014 (ver tabla 2). Para la estación de Jaca los datos son los recogidos desde 1943 a 2014 (tabla 3).

	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014
Oct	-	53,66	41,16	30,84	2,1	0,95	0,44	6,47	47,39	47,96	28,39	30,35	50,81	41,16	39,48	110,98	7,29	4,51	25,34	13,77	3,58	115,4	34,97
Nov	59,88	18,68	16,22	54,23	50,81	41,72	49,67	3,77	2,01	63,06	4,51	21,53	27,9	7,41	27,9	54,66	43,69	13,34	17,73	12,8	40,56	26,05	26,5
Dic	0,91	31,82	4,93	45,11	56,07	32,8	60,52	11,51	13,7	24,47	9,06	38,92	27,41	3,21	18,59	43,69	1,53	2,28	26,18	29,53	2,31	25,6	6,96
Ene	0,44	0,91	4,93	44,54	22,51	8,73	7,08	5,07	5,91	45,11	5,63	44,54	25,94	3,4	4,79	3,4	9,73	24,47	9,04	14,1	2,31	24,7	19,03
Feb	0,91	0,41	1,84	25,45	6,47	3,77	3,03	4,23	7,08	8,07	6,47	3,77	4,51	1,02	4,51	47,99	1,08	2,28	14,75	4,26	4,62	10,42	15,38
Mar	0,55	2,75	2,48	9,39	14,58	1,63	3,03	8,73	7,74	40,6	8,73	45,11	8,4	9,06	30,35	9,43	2,01	2,84	11,54	3,73	0,76	24,7	10,74
Abr	22,78	2,48	19,5	2,01	14,14	10,42	19,57	16,78	24,96	18,59	6,75	35,8	11,51	16,34	21,04	25,1	11,5	3,95	16,06	25,76	23,77	22,9	20,52
May	12,88	30,84	33,8	40,04	26,43	17,66	26,43	27,41	42,84	16,78	42,28	17,66	28,88	32,31	17,22	11,5	34,16	26,92	15,08	3,73	18,38	22,45	17,93
Jun	15,4	20,32	32,8	4,79	13,34	5,35	21,53	7,08	18,59	11,88	23	12,61	27,9	2,01	12,61	47,51	13,12	12,6	14,75	2,34	3,58	34,97	15,74
Jul	6,16	0,77	1,06	1,25	6,47	29,37	1,82	19,08	6,47	6,19	1,72	5,35	8,73	3,21	15,02	1,08	2,34	1,13	18,39	1,07	2,15	14,65	11,72
Ago	36,8	3,3	0,62	0,34	2,47	6,75	18,59	7,74	4,23	2,29	2,84	2,1	5,35	31,33	5,35	3,21	0,66	10,91	2,69	1,88	1,5	11,39	8,47
Sep	4,38	27,47	24,89	10,42	11,51	3,4	12,97	31,33	4,79	3,21	3,58	43,97	3,21	5,91	85,97	1,34	0,79	2,69	4,82	1,2	3,84	16,11	10,42

Tabla 2. Máximos instantáneos mensuales. Estación de Canfranc.

	1943-1944	1946-1947	1947-1948	1948-1949	1949-1950	1950-1951	1951-1952	1952-1953	1953-1954	1954-1955	1955-1956	1956-1957	1957-1958	1958-1959	1959-1960	1960-1961	1961-1962	1962-1963	1963-1964	1964-1965	1965-1966	1966-1967	1967-1968
Oct	76	8	16,6	1,26	28,5	1,7	4	48	41,1	16	37	4,4	5,3	47,1	43	133	20,4	15,7	54,3	30,9	143,05	210,2	56,7
Nov	127	11,3	8,1	6,55	25	60	31,5	94	27,2	32,5	37	2,46	9,18	16,3	30,3	69,5	121	40,6	136	72,5	251,81	313,51	251,81
Dic	14	42,5	11	14,2	26	3,5	4,4	72	18,1	48	72	3,06	1,56	63,5	78,3	23,7	22,04	39	40,6	18,86	43,64	31,34	20,2
Ene	2,4	20,2	54	3,2	20	62	32,5	6,5	12,5	88	65	2,16	11,1	8,3	42,2	64,7	99,1	73,58	3,19	16,55	173,45	4,69	23,8
Feb	1,5	50	12	1,35	13	35	36	5,75	18,3	65	9,5	29,22	38,94	4,5	99,1	39	14,8	13	62,3	17,32	32,22	10,96	35,86
Mar	15	98	21	3,94	20	80	96	12,3	29,5	29	36	14,4	65,78	55	36,6	17,4	101,5	44,6	39	35,7	12,44	117,26	16,38
Abr	52	28,6	47,5	8,7	16	30	44	31,2	30	15,5	-	14,4	31,2	73	26,9	54,3	88,08	65,5	97,5	20,4	48,2	17,11	122,63
May	29	65	38	17,8	75	55	20	29,8	37,6	21	-	18,3	70,96	43	78,3	86	40,6	29,3	42,2	33,3	34,94	39,62	54,1
Jun	25,5	22,75	14	15,15	26	45	35	38,4	45,6	93	-	51,68	75,4	28	165,5	51	41,4	79,16	43	14,24	56,7	25,76	26,74
Jul	2,2	23,6	2	1,35	5	9	60	16,5	9	72	-	12,42	18,38	11	13,3	20,4	9,88	128	8,94	15,78	13,24	14,05	26,74
Ago	51	7	1	2	3,5	4	8	17,5	1,4	35	-	5,3	2,46	4	7,8	23,7	1,7	108	6,7	1,96	1,37	2,67	15,65
Sep	31	18,34	19,68	43	1,6	1,5	7,5	7	5	14,1	-	2,76	67,26	49	90,7	50,3	3,78	17,36	9,5	123	2,67	102,94	19,3

	1968-1969	1969-1970	1970-1971	1971-1972	1972-1973	1973-1974	1974-1975	1975-1976	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981	1981-1982	1982-1983	1983-1984	1984-1985	1985-1986	1986-1987	1987-1988	1988-1989	1989-1990	1990-1991
Oct	1,05	17,56	17,56	66,38	81,9	8,3	10,9	8,7	241	196	4,68	96,95	86,69	26,7	153,2	2,76	16,63	1,58	11,4	145,3	13,6	9,32	-
Nov	81,9	24,5	273	7,68	160	128	167	15	128	6,1	4,68	5,66	-	2,84	252	10,6	176,4	55,31	54,5	4,51	18,93	22,75	49
Dic	39,6	78,48	11,89	2,15	45,9	7,1	8,7	28,7	50,6	32,8	40,14	10,2	32,63	301	36,28	18,9	56,14	20,48	33	27,47	0,45	65,63	21,94
Ene	35,9	151,7	43,64	4,6	5,6	152	25	9,78	85,3	6,6	104	24,15	39,01	32,6	4,87	14,4	86,44	7,05	11,4	66,5	0,45	4,02	21,94
Feb	23,8	9,42	39,62	88,77	4,6	9,4	12,7	28,7	150	55,4	166,5	21,66	39,01	9,6	73,7	43,7	25,1	18,93	11,4	56,14	1,38	23,44	10,02
Mar	124	5,1	26,7	10,63	3,12	62	11,5	10,4	12,1	39,6	122,4	-	34,69	9	7,05	33	5,74	12,86	6,18	7,62	9,9	4,48	55,28
Abr	150	39,62	273	34,04	60,6	25	75,1	15,7	30,6	28,7	44,74	-	55,4	10,2	35,46	37,1	63,02	46,18	120	65,63	12,86	4,94	27,12
May	162	58	210,2	64,93	85,3	44	42,5	34,7	43,6	81,9	142,5	25	58	26,7	63,89	33	47,84	67,4	8,76	28,26	23,56	35,18	24,44
Jun	119	52,92	195,5	70,72	43,6	247	64,9	22,4	132	87,1	391,3	60,6	50,59	63,5	37,1	56,1	35,46	51,99	6,18	110,4	9,86	10,94	43
Jul	33,1	10,63	48,2	28,66	41,5	28	50,6	92,2	107	16,6	22,45	17,03	5,66	12,1	6,61	15,9	7,62	3,41	22	100,2	6,78	4,02	7,2
Ago	8,89	16,65	28,66	64,93	81,9	6,6	13,8	12,1	23,3	5,6	15,56	1,72	2,84	16,3	14,36	5,31	1,87	-	2,17	5,74	20,68	-	4,4
Sep	35,9	5,6	76,77	75,05	35,3	14	55,4	14,4	4,9	5,6	23,3	113	56,7	66,4	8,19	8,19	3,41	7,62	1,87	11,38	7,24	-	14,06

	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014
Oct	17,9	171	105	91	6,05	12	11,8	17,6	141	93,5	72,25	59,23	166,8	72,3	92,25	199	6,86	11,77	71	25,08	6,34	363	110,55
Nov	112	36,91	46,65	169,6	119	106	129	15,5	8,23	163	6,45	44,14	56,56	13,5	38,38	106	69,75	26,83	45,6	22,17	86,16	34,49	79,64
Dic	9,08	89,4	22,44	129,2	55,5	155	174	20,4	37,6	49,5	6,17	61	92,25	8,67	5,88	59,9	6,05	6,86	82,3	108,5	8,75	74,32	43,18
Ene	4,4	6,8	25,09	137	-	34	26,2	7,78	10,5	123	7,78	76	54,79	14	4,17	3,38	26,25	116,2	32,4	27,31	5,46	187,05	46,14
Feb	6,15	5,24	23,92	29,1	20,6	11	10,9	5,6	10,9	10,5	4,74	68,5	6,89	7,78	3,89	125	3,87	18,19	18,1	11,89	5,46	20,03	31,06
Mar	5,8	11,2	15,02	16,26	50	15	10,9	31,7	11,9	163	17,64	73,5	12,93	16,6	45,03	8,2	11,38	12,31	23,9	8,15	4,63	120,32	24,66
Abr	38,5	34,48	29,1	12,17	50	27	41,6	24,2	64,8	58,3	19,82	40,81	20,37	23,5	21,46	59,9	81	39,48	26,8	35,78	70,5	41,7	42,44
May	23,1	58,68	74,75	83,5	89,8	58	43,3	72,3	87,3	31	47,69	28,23	35,13	28,2	26,2	12,6	153,2	46,88	31,3	8,57	32,68	33,22	28,9
Jun	29,1	43,08	52,2	16,26	31,3	26	43,3	-	96</														

distribución de las crecidas a lo largo del año, lo que es normal al tratarse del mismo río y no estar muy lejos un punto del otro.

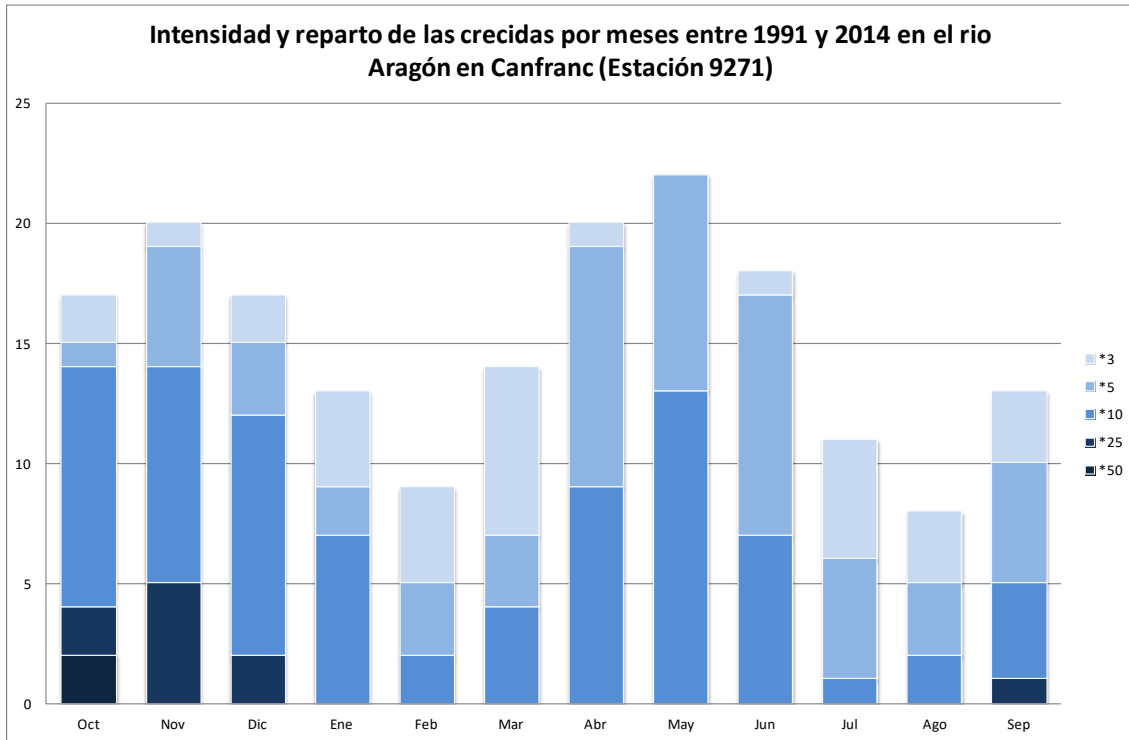


Figura 18. Intensidad y reparto de crecidas. Canfranc, 1991-2014.

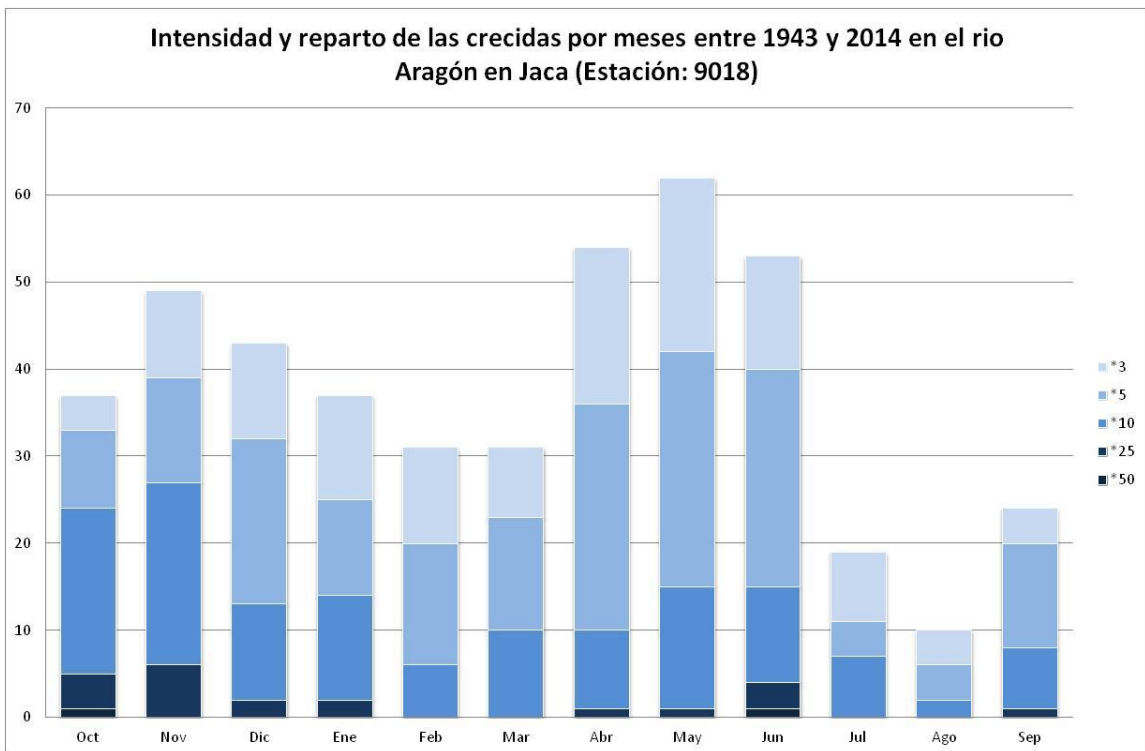


Figura 19. Intensidad y reparto de crecidas. Jaca, 1943 -2014.

7.3 Reparto de las crecidas por meses

Siguiendo con las figuras 18 y 19, podemos observar que hay un mayor número de crecidas en los meses de primavera entre abril y junio, siendo mayo el mes con más eventos en ambas estaciones. Como segundo grupo de meses con un notable número de crecidas está el de los meses de otoño, sobre todo noviembre pero también octubre y diciembre. Estos meses otoñales destacan más en el gráfico de Canfranc que en el de Jaca, donde claramente los meses primaverales tienen mucho más peso.

La abundancia de crecidas en otoño está relacionada con la cantidad de precipitaciones en forma de lluvia durante estos meses, mientras que en primavera, además de estar relacionada con las precipitaciones, también lo está con el deshielo de la nieve acumulada durante el invierno.

En cambio, las estaciones de verano e invierno son las que han tenido menos crecidas: los meses de febrero y agosto en el caso de Canfranc, mientras que en Jaca son julio y agosto, siendo este último el mes en el que ha habido menos precipitaciones en ambas estaciones. Las causas de que no haya habido muchas crecidas en verano, e evidentemente, tiene que ver con ausencia de precipitaciones. En cuanto al invierno, no es consecuencia de la ausencia de precipitaciones, sino a la forma de nieve de las mismas y que quedan almacenadas en las partes altas de las montañas.

La localización de las crecidas más fuertes en el tiempo no está relacionada con los meses con mayor número de eventos. Las crecidas más fuertes se dan en ambas estaciones en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre. En Canfranc también hay crecidas muy fuertes en abril, mayo y junio. Las crecidas de los meses primaverales no son tan fuertes como puedan ser las de otoño, esto se debe a que las crecidas procedentes del deshielo de nieve suelen ser mucho menos repentinas y más previsibles, por lo que para la población suelen comportar menos riesgos.

Si miramos la distribución a lo largo de los años, en las tablas 2 y 3, llama la atención como en los dos últimos años (2012-2013 y 2013-2014) aumenta notablemente el número de crecidas, como en Canfranc donde durante estos dos últimos años hay un registro de crecida en todos los meses. También destacar la escasa cantidad de crecidas producidas entre 1943 hasta los años 60 en Jaca (tabla 3) en comparación con el resto de los años.

7.4 Tipología de las crecidas

Una vez vistas la cantidad de crecidas registradas en la cuenca alta del río Aragón y su distribución temporal, vamos a analizar en detalle algunas de ellas, para evidenciar su evolución e intentar establecer la presencia de varios tipos de crecida en función de las características de esa dinámica. Para ello es necesario elaborar los correspondientes hidrogramas. Hemos seleccionado una serie de eventos por cada uno de los grupos de intensidades de crecida, las que multiplican el módulo por 3, 5, 10, 25 y por 50. Dentro de ellas, y a lo largo de los años, se ha pretendido que sean representativas de las producidas en cada estación del año (otoño, invierno, primavera y verano). Se pretende mostrar con los ejemplos que los hidrogramas siguen modelos diferentes que corresponden a distintos tipos de crecidas con distintos niveles de riesgo y peligrosidad.

Antes de entrar en el estudio del tipo de gráfico de crecida para el trabajo, conviene aclarar algunos conceptos en cuanto a las partes de un hidrograma. La curva de ascenso se da al inicio de la crecida con un aumento rápido del caudal; la cresta o punto de inflexión es el instante con el máximo de crecida a partir del cual empieza a descender el caudal del río; a partir de ahí es donde comienza la curva de descenso, una curva más prolongada que la de ascenso. Por último la curva de agotamiento es la prolongación de la de descenso pero con una menor pendiente y termina cuando el río recupera sus niveles habituales de caudal (Figura 19)

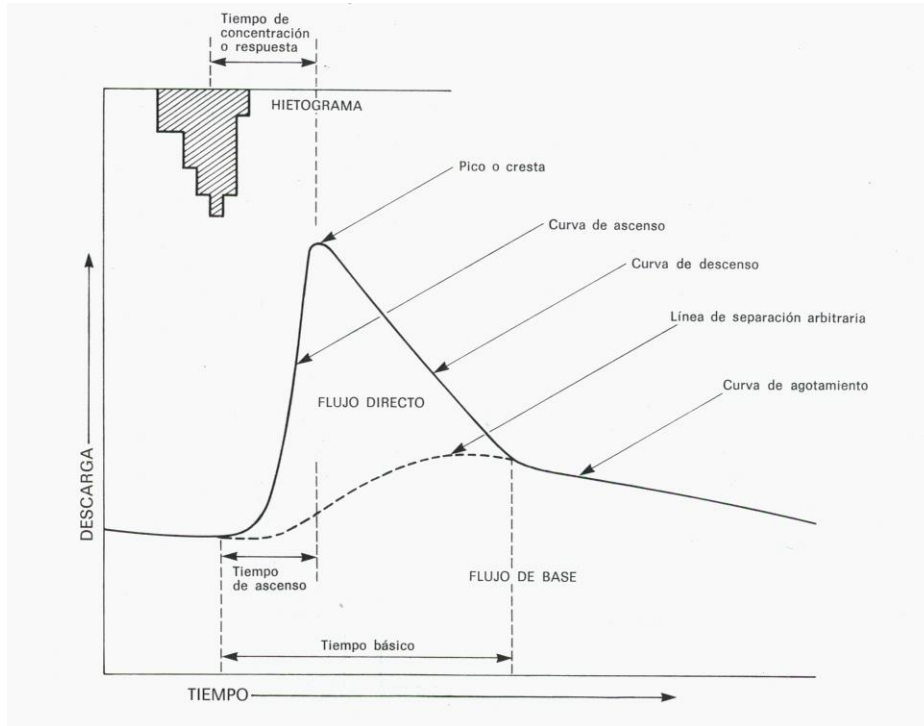


Figura 20. Esquema de el hidrograma de crecida. Fuente: Mateu (1984).

Ollero (2000) recoge dos tipos de procesos en los ríos de Aragón que llevan asociado distinto tipo de crecidas: procesos en cauces de montaña y cursos de orden bajo (crecidas relámpago o *flash flood*) y procesos en cursos medios y bajos (crecidas más largas). Además podemos añadir otro grupo de transición entre los grupos precedentes (correspondiendo a cursos de agua de tamaño medio). Los dos puntos de referencia del río Aragón del que tomamos los datos reúnen características propias del primer grupo (especialmente Canfranc) y más del de transición (Jaca). Por tanto, analizando las crecidas cortas y las largas conoceremos mejor las variaciones de comportamiento de río en su tramo alto, durante los episodios de crecida.

Consideraremos como crecidas cortas aquellas cuya duración, independientemente de la intensidad, es inferior a 15 días, considerando desde el momento en que se inicia la curva de ascenso hasta el final de la curva de agotamiento. La mayoría de ellas presentan un hidrogramas muy simple, una curva de ascenso rápida y con pendiente muy acusada, un único punto de inflexión que coincide con el máximo de la crecida a partir del cual el caudal empieza a descender con la misma rapidez. La figura 21 muestra ejemplos de crecidas cortas en Canfranc.

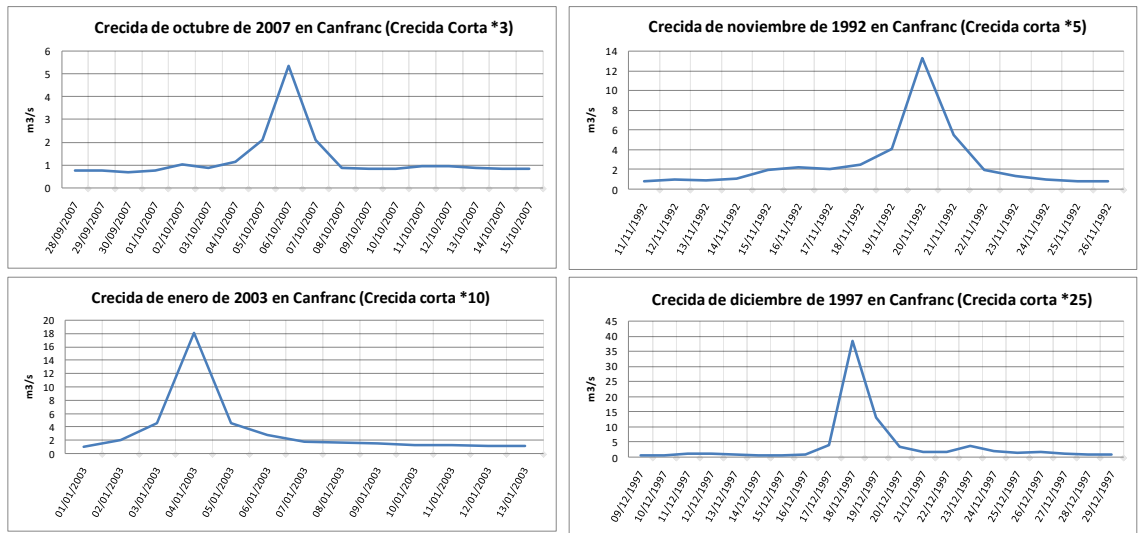


Figura 21. Ejemplos de crecidas cortas. Canfranc.

Independientemente de la intensidad de las crecidas representadas, puede verse que su duración en este punto del río no va más allá de los tres días de duración, presentado pendientes de ascenso y de descenso muy rápidos sin estabilidad en los máximos. Este tipo de crecidas es las que podríamos considerar como procesos propios de ríos de montaña, según la tipología que se ha visto más arriba.

Por su parte, en la figura 22 se puede ver las cinco crecidas cortas sobre las que se han recogido datos en la estación de Jaca.

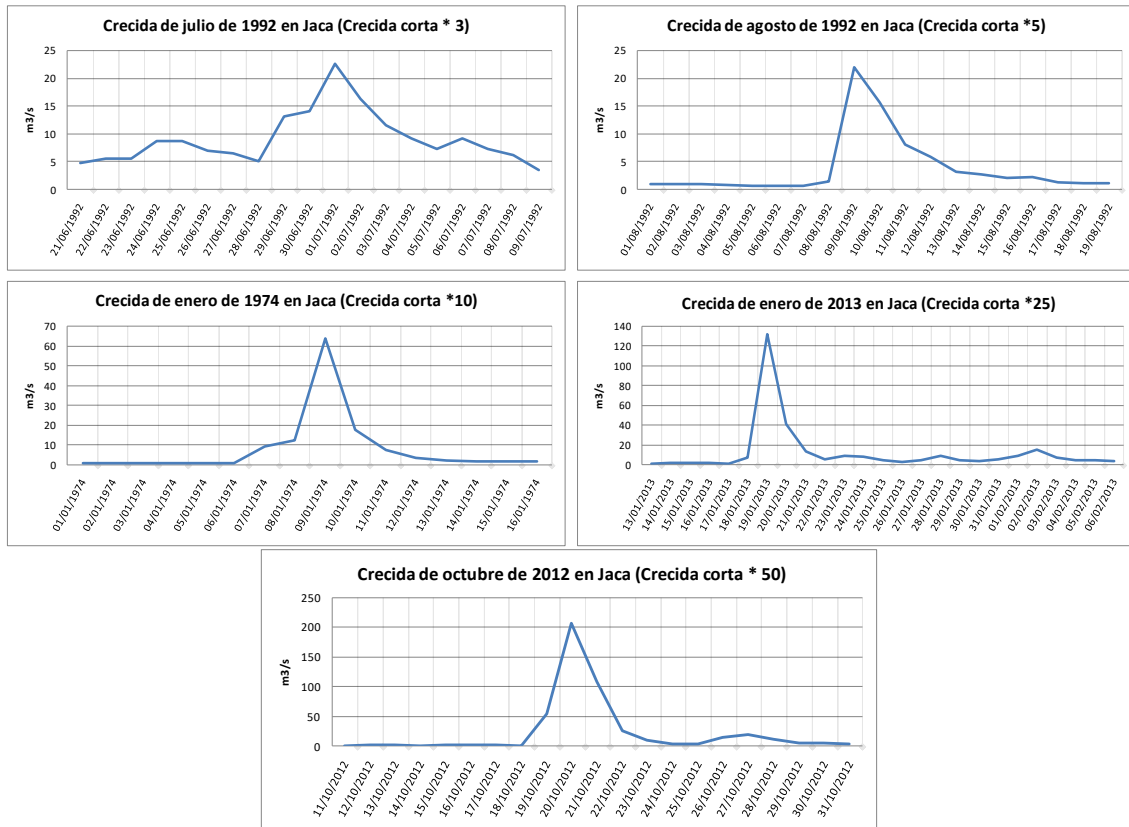


Figura 22. Ejemplos de crecidas cortas. Jaca.

Puede verse que en esta caso los perfiles de las crecidas cortas de Jaca son ligeramente diferentes a las de Canfranc, con una duración un poco más larga y, en algunas ocasiones con ascensos menos marcados (caudal *3) o descensos menos rápidos (caudal *5). Según se incrementa la intensidad, los perfiles se asemejan más a los de Canfranc. En este punto del río se puede hablar de los procesos más de transición de la clasificación de Ollero (2000).

Por otra parte, las crecidas largas, de más de 15 días de duración, tienen una forma distinta en el histograma: no tienen una única cresta, suelen tener un máximo principal y otro o varios secundarios. Hay distintas formas dentro de este grupo, con una curva de ascenso más prolongada que la de descenso o viceversa, o también presentando una gráfica con varios máximos de similar tamaño, es decir, varias crecidas fuertes de similar volumen y próximas en el tiempo.

A los eventos (como la de octubre de 1965, Jaca) con dos picos de crecida, con el secundario muy cerca del principal, se les llama crecidas de *tipo simple con doble pico*. Las que tienen una gran cantidad de altibajos hasta alcanzar el pico máximo de la crecida las podemos denominar como *crecidas de tipo complejo*.

Los ejemplos de crecidas largas en Canfranc están en la figura 23.

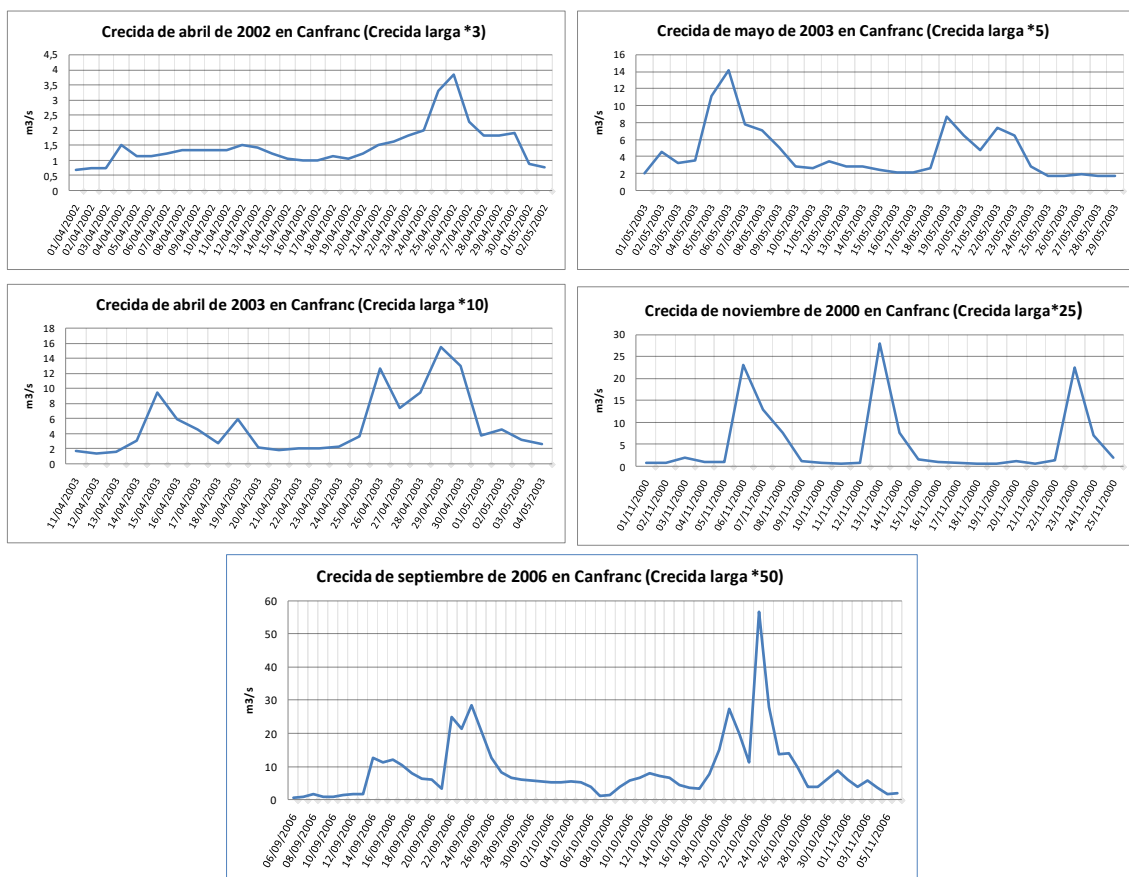


Figura 23. Ejemplos de crecidas largas. Canfranc.

Todas las crecidas mostradas tienen una duración superior a los 15 días sobradamente, sobrepasando en algunos casos el mes. En los gráficos se pueden apreciar tanto eventos que se podrían clasificar como crecidas simples con doble pico (noviembre 2000) o más complejas con gran cantidad de agua y altibajos constantes desde el inicio al final de la crecida (septiembre 2006).

En cuanto a las crecidas largas observadas en Jaca, la figura 24 recoge varios hidrogramas a modo de ejemplo.

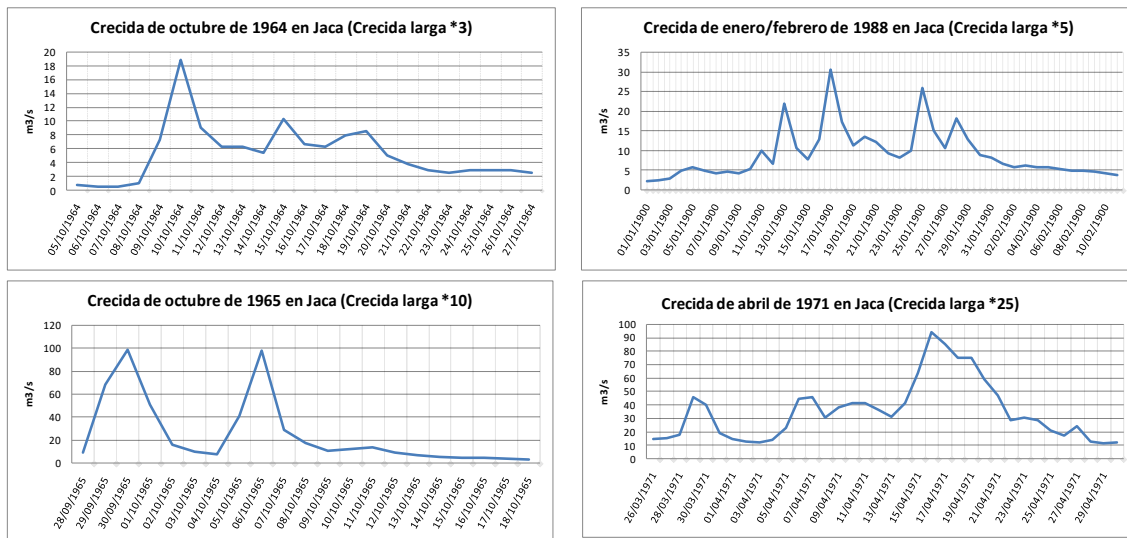


Figura 24. Ejemplos de crecidas largas. Jaca.

Las mismas tipologías de crecidas que hemos visto en Canfranc pueden identificarse en Jaca: tipo complejo, con una duración muy superior a un mes (enero – febrero de 1988), o tipo simple, con dos picos cercanos en el tiempo (octubre 1965).

7.5 Problemática y consecuencias de las crecidas

7.5.1 Grandes crecidas

A continuación analizamos dos fuertes crecidas en el río Aragón, la de Septiembre de 2006 y, sobre todo, la de Octubre de 2012, mostrándolas en un grafico y viendo cómo afectan a cada uno de los dos observatorios. Hemos escogido estas dos crecidas al ser relativamente actuales y con un elevado caudal, sobre todo la de octubre de 2012 que, como veremos más adelante, ha llegado a dar algún susto en localidades del valle. Ambas se produjeron a comienzos de otoño, septiembre y octubre, meses donde, como veremos, las crecidas alcanzan más intensidad.

Se han seleccionado estas dos crecidas porque, al ser recientes y disponer de diversa información sobre su dinámica y evolución, son dos buenos ejemplos para conocer las consecuencias de este tipo de eventos y los principales problemas que generar.

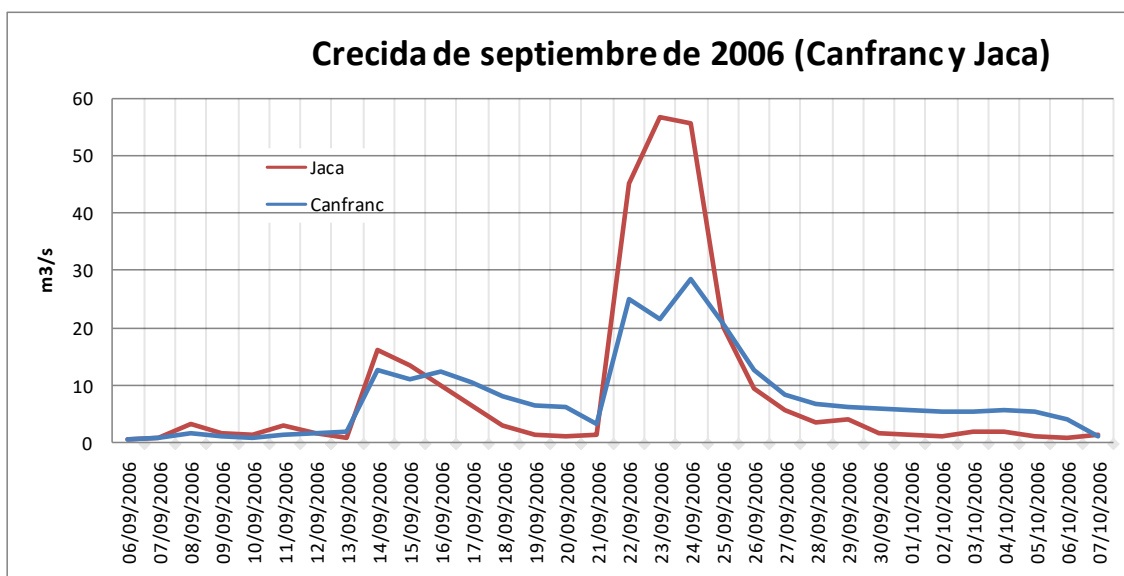


Figura 25. Crecida de septiembre de 2006: datos de Canfranc y Jaca.

La crecida de septiembre de 2006 (figura 25) fue provocada por las fuertes precipitaciones en el valle en la parte alta, menos intensas en Jaca. En Canfranc (observatorio de la Central de IP), las precipitaciones caídas en el mes de septiembre y octubre fueron de 358 l/m² y 277 l/m² respectivamente; en Villanúa, 248,4 y 151,5 l/m²; en Jaca, algo menores, 177,4 y 76,6 l/m²¹⁸. En las crecidas que provocaron se pueden ver dos máximos, el primero localizado el 14 de Septiembre con un caudal similar en Jaca y en Canfranc por lo que podemos decir que fueron más fuertes las precipitaciones en Canfranc y un segundo y máximo principal entre el 22 y el 25 de Septiembre, donde ya se observa que Jaca lleva mucho más caudal que Canfranc, por lo que las precipitaciones en estas fechas estaban más repartidas por todo el valle.

Tanto en Jaca como en Canfranc, mirando los datos mensuales, vemos que el Módulo se multiplica por 25; en Canfranc el caudal máximo instantáneo mensual alcanzó los 85.97 m³/s mientras que en Jaca llega a 227,25 m³/s.

Se puede decir que es un crecida larga al tener dos máximos pero apenas alcanza los 15 días establecidos como umbral. Las curvas de ascenso y descenso son muy bruscas, sobre todo la del pico principal que enseguida recupera los niveles habituales de caudal. La curva de descenso del primer máximo es más suave y enlaza con la curva de ascenso del segundo gráfico.

La crecida de octubre de 2012 ha sido objeto de estudios específicos (Acín et al., 2012; Serrano Muelas et al., 2013) por la intensidad de precipitaciones en el valle del Aragón. La precipitación mensual de octubre 2012 fue en Canfranc de 382 l/m², de los cuales 225.4 cayeron entre las 5:15 h. del día 19 y las 23:45 del día 20, en Villanúa fueron 374,6 l/m², en Castiello 352,0 l/m² y en Jaca: 333,0 l/m².¹⁹

¹⁸ Fuente: IAEST, Información estadística de Aragón. Medio Ambiente; Clima.

¹⁹ Fuentes: IAEST, Serrano Muelas y otros (2013).

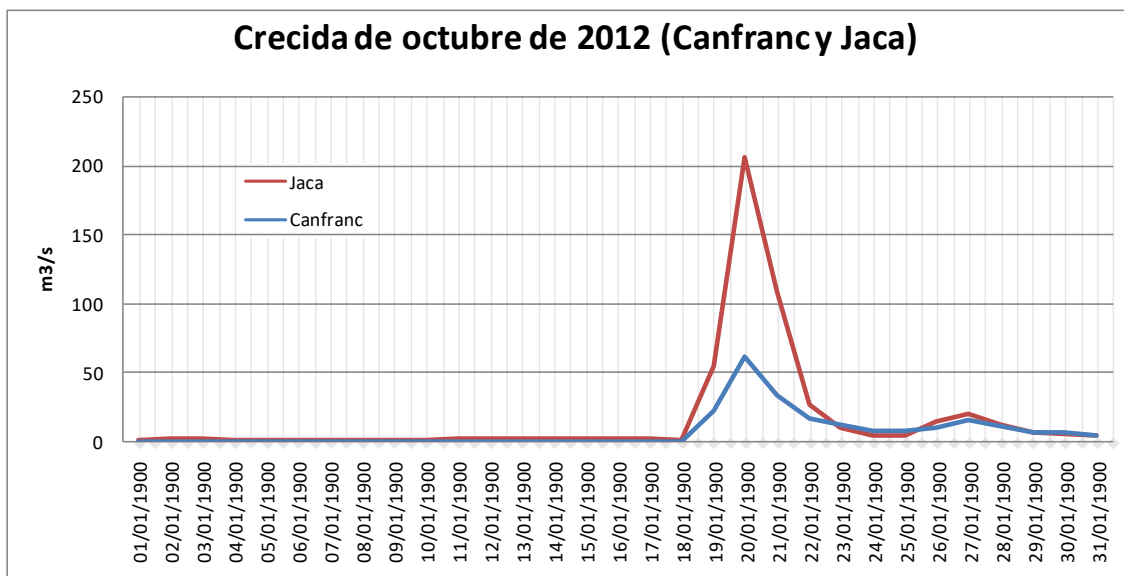


Figura 26. Crecida de septiembre de 2012: datos de Canfranc y Jaca.

Esta crecida fue una de las más fuertes que se recuerdan en el río Aragón. Tanto en Jaca como en Canfranc el Módulo se multiplicó por más de 50. El caudal máximo instantáneo mensual en Canfranc fue 115,4 m³/seg y en Jaca alcanzó los 363 m³/seg. El evento se dio con un rápido ascenso de los caudales el día 19 de octubre configurando una curva de ascenso cuyo máximo lo alcanzó el día 20 y se alargó hasta el 22. La duración (cuatro días) y su intensidad la hacen una crecida corta, una crecida relámpago, con un único punto de inflexión y con consecuencias catastróficas en Castiello de Jaca y en el conjunto del valle.

7.5.2 Consecuencias de las crecidas

Hemos de ver las crecidas fluviales como “*procesos naturales de respuesta hidromorfológica del sistema ante una determinada situación (un evento de precipitaciones intensas, fusión nival, etc.)*” (Doménech et al, 2008, 19). Son necesarias para la supervivencia de los sistemas fluviales, constituyen un proceso natural, son episodios extremos necesarios para el correcto funcionamiento de los ríos y de sus ecosistemas. Sin embargo, pueden ser un riesgo para las actividades humanas; las poblaciones no conviven bien con las avenidas, sino que cada vez sufren mayores daños al tener más intereses en los espacios inundables (Doménech y otros (2008, 17). A veces el ser humano no tiene en cuenta la fuerza que puede tener la naturaleza, en este caso los ríos, cultivando las zonas de inundación, construyendo edificaciones en ellas o modificando los cauces para otro tipo de aprovechamientos (desviación y canalización del río en Canfranc-Estación, las presas de las centrales hidroeléctricas...).

Esta crecida de octubre de 2012 antes descrita, tuvo consecuencias catastróficas ya que afectó a todo el valle del río Aragón: el agua se llevó por delante partes del Camino de Santiago (desde Somport), huertas (en Villanúa) o partes de carretera y viviendas en la localidad de Castiello de Jaca construidas en zona inundable (Acín et al., 2012). Se puede adivinar que en la causa de todos estos desastres no solo fueron las intensas precipitaciones de octubre, sino también, como factor importante, la alteración de la dinámica fluvial (Ollero et al., 2007, 113), además de la falta de planificación y

consideración del riesgo en la construcción de determinadas infraestructuras y viviendas.

En los apartados que siguen analizaremos en distintos municipios del valle (Canfranc-Estación, Canfranc y Castiello de Jaca), como se ha “roto” esta dinámica fluvial del Río Aragón, ocupado sus llanuras de inundación con distintas edificaciones y con otro tipo de actuaciones.

8. Zonas inundables. Afección a núcleos de población

Esta parte del trabajo, se ha realizado con la ayuda del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), un instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial elaborado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

8.1 Zonas inundables y actuaciones en los distintos municipios

8.1.1 Canfranc-Estación.

En este mapa que se presenta en la figura 26 se observa claramente que casi todo Canfranc-Estación está situado dentro del área de inundación del río Aragón, sobre todo la margen izquierda del río donde se encuentra situada la estación de tren.

Zonas inundables para los diferentes periodos de retorno en Canfranc-Estación

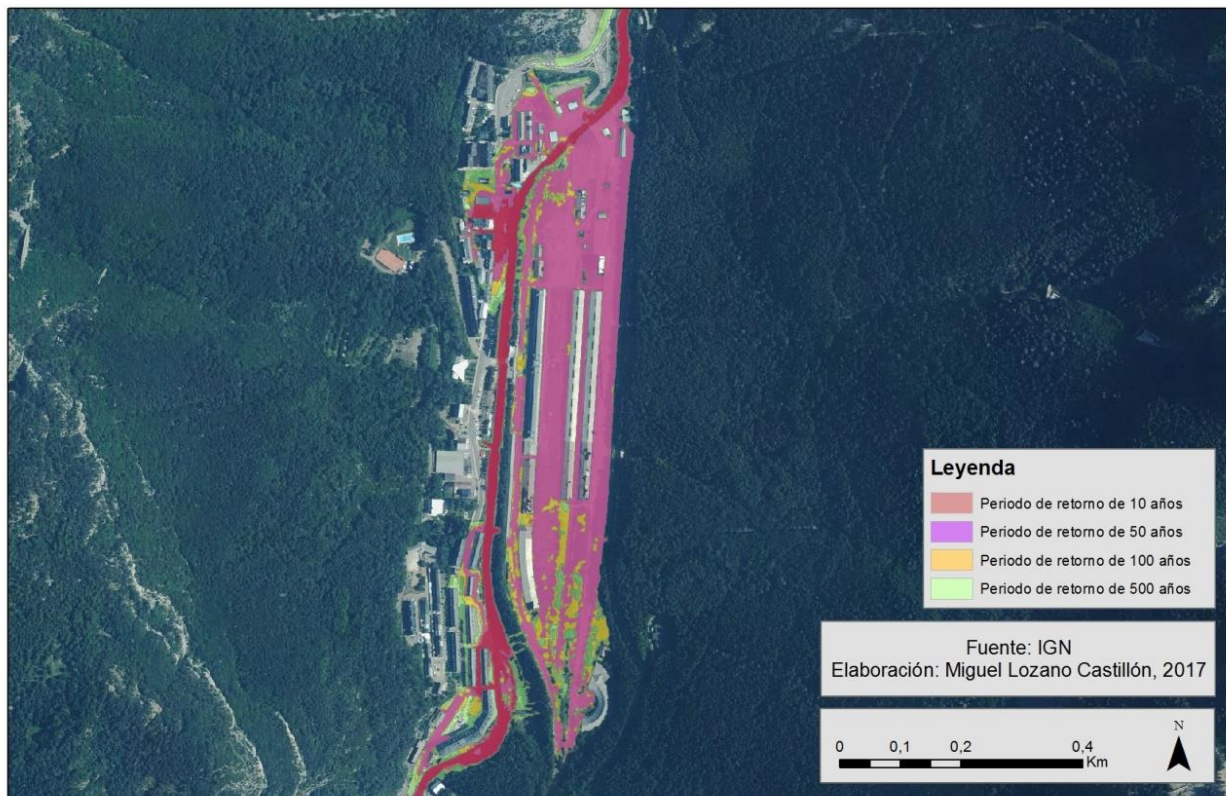


Figura 27. Zonas inundables en Canfranc-Estación.

Si se analizan los periodos de retorno, se observa que el primer periodo de retorno, el de 10 años, apenas desborda el cauce y no supone peligro para la población, pero los siguientes, a partir de 50 años, ya desbordan el cauce y ocupan toda la margen izquierda donde localizábamos la estación y en la margen derecha afectan a distintos edificios tanto al principio como al final del pueblo.

La construcción de ferrocarril a principios del siglo XX que ocupó la zona inundable de los Arañones hizo que se desviara el río y se canalizase durante más de un kilómetro, ya no solo el río Aragón, sino también los barrancos que desembocan en él como el barranco de Epifanio o el de Estiviellas. Aquí se exponen unas fotos de la canalización del río (ver fotos 1,2 y 3).



Foto 1: Río Aragón a su paso por Canfranc-Estación



Foto 2: Río Aragón a su paso por Canfranc-Estación



Foto 3: Desembocadura del canal proveniente del barranco de Epifanio

Al final de Canfranc-Estación encontramos otra alteración del cauce por parte del ser humano, dos presas, las cuales utilizan el agua con fines hidroeléctricos, suministrando agua a la central hidroeléctrica de Canalroya y a la de Ip (Fotos 5, 6 y 7). En una fuerte crecida, como la de Octubre de 2012, se llenó el pantano por lo que se tuvo que dejar pasar el agua, un hecho que agravó la crecida que se estaba produciendo valle abajo.



Foto 4: Presa de la central hidroeléctrica de Canalroya.



Foto 5: Presa de la central hidroeléctrica de Canalroya.

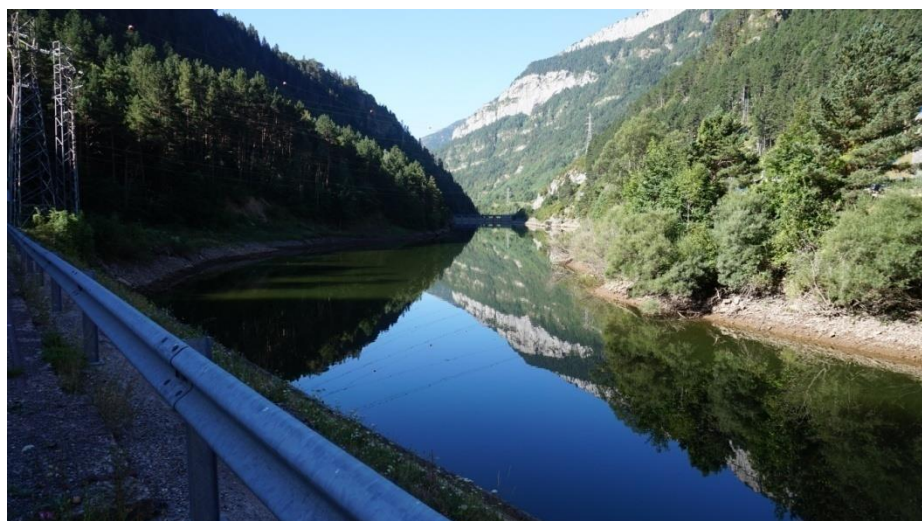


Foto 6: Embalse formado por la presa de Ip



Foto 7: Presa de de la central de Ip

8.1.2 Canfranc:

Al paso del río Aragón por Canfranc, la zona inundable se extiende por la margen izquierda del río, mientras que el pueblo está construido en la margen derecha. El área inundable apenas afecta a unas casas al principio del pueblo, en un periodo de retorno de 100 y 500 años (ver figura 27 y 28) y algunos huertos situados al borde del río.

Zonas inundables para los diferentes periodos de retorno en Canfranc

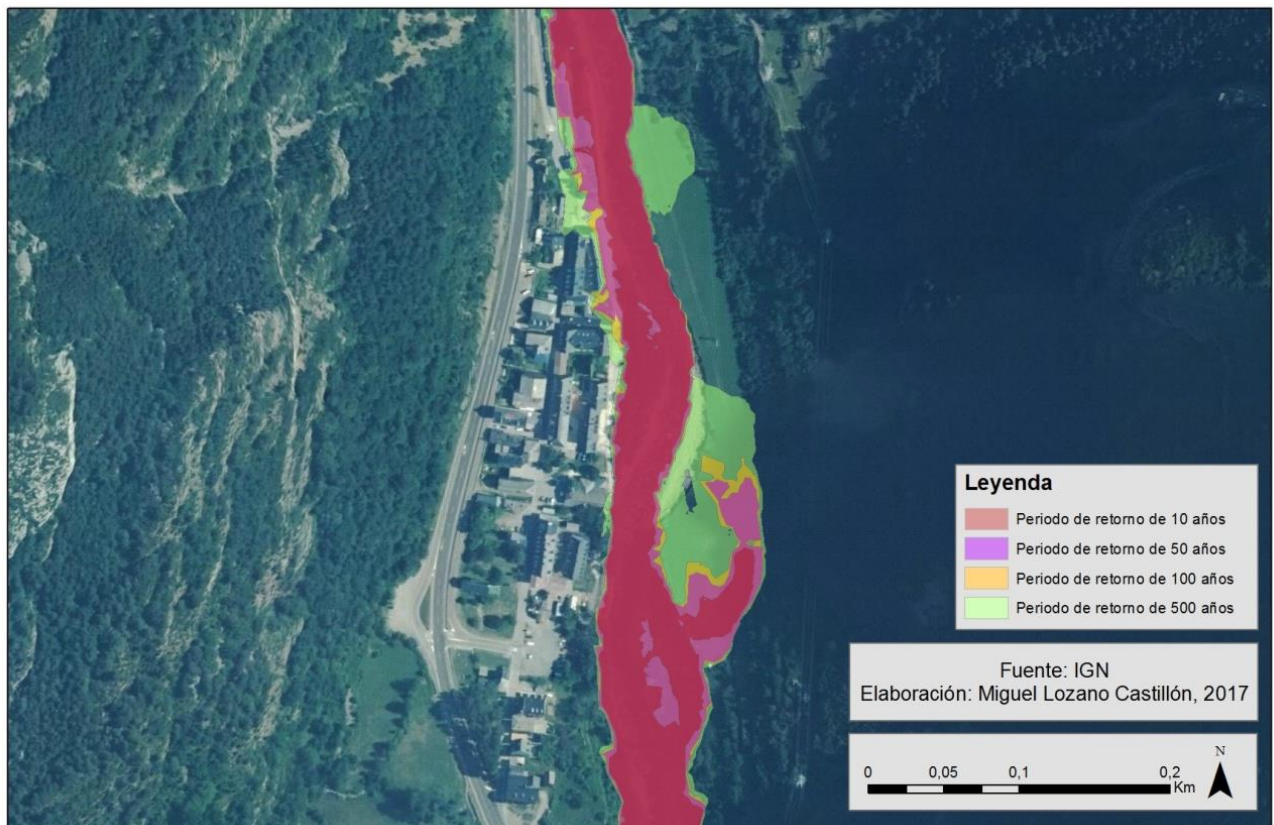


Figura 28 .Zonas inundables en Canfranc

Zonas inundable en la zona norte de la localidad de Canfranc



Figura 28. Zona inundada en un periodo de retorno de 500 años en la parte norte de Canfranc

A pesar de ello, el río se encuentra canalizado, con una pared en su margen derecha que protege al pueblo de posibles crecidas y un dique en la margen izquierda para intentar canalizar y dirigir la dirección del río (ver foto 8 y 9)



Foto 8: Canalización del la parte derecha del río Aragón a su paso por Canfranc



Foto 9: Dique de protección en la parte derecha del río Aragón a su paso por Canfranc

8.1.3 Castiello de Jaca

Castiello de Jaca es la localidad que se vio más afectada en la crecida de 2012, donde el río llegó a destrozar una casa que se encontraba dentro del área de inundación del río.

La parte histórica o más antigua del pueblo está situado en la margen derecha del río Aragón, colina arriba lejos de este y fuera de su área de inundación. Pero en los últimos años se ha empezado a construir nuevos apartamentos cerca del río dentro de su área inundable (ver figura 29)

Zonas inundables para los diferentes periodos de retorno en Castiello de Jaca

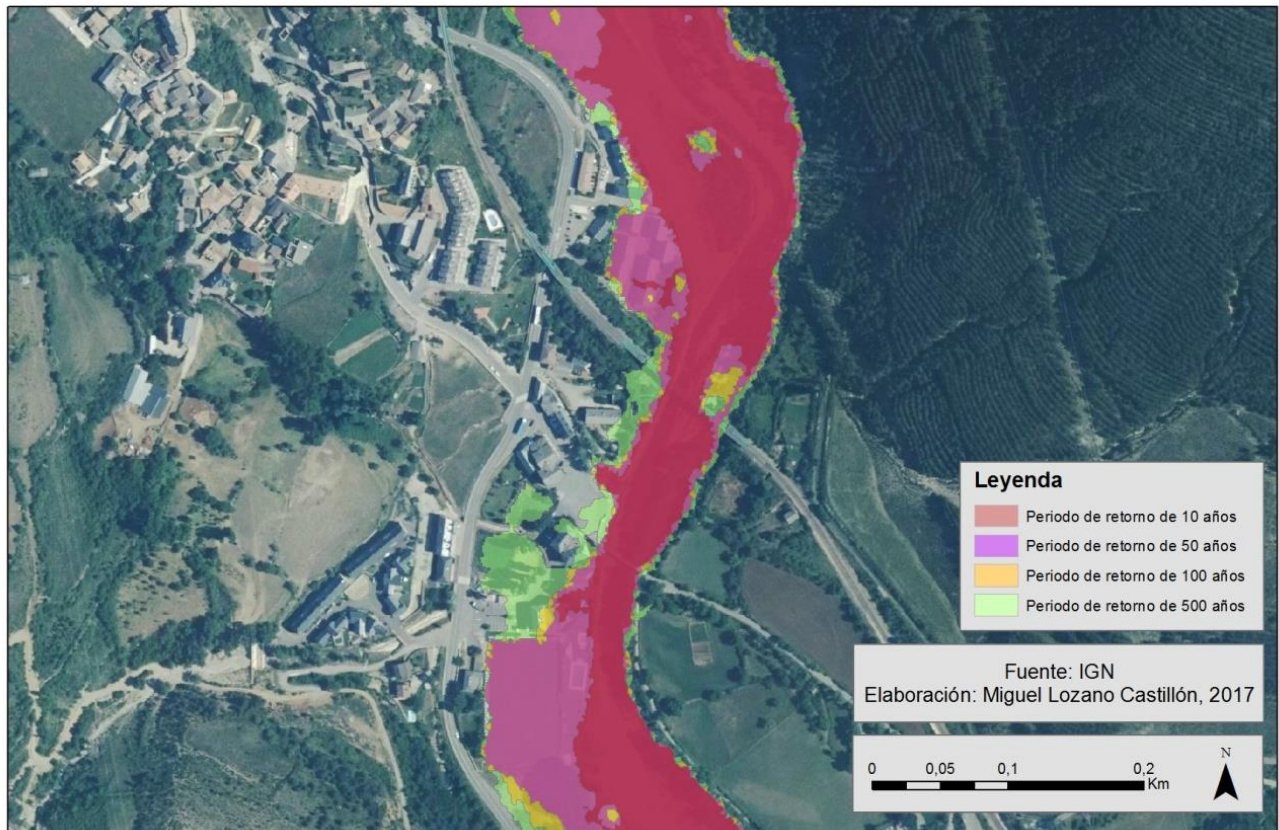


Figura 29. Zonas inundables en Castiello de Jaca.

Como se puede observar en el mapa de la figura 29, hay una serie de edificaciones, apartamentos e instalaciones que están dentro del área inundable del río, especialmente en la margen derecha del río, sobre todo la reciente urbanización “El Molino” (ver Figura 30), así como otra urbanización al final del pueblo junto con el campo de fútbol. En la margen izquierda están actualmente las instalaciones de un camping.

Zonas inundable en la urbanización del Molino de Castiello de Jaca

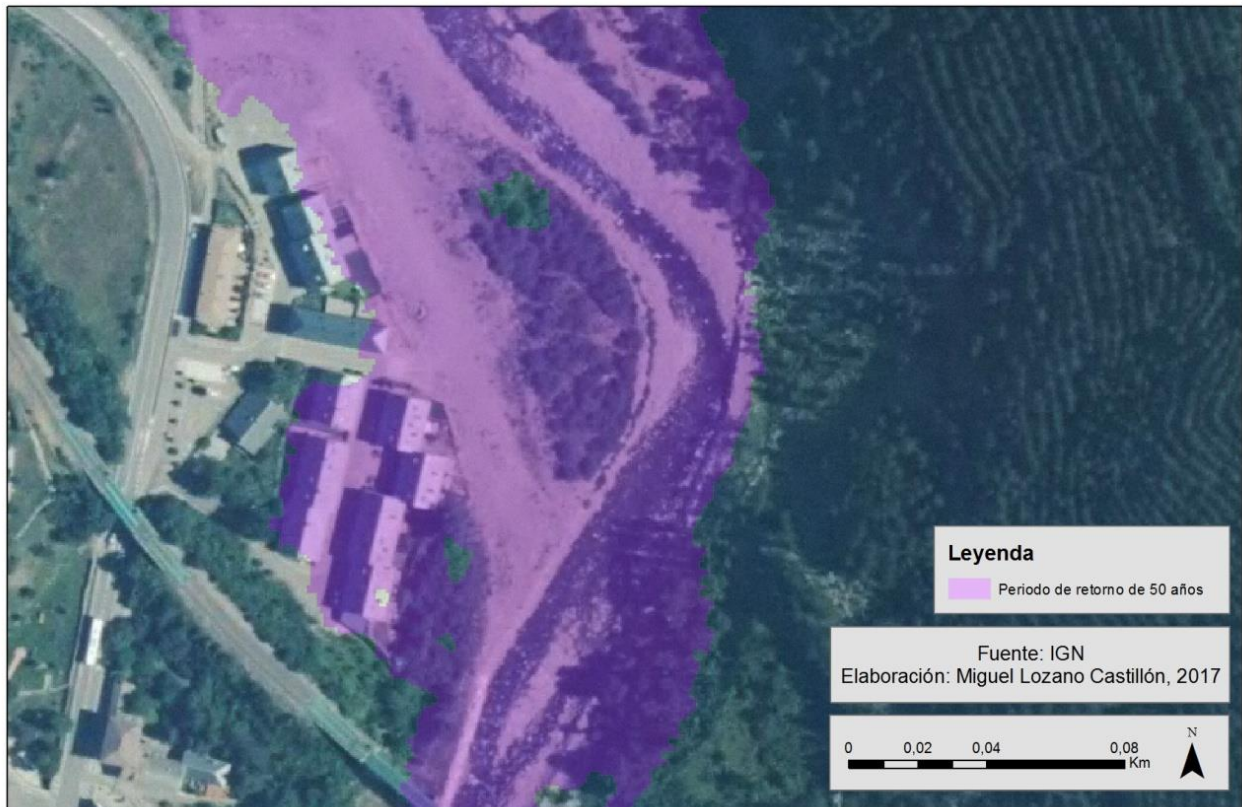


Figura 30. Zona inundable con periodo de retorno de 50 años en el área colindante a la urbanización del Molino en Castiello de Jaca

En octubre de 2012, la conocida crecida ya estudiada, afectó al pueblo pudiendo tener un trágico desenlace. El caudal en Castiello fue muy elevado por los barrancos aguas arriba que nutren al río Aragón, así como las actuaciones (canalizaciones o embalses) que acrecentaron la crecida. El agua desbordó su curso habitual, superando un dique que protegía las urbanizaciones de posibles crecidas, llevándose consigo la primera casa de la urbanización de El Molino, causando importantes daños materiales incluso en la carretera nacional 330, aunque afortunadamente no hubo víctimas entre los habitantes de la zona.

Las fotografías que se incluyen a continuación muestran la situación actual de la zona inundable afectada de Castiello de Jaca. La foto 10 muestra una panorámica de la zona del río a su paso por el pueblo. La foto 11 muestra el dique de contención (por acumulación de bloques de piedra), aguas arriba de la ubicación de la urbanización “El Molino” construido tras la crecida de octubre de 2012. Por último, la fotografía 12 pone en evidencia como la citada urbanización ocupa claramente el lecho del cauce del río Aragón.



Foto 10. Vista del río Aragón a su paso por Castiello de Jaca



Foto 11. Dique de contención construido en la margen derecha del río Aragón a su paso por Castiello de Jaca.



Foto 12. Urbanización El Molino situada dentro del cauce del río Aragón

8.1.4 Jaca

No se considera necesario efectuar ningún estudio en la localidad de Jaca ya que el núcleo urbano se encuentra lejos del río Aragón y no hay edificaciones dentro de la zona inundable de éste; sólo huertas con algunas edificaciones agrícolas. Aun así sería conveniente realizar, en otro trabajo, un estudio del río Gas que atraviesa Jaca por el sur donde hay urbanizaciones dentro de su área de inundación.

8.2 Comparación de los caudales con el Sistema Nacional de Cartografía de zonas inundables (SNCZI)

En este apartado se va a establecer una relación entre los registros de caudal máximo anual con los que se ha venido trabajando (Sistema del Anuario de Aforos) y los que el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) determina para diferentes periodos de retorno. Cada uno de esos caudales establecidos por el SNCZI para los diferentes periodos de retorno determina la inundación de esos sectores de las poblaciones y sus alrededores, que han sido recogidos en las figuras anteriores.

Lo que intentamos ver es si históricamente se han alcanzado esos valores que provocan inundaciones con cierta frecuencia y, por tanto, si ese riesgo de inundación se ha materializado en distintos casos y, por tanto, es susceptible de seguir produciéndose en el presente y en el futuro.

Los datos ofrecidos por el Sistema Nacional de Zonas Inundables nos permiten conocer los umbrales de caudales máximos instantáneos de riesgo de inundación para los diferentes periodos de retorno. Pero, además, a partir de los datos de máximos instantáneos del Sistema del Anuario de Aforos, se calculan, mediante la Ley de Gumbel, los valores de caudal máximo para los diferentes periodos de retorno.

	T= 2 años	T= 5años	T= 10 años	T= 25 años	T= 100 años
Jaca (SNCZI)	136	206	265	365	565
Datos estación de aforo (Gumbel)	127	200	249	310	400,9

	T= 2 años	T= 5años	T= 10 años	T= 25 años	T= 100 años
Canfranc (SNCZI)	134	194	243	332	485
Datos estación de aforo (Gumbel)	48,4	73,2	89,5	110,2	140,7

Tabla: 4 Caudal máximo instantáneo en m³/s para los diferentes periodos de retorno

En la tabla 4, se observa que en el caso de Jaca obtenemos unos datos de caudal muy similares a los umbrales establecidos en el SNCZI, donde, por ejemplo, con un periodo de retorno de 2 años, tenemos un máximo instantáneo de 127 m³/s, es decir, que estadísticamente cada dos años hay una crecida que lleva un caudal máximo instantáneo de 127 m³/s. Por su parte, el SNCZI marca este umbral un poco más elevado, en 136 m³/s. Esta similitud se extiende a todos los periodos de retorno considerados excepto el de 100 años, donde el dato del SNCZI es sensiblemente superior al calculado con el método de Gumbel.

El caso de Canfranc es muy distinto, ya que los caudales establecidos por el SNCZI están muy “inflados”, dando umbrales muy por encima de nuestros datos, casi a la altura de los de Jaca. Comparando los datos de SNCZI con los datos reales se aprecia que hay un total desajuste en la estimación del SNCZI de los valores de pico de crecida para distintos periodos de retorno. Por eso, fundamentalmente nos pareció necesario recalcular los caudales para diferentes periodos de retorno con el método de Gumbel

Por ejemplo, en la crecida anteriormente estudiada de Octubre de 2012, Jaca alcanzó un caudal máximo instantáneo de 363 m³/s, que comparándolo con los umbrales del SNCZI, se situaría casi al borde del periodo de retorno de 25 años, por lo cual la crecida superaría el área cartografiada con un periodo de retorno de 10 años.

No existen datos que alcancen el umbral para el periodo de retorno de 100 años en ninguno de los dos observatorios. En Canfranc, por ejemplo, con un periodo de retorno de 25 años, por encima del umbral marcado por Gumbel se han registrado 2 crecidas durante todo el periodo con registros (23 años de registros en Canfranc). En el caso de Jaca, con este mismo periodo de retorno, se registran un total de 3 crecidas por encima del umbral marcado por Gumbel y una por encima del umbral establecido por el SNCZI en todo el periodo de retorno, que en este caso son 69 años.

Esta comparación nos muestra que se han producido crecidas en diversos momentos capaces de inundar las zonas delimitadas dentro del periodo de retorno correspondiente a los umbrales de caudal establecidos. Lo que significa que el riesgo ha existido históricamente y que sigue existiendo por lo que es necesario tomar medidas de prevención.

8.3 Medidas para prevenir y mitigar los daños por crecida

Poco a poco el ser humano va ocupando el cauce natural del río, ya no solo con huertos o pequeñas casetas, sino con urbanizaciones que son construidas ignorando los impactos que pueden tener sobre esta naturaleza. Estas construcciones corren grandes riesgos que pueden acabar en tragedia (como ocurrió en Biescas en 1996). Ya hemos tenido un aviso serio en Castiello de Jaca, donde el río se llevó una casa que

estaba construida sobre el área de inundación, además de otras edificaciones agrícolas aguas abajo del pueblo. Esos incidentes graves tienen que servir de ejemplo y aprendizaje para que no se vuelva a ignorar los riesgos que la naturaleza tiene ya que las crecidas son procesos naturales y van a seguir sucediendo en el futuro (Doménech y otros, 2008).

La canalización del río da seguridad a la población del municipio frente a las inundaciones, sintiéndose mucho más protegidos, pero estos muros pueden fallar o ser insuficientes, además de ser perjudiciales ya que cambian la trayectoria del río llegando a incrementar su velocidad y agravando los efectos de la crecida, especialmente aguas abajo.

No solo tiene consecuencias sobre las viviendas, sino a cualquier infraestructura construida dentro del cauce: carreteras, campos de cultivo... En los efectos económicos que pueden causar las crecidas si no se respeta el cauce del río puede llegar a ser muy elevado.

Diferentes trabajos, entre ellos los de ECOTER S.C. (2011) y González del Tanago (2008), han desarrollado una serie de propuestas para prevenir y mitigar los daños generados por las inundaciones. De todas las medidas propuestas nosotros consideramos como las más efectivas:

- Sacar del área de inundación todo aquello que se pueda cambiar de ubicación como huertos u otras instalaciones que puedan transportarse. No es el caso de las urbanizaciones ya que están fijas y la única solución en ellas sería la demolición de las construcciones en riesgo.
- En el caso de que fuera inviable (económicamente, legalmente...) sacar del área inundable estas urbanizaciones, se debería realizar un seguimiento de las crecidas para estudiar la mejor protección para estas áreas buscando la mejor posición y forma de las defensas que guarden estas edificaciones.
- No sólo sería cuestión de buscar la mejor protección para las zonas de invasión, sino también que estas estructuras construidas no tengan una influencia negativa en la dinámica natural del río, procurando alterar lo menos posible el ecosistema que alberga.
- Evidentemente, sería necesario un control exhaustivo de las autoridades municipales y de la Confederación Hidrográfica del Ebro para prohibir cualquier tipo de nueva construcción dentro del área inundable del río.
- Sería necesario también advertir a la población del riesgo de las inundaciones sobre todo en núcleos de población donde ese riesgo es alto, y concienciarles de que la protección y la sensación de seguridad que dan los muros, canalizaciones y diques no se debe considerar como una garantía de total de que el riesgo de inundación está corregido.
- Aprender de los errores del pasado para que no se vuelvan a producir en el futuro

En definitiva, hay que tomar medidas para informar y educar a la población de las localidades afectadas por el riesgo de inundación. Y, al mismo tiempo, hay que poner en práctica una ordenación del territorio que delimite los usos de la llanura de

inundación impidiendo la construcción de viviendas y evitando la instalación de infraestructuras en los sectores donde se haya constatado o se constate la existencia de riesgo de inundaciones.

9. Conclusiones

El río Aragón es uno de los principales afluentes del río Ebro y uno de los cursos fluviales más importantes del Pirineo.

Este río que nace en los ibones de Escalar y Truchas, en el valle de Astún y va formando en su parte alta un valle con fuertes pendientes que facilita la llegada de agua de sus afluentes de ambas márgenes.

Si a las fuertes pendientes del valle en su parte alta, añadimos unas abundantes precipitaciones características de la zona de estudio y la abundante cubierta vegetal que favorece los procesos de infiltración haciendo que el agua fluya bajo tierra, obtenemos con todos estos factores que el río Aragón sea un río con un caudal específico elevado (20,12 l/km²/seg en Canfranc y 28,82 l/km²/seg en Jaca)

El régimen hídrico del río Aragón en su cabecera es un régimen mixto o complejo original donde se observa un máximo y un mínimo principal y otro secundario. El máximo principal de primavera está asociado al deshielo además de las precipitaciones primaverales y el secundario de otoño a las precipitaciones propias de esta estación.

Estos máximos de caudal están también muy relacionados con el reparto de las crecidas a lo largo del año (Figuras 17 y 18). También en la intensidad de éstas, las crecidas primaverales (Abril y Mayo) que provienen del deshielo de la nieve acumulada, son más largas en el tiempo pero no tan fuertes como las crecidas otoñales que tienen su origen en fuertes precipitaciones por lo que son más fuertes y repentinas, lo que las hace más peligrosas y menos predecibles. Los meses en los que se dan más crecidas son los de primavera (Abril, Mayo y Junio), con Mayo como mes con más crecidas en ambas estaciones y en otoño, destacando el mes de Noviembre siendo en Canfranc el segundo mes con más precipitaciones

En cuanto a la tipología de estas crecidas, se clasifican en dos grupos dependiendo de su duración, desde crecidas cortas que apenas pueden durar dos o tres días, más propias de meses otoñales hasta crecidas más largas que pueden durar más de un mes más características de época primaveral.

Hay algunos momentos donde el caudal alcanza valores pico muy altos, por ejemplo, en Octubre de 2012, el caudal se llegó a multiplicar en Canfranc y Jaca por 25, obteniendo un máximo instantáneo de 85,97 m³/s en Canfranc y 227,25 m³/s en Jaca.

Estas crecidas pueden tener una serie de consecuencias, sobre todo al paso del río por una localidad establecida a su orilla. El estudio se ha realizado sobre tres poblaciones del valle afectadas obteniendo las siguientes conclusiones:

- Canfranc-Estación: Prácticamente todo el pueblo está dentro del cauce del río, sobre todo la margen izquierda donde se encuentra la estación. El río está completamente canalizado a ambos lados, pero esta sensación de seguridad que

da la canalización no quita que algún día la crecida sea tan fuerte que llegue a desbordar el cauce.

- Canfranc: El área inundable del río a su paso por Canfranc afecta a un pequeño número de casas al inicio del pueblo, a pesar de que el río se encuentra canalizado, con un muro en la margen derecha de este.
- Castiello de Jaca: Esta localidad ha sido la más afectada del valle en las recientes crecidas, ya que se han construido una serie de urbanizaciones dentro del cauce del río. Actualmente es un dique el que trata de dirigir el río desviando su cauce y “protegiendo” estas nuevas urbanizaciones. Sin embargo, sobre el terreno puede observarse que la incisión de la defensa ya se ha iniciado y que con caudales elevados la protección sería poco o nada eficaz.

Toda esta modificación antrópica del cauce de un río y la ocupación de su caudal con urbanizaciones tiene consecuencias sobre la población, no solo las pérdidas económicas que puede producir sino que puede producir también pérdidas humanas.

Para prevenir estas posibles consecuencias que pueden producir las inundaciones se han propuesto una serie de medidas o soluciones relacionadas con la ordenación territorial ya enumeradas anteriormente pero que giran en torno a la idea de dejar de lado la lucha contra la naturaleza, los ríos en nuestro caso, ya que ésta, con el tiempo, siempre saldrá vencedora.

10. Bibliografía.

- Acín, V., Ballarín, B., Brufao, P., Domenech, S., Espejo, F., González-hidalgo, J., Granada, D., Ibisate, A., Marcén, C., Mora, D., Nadal, E., Ollero, A., Sánchez-Fabre, M., Sanz M., Serrano-Notivoli, R. (2012): “[Sobre las precipitaciones de octubre de 2012 en el Pirineo aragonés, su respuesta hidrológica y la gestión de riesgos](#)”, en *geographicalia*, 61, 101-108.
- Alvera, B. (2000): “[La cuenca experimental de Izas, Pirineo Aragonés](#)”. Cuadernos de investigación geográfica, 26, 9-21.
- ATLAS CLIMÁTICO DE ARAGÓN (s/f): “La división climática de Aragón”. Capítulo 4.13, *Atlas climático de Aragón*. Departamento de Desarrollo Rural y sostenibilidad. Gobierno de Aragón. Disponible en http://www.aragon.es/estaticos/Celia/4_13.pdf (agosto de 2017).
- Beguería, S., López-Moreno, J.I., LORENTE, A., Seeger, M. y García-Ruiz, J.M. (2003): “[Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees](#)”. *Ambio*, 32 (4), 283-286.
- Cuadrat, J.M. (2004). “[El clima de Aragón](#)”. En Peña, J.L. y otros: *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, 2004, 15-26.
- Díaz, E. y Ollero, A. (2005): “[Metodología para la clasificación geomorfológica de los ríos de la cuenta del Ebro](#)”. *Geographicalia*, 47, 23-45.
- Doménech, S., Ollero, A. y Sánchez Fabre, m. (2008): “[Núcleos de población en riesgo de inundación fluvial en Aragón: diagnóstico y evaluación para la ordenación del territorio](#)”. *Geographicalia*, 54, 17-44.
- ECOTER S.C. (2011): [Crecidas e inundaciones](#). Documento pdf. Fundación Nueva Cultura del Agua/Foro Joven/CIREF.
- ECOTER, S.C. (2012): [Mapa Castiello 2](#), elaborado a partir de la fuente: SIG Oleícola, PNOA, CHE. Disponible en <https://ecoter.wordpress.com/tag/castiello-de-jaca/>
- Elmoujahid, A. (1997). “[Aplicación del análisis estadístico para la homogeneización climatológica e hidrológica en la cuenca del río Aragón aguas arriba del pantano de Yesa \(Pirineo Central\)](#)”. *Geographicalia*, 35, 57-74.
- Elósegui, A., Butturini, A. y Armengol, J. (2009): “Capítulo 4. El caudal circulante”. En ELÓSEGUI, A. (Ed.). (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVa. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OfOUggC20_UC&oi=fnd&pg=PA11&dq=concepto+de+crecida&ots=9iE8GwoayH&sig=sJfTbkt4zMNH2az2R9yTwB-abcg#v=onepage&q=concepto%20de%20crecida&f=false
- Fernández Yuste, J.A. y Martínez, C. (s/f): “[Obtención de indicadores de masa de agua muy alteradas mediante IAHRIS v2.2 \(Índices de Alteración Hidrológica en Ríos\)](#)”. Comunicación técnica presentada en el 10 Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA10).

- Ferrer Sánchez, V. (2015): [El río Veral: Factores naturales y elementos del régimen fluvial. Estudio y caracterización de las crecidas y su repercusión socio-económica](#). Trabajo de fin de Grado dirigido por M. Sánchez Fabre. Universidad de Zaragoza, Facultad de Filosofía y Letras, Grado de Geografía y Ordenación del Territorio.
- García Vera, M.A., dir. (2000): [Los aprovechamientos en la cuenca del Ebro: Afección en el régimen hidrológico fluvial](#). Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza.
- García Ruiz, J.M.; Beguería, S.; López, J.I.; Lorente, A. Y Seeger, M. (2001): Los recursos hídricos superficiales del Pirineo Aragonés y su evolución reciente. Geofoma ediciones, 193 p. Logroño.
- García Ruiz, J.M. et al. (2011): [El relieve del alto Aragón Occidental. Cartografía y síntesis geomorfológica](#). Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza.
- García Ruiz, J.M. et al. (2012): "[Glacial and Fluvial Deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean Late Pleistocene Glaciers](#)". GEOGRAFISKA ANNALER: SERIES A, PHYSICAL GEOGRAPHY, 95, 15-32. Disponible http://digital.csic.es/bitstream/10261/74020/1/Garcia%20Ruiz%202013_Glacial%20and%20Fluvial%20Deposits%20in%20the%20Arag%20Valley.pdf.
- García-Ruiz, J. M., Puigdefábregas-Tomás, j., & Creus-Novau, J. (2013). "[Influencia de las características físicas de las cuencas hidrográficas en la frecuencia e intensidad de crecidas](#)". CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN GEOGRÁFICA, 6, 19-36.
- Gonzalez del Tanago del rio, M. (2008): "[Inundaciones y cambio climático](#)." Disponible en [http://oa.upm.es/4764/2/INVE MEM 2008 57086.pdf](http://oa.upm.es/4764/2/INVE_MEM_2008_57086.pdf).
- Jiménez, F. (2014): "[La cuenca del río Aragón y sus afluentes en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro 2010 2015. Una primera aproximación](#)". Comunicación presentada en el Primer encuentro de la cuenca del río Aragón. En defensa del agua y del territorio. No al recrecimiento de Yesa. Sangüesa, 2014". Disponible en https://fnca.eu/images/documentos/ODMA/Jornada%20Yesa/La%20cuenca%20del%20r%C3%ADo%20Arag%C3%B3n%20y%20sus%20afluentes_1_FJim%C3%A9nez.pdf.
- Lana-Renault, N. et al. (2013): "[Comparative analysis of the response of various land covers to an exceptional rainfall event in the central Spanish Pyrenees, October 2012](#)". Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/96172/1/LRenault_ExtremeEvent_EarthSurface2014.pdf.
- López Moreno, J.I., Beguería, S. Y García-Ruiz, J.M. (2000): "[El régimen del embalse de Yesa \(cuenca alta del río Aragón\) y su adaptación a la variabilidad del régimen fluvial](#)". Cuadernos de investigación geográfica, 26, 131-145.

- López Moreno, J.I., Beguería, S. Y García-Ruiz, J.M. (2006): "Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change?". *Hydrological Sciences Journal*, 51:6, 1039-1050.
- Lunar, A. (s/f): "[Avenidas por deshielo en la cuenca alta del río Aragón](#)". Texto policopiado.
- Mateu, J. (1984): "Hidrología", en Bielza, V. (Ed.): *Geografía General*. Tomo I, p. 222-268. Ed. Taurus. Madrid.
- Navas, A., Valero-Garcés, B., Gaspar, I., García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Machín, J., y López-Vicente, M. (2008). "[Variabilidad espacial del transporte de sedimento en la cuenca superior del río Aragón](#)". Cuadernos de investigación geográfica, 34, 39-60.
- Ollero, A. et al. (2007): "[Un índice hidrogeomorfológico \(IHG\) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales.](#)" *GEOGRAPHICALIA* 52 (2007): 113-141.
- Ollero, A. (2000). "[Crecidas fluviales en la Cuenca del Ebro desde 1980: Estado de la cuestión, principales eventos y sistemas de prevención](#)". *SERIE GEOGRÁFICA*, 9, 151-162
- PLAN HIDROLÓGICO DEL RÍO ARAGÓN (2008a): [Resumen de las reuniones de participación](#). Versión V.1, marzo de 2008. Disponible en www.chebro.es/contenido.streamFichero.do?idBinario=4327.
- PLAN HIDROLÓGICO DEL RÍO ARAGÓN (2008b): *Plan hidrológico del Río Aragón*. Versión V3. <http://www.adelpa.com/descargas/aragon.pdf>
- Ríos Aragüés, S. ed. (2000): [El medio físico y su peligrosidad en un sector del Pirineo Central](#). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Sánchez Fabre, M. (1993): "[Aportación al estudio hidrológico del Río Alfambra \(provincia de Teruel\)](#)". *Geographicalia*, 30, 347-360).
- Sánchez Fabre, M. (2014): *Hidrografía*. Grado de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Apuntes policopiados curso 2014/2015.
- Sánchez Fabre, M. y Ollero, A. (2010): "[Agua y medio ambiente en España: diagnóstico y perspectivas de algunas líneas de acción](#)". *Investigaciones geográficas*, 51, 53-79.
- Sánchez fabre, M., Ollero, A. y del Valle, J. (2004). "[La red fluvial en Aragón](#)". En Peña, J.L. y otros: *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, 2004, 55-70.
- Serrano-Muela, M.P., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., González-Hidalgo, J.C., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Sanjuan, y. García-ruiz, J.M. (2013): "[An exceptional rainfall event in the central western Pyrenees: Spatial patterns in discharge and impact](#)". *Land Degradation & Development*. Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/78830/1/Serrano_Muela_An%20exception

[al%20rainfall%20event%20in%20the%20central%20western%20Pyrenees2013.pdf](#).

Zbigniew W. Kundzewicz , Iwona Pińskwar & G. Robert Brakenridge (2012): Large floods in Europe, 1985–2009, Hydrological Sciences Journal.

Cartografía.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (2014). *Mapa topográfico Nacional de España*. Escala 1:25.000. Madrid, Centro Nacional de Información Geográfica. Hojas 144 – I, II, III y IV; 145 – I y III; 176 – I, II, III, IV; 177 – I y III.

11. Anexo. Índice de figuras, tablas y fotografías.

11.1 Índice de figuras.

- Figura 1. Mapa de localización del tramo superior del río Aragón en la cuenca de río Ebro y en España. Fuente: IGN. Elaboración: Miguel Lozano Castellón, 2017.
- Figura 2. Cuenca hidrográfica del tramo superior del río Aragón y su localización dentro de Aragón y de la cuenca del Ebro. Fuente: IGN. Elaboración: Miguel Lozano Castellón, 2017
- Figura 3. Esquema de la cuenca alta del río Aragón (elaboración: Miguel Lozano Castellón).
- Figura 4. Climograma de Canfranc Estación. Elaboración: Miguel Lozano Castellón.
- Figura 5. Climograma de Jaca. Elaboración del autor.
- Figura 6 Pendientes en la cuenca del río Aragón.
- Figura 7. Usos del suelo en la cuenca alta del río Aragón
- Figura 8. Curva de variación estacional del río Aragón en Canfranc.
- Figura 9. Curva de variación estacional del río Aragón en Jaca.
- Figura 10. Curva de coeficiente de caudal del río Aragón en Canfranc
- Figura 11. Curva de coeficiente de caudal del río Aragón en Jaca
- Figura 12. Histograma de irregularidad interanual en el río Aragón en Jaca.
- Figura 13. Histograma de irregularidad interanual en el río Aragón en Jaca.
- Figura 14. Histograma de irregularidad interanual en el río Aragón en Canfranc
- Figura 15. Número de eventos de crecida en el río Aragón, por intensidad (estaciones de aforo de Canfranc y Jaca).
- Figura 16. Registros de máximos de caudal mensuales que suponen crecida en el río Aragón. Estaciones de Canfranc y Jaca.
- Figura 17. Registros de máximos de caudal mensuales que suponen crecida en el río Aragón. Estaciones de Canfranc y Jaca.
- Figura 18. Intensidad y reparto de crecidas. Canfranc, 1991-2014.
- Figura 19. Intensidad y reparto de crecidas. Jaca, 1943 -2014.
- Figura 20. Esquema del hidrograma de crecida. Fuente: Mateu (1984).
- Figura 21. Ejemplos de crecidas cortas. Canfranc.
- Figura 22. Ejemplos de crecidas cortas. Jaca.
- Figura 23. Ejemplos de crecidas largas. Canfranc.

Figura 24. Ejemplos de crecidas largas. Jaca.

Figura 25. Crecida de septiembre de 2006: datos de Canfranc y Jaca.

Figura 26. Crecida de septiembre de 2012: datos de Canfranc y Jaca.

Figura 27. Zonas inundables en Canfranc-Estación.

Figura 28. Zona inundada en un periodo de retorno de 500 años en la parte norte de Canfranc.

Figura 29. Zonas inundables en Castiello de Jaca.

Figura 30. Zona inundable con periodo de retorno de 50 años en el área colindante a la urbanización del Molino en Castiello de Jaca.

11.2 Índice de tablas.

Tabla 1. Grupos en los que clasificar los datos de máximos instantáneos mensuales en m³/s. Estaciones de Canfranc y Jaca.

Tabla 2. Máximos instantáneos mensuales. Estación de Canfranc.

Tabla 3. Máximos instantáneos mensuales. Estación de Jaca.

Tabla 4. Caudal máximo instantáneo en m³/s para los diferentes periodos de retorno

11.3 Índice de fotografías.

Foto 1: Rio Aragón a su paso por Canfranc-Estación.

Foto 2: Rio Aragón a su paso por Canfranc-Estación

Foto 3: Desembocadura del canal proveniente del barranco de Epifanio.

Foto 4: Presa de la central hidroeléctrica de Canalroya.

Foto 5: Presa de la central hidroeléctrica de Canalroya.

Foto 6: Embalse formado por la presa de Ip.

Foto 7: Presa de de la central de Ip.

Foto 8: Canalización del la parte derecha del rio Aragón a su paso por Canfranc.

Foto 9: Dique de protección en la parte derecha del rio Aragón a su paso por Canfranc.

Foto 10. Vista del rio Aragón a su paso por Castiello de Jaca.

Foto 11. Dique de contención construido en la margen derecha del rio Aragón a su paso por Castiello de Jaca.

Foto 12. Urbanización El Molino situada dentro del cauce del rio Aragón