

Trabajo Fin de Máster

*EFFECTO DEL RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS
SOBRE LOS INDICADORES DE ALTERACIÓN
HIDROLÓGICA. CASO DE ESTUDIO, CUENCA DEL RÍO
ÓRBIGO. (Demarcación Hidrográfica del Duero)*

Intensificación: *ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE
CUENCAS*

Autor:

VALENTINA MÓNICO GONZÁLEZ

Tutor:

DR. ABEL SOLERA SOLERA

Cotutor:

DR. JAVIER PAREDES ARQUIOLA

DR. RAFAEL BERGILLOS MECA

FEBRERO, 2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Efecto del régimen de caudales ecológicos sobre los indicadores de alteración hidrológica. Caso de estudio, cuenca del río Órbigo. (Demarcación Hidrográfica del Duero)

Título del TFM en inglés: Effect of the ecological flows regime on the indicators of hydrological alteration. Case of study, orbigo river basin (Duero basin authority).

Título del TFM en Valenciano: Efecte del règim de cabals ecològics sobre els indicadors d'alteració hidrològica. Cas d'estudi, cuenca del riu Órbigo (cuenca del riu Duero).

Alumno: VALENTINA MÓNICO GONZÁLEZ.

Tutor: DR. ABEL SOLERA SOLERA

Cotutor/es: DR. JAVIER PAREDES ARQUIOLA
DR. RAFAEL BERGILLOS MECA

Fecha de Lectura: FEBRERO, 2022

Resumen

Resumen

En la gestión del agua es cada vez más común hablar sobre impacto ambiental debido a la actividad humana y sus consecuencias sobre el medio ambiente, así como las medidas que se deberían tomar para mitigar, en mayor o menor medida, ese impacto. Y si se tiene en cuenta que gran parte del éxito en la conservación y funcionalidad de los ríos y la biodiversidad depende del régimen natural de caudales, se entiende que las medidas más importantes son las que se toman a la hora de gestionar una cuenca. Es aquí donde la planificación hidrológica tiene un papel fundamental.

En la actualidad, existen diferentes metodologías para estimar la alteración que sufre un ecosistema frente a una intervención antrópica y en las cuales se apoya la planificación hidrológica en la toma de decisiones. Estas metodologías, suelen estimar el impacto a



escala local y dependiendo de la naturaleza de la intervención y de los datos disponibles, los procedimientos pueden llegar a ser muy complejas. El presente trabajo hace una recopilación del estado del arte del régimen de caudales ecológicos y la alteración hidrológica, así como de las metodologías más importantes para evaluarla.

Una vez se cuenta con las bases teóricas y teniendo como punto de partida la caracterización del sistema y los objetivos de planificación, se busca establecer una metodología que permita hacer uso de los índices de alteración hidrológica y de las diferentes herramientas tecnológicas. Esto con el fin de valorar el impacto de las diversas medidas de gestión, sobre el estado general de la cuenca y poder valorar el grado de cumplimiento de estos objetivos.

Esta metodología permite, en primera instancia, establecer la condición de referencia de la cuenca y caracterizar el régimen natural de caudales en esta condición. Buscando conocer los diferentes elementos del régimen de caudales y su interacción con el ecosistema. Adicionalmente, valora la alteración del régimen de caudales por medio de 33 indicadores simplificados en seis índices de alteración hidrológica.

Uno de los puntos más importantes a considerar dentro de la metodología propuesta, es la utilización de datos diarios de aportaciones. Esto teniendo en cuenta que el análisis de la gestión de cuencas se realiza a escala mensual, y esto dificulta el contraste con los indicadores hidrológicos. Por otro lado, los datos diarios permiten diferenciar y considerar en el análisis eventos de gran importancia para el ecosistema, como las crecidas o los días de caudal nulo.

Finalmente, se ha aplicado esta metodología a la cuenca del río Órbigo, que forma parte del sistema fluvial del Duero y que abastece a cerca de 156 603 personas y 68 318 ha de regadíos al año. Con esta aplicación se valida el uso de esta metodología y se evidencia la utilidad que tendrá para la toma de decisiones.



Resum

En la gestió de l'aigua cada vegada és més comuna parlar sobre impacte ambiental a causa de l'activitat humana i les seues conseqüències sobre el medi ambient, així com les mesures que s'haurien de prendre per a mitigar, en major o menor mesura, aqueix impacte. I si es té en compte que gran part de l'èxit en la conservació i funcionalitat dels rius i la biodiversitat depén del règim natural de cabals, s'entén que les mesures més importants són les que es prenen a l'hora de gestionar una conca. És ací on la planificació hidrològica té un paper fonamental.

En l'actualitat, existeixen diferents metodologies per a estimar l'alteració que pateix un ecosistema enfront d'una intervenció antròpica i en les quals es recolza la planificació hidrològica en la presa de decisions. Aquestes metodologies, solen estimar l'impacte a escala local i depenent de la naturalesa de la intervenció i de les dades disponibles poden arribar a ser molt complexes. El treball fa una recopilació de l'estat de l'art del règim de cabals ecològics i l'alteració hidrològica, així com de les metodologies més importants per a avaluar-la.

Una vegada es compta amb les bases teòriques i tenint com a punt de partida la caracterització del sistema i els objectius de planificació, es busca establir una metodologia que permeta fer ús dels índexs d'alteració hidrològica i de diferents eines tecnològiques. Això amb la finalitat de valorar l'impacte de les diferents mesures de gestió, sobre l'estat general de la conca i poder valorar el grau d compliment d'aquests objectius.

Aquesta metodologia permet en primera instància establir la condició de referència de la conca i caracteritzar el règim natural de cabals en aquesta condició. Buscant conèixer els diferents elements del règim de cabals i la seua interacció amb l'ecosistema. Addicionalment, valora l'alteració del règim de cabals per mitjà de 35 indicadors simplificats en sis índexs d'alteració hidrològica.



Un dels punts més importants a considerar dins de la metodologia proposada, és la utilització de dades diàries d'aportacions. Això tenint en compte que l'anàlisi de la gestió de conques es realitza a escala mensual, i això dificulta el contrast amb els indicadors hidrològics. D'altra banda, les dades diàries permeten diferenciar esdeveniments de gran importància per a l'ecosistema, com les crescudes.

Finalment, s'ha aplicat aquesta metodologia a la conca del riu Órbigo, que fa part del sistema fluvial del Duero i que proveeix a prop de 156 603 persones i 68 318 ha de regadius a l'any, per a validar el seu ús i mostrar la utilitat que tindrà per a la presa de decisions.

Abstract

In water management, it is increasingly common to speak of environmental impact due to human activity and its consequences on the environment, as well as the measures that must be taken to mitigate, to a greater or lesser extent, this impact. And if one considers that much of the success in the conservation and functionality of rivers and biodiversity depends on the natural flow regime, it is understood that the most important measures are those taken when managing a basin. This is where hydrological planning plays a key role.

At present, there are different methodologies to estimate the alteration suffered by an ecosystem in the face of anthropic intervention and on which hydrological planning is based in decision-making. These methodologies often estimate impact at the local level and, depending on the nature of the intervention and the data available, can be very complex. This work makes a compilation of the state of the art of the regime of ecological flows and hydrological alteration, as well as the most important methodologies to evaluate it.

Once the theoretical bases have been established and having as a starting point the characterization of the system and the planning objectives, we seek to establish a methodology that allows the use of hydrological alteration indices and different



technological tools. This in order to evaluate the impact of the different management measures on the general state of the basin and to be able to evaluate the degree of fulfilment of these objectives.

This methodology allows in the first instance to establish the basin reference condition and characterize the natural flow regime in this condition. Seeking to know the different elements of the flow regime and its interaction with the ecosystem. Additionally, it evaluates the alteration of the flow regime through 33 simplified indicators in six indices of hydrological alteration.

One of the most important points to consider within the proposed methodology is the use of daily input data, since the analysis of watershed management is carried out on a monthly scale, and this makes difficult to contrast with hydrological indicators. On the other hand, daily data make it possible to differentiate events of great importance to the ecosystem, such as floods.

Finally, this methodology has been applied to the Órbigo river basin, which is part of the Duero River system and supplies about 156,603 people and 68,318 hectares of irrigated land per year, to validate its use and show the usefulness it will have for decision making.

Palabras clave español: Régimen de caudales, Indicadores, Alteración hidrológica, Gestión, Ecosistemas

Palabras clave valenciano: Règim de cabals, Indicadors, Alteració hidrològica, Gestió, Ecosistemes

Palabras clave inglés: Flows regime, Indicators, Hydrological alteration, Management, Ecosystem



AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que me inspiran a diario, a mis padres, a mis hermanos. A Iván por estar siempre. A mis tutores por todo lo que me enseñaron, por las ideas y la paciencia.

Este trabajo se enmarca en el proyecto "Reducción de la escala temporal en la planificación hidrológica para la gestión de recursos y el medio ambiente (RESPHIRA)" de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2019-106322RB-I00; AEI/10.13039/501100011033).

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	ESTADO DEL ARTE	3
3.1	RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS	3
3.1.1	Influencia del Régimen de Caudales en el ecosistema fluvial.....	4
3.1.2	Metodologías para la definición de caudales ecológicos.....	6
3.2	ALTERACIÓN HIDROLÓGICA	9
3.2.1	Indicadores de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS)	10
3.2.2	Indicators of Hydrologic Alteration (IHA).....	12
3.3	PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA.....	16
3.3.1	Planificación hidrológica en España	17
3.3.2	Caudales ecológicos en España.....	18
4	EVALUACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA.....	20
4.1	METODOLOGÍA.....	20
4.1.1	Recopilación y análisis de la información	21
4.1.2	Modelo conceptual de la gestión	22
4.1.3	Calibración del modelo de simulación	22
4.1.4	Simulación del régimen natural	23
4.1.5	Simulación de escenarios	23
4.1.6	Cálculo de índices de alteración hidrológica.....	24
4.1.7	Evaluación de los índices de alteración hidrológica.....	28

4.2	APLICACIÓN EN EL CASO DE ESTUDIO	30
4.2.1	Recopilación y análisis de la información	30
4.2.2	Modelo conceptual de la gestión del sistema.....	39
4.2.3	Calibración del modelo de simulación	45
4.2.4	Simulación del régimen natural	47
4.2.5	Simulación de escenarios	50
4.2.6	Cálculo de índices de alteración.....	62
4.2.7	Evaluación de los índices de alteración hidrológica.....	73
4.2.8	Evaluación de las soluciones	77
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
6	REFERENCIAS.....	84

Índice de figuras	
Figura 1. Esquema de la metodología para la evaluación de la alteración hidrológica.....	20
Figura 2. Zonas y subzonas de la demarcación hidrográfica del Duero.....	31
Figura 3. Ríos en el sistema de explotación Órbigo	32
Figura 4. Acuíferos pertenecientes a la cuenca del río Órbigo	33
Figura 5. Tramos de río en los que se ha considerado caudal ecológico dentro de la cuenca del río Órbigo Fuente: Confederación hidrográfica del Duero (2015)	34
Figura 6. Estado ecológico de las masas de agua superficial pertenecientes a la cuenca del río Órbigo.....	35
Figura 7. régimen de precipitación medio mensual	36
Figura 8. Régimen de precipitaciones anuales en la cuenca del Órbigo.....	37
Figura 9. Temperatura media anual en la cuenca del Órbigo.....	37
Figura 10. Temperatura media mensual en la cuenca del Órbigo.....	38
Figura 11. Evapotranspiración media mensual en la cuenca del Órbigo.....	39
Figura 12. Embalses pertenecientes a la cuenca del río Órbigo	41
Figura 13. Puntos de control seleccionados para el análisis.....	44
Figura 14. Esquema de modelación cuenca del río Órbigo.....	46
Figura 15. Curva de caudales de Valdesamario 63 para cada uno de los escenarios simulados...61	
Figura 16. Curva de caudales de Luna 42_b para cada uno de los escenarios simulados	61
Figura 17. Curva de caudales de Tuerto 105 para cada uno de los escenarios simulados.....	61
Figura 18. Curva de caudales de Órbigo 47_c para cada uno de los escenarios simulados	62
Figura 19 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Valdesamario 63 – meses de invierno	64
Figura 20 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Valdesamario 63 – meses de verano	64
Figura 21 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Luna 42_b – meses de invierno	64
Figura 22 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Luna 42_b – meses de verano	64

Figura 23 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Tuerto 105 – meses de invierno	65
Figura 24 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Tuerto 105 – meses de verano	65
Figura 25 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Órbigo 47_c - meses de invierno	65
Figura 26 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Órbigo 47_c - meses de verano	65
Figura 27 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Valdesamario 63 – Caudales bajos.....	67
Figura 28 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Valdesamario 63 – Caudales altos	67
Figura 29 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Luna 42_b –Caudales bajos.....	67
Figura 30 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Luna 42_b –Caudales altos	67
Figura 31 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Tuerto 105 –Caudales bajos.....	67
Figura 32 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Tuerto 105 –Caudales altos	67
Figura 33 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Órbigo 47_c –Caudales bajos.....	68
Figura 34 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Órbigo 47_c –Caudales altos	68
Figura 35 . Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Valdesamario 63.....	69
Figura 36 Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Luna 42_b	69
Figura 37 Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Tuerto 105	70

Figura 38 Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Tuerto 105
.....70

Figura 39. índices generales por escenarios en la cuenca del río Órbigo76

Figura 40. Esquema general de las demandas consideradas en la cuenca del río Órbigo80

Índice de tablas

Tabla 1. Relación entre parámetros e índices utilizados en la metodología IAHRIS	11
Tabla 2. Parámetros utilizados en la metodología IHA y su influencia en el ecosistema	13
Tabla 3. Agrupación indicadores de alteración hidrológica utilizados	25
Tabla 4. Estandarización de los indicadores de alteración hidrológica	27
Tabla 5. Índices de alteración hidrológica considerados	27
Tabla 6. Rangos propuestos de alteración hidrológica	29
Tabla 7. Descripción de las corrientes principales de la cuenca del río Órbigo (Serie larga 41-06)	32
Tabla 8. Embalses de la cuenca del río Órbigo y su uso.....	41
Tabla 9. Resumen demandas utilizadas	42
Tabla 10. Valores de caudales mínimos mensuales considerados en el modelo	43
Tabla 11. Series de caudales diarios en régimen natural.....	48
Tabla 12. Resultados de la simulación del régimen de caudales en el estado actual de la cuenca del Órbigo.....	51
Tabla 13. Caudales ecológicos considerados en la simulación del escenario actual.....	53
Tabla 14. Resultados de la simulación del régimen de caudales sin caudales ecológicos.	55
Tabla 15. Caudales mínimos considerados para el escenario proyectado	57
Tabla 16. Resultados de la simulación del régimen de caudales proyectados	58
Tabla 17. Índices de alteración hidrológica en el río Valdesamario	71
Tabla 18. Índices de alteración hidrológica en el río Luna.....	71
Tabla 19. Índices de alteración hidrológica en el río Tuerto.....	71
Tabla 20. Índices de alteración hidrológica en el río Órbigo.....	71
Tabla 21. Índices de alteración general por corriente	73
Tabla 22. Evaluación de los índices de alteración hidrológica por corriente.....	74
Tabla 23 Caudales ecológicos definitivos establecidos en el PHD 2022	77
Tabla 24. Evaluación de las garantías anuales, bianuales y decadales para cada uno de los escenarios considerados	78

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.	26
Ecuación 2	28
Ecuación 3	28

1 INTRODUCCIÓN

La explotación de los recursos hídricos ha sido desde siempre un eje de desarrollo importante para la humanidad. Sin embargo, en las últimas décadas se han hecho visibles las consecuencias que este desarrollo, cada vez más acelerado, tiene sobre el medio ambiente.

Uno de los efectos más importantes de la explotación de los recursos hídricos es el continuo deterioro de los ecosistemas fluviales, ya que estos constituyen sistemas de gran complejidad y diversidad, de los cuales dependen una gran cantidad de especies, y de los que se derivan una gran cantidad de bienes y servicios para el ser humano.

Por lo tanto, para establecer medidas de mitigación eficientes, se pone de manifiesto la necesidad de establecer límites a estas alteraciones a través de la gestión, y de enfocar la atención hacia un reconocimiento anticipado de la respuesta del ecosistema frente a las intervenciones humanas.

Es por esto que, al buscar atender a estas necesidades, surge el concepto de caudal ecológico, así como diversas metodologías que permiten evaluar la alteración hidrológica en cuencas hidrográficas. Sin embargo, se encuentra que estas tienden a estimar el impacto a escala local y, dependiendo de la naturaleza de la intervención y de los datos disponibles, pueden llegar a ser muy complejas para su uso en la toma de decisiones.

Por lo anterior, con este trabajo se busca establecer una metodología que permita valorar de forma práctica y rigurosa el impacto de las medidas de gestión sobre el estado general de una cuenca, sin necesidad de que estas hayan sido implementadas, utilizando para ello indicadores de alteración hidrológica.

El trabajo se desarrolla en cinco puntos principales:

1. Introducción
2. Objetivos
3. Estado del arte de los caudales ecológicos y la alteración hidrológica enmarcados en la planificación hidrológica.
4. Evaluación de la alteración hidrológica, describiendo la metodología propuesta y validándola con la aplicación en un caso de estudio
5. Conclusiones del trabajo realizado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar y valorar el impacto que medidas de gestión de cuencas relacionadas con el recurso hídrico y, en particular, la implementación de un régimen de caudales ecológicos, tiene sobre el estado general de la cuenca del río Órbigo utilizando, para ello, indicadores de alteración hidrológica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar las distintas metodologías disponibles para el cálculo de indicadores de alteración hidrológica
- Caracterizar el estado hidrológico de la cuenca de estudio y los componentes principales del régimen de caudales ecológicos, tanto en su estado natural, como en la condición actual.
- Formular una metodología que permita valorar el impacto de diferentes medidas de gestión de cuencas, aun cuando estas no hayan sido implementadas, utilizando indicadores de alteración hidrológica.
- Plantear diferentes escenarios de regímenes de caudales ecológicos como medidas de gestión, y valorar la influencia que estas variaciones tienen sobre los indicadores de alteración hidrológica y la satisfacción de las demandas.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS

El concepto de caudal ecológico surge por la necesidad de establecer límites a las alteraciones antrópicas en las masas de agua, buscando que los ecosistemas que dependen de estas mantengan un buen estado ecológico. Entendiéndose el estado ecológico como la calidad de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas asociados a estas masas (Fernández, 2017).

Las primeras experiencias con caudales ecológicos se presentaron en Estados Unidos hacia los años cuarenta (Tharme R. , 2003), y hacia los años setenta el concepto se empieza a expandir y a estudiar en diferentes países (Rodríguez-Gallego, y otros, 2011). Esta difusión global ha dado lugar a diferentes concepciones y definiciones a lo largo de la historia.

Sin embargo, una de las definiciones más utilizada y aceptada en el ámbito científico, es la establecida por la Declaración de Brisbane (2018). En esta se definen los caudales ecológicos como *“la cantidad, duración, y calidad de los flujos de agua, así como los niveles requeridos para mantener los ecosistemas acuáticos, los cuales a su vez sostienen la economía y el bienestar humano”*. No obstante, aunque las primeras experiencias con caudales ecológicos llevaron a la necesidad de definir un único valor de caudal con el que se podría llegar a proteger el ecosistema, recientemente se ha postulado que se pueden obtener mejores resultados al establecer un régimen de caudales ecológicos que reproduzca las condiciones naturales variables.

Según la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2008), el régimen de caudales ecológicos es aquel *“que permita mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición”*. Para lograr esto, se considera que el régimen de caudales se caracterizará por su magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasas de cambio, de forma que permita mantener un dinamismo característico de un sistema sin alteraciones.

De este modo, para instaurar un régimen de caudales ecológicos apropiado, es necesario establecer y cuantificar la relación entre los procesos y componentes hidrológicos, y las diversas variables ecológicas involucradas (Poff, Tharme, & Arthington, 2017).

3.1.1 Influencia del Régimen de Caudales en el ecosistema fluvial

Las diferentes especies de un ecosistema asociado a una masa de agua, evolucionan y se adaptan a las condiciones marcadas por el régimen natural del río, siendo este el elemento vertebrador de ese ecosistema. Cuando se introduce un cambio que modifique ese régimen, la alteración afecta a todos los organismos y formas que conforman ese ecosistema.

En este sentido, el rango de variación interanual del régimen, con sus características asociadas de magnitud, estacionalidad, duración, frecuencia y tasa de cambio, son claves para sustentar la biodiversidad natural y la integridad de los ecosistemas acuáticos (Poff, y otros, 1997). Pero esto sólo es posible considerando estas características dentro de los procesos de gestión de cuencas. Un ejemplo de este tipo de prácticas está presente en el esquema de gestión hídrico de España. Por ejemplo, el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Duero (CHD, 2015), en adelante PHD, establece diferentes componentes que deben ser considerados a la hora de determinar el régimen de caudales para garantizar un buen estado ecológico de las aguas. Dentro de ellos se encuentran:

- **Caudales mínimos:** Hace referencia a la cantidad mínima de agua necesaria para mantener la diversidad espacial del hábitat y su conectividad, de forma que se favorezca el mantenimiento de las comunidades autóctonas y las diferentes especies que cohabitan con la masa de agua. Se entiende que una disminución en los caudales mínimos puede conducir a una conectividad limitada y la consecuente reducción en la distribución geográfica de las especies, así como su densidad poblacional.
- **Caudales máximos:** Son aquellos caudales por debajo de los cuales se debe mantener la gestión de la infraestructura, ya que superarlos implicaría afectar negativamente el ecosistema asociado. Es decir, en la gestión de un embalse o una presa no se deben considerar caudales superiores a este con el objetivo de proteger las especies autóctonas más vulnerables.

- **Tasa de cambio:** Se refiere a la variación de los caudales circulantes, es decir, la relación temporal entre los caudales mínimos y los máximos. Su importancia radica en que contribuye a conservar condiciones propicias de regeneración.

Una alteración importante de las tasas de cambio implicaría una disminución en la diversidad de hábitats y, por tanto, en la riqueza de especies. Su estudio e implementación en la gestión pretende evitar los efectos negativos de una variación súbita o muy baja de los caudales, que interfiera en los diferentes procesos naturales.

- **Caudales de crecida:** El objetivo principal de estos caudales es el de controlar la presencia y abundancia de las diferentes especies para mantener un equilibrio, conservar las condiciones fisicoquímicas del agua y del sedimento, mejorar las condiciones y disponibilidad del hábitat a través de la dinámica geomorfológica, y favorecer los procesos hidrológicos que controlan la conexión de las aguas de transición con el río, el mar y los acuíferos asociados.

Por su parte, Bunn & Arthington (2002) establecen cuatro hipótesis relacionadas con estos componentes y con la influencia directa que el régimen de caudales tiene sobre los ecosistemas fluviales:

- El régimen de caudales en un río determina la naturaleza física de los hábitats acuáticos, lo que está directamente relacionado con la composición biótica presente en ese río.
- Las especies acuáticas establecen estrategias de desarrollo en respuesta directa a los regímenes de caudales.
- La conservación de patrones naturales de conectividad lateral y longitudinal es esencial para la viabilidad de los ecosistemas ribereños.
- La alteración de los regímenes de caudal facilita el establecimiento de especies no nativas o invasoras.

De esta forma, se hace evidente la necesidad de establecer en los cauces regulados, regímenes de caudales ecológicos capaces de reproducir, de la forma más estricta posible, la variabilidad temporal propia del curso en su estado natural. Esto con el fin de disminuir la alteración hidrológica y mantener los ecosistemas que dependen de estos cauces. De esta necesidad surgen

diferentes metodologías para definir caudales ecológicos, algunas de las cuales consideran el régimen de caudales naturales del río.

3.1.2 Metodologías para la definición de caudales ecológicos

La influencia de los caudales ecológicos en la gestión del agua y los desafíos que se enfrentan a la hora de establecer un régimen de caudales apropiado ha dado lugar a un gran número de metodologías. En términos generales, estas metodologías se pueden agrupar en cuatro categorías principales: los métodos hidráulicos, los de simulación de hábitat, los métodos holísticos y los métodos hidrológicos (Tharme R. , 2003).

Metodologías hidráulicas

Los métodos hidráulicos se enfocan en el estudio de secciones críticas, o que son representativas del comportamiento de todo un tramo de río, considerando la variación de algunos parámetros hidráulicos (Díez Hernández, 2005). En términos generales, se utilizan relaciones entre variables hidráulicas simples como profundidad, ancho, velocidad y perímetro mojado, con el caudal. Esta relación, a su vez, se vincula con el hábitat disponible para los organismos acuáticos. De esta forma, al garantizar un valor del parámetro hidráulico seleccionado, se supone que la integridad del ecosistema y todos los elementos que lo componen se mantendrá en buenas condiciones.

Métodos de simulación de hábitat

El caudal ecológico resulta de una cuantificación previa del hábitat físico de una especie de referencia y del análisis de su relación con el caudal circundante (Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Tajo, 2011). Por consiguiente, estos métodos incorporan variables que tienen una relación directa con los seres vivos tales como el sustrato, los elementos de refugio y los rangos idóneos de velocidad y profundidad.

Debido a la alta demanda analítica y a la necesidad de contar con estudios de requerimientos de hábitat de todas las especies a considerar, estos métodos de simulación de hábitat se han venido aplicando principalmente en la descripción de las condiciones de hábitat de especies. Dentro de este grupo, una de las metodologías más utilizadas en el mundo, gracias a su sólida base científica es la metodología Instream Flow Incremental Methodology, más conocida como IFIM (Paredes Arquiola, Martínez Capel, Solera Solera, & Aguilera Vidal, 2011).

Metodologías holísticas

Este tipo de metodologías se basa en que, si ciertas características del régimen hidrológico natural pueden identificarse e incorporarse adecuadamente en un sistema que ha sido modificado, entonces, de la misma forma, se debería mantener la biota existente y la integridad funcional del ecosistema (Tharme R. , 2004).

En términos generales, el caudal ecológico se establece a partir de un análisis independiente de la magnitud y distribución que requieren los diferentes componentes del ecosistema fluvial (Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Tajo, 2011). Esta metodología considera, por tanto, aspectos abióticos (morfología, calidad del agua, temperatura, etc.), ecológicos (comunidades animales y vegetales) y socioeconómicos. Estos análisis buscan principalmente encontrar la función que ejercen los flujos como soporte de todos estos componentes (Pardo Martínez & Gilabert Cervera, 2010).

Uno de los métodos holísticos más reconocidos es el ELOHA. Este propone la clasificación de tramos fluviales utilizando criterios ambientales que proporcionen la integración y extrapolación de los resultados del tramo evaluado a la escala de cuenca hidrográfica (Paredes Arquiola, Martínez Capel, Solera Solera, & Aguilera Vidal, 2011).

Metodologías hidrológicas

Estas metodologías están basadas en el uso de registros históricos de flujos en régimen natural, mensuales o diarios; para estimar los caudales ecológicos recomendados por medio de tratamientos estadísticos.

Dentro de los métodos hidrológicos para definir caudales ecológicos se destacan tres principales: el Método de Montana o de Tennant, el método de caudal básico de mantenimiento y el análisis de rango de variabilidad.

El Método de Montana surgió en Estados Unidos tras la evaluación de 11 ríos ubicados en Montana, Nebraska y Wyoming. En este estudio se buscó una relación entre el caudal circulante y la disponibilidad de hábitat para la biota acuática. En él se encontró que con caudales menores al 10% del caudal medio en época seca, la profundidad y la velocidad disponibles para la fauna acuática era insuficiente, (Jamett Domínguez & Rodríguez Finotti, 2015) Razón por la que se

adoptó este valor como caudal ecológico. Sin embargo, dadas las condiciones hídricas, hidrológicas y ecológicas particulares del caso estudio, no se considera adecuada la aplicación de esta metodología en regiones que no presenten características semejantes a las del estudio. Esto, sumado al hecho de que el método no considera la variación natural de los caudales, representa una fuerte limitación para su aplicación de forma generalizada a cualquier sistema hídrico.

Por su parte, el método del caudal básico de mantenimiento (QBM) analiza series diarias de caudales para definir un caudal básico del río y una variación mensual. Este caudal básico se determina a partir de medias móviles de los caudales mínimos medidos; y a partir de este valor se asigna una variabilidad estacional o mensual. Esta metodología ha sido utilizada en algunas cuencas de España, por organismos oficiales de planificación.

Finalmente, el análisis de rango de variabilidad (RVA, por sus siglas en inglés) se basa en la comparación de series de caudales en régimen natural y en régimen alterado estableciendo indicadores de dichas diferencias. El objetivo final es proponer cambios de gestión del agua para conseguir regímenes de caudales ecológicos que reduzcan dicha alteración, y así mejorar el estado del ecosistema.

Uno de los aspectos de mayor importancia a la hora de aplicar esta metodología es la disponibilidad de información inicial de calidad. En este sentido, Puig, Olguín, Salinas, & Castro (2016) recomiendan contar con datos representativos de la zona de estudio para al menos 20 años consecutivos de registros de caudal en régimen natural; lo cual en cuencas alteradas suele representar una importante limitación (Hernández Salinas, 2017). Para intentar paliar estas limitaciones, se han venido desarrollando, con el uso métodos hidrológicos, metodologías que permiten restituir registros de caudales alterados a régimen natural. Finalmente, con estas restituciones es posible simular series de caudales en régimen natural de varios años.

Sin lugar a duda, las metodologías hidrológicas presentan una buena alternativa para la determinación de los caudales ecológicos. Entre algunas de las ventajas soportan esta hipótesis se puede mencionar la obtención rápida de resultados, y la capacidad de aplicabilidad a distintas escalas, bien sea a nivel de cuenca o de tramo.

3.2 ALTERACIÓN HIDROLÓGICA

Una vez definido el concepto de caudal ecológico y las metodologías comúnmente utilizadas para su estimación, es importante establecer su relación con la alteración hidrológica. La alteración hidrológica hace referencia a la variación en uno o más componentes del régimen hidrológico como consecuencia de la intervención humana (en el caso de estudio aquí abordado se prestará especial atención a los principales componentes del régimen hidrológico de caudales). Estos componentes son los encargados de mantener las condiciones físicas, químicas y biológicas que sostienen a los organismos y los servicios de los ecosistemas fluviales (Puig, Olgúin Salinas, & Castro, 2016).

En consecuencia, el estado ecológico de una masa de agua está determinado por un gran número de variables, la mayoría de las cuales están relacionadas con el régimen de caudales del río. Por lo tanto, al establecer un régimen de caudales que cumpla con los componentes mencionados anteriormente y sumado a un buen estado de los parámetros fisicoquímicos del agua, se podría garantizar el mantenimiento de su buen estado ecológico (Rodríguez Benlloch, 2019).

Para avanzar hacia el objetivo del buen estado ecológico, desde el punto de vista de la gestión de cuencas, es necesario conocer los aspectos del régimen de caudales más relevantes. Esto con el fin de formular diagnósticos adecuados sobre los que establecer políticas de uso y gestión (Martínez Santa-María & Fernández Yuste, 2010).

Adicionalmente, para determinar el grado de alteración hidrológica a la que se puede llegar a someter a un ecosistema sin generar consecuencias importantes, es necesario implementar evaluaciones cuantitativas de los cambios hidrológicos inducidos por el hombre (Richter, Baumgartner, Powell, & Braun, 1996). En este aspecto, recientemente se han formulado diferentes metodologías que buscan determinar el grado de alteración hidrológica de una cuenca.

De forma general, algunas de estas metodologías, relacionadas con el análisis de rango de variabilidad, se basan en la comparación del régimen hidrológico existente en la cuenca con el régimen hidrológico en estado natural, es decir, aquel que tendría el sistema si no existieran alteraciones antropogénicas. Esta comparación se realiza mediante una serie de indicadores de

alteración hidrológica que permiten clasificar el estado ecológico de la masa evaluada desde un estado muy bueno o mínimamente alterado, hasta un estado deficiente o críticamente alterado.

Dos de las metodologías más relevantes en el ámbito para determinar indicadores de alteración hidrológica son la metodología IAHRIS de Indicadores de Alteración Hidrológica en Ríos (Martínez Santa-María & Fernández Yuste, 2010), y la metodología de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA, por sus siglas en inglés) (Rodríguez Benlloch, 2019).

3.2.1 Indicadores de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS)

Este método fue desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y financiado por la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente de España. En este método se evalúan 19 parámetros clasificados en valores habituales y valores extremos (Martínez Santa-María & Fernández Yuste, 2010). Adicionalmente, como se puede observar en la Tabla 1, también se subdividen en cinco aspectos relacionados con los componentes del régimen de caudales:

- Magnitud: Determina la cantidad, y por tanto la disponibilidad general de agua en el ecosistema.
- Frecuencia con la que un evento se produce en un intervalo de tiempo dado: Indicativa de la variabilidad en el régimen de caudales y condicionante de la dinámica geomorfológica y ecológica y, por ende, de la diversidad.
- Duración o intervalo de tiempo asociado con unas determinadas condiciones de flujo: En situaciones extremas, avenidas y sequías, la duración está íntimamente ligada a los umbrales de resiliencia de las diferentes especies.
- Estacionalidad o regularidad con la que ese evento acontece en una época determinada del año: Este aspecto se relaciona estrechamente y en sincronía con los ciclos de vida de las diferentes especies (fluviales, de estuarios y marinas).
- Variabilidad: Se refiere a la velocidad con la que se producen los cambios de unas magnitudes a otras, afectando a la capacidad de respuesta de la biota.

Tabla 1. Relación entre parámetros e índices utilizados en la metodología IAHRIS

COMPONENTE	ASPECTO	PARÁMETRO		ÍNDICE		
		DENOMINACIÓN	CÓDIGO	DENOMINACIÓN	CÓDIGO	
VALORES HABITUALES	APORTACIONES ANUALES Y MENSUALES	MAGNITUD	Media de las aportaciones anuales	P1 ¹	Magnitud de las aportaciones anuales	IAH 1
					Magnitud de las aportaciones mensuales	IAH 2
		VARIABILIDAD	Diferencia entre la aportación mensual máxima y mínima en el año	P2 ¹	Variabilidad extrema	IAH 4
		ESTACIONALIDAD	Mes de máxima y mínima aportación del año	P3 ²	Estacionalidad de máximos	IAH 5
	Estacionalidad de mínimos				IAH 6	
CAUDALES DIARIOS	VARIABILIDAD	Diferencia entre los caudales medios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90%	P4 ²	Variabilidad habitual	IAH 3	
VALORES EXTREMOS	VALORES MÁXIMOS DE CAUDALES DIARIOS (AVENIDAS)	MAGNITUD Y FRECUENCIA	Media de los máximos caudales diarios anuales	P5	Magnitud de las avenidas máximas	IAH 7
			Caudal generador del lecho	P6	Magnitud del caudal generador del lecho	IAH 8
			Caudal de conectividad	P7	Magnitud del caudal de conectividad	IAH 9
			Caudal de la avenida habitual (Q 5%)	P8	Magnitud de las avenidas habituales	IAH 10
		VARIABILIDAD	Coeficiente de variación de máximos caudales diarios anuales	P9	Variabilidad de las avenidas máximas	IAH 11
			Coeficiente de variación de la serie de avenidas habituales	P10	Variabilidad de las avenidas habituales	IAH 12
		DURACION	Máximo número de días consecutivos del año con $q > Q 5\%$	P11	Duración de avenidas	IAH 13
		ESTACIONALIDAD	Número medio de días al mes con $q > Q 5\%$	P12 ³	Estacionalidad de avenidas	IAH 14 ³
	VALORES MÍNIMOS DE CAUDALES DIARIOS (SEQUÍAS)	MAGNITUD Y FRECUENCIA	Media de los mínimos caudales diarios anuales	P13	Magnitud de las sequías extremas	IAH 15
			Caudal de sequía habitual (Q 95%)	P14	Magnitud de las sequías habituales	IAH 16
		VARIABILIDAD	Coeficiente de variación de mínimos caudales diarios anuales	P15	Variabilidad de las sequías extremas	IAH 17
			Coeficiente de variación de la serie de sequías habituales	P16	Variabilidad de las sequías habituales	IAH 18
		DURACIÓN	Máximo número de días consecutivos al año con $q < Q 95\%$	P17	Duración de sequías	IAH 19
			Número medio de días al mes con caudal diario nulo	P18 ³	Número de días con caudal nulo	IAH 20 ³
		ESTACIONALIDAD	Número medio de días al mes con $1 < Q 95\%$	P19 ³	Estacionalidad de sequías	IAH 21 ³

1. Año ponderado, 2. Tipo de año (año húmedo, año medio, año seco), 3. 12 valores, uno por cada mes

Fuente: Elaboración propia adaptada de Martínez Santa-María & Fernández Yuste (2010)

En cuanto al cálculo de los indicadores, en la mayoría de los casos se determina como la media aritmética de los cocientes entre los valores en régimen alterado y régimen natural. Por lo tanto, los valores de los indicadores estarán comprendidos entre 0 y 1 siendo 0 completamente alterado y 1 inalterado.

Cabe mencionar que se conocen algunas adaptaciones de este método relacionadas principalmente con la disponibilidad de información. Esto teniendo en cuenta que esta metodología utiliza tanto series diarias como mensuales para el cálculo de los parámetros y la mayoría de información disponible se encuentra a una escala mensual. Una de estas adaptaciones es la realizada por Ortín L(2017), en la que se plantea una metodología similar a la establecida en IAHRIS adaptando la mayoría de los parámetros a escala mensual.

Sin embargo, no es posible realizar este tipo de adaptación a todos los parámetros IAHRIS, por lo que el número total de parámetros queda reducido a 12, manteniendo el rango de valores de los parámetros entre 0 y 1 (Rodríguez Benlloch, 2019).

3.2.2 Indicators of Hydrologic Alteration (IHA)

Es un método desarrollado por la organización The Nature Conservancy que tiene como objetivo evaluar el grado de alteración hidrológica que se da como consecuencia de intervenciones antrópicas dentro de un ecosistema (Richter, Baumgartner, Powell, & Braun, 1996). Este se basa en el análisis de datos hidrológicos ya sean obtenidos en campo o generados a partir de simulaciones.

Esta metodología utiliza 33 parámetros que suministran información indicadora de los rasgos propios de los regímenes de aguas superficiales y subterráneas, y los clasifica en cinco grupos que permiten caracterizar estadísticamente la variación hidrológica de cada año (The Nature Conservancy, 2011).

Estos parámetros se calculan a partir de series de caudales diarios. El valor de cada indicador se obtiene calculando la media y la desviación típica de cada uno de los parámetros en su régimen natural y alterado. El indicador de alteración calculado se expresa como un porcentaje de la desviación del régimen alterado respecto al natural (Ortín León, 2017). En la Tabla 2 se presentan los parámetros utilizados y la relación que tienen con el ecosistema. Adicionalmente,

dependiendo de su naturaleza y para facilitar su análisis, estos parámetros se han clasificado en cinco grupos distintos.

Tabla 2. Parámetros utilizados en la metodología IHA y su influencia en el ecosistema

GRUPO	PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	NÚMERO DE PARÁMETROS	INFLUENCIA EN EL ECOSISTEMA
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la media o la mediana para cada mes	12	Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos
			Disponibilidad de humedad del suelo para las plantas
			Disponibilidad de agua para los animales terrestres
			Disponibilidad de alimentos/cobertura para mamíferos con pelo
			Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres
			Acceso de los depredadores a los sitios de anidación
			Influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Mínimos anuales, media de 1 día	12	Equilibrio de organismos competitivos, y tolerantes a las presiones
	Mínimos anuales, medias de 3 días		Creación de sitios para la colonización de plantas
	Mínimos anuales, medias de 7 días		Estructuración de los ecosistemas acuáticos por factores abióticos vs. Bióticos
	Mínimos anuales, medias de 30 días		Estructuración de la morfología del canal del río y las condiciones físicas del hábitat
	Mínimos anuales, medias de 90 días		Estrés de la humedad del suelo en las plantas
	Máximos anuales, media de 1 día		Deshidratación en los animales
	Máximos anuales, medias de 3 días		Estrés anaeróbico en las plantas
	Máximos anuales, medias de 7 días		Volumen del intercambio de nutrientes entre los ríos y las planicies de inundación
	Máximos anuales, medias de 30 días		Duración de las condiciones de presión tales como bajo nivel de oxígeno y concentración de químicos en los ambientes acuáticos
	Máximos anuales, medias de 90 días		Distribución de las comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación
	Cantidad de días con caudal cero		Duración de los caudales altos para la eliminación de residuos, aeración de los lechos de desove en los sedimentos del canal
	Índice de flujo de base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual		
3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día	2	Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos
			Predictibilidad/evitabilidad del estrés en los organismos
			Acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación
			Indicios para el desove de los peces migratorios

GRUPO	PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	NÚMERO DE PARÁMETROS	INFLUENCIA EN EL ECOSISTEMA
	Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día		Evolución de las estrategias de los ciclos biológicos, mecanismos de comportamiento
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico	4	Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas
	Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días)		Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas
	Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico		Disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos
	Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días)		Intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación
			Disponibilidad de minerales del suelo
			Acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos	3	Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes)
	Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos		Atrapamiento de los organismos en las islas, planicies de inundación (niveles crecientes)
	Cantidad de inversiones hidrológicas		Estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente (varial zone)
TOTAL PARÁMETROS		33	

Fuente: Elaboración propia adaptada de The Nature Conservancy (2011)

Es posible realizar este análisis con estadísticas paramétricas o no paramétricas, dependiendo de si la distribución de los datos utilizados es conocida o no. Sin embargo, en términos generales se recomienda utilizar el análisis no paramétrico dado que muchos conjuntos de datos pueden presentar sesgos.

Adicionalmente, IHA permite caracterizar cinco tipos diferentes de componentes del caudal ecológico o EFC (Environmental Flow Components). Esta caracterización del caudal ecológico se basa en la observación de diferentes investigadores que plantean que un hidrograma puede dividirse en un conjunto de ciclos hidrográficos ecológicamente relevantes que se repiten (The Nature Conservancy, 2011) y que permiten, a su vez, mantener la integridad ecológica del cauce.

Estos cinco tipos de componentes de caudal son:

- Caudales bajos: También conocidos como caudal base o mínimo. Este caudal es generado en la mayoría de los casos por descargas de agua subterránea. Esta es la condición de caudal que más se repite en el tiempo y, por lo tanto, la que determina la cantidad de hábitat disponible durante la mayor parte del año para las diferentes especies acuáticas (Aramburú Paucar & Martínez Capel, 2020).
- Caudales extremadamente bajos: Como su nombre indica, son caudales por debajo de los caudales bajos. Suelen presentarse en épocas de sequía. Se consideran importantes para los ecosistemas ya que concentran presas acuáticas para distintos tipos de depredadores y propician ambientes de competencia para las especies autóctonas. Adicionalmente, proporcionan las condiciones necesarias para que ciertas especies de plantas se regeneren (The Nature Conservancy, 2011).
- Pulsos de caudal alto: Hacen referencia, en términos generales, al nivel del agua entre el caudal bajo y el límite de la ribera del cauce. Estos pulsos de caudal alto proporcionan conectividad longitudinal permitiendo la migración de algunas especies (The Nature Conservancy, 2011).
- Pequeñas inundaciones: Se refiere a los eventos en los que se sobrepasa el cauce principal, pero que no representan eventos de un periodo de retorno muy grande, que puede ser superior a 5 años, dependiendo de las características del sistema. Estos eventos permiten la conectividad longitudinal y transversal del ecosistema, incluyendo transferencia de materiales y energía entre el cauce, las zonas de inundación y la ribera (Bernuy Vilca, 2019).
- Grandes inundaciones: Son eventos de precipitación con un periodo de retorno de varios años. Debido a su magnitud, pueden llegar a modificar la distribución biológica y física de un río. Aunque representa un factor de alta presión para la mayoría de las especies nativas, es clave en la creación de hábitats.

En el presente trabajo se utilizará este método para calcular los indicadores de alteración hidrológica, esto teniendo en cuenta que esta metodología está actualizada y permite evaluar los componentes de caudal y los parámetros descritos anteriormente. Adicionalmente se considera que esta metodología incluye la mayoría de los parámetros considerados por el

CEDEX, a excepción de la diferencia entre los caudales medios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90%. Sin embargo, evalúa las tasas de ascenso y descenso de los caudales diarios que a efectos del análisis se considera suficiente e importante.

3.3 PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

La planificación hidrológica se concibe como parte esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos y está orientada a establecer vínculos entre el conocimiento, la gestión y el desarrollo sostenible del agua. Lo anterior, enmarcado en una serie de objetivos sociales, económicos y ambientales (González, Hernández, & Romero, 2013) en los que se busca garantizar a corto, medio y largo plazo las necesidades de las poblaciones humanas sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas.

Para lograr estos objetivos, hoy en día se cuenta con diferentes herramientas de evaluación y análisis de cuencas, como WEAP, BASINS o AQUATOOL+, entre otras. Estas herramientas, en términos generales, están diseñadas con el fin de representar las características de una cuenca o sistema de explotación y su funcionamiento, permitiendo conocer la respuesta del sistema a diferentes factores y analizarlos desde diferentes puntos de vista. Estos modelos presentan grandes ventajas en cuanto a la adaptabilidad y la capacidad de representar elementos muy complejos.

WEAP es un software desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI, por sus siglas en inglés) que involucra disponibilidad, generación de residuos, calidad de agua, costos y diferentes opciones de gestión. Este software ha sido utilizado principalmente en estudios de cuencas hidrográficas de Kenia (Marcellus Metobwa, Mourad, & Ribbe, 2018), y en los últimos años ha tenido un creciente uso en estudios oficiales de Chile y otros países.

Por otro lado, BASINS es una herramienta desarrollada por la Oficina del Agua de la EPA. Esta permite valorar cuencas hidrográficas, con el fin de identificar y evaluar de manera eficiente la calidad y cantidad de los cursos de agua superficial. Su uso se ha extendido mayoritariamente en cuencas de los Estados Unidos (Whittemore & Beebe, 2000).

En cuanto a AQUATOOL+, este es un entorno de desarrollo de sistemas de soporte a la decisión (SSD) que surge para contribuir con la planificación y gestión de cuencas complejas. Como SSD proporciona, además, recursos para ayudar a la toma de decisiones y al análisis de diversos problemas relacionados con la gestión del agua (Andreu, Capilla, & Sanchís, 1996).

AQUATOOL+ ha sido utilizado para diseñar estrategias de gestión y demás toma de decisiones referentes a los recursos hídricos de todas las cuencas hidrográficas en España (Jódar-Abellán, Pla, & Valdes-Abellan, 2019).

Sin embargo, una correcta planificación hidrológica no solo depende de las herramientas que se utilicen, sino de cómo se afronten las singularidades de cada sistema. En este sentido, España ha sido pionero a la hora de gestionar los recursos hídricos disponibles, debido precisamente a la singularidad hidrológica del territorio. Esta singularidad se traduce en un desfase espacial y temporal de los recursos frente a las demandas (Ardiles, 2015).

3.3.1 Planificación hidrológica en España

En España, la planificación hidrológica surge con el objetivo de cuidar y proteger el dominio público hidráulico y las masas de agua, así como garantizar las demandas, protegiendo su calidad y racionalizando su uso en armonía con el medio ambiente (Confederación hidrográfica del Duero, 2015). Además, en el marco de la Unión Europea, sigue las directrices de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) la cual introduce la obligación de realizar un completo proceso de planificación hidrológica en cada una de las cuencas (Confederación hidrográfica del Duero, 2015).

Esta planificación se lleva a cabo por medio de dos instrumentos principales: el plan hidrológico nacional y los planes hidrológicos de cada una de las demarcaciones hidrográficas pertenecientes al espacio español. Estos instrumentos están regulados a distintos niveles por normativas nacionales y europeas que establecen un procedimiento común para todos los estados miembros de la Unión Europea, fundamentado principalmente en la Directiva Marco del Agua.

En cuanto a los criterios técnicos para la homogeneización y sistematización para la elaboración de los planes hidrológicos de cuenca, la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) es la normativa encargada de definirlos. Dentro de esta normativa se instaura la necesidad de

establecer un régimen de caudales ecológicos en todas las masas de agua (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 2008).

3.3.2 Caudales ecológicos en España

Cada uno de los Planes Hidrológicos de cuencas cuentan con un capítulo destinado a fijar el régimen de caudales ecológicos en las masas de agua propias de su demarcación. Según lo estipulado en la IPH, este régimen de caudales ecológicos se debe establecer *“de modo que permita mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados”* (Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente, 2016).

Adicionalmente se establecen dos requisitos que debe cumplir el régimen de caudales. El primero establece *“proporcionar condiciones de hábitat adecuadas que permitan satisfacer las necesidades de las diferentes comunidades biológicas propias de los acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, mediante el mantenimiento de los procesos ecológicos y geomorfológicos necesarios para completar sus ciclos biológicos”*. El segundo requisito indica que se debe *“ofrecer un patrón temporal de los caudales que permita la existencia, como máximo, de cambios leves en la estructura y composición de los ecosistemas acuáticos y hábitat asociados y permita mantener la integridad biológica del ecosistema”* (Confederación hidrográfica del Duero, 2015).

Por otro lado, la IPH establece que el régimen de caudales debe incluir cuatro componentes fundamentales, los cuales se han explicado anteriormente (ver 3.1.1). Asimismo, incluye criterios específicos para determinar cada uno de estos componentes:

- Caudales mínimos: se calcularán a partir de métodos hidrológicos y sus resultados deberán ser ajustados con base en métodos de simulación de hábitat en tramos fluviales representativos de cada tipo de río. También se establece que en caso de sequías prolongadas se podrá aplicar un régimen de caudales menos exigente, siempre y cuando no sean zonas incluidas en la red Natura 2000 o en la lista de humedales de importancia internacional.

- Caudales máximos: para su determinación se debe analizar los percentiles de excedencia mensuales de una serie representativa de caudales en régimen natural de al menos 20 años de duración. Adicionalmente deberá ser verificado con modelos hidráulicos asociados a modelos de hábitat.
- Tasas de cambio: esta será definida como “la máxima diferencia de caudal entre dos valores sucesivos de una serie hidrológica por unidad de tiempo, tanto para las condiciones de ascenso como las de descenso de caudal”
- Caudales de crecidas: debe ser asociado al caudal de sección llena del cauce y al definirse es importante incluir su magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasa máxima de cambio de acuerdo con los estudios realizados.

Estos criterios establecen parámetros técnicos para la homogeneización y sistematización de los planes hidrológicos de cuenca. Además, están enfocados en mantener un buen estado ecológico de los ecosistemas asociados a estas masas de agua que han sido alteradas por la acción humana compatibilizándolo con las demandas del sistema.

En conclusión, los caudales ecológicos nacen como alternativa para garantizar un buen estado ecológico de las masas de agua y sus ecosistemas asociados en aquellos lugares en los que la acción humana genere una alteración de las condiciones hidrológicas naturales. Hoy en día existen diversos métodos, tanto para establecer valores de caudales ecológicos, como para cuantificar el efecto que estas alteraciones tienen sobre el medio ambiente.

Sin embargo, a la hora de hacer estas evaluaciones es importante considerar cada uno de los componentes del régimen de caudales y sus características (magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasas de cambio) buscando mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados.

4 EVALUACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA

4.1 METODOLOGÍA

En los próximos apartados se hará una descripción de la metodología propuesta para el uso de los índices de alteración hidrológica con el fin de valorar el impacto de las diferentes medidas de gestión sobre el estado general de una cuenca, y en particular del efecto del régimen de caudal ecológico.

En la Figura 1 se esquematizan las etapas consideradas en la metodología, cada una de las cuales serán desarrolladas en profundidad en los apartados siguientes.

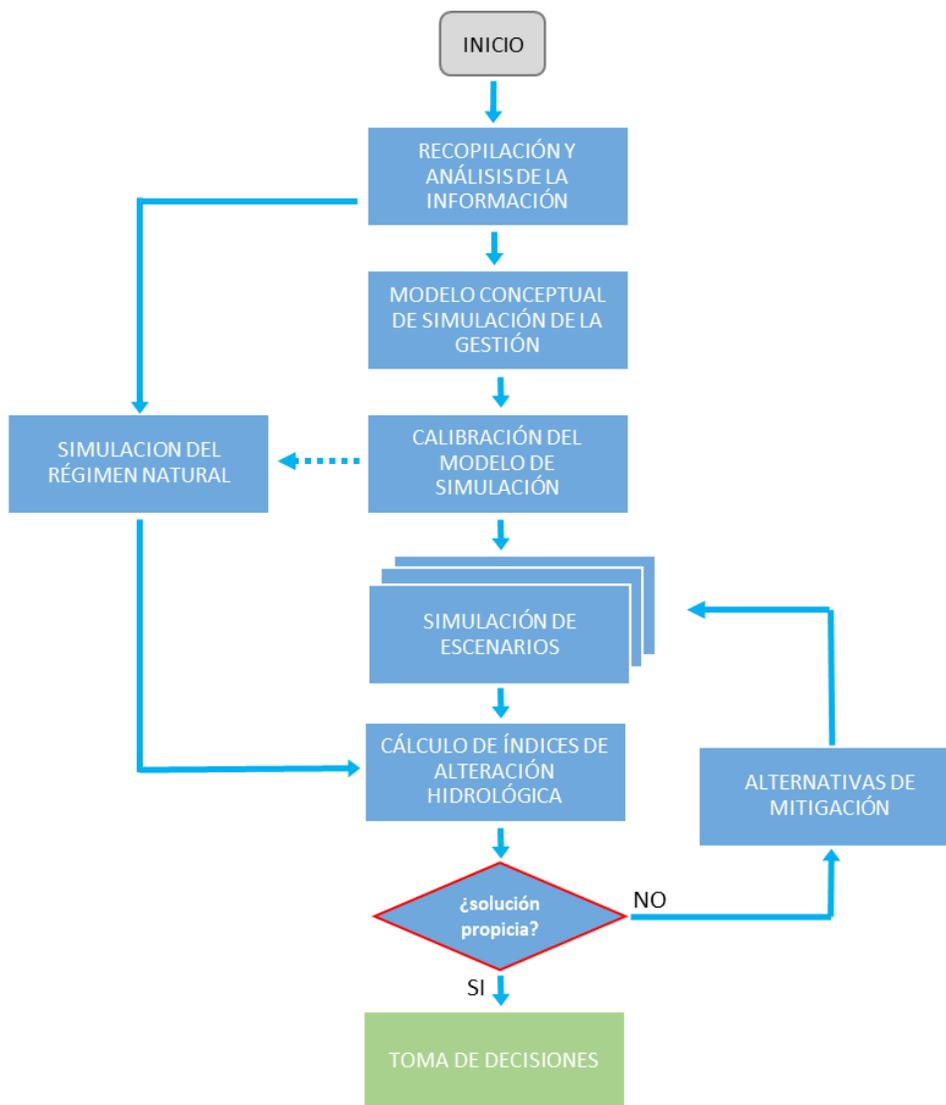


Figura 1. Esquema de la metodología para la evaluación de la alteración hidrológica.

Tal como se evidencia en la figura anterior, la metodología propuesta permite diferentes acepciones de acuerdo con la información disponible y a los objetivos establecidos, así como simular tantos escenarios como se consideren necesarios según el alcance de la evaluación.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los pasos considerados, y la información requerida.

4.1.1 Recopilación y análisis de la información

Este primer paso está enfocado en reunir la información necesaria y con las características adecuadas para que los resultados sean acordes con los objetivos planteados.

En primer lugar, se requieren datos de aforo de caudales, así como series de aportaciones históricas a nivel diario y mensual en régimen natural que presenten una alternancia relevante entre años secos y húmedos.

Sin embargo, teniendo en cuenta la dificultad que representa encontrar información suficiente previa a todas las alteraciones, la metodología permite emplear restituciones a régimen natural. Por lo tanto, si se cuenta con información de aportaciones, aforos de caudales y datos de explotación históricos, es posible realizar la calibración de un modelo hidrológico con el fin de obtener series de caudal restituidas a régimen natural confiables para el estudio. Esta información también es importante a la hora de simular la gestión en diferentes escenarios actuales y futuros.

Conviene resaltar que, en términos generales, la planificación hidrológica está limitada a datos en una escala mensual. Con esta escala, se puede llegar a representar el comportamiento habitual de un sistema. Sin embargo, a la hora de estudiar eventos puntuales y/o extremos presenta algunas limitaciones. En este sentido los datos diarios aportan mayor detalle y robustez al estudio.

Por otro lado, se requiere información relacionada con el funcionamiento de la cuenca. Es importante contar con datos de infraestructuras, conocer las reglas de operación de estas, así como las asignaciones del recurso y su distribución espacial y temporal. Lo anterior, con el fin de definir un modelo de balance que refleje el escenario de gestión actual del sistema.

Finalmente, los datos de objetivos de desarrollo o alteración futuros en la gestión de la cuenca se tendrán en cuenta para evaluar los distintos escenarios y la posible alteración hidrológica que se pueda llegar a ocasionar en cada uno de ellos.

4.1.2 Modelo conceptual de la gestión

Una vez se cuenta con la información necesaria y se definen los elementos propios de la cuenca y de su gestión, es importante conocer el funcionamiento del sistema de explotación en conjunto con el fin de reproducir las características esenciales del sistema y su respuesta a las diferentes presiones.

El modelo conceptual permite definir el comportamiento del sistema y, por tanto, establecer los parámetros de entrada y de salida, considerando además las restricciones y prioridades del sistema. En este caso particular, los parámetros de entrada se establecen como los recursos y objetivos que se presentan para la cuenca de estudio, mientras que los parámetros de salida se determinan por el grado de cumplimiento de estos objetivos. Este grado de cumplimiento viene dado por los índices de alteración hidrológica.

En resumen, se busca conceptualizar el sistema, teniendo en cuenta cada uno de los elementos, actuales y proyectados, así como la influencia o el impacto que estos tienen sobre el sistema, en relación con su comportamiento en régimen natural.

4.1.3 Calibración del modelo de simulación

Una vez se ha conceptualizado un modelo se debe simular el estado actual del sistema. Para lograrlo, primero se debe calibrar un modelo con datos observados. Esta calibración debe garantizar que la simulación reproduzca lo más fielmente posible las interacciones de los diferentes elementos y la respuesta de la cuenca a cada uno de los procesos, considerando asignaciones e infraestructuras actuales.

Una calibración adecuada se logra cuando al simular el estado actual de la cuenca (o conocido) y comparar los resultados con datos observados o medidos en terreno, se establezca que la simulación representa adecuadamente la realidad del sistema.

4.1.4 Simulación del régimen natural

Con la simulación en régimen natural se busca conocer el comportamiento del sistema previo a las diferentes intervenciones antrópicas. Esta es la base para evaluar cualquier alteración, no solo porque esta información indica el estado más inalterado de la cuenca, sino porque denota la magnitud de los impactos presentes y futuros.

En cuanto a la alteración hidrológica, y el presente estudio en particular, el punto de referencia está dado por los caudales circulantes. Por consiguiente, la simulación en régimen natural busca generar una serie de caudales que representen las condiciones del sistema previas a las diferentes intervenciones.

Para generar estas series de caudales, se pueden utilizar diferentes metodologías dependiendo de las condiciones de la cuenca y los datos disponibles. En caso de contar con masas de agua inalteradas se puede utilizar directamente las series obtenidas de la red de aforos, en caso contrario, se debe hacer una restitución de las series en régimen alterado. Esta restitución es posible realizarla por medio de un balance de aportaciones, detracciones, retornos y derivaciones, aunque estos datos no suelen existir, por lo que tendrían que ser obtenidos indirectamente o por un modelo de flujo a medida. En algunos casos, también será necesario el uso de un modelo hidrológico para extender o completar las series en régimen natural.

Una vez se cuenta con aportaciones en régimen natural a lo largo de toda la cuenca o del sistema, ya se tiene el punto de partida para evaluar la alteración que ha sufrido o puede sufrir esta cuenca o el sistema que se esté analizando.

4.1.5 Simulación de escenarios

Una vez se conoce el comportamiento del sistema en régimen natural y se cuenta con un modelo calibrado, es posible plantear diferentes escenarios de gestión referentes al objetivo del análisis. Dependiendo de estos objetivos, puede ser necesario únicamente el escenario de gestión actual, o un escenario futuro (con los cambios previstos, ya sea en infraestructuras, en asignaciones consuntivas o ambientales, o en reglas de operación).

El escenario actual es el resultado de la calibración del modelo. En este primer escenario se puede determinar el grado de alteración de la cuenca en un instante en el que todas las variables son

conocidas. Este escenario permite establecer un diagnóstico de la cuenca y determinar posibles acciones de mitigación a corto o mediano plazo.

Los escenarios adicionales dependerán de los objetivos de planificación y las proyecciones que se tengan sobre el territorio. En consecuencia, podrán evaluarse escenarios con diferentes horizontes de planificación, tales como escenarios de cambio climático, cambios en la infraestructura, evolución antrópica de las demandas del sistema, entre otros. Por lo tanto, el siguiente paso es la definición de objetivos hacia los que se va a enfocar la evaluación de la alteración hidrológica y las variaciones o tolerancias admisibles en estos objetivos o en los medios a utilizar para alcanzarlos. Es decir, en este punto se deben establecer las diferentes simulaciones que se van a realizar en función de los objetivos de gestión y planificación de la cuenca, como por ejemplo las diferentes asignaciones de caudales ecológicos.

4.1.6 Cálculo de índices de alteración hidrológica

Cada vez es más común el uso de indicadores como herramientas en la toma de decisiones. En el caso particular de los recursos hídricos, los indicadores relacionan múltiples factores para establecer criterios comparativos que permiten definir el estado en el que se encuentran estos recursos.

Por su parte, un índice es una agregación matemática de indicadores y pretende proporcionar información que responda clara y concisamente a las necesidades de la sociedad (de Lama Pedrosa, 2011). Dicho de otra forma, los indicadores procesan variables dando como resultado un conjunto de información compleja. Esta información se simplifica posteriormente en índices.

Para determinar los indicadores de alteración hidrológica existen diferentes metodologías, como se menciona en el apartado 3.2. En el presente trabajo se propone utilizar el método desarrollado por The Nature Conservancy (ver apartado 3.2.2) el cual compara series de caudales en dos periodos de tiempo. Estos periodos están definidos por la alteración antropogénica, es decir que el primer periodo consiste en la serie de caudales en régimen natural, y el segundo en la serie de caudales en régimen alterado.

Con esta metodología se establecen 33 indicadores de alteración hidrológica, los cuales, a su vez, se dividen según su naturaleza, el momento en el que se evalúa, la duración, etcétera.

Sin embargo, para facilitar su análisis se propone evaluar los parámetros en cinco grupos principales, de los cuales el primero y el segundo se dividen en dos subgrupos cada uno, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Agrupación indicadores de alteración hidrológica utilizados

INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA				
PARÁMETROS			ABREVIATURA	GRUPO
Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Invierno	Octubre	IHA1	GRUPO 1
		Noviembre	IHA2	
		Diciembre	IHA3	
		Enero	IHA4	
		Febrero	IHA5	
		Marzo	IHA6	
	Verano	Abril	IHA7	GRUPO 2
		Mayo	IHA8	
		Junio	IHA9	
		Julio	IHA10	
		Agosto	IHA11	
		Septiembre	IHA12	
Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Caudales bajos	1-día mínimo	IHA13	GRUPO 3
		3-días mínimo	IHA14	
		7-días mínimo	IHA15	
		30-días mínimo	IHA16	
		90-días mínimo	IHA17	
		Núm días cero caudal	IHA18	
		Indice caudal base	IHA19	
	Caudales máximos	1-día máximo	IHA20	GRUPO 4
		3-días máximo	IHA21	
		7-días máximo	IHA22	
30-días máximo		IHA23		
90-días máximo		IHA24		

INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA			
PARÁMETROS		ABREVIATURA	GRUPO
Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha de caudal mínimo	IHA25	GRUPO 5
	Fecha de caudal máximo	IHA26	
Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Conteo pulsos bajos	IHA27	GRUPO 6
	Duración pulsos bajo	IHA28	
	Conteo pulsos altos	IHA29	
	Duración pulsos alto	IHA30	
Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasa de subida	IHA31	GRUPO 7
	Tasa de bajada	IHA32	
	Cantidad de inversiones hidrológicas	IHA33	

El cálculo de estos indicadores se realiza con el software IHA7. Este software, por medio de un análisis de rango de variabilidad natural (RVN), define el alcance de las alteraciones a los regímenes de caudales naturales. En términos generales, calcula la mayoría de los indicadores de alteración haciendo una comparación entre el comportamiento de los datos en régimen natural y el de la serie de datos en régimen alterado, tal y como se expresa en la Ecuación 1.

$$IAH = \frac{\text{frecuencia observada} - \text{frecuencia esperada}}{\text{frecuencia esperada}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde la frecuencia observada hace referencia a la frecuencia con la que el parámetro de los años correspondientes al régimen alterado toma valores dentro del RVN y la frecuencia esperada hace referencia a la frecuencia con la que el parámetro de los años correspondientes al régimen natural toma valores dentro del RVN.

En este análisis el indicador será cero cuando la alteración es nula y tomará valores negativos cuando la frecuencia de los valores ha disminuido siendo -1 la alteración máxima. En este caso también es posible encontrarse con valores positivos, que hacen referencia a que los valores dentro del RNV han aumentado (The Nature Conservancy, 2011).

Sin embargo, se considera que un aumento en la frecuencia de los eventos también puede ser una alteración negativa para el ecosistema, ya que puede inducir la presencia de especies invasoras o representar presiones para el ciclo natural de la biota. Por lo tanto y con el fin de visualizar los resultados de los indicadores hidrológicos más claramente, se propone estandarizar los valores obtenidos con el IHA7.

Esta estandarización consiste en limitar los valores a un rango entre 0 y 1, siendo cero la alteración total y uno alteración nula, como se muestra en la Tabla 4. Además, busca mantener el orden de magnitud de los indicadores obtenidos del IHA7.

Tabla 4. Estandarización de los indicadores de alteración hidrológica

CONDICIONAL	ESTANDARIZACIÓN
Si $-1 \leq x \leq 0$	$x + 1$
Si $x > 0$	$1/(1 + x)$

Finalmente, los 33 indicadores se simplifican en cinco índices de alteración hidrológica los cuales se muestran en la Tabla 5. Esta agrupación se ha realizado teniendo en cuenta la relación que existe entre cada uno de los grupos de parámetros y los factores que intervienen en la evaluación. De esta manera, los índices EST_{INV} y EST_{VER} equivalen a los grupos 1 y 2 de los indicadores de alteración hidrológica (Tabla 3) respectivamente. El índice EXT_{MIN} corresponde al grupo 3 incluyendo además la fecha de caudal mínimo incluido en el grupo 5, de la misma forma el índice EXT_{MAX} corresponde al grupo 4 incluyendo además la fecha de caudal máximo. Finalmente, el índice PUL_{INT} equivale a la unión de los grupos 6 y 7.

Tabla 5. índices de alteración hidrológica considerados

ÍNDICES DE ALTERACIÓN	
Nombre	Abreviatura
Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales (invierno)	EST_{INV}
Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales (verano)	EST_{VER}
Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales (caudales bajos)	EXT_{MIN}
Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales máximos (caudales máximos)	EXT_{MAX}
Tasa, frecuencia y duración de los pulsos y los cambios de las condiciones hidrológicas	PUL_{INT}

Para llegar a estos cinco índices se propone hacer una ponderación de los parámetros considerados en cada grupo con la intención de considerar las decisiones que dentro de la gestión de un proyecto se deban tomar por parte de los gestores. De esta forma se asigna un factor de ponderación a cada indicador de alteración hidrológica como se ejemplifica en la Ecuación 2.

$$\text{Índice}_x = \sum_i^n c_i * IHA_i \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde Índice_x es cada uno de los cinco índices considerados, n el número de indicadores contemplados en el índice a evaluar, IHA_i cada uno de los indicadores de alteración hidrológica que se consideran dentro del índice y c_i El factor de ponderación asignado a cada indicador.

Estos factores de ponderación se definirán dependiendo de la importancia que cada parámetro tenga dentro del proyecto a gestionar. El factor será mayor en cuanto mayor sea la importancia de él para la gestión de la cuenca. En cualquier caso, la suma de todos los factores de ponderación debe ser igual a 1.

Finalmente se determina un índice general que agrupa los cinco índices anteriores. Siguiendo la importancia que tiene el proceso de decisión de los gestores a cada uno de los índices se le asigna un factor de ponderación como se muestra en la Ecuación 3. Con esto se asegura que el proceso de toma de decisiones sea lo más acotado a los objetivos de planificación de la cuenca.

$$I_G = K_1 * EST_{INV} + K_2 * EST_{VER} + K_3 * EXT_{MIN} + K_4 * EXT_{MAX} + K_5 * PUL_{INT} \quad \text{Ecuación 3}$$

En esta ecuación I_G es el índice general y K el factor de ponderación de cada uno de los índices obtenidos. La suma de los factores de ponderación debe ser igual a 1, y el valor de cada uno será mayor en cuanto mayor sea la importancia del índice para la evaluación general de la cuenca.

4.1.7 Evaluación de los índices de alteración hidrológica

El objetivo principal de la metodología propuesta es valorar el impacto de las diferentes medidas de gestión sobre el estado general de una cuenca de estudio o un sistema de recursos hídricos en

particular. Por lo tanto, una vez conseguidos los resultados de la alteración hidrológica de la cuenca, se hace evidente la necesidad de una valoración cualitativa que delimite los resultados y haga más simple su interpretación. En el presente trabajo se proponen cuatro rangos de alteración hidrológica, los cuales han sido definidos siguiendo las recomendaciones en cuanto a niveles y asignación de colores de (Demarcación Hidrográfica del Duero, 2018), como se muestra en la Tabla 6

Tabla 6. Rangos propuestos de alteración hidrológica

Estado	rango
Poco alterado	0.8 – 1
Moderadamente alterado	0.5 - 0.8
Alterado	0.3 - 0.5
Muy alterado	0 - 0.3

Si bien se propone una evaluación cualitativa y cuantitativa frente a los resultados de los índices de alteración hidrológica, es el planificador quien debe definir el o los límites de alteración aceptables en función de las características de la cuenca. En este sentido, las medidas de mitigación deben ser evaluadas en concordancia con el estado general de la cuenca y los objetivos planteados.

4.2 APLICACIÓN EN EL CASO DE ESTUDIO

Teniendo en cuenta que España ha sido históricamente un país pionero en la gestión del recurso hídrico en donde existe una importante singularidad con respecto a la distribución de este recurso frente a la demanda, se considera oportuno aplicar la metodología propuesta en una cuenca española. La cuenca seleccionada para este fin es la cuenca del río Órbigo, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Duero.

El río Órbigo, ha sido blanco de atención en diferentes oportunidades gracias al desarrollo de proyectos de restauración y rehabilitación de su cauce y riberas. Uno de los proyectos de mayor importancia fueron las obras de mejora del estado ecológico del río, finalizadas en 2012. Este proyecto ha sido considerado por la *International River Foundation* como uno de los mejores proyectos de restauración fluvial (Iagua, 2013).

Por lo tanto, a continuación, se presenta la aplicación de la metodología propuesta en la cuenca del Río Órbigo.

4.2.1 Recopilación y análisis de la información

En primer lugar, se recopila información referente a las características físicas e hidrológicas de la cuenca que permitan describir fielmente el área de estudio y conocer el comportamiento del sistema. Asimismo, se recoge información referente a la gestión actual, los objetivos de planificación y las estructuras presentes.

Por otra parte, se obtienen datos de aportaciones mensuales y diarios a lo largo de toda la cuenca.

Descripción de la cuenca

La cuenca del río Órbigo forma parte del sistema de explotación Órbigo perteneciente, a su vez, a la demarcación hidrológica del Duero (Figura 2) la cual es una cuenca binacional y la más extensa de la península Ibérica, con un poco más de 98 km². La cuenca del Duero, en la parte española, cuenta con 13 sistemas de explotación, entre los que se encuentra el sistema de explotación del río Órbigo

En términos generales, cada sistema de explotación está compuesto por masas de agua superficiales y subterráneas, infraestructura hidráulica, y reglas de explotación.

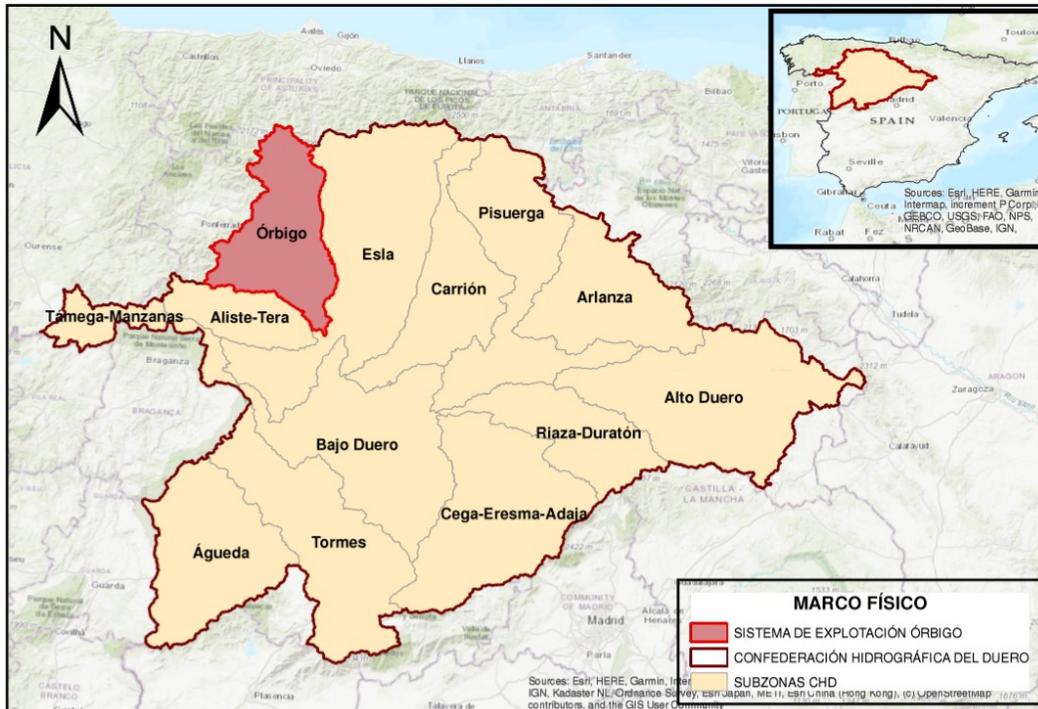


Figura 2. Zonas y subzonas de la demarcación hidrográfica del Duero
 Fuente: Información extraída de Mirame IDEduero (2020), elaboración propia

El sistema de explotación Órbigo comprende la cuenca generada por el río del mismo nombre y abarca una superficie de 4.987 km². En la cabecera del sistema de explotación se encuentran los ríos Omaña y Luna, cuya confluencia da origen al río Órbigo a la altura de la población de Secarejo, el cual fluye de norte a sur por la provincia de León, hasta desembocar en el río Eria.

Los principales tributarios del Órbigo son los ríos Tuerto, Jamuz y Eria, que finalmente desembocan en el río Esla (Confederación hidrográfica del Duero, 2015), que a su vez es tributario del Duero.

La cuenca del Órbigo cuenta con un gran número de masas de agua, dentro de las que destacan 26 corrientes de agua permanentes, de las cuales algunas de ellas se muestran en la Figura 3. Dentro de ellas se identifican los ríos principales de Duerna, Eria, Luna, Omañas, Órbigo y Tuerto, los cuales se describen brevemente en la Tabla 7.

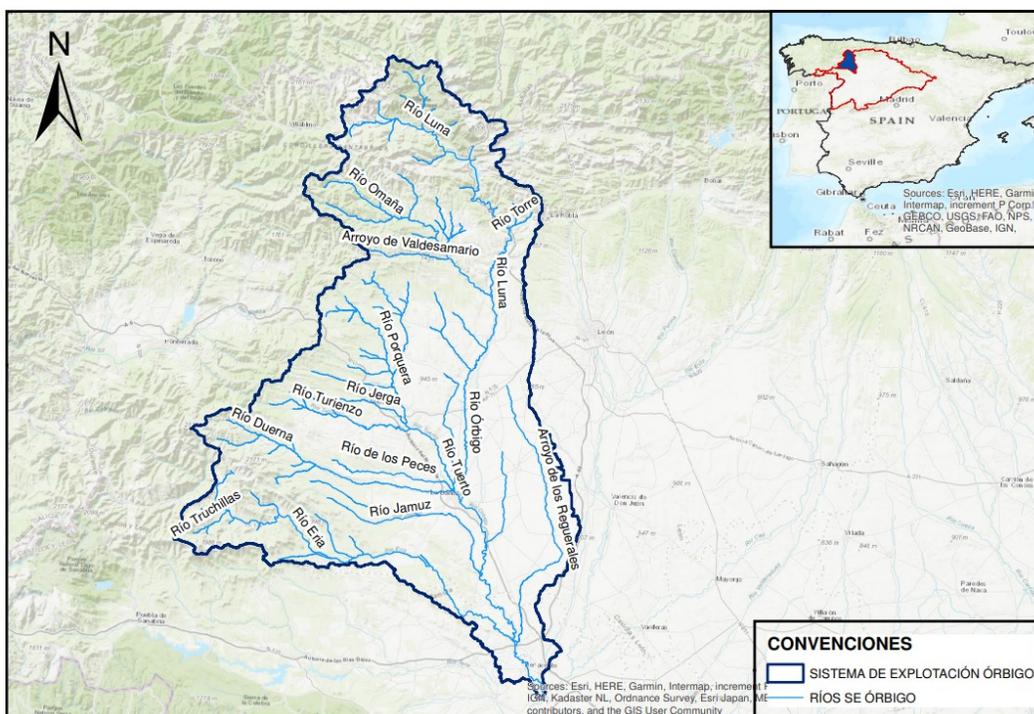


Figura 3. Ríos en el sistema de explotación Órbigo
Fuente: Información extraída de Mirame IDEduero (2020), elaboración propia

Tabla 7. Descripción de las corrientes principales de la cuenca del río Órbigo (Serie larga 41-06)

RÍO	LONGITUD (km)	CUENCA (km ²)	APORTACIÓN MEDIA (hm ³ /año)
DUERNA	59,90	298	95,41
ERIA	101,54	657	197,30
LUNA	76,82	740	497,91
OMAÑAS	52,10	513	348,19
ÓRBIGO	108,20	4986	1576,06
TUERTO	61,65	1443	228,12

Fuente: Información extraída de Confederación hidrográfica del Duero (2015), elaboración propia

Como se evidencia en la tabla anterior, el río Luna es el mayor tributario del río Órbigo, seguido por el río Omañas y el Tuerto. Este último presenta la subcuenca de mayor superficie y una aportación media anual de 228 hm³ al año.

Por otro lado, la cuenca del río Órbigo cuenta con un gran número de masas de agua subterránea que se encuentran en los acuíferos presentes en la zona. Estos acuíferos se presentan en la Figura 4.

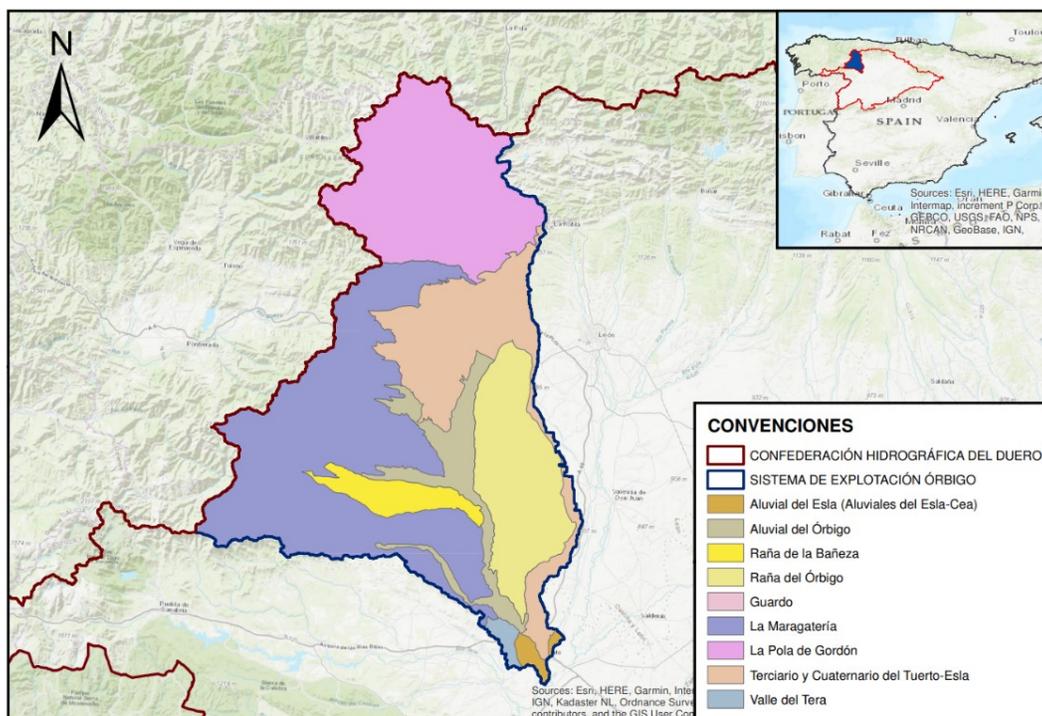


Figura 4. Acuíferos pertenecientes a la cuenca del río Órbigo
Fuente: Información extraída de Mirame IDEDuero (2020), elaboración propia

Una de las masas de agua subterránea de mayor relevancia dentro del sistema de explotación es el acuífero La Maragatería, ubicado en la zona occidental de la cuenca. Su importancia no solo radica en su gran extensión, sino en que gran parte de la población de la zona se abastece de sus aguas.

La regulación y planificación de las demandas y abastecimientos de agua dependen en gran medida de la gestión de las masas de agua disponibles en el territorio y de la planificación hidrológica de la cuenca.

Planificación hidrológica en la cuenca del Órbigo

La planificación hidrológica en la cuenca del Órbigo es llevada a cabo por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD). Esta entidad es la encargada de establecer criterios que permitan alcanzar el buen estado ecológicos de las masas de agua. Para esto, no solo evalúan las demandas de las poblaciones y los regadíos, sino las necesidades del ecosistema. En este sentido, se destaca la gestión referente a los caudales ecológicos en la cuenca.

Actualmente se han establecido, por métodos hidrológicos, caudales ecológicos mínimos en 31 tramos pertenecientes al sistema de explotación Órbigo con el fin de garantizar la conservación de las masas y la continuidad del flujo.

Adicionalmente, en 5 masas de agua que son de gran importancia para el sistema se han realizado simulaciones hidrobiológicas con el fin de establecer un régimen de caudales que garantice el buen estado ecológico de los ecosistemas asociados, teniendo en cuenta las necesidades de hábitat de las especies más representativas. Entre estas masas se encuentran los embalses Barrios de Luna y Villameca.

En la Figura 5 se muestran todos los tramos pertenecientes al sistema de explotación Órbigo, para los que, dentro del plan hidrológico, se han considerado caudales ecológicos.

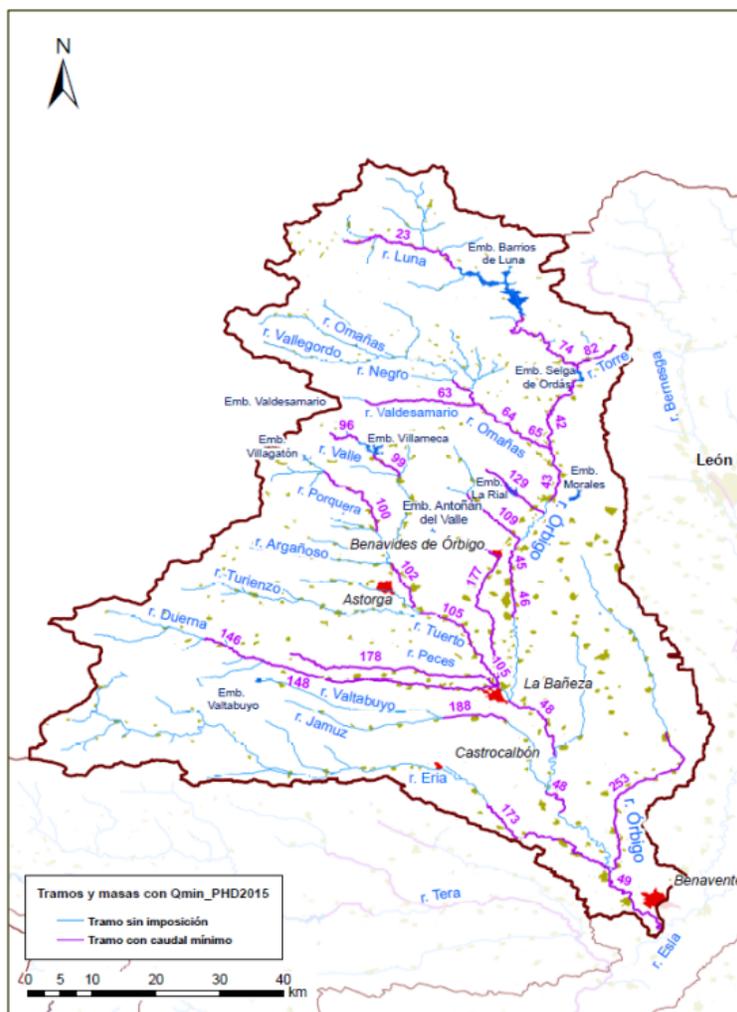


Figura 5. Tramos de río en los que se ha considerado caudal ecológico dentro de la cuenca del río Órbigo Fuente: Confederación hidrográfica del Duero (2015)

Adicionalmente se establecen las demandas, los usos, las diferentes restricciones que atañen a cada masa de agua, y además se evalúa el estado ecológico de cada una con el fin de garantizar el buen funcionamiento y calidad de los ecosistemas que dependen de estas fuentes de agua.

La clasificación de cada masa de agua según su estado ecológico (máximo, muy bueno, bueno, moderado y deficiente) es determinada, según corresponda, por indicadores biológicos, fisicoquímicos o hidromorfológicos (Confederación hidrográfica del Duero, 2015). En estos últimos se pueden destacar los índices de alteración hidrológica, en los que se enfoca el presente documento.

En la cuenca del río Órbigo se ha determinado que la mayoría de las masas de agua superficial cuentan con un estado ecológico entre máximo y bueno. Sin embargo, los tramos finales del Arroyo los Reguerales y del río Órbigo presentan un estado ecológico deficiente, tal como se muestra en la Figura 6.

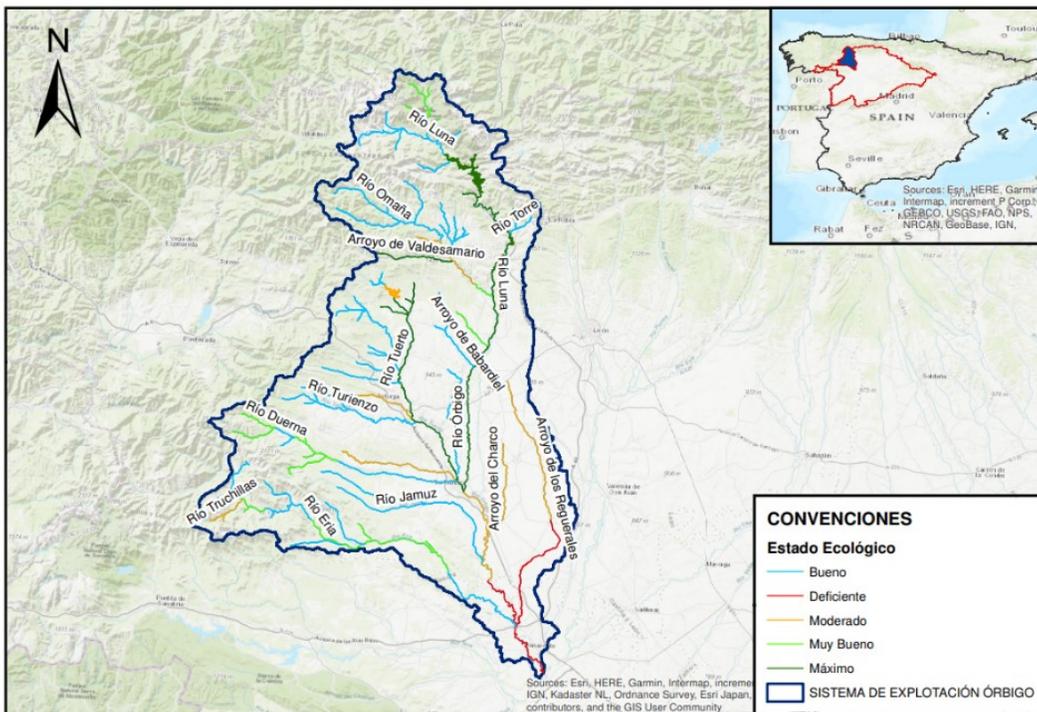


Figura 6. Estado ecológico de las masas de agua superficial pertenecientes a la cuenca del río Órbigo
Fuente: Información extraída de Mirame IDEduero (2020), elaboración propia

Caracterización hidrológica

Por otra parte, hacer una caracterización hidrológica del área de estudio permite entender su funcionamiento, las limitaciones y ventajas que presenta frente a la gestión del recurso.

En primera instancia se evalúa la precipitación. La cuenca del Órbigo presenta un valor de precipitación promedio de 63 mm/mes. Durante los meses de octubre a mayo las precipitaciones se encuentran por encima del promedio, siendo los meses con mayores precipitaciones noviembre y diciembre. Por otro lado, los meses entre julio y septiembre presentan precipitaciones bajas, siendo los valores mínimos en julio y agosto tal como se muestra en la Figura 7.

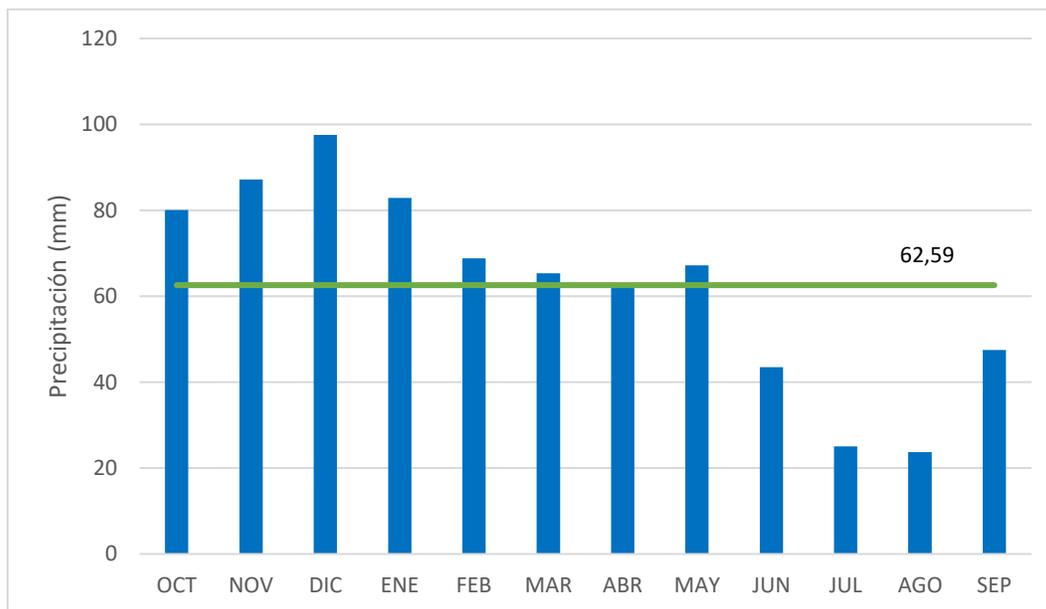


Figura 7. Régimen de precipitación media mensual

Sin embargo, la cuenca en estudio se caracteriza por tener una importante diferencia en la distribución espacial de las precipitaciones. La parte alta de la cuenca presenta una alta pluviosidad anual, la cual alcanza los 1400 mm/año, mientras que la parte baja de la cuenca presenta valores cercanos a los 400 mm/año (Confederación hidrográfica del Duero, 2015), tal como muestra la Figura 8.

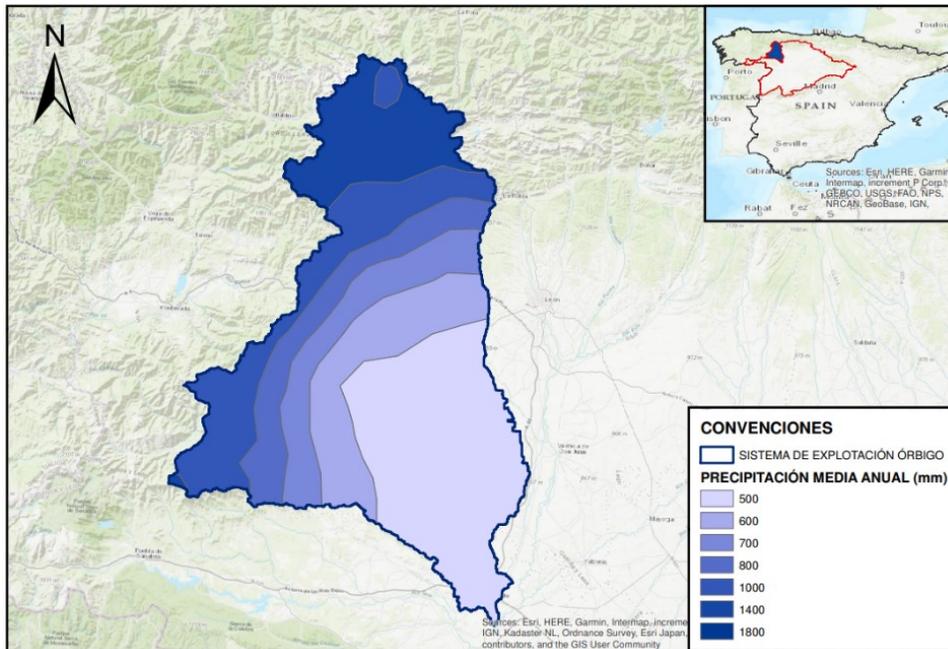


Figura 8. Régimen de precipitaciones anuales en la cuenca del Órbigo
Fuente: Información extraída de Mirame IDEduero (2020), elaboración propia

En cuanto a la distribución de la temperatura, según la información de la Confederación hidrográfica del Duero (2015) las zonas más frías de la cuenca del río Órbigo corresponden al borde norte, en donde la temperatura media anual es de 7°C, mientras que la temperatura media anual en la zona sur alcanza los 12,5°C (Ver Figura 9).

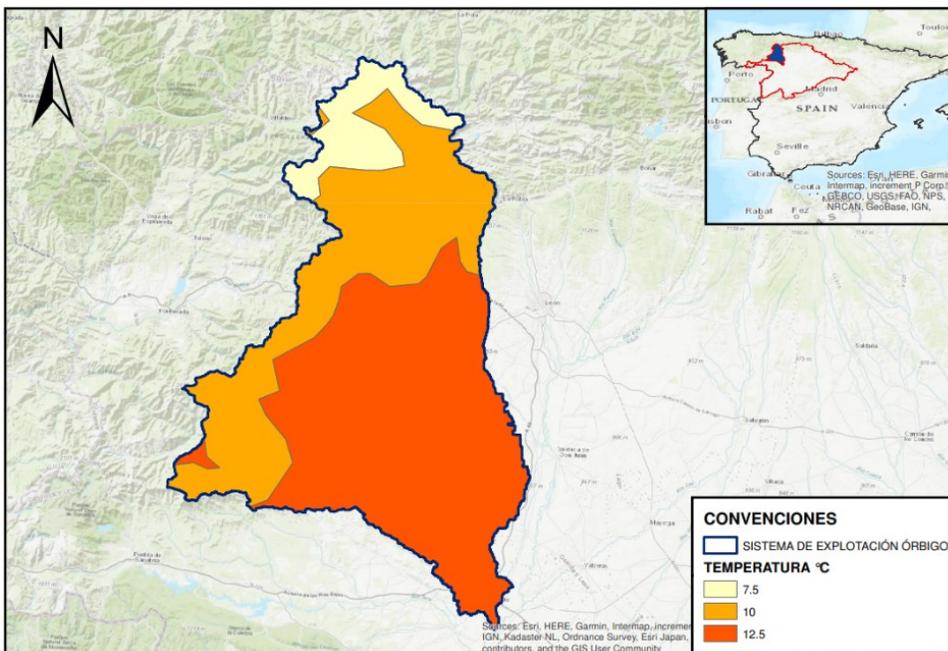


Figura 9. Temperatura media anual en la cuenca del Órbigo
Fuente: Información extraída de Mirame IDEduero (2020), elaboración propia

Por otro lado, a lo largo del año hidrológico se pueden presentar variaciones de 15°C entre el mes más frío y el mes con mayor temperatura. Al respecto, se evidencia que los meses de diciembre a febrero presentan las temperaturas más bajas, mientras que los meses de junio a septiembre presentan temperaturas por encima de los 14°C, siendo octubre, noviembre, marzo, abril y mayo meses de transición con temperaturas media mensuales variables entre los cinco y los doce grados Celsius.

Para visualizar este comportamiento, se presenta en la Figura 10 la variación media de la temperatura en la cuenca del río Órbigo, presentando tanto los valores medios, como los máximos y mínimos a escala mensual.

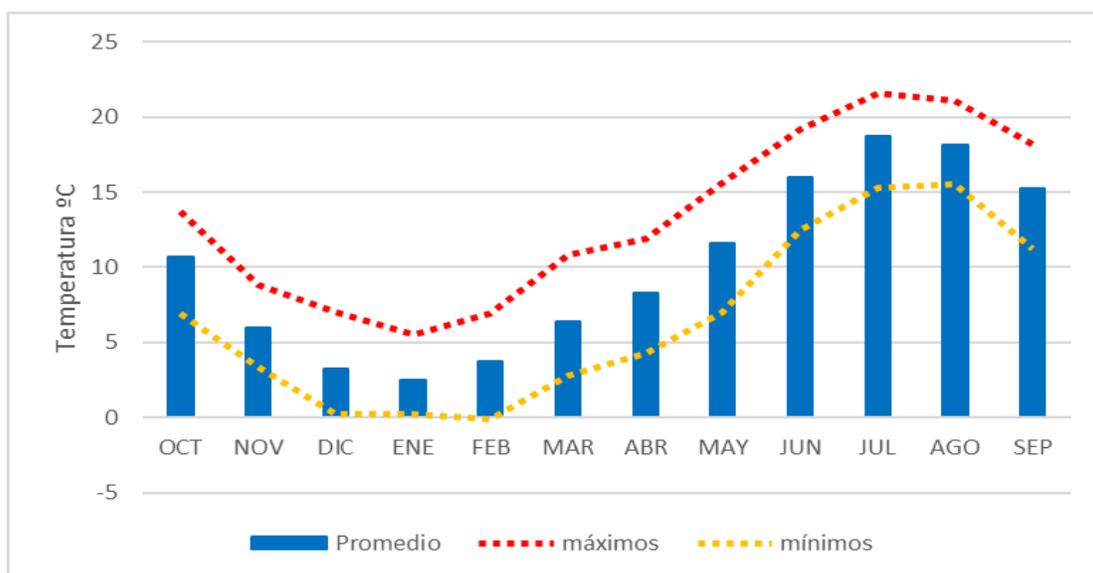


Figura 10. Temperatura media mensual en la cuenca del Órbigo

En esta gráfica se puede observar que la diferencia entre los valores medios mensuales máximo y mínimos es aproximadamente constante con un valor promedio de 5°C a lo largo de todos los meses. Adicionalmente, en la cuenca se alcanzan temperaturas medias máximas de 22°C en julio y mínimas cercanas a los 0°C en enero.

Paralelamente, en la cuenca del Órbigo la evapotranspiración potencial presenta, en promedio, valores mínimos de 13 mm en diciembre y valores máximos de 129 mm en julio. Por otro lado, la evapotranspiración real tiene un comportamiento similar en los meses de invierno, con valores mínimos promedio de 14 mm en el mes de enero. Sin embargo, los valores en verano se

encuentran por debajo de la evapotranspiración potencial, alcanzando valores de 73 mm en mayo (Figura 11).

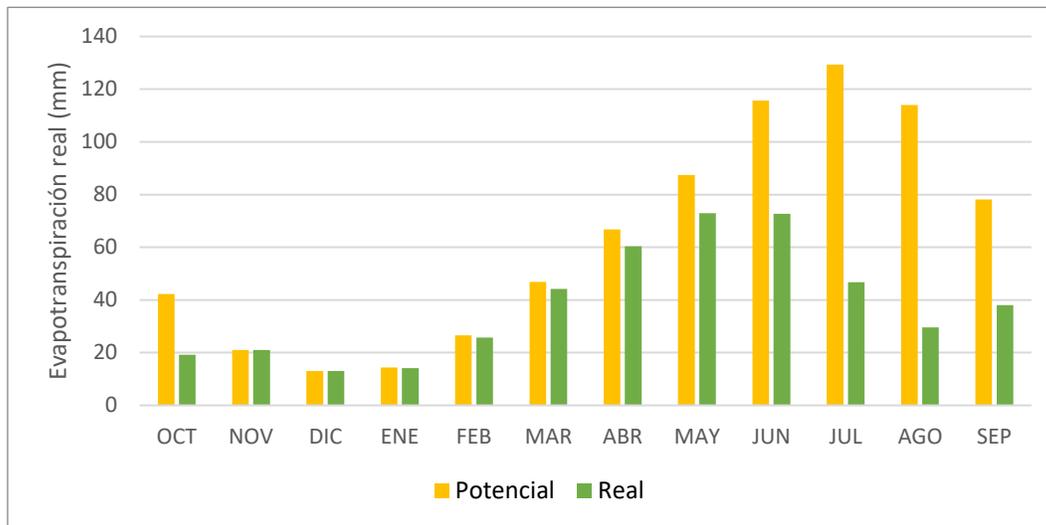


Figura 11. Evapotranspiración media mensual en la cuenca del río Órbigo

En la gráfica anterior es evidente como en los meses más secos la diferencia entre la evapotranspiración potencial y real es mayor, lo cual se explica por la ausencia de agua en el suelo.

Datos de aportaciones

Los datos de aportaciones mensuales utilizados provienen de la Confederación Hidrográfica del Duero y están enmarcados dentro del inventario de recursos del tercer ciclo de planificación hidrológica de la cuenca del Duero.

Adicionalmente, se emplean para el análisis series diarias de aportaciones del periodo 1950-2015, las cuales se enmarcan en el trabajo de Fermac Ingenieros consultores (2017).

4.2.2 Modelo conceptual de la gestión del sistema

En este apartado se conceptualizan las características esenciales del sistema con el fin de conocer la respuesta de la cuenca a cualquier medida de planificación actual o proyectada.

Una vez realizada la caracterización física e hidrológica de la cuenca del río Órbigo, el siguiente paso es definir los aspectos principales de la gestión de esta.

Aportaciones

El sistema de explotación Órbigo es un sistema aislado, es decir que no recibe aportaciones de otros sistemas. En consecuencia, el balance hídrico está determinado únicamente por los recursos generados en cada una de las subcuencas pertenecientes a este sistema.

Infraestructura

El sistema de explotación Órbigo cuenta con infraestructura de gestión hídrica que permite regular y garantizar el suministro y abastecimiento de las diferentes demandas, incluyendo las demandas propias de los ecosistemas asociados a la cuenca hidrográfica.

Por un lado, destaca el canal que permite el trasvase de agua entre el embalse de Valdesamario y el de Villameca, con una capacidad máxima promedio de 2.77 hm³ al mes y una longitud aproximada de 900 metros. Esta canalización fue construida hacia 1935 e inaugurada en 1946 con el fin de disminuir las áreas de secano y ampliar la zona regable de La Cepeda y ha sido utilizada hasta la actualidad.

Por otro lado, se encuentra la canalización que conecta el embalse Selga de Ordás con el río Órbigo con una capacidad de 77.77 hm³ al mes. Esta es utilizada para generación de energía y para abastecimiento de algunas demandas agrícolas y urbanas de la zona.

Adicionalmente, en la cuenca se encuentran siete embalses en operación (ver Figura 12), entre estos destaca Barrios de Luna por su gran capacidad y su importancia dentro del sistema de explotación. Este está ubicado en la cabecera del río Luna y cuenta con una capacidad de 308 hm³. Otro de los embalses de regulación de importancia en la cuenca es Villameca, que se encuentra en la cabecera del río Tuerto y cuenta con una capacidad de 20 hm³.

Por otro lado, Valdesamario y Selga de Ordás son nudos de derivación y su capacidad de almacenamiento es poco representativa. El primero sirve para el trasvase de recurso a Villameca, y del segundo nace el Canal principal del Órbigo. En cuanto a Valtabuyo, Antoñán del Valle y Villagatón tienen un efecto regulador local, ya que se encuentran en ríos que contribuyen al regadío de pequeñas comunidades de regantes (Confederación hidrográfica del Duero, 2015).

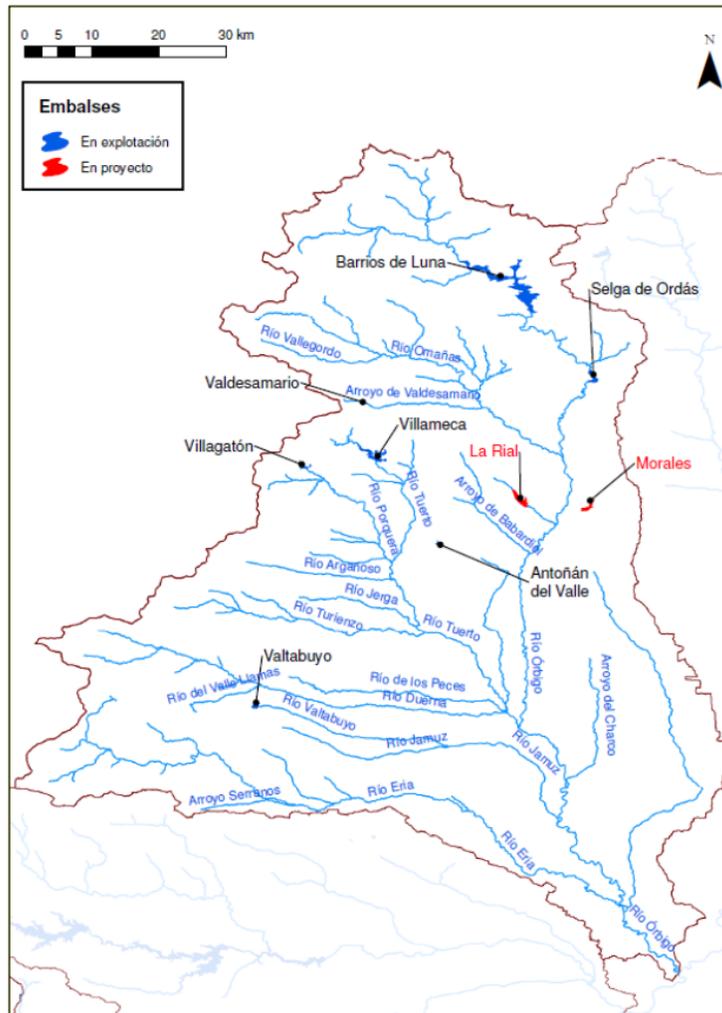


Figura 12. Embalses pertenecientes a la cuenca del río Órbigo
Fuente: Confederación hidrográfica del Duero (2015)

En la Tabla 8 se especifica cada uno de los usos de los embalses presentes en la cuenca del Órbigo.

Tabla 8. Embalses de la cuenca del río Órbigo y su uso

EMBALSE	USOS
Antoñán del Valle	Regadío
Barrios de Luna	Navegación
	Control de avenidas
	Abastecimiento
	Energético
	Regadío
	Industrial
Selga de Ordás	Derivación
	Industrial
	Abastecimiento
	Energético

EMBALSE	USOS
	Regadío
Valdesamario	Ambiental
	Navegación
	Regadío
	Trasvase
Valtabuyo	Regadío
Villagatón	Regadío
Villameca	Industrial
	Navegación
	Control de avenidas
	Control de aforos
	Regadío
	Energético

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de Confederación hidrográfica del Duero (2015)

Por otro lado, cada embalse de cabecera (Barrios de Luna, Villameca, Villagatón, Valdesamario, Valtabuyo y Antoñán del Valle) define una subcuenca independiente. De esta forma, cada infraestructura regula los recursos que se generan en el interior de su subcuenca, facilitando la asignación de recursos (Confederación hidrográfica del Duero, 2015).

Adicionalmente, el sistema cuenta con dos piscifactorías y nueve centrales hidroeléctricas que abarcan una producción media anual de 156 GWh (Confederación hidrográfica del Duero, 2015).

Demandas

En términos generales, el sistema de explotación Órbigo suministra agua para el regadío de 68.400 ha, dos piscifactorías y el abastecimiento de 140.000 habitantes, además de las demandas producidas por la industria.

Para el presente trabajo se han tomado como referencia los valores de demandas establecidos por Haro Monteagudo (2014). Los valores de demanda utilizados en el modelo de gestión se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen demandas utilizadas

DATOS EN hm ³ /AÑO	
Demanda Industrial	1.674
Demanda Agraria	614.410
Demanda Urbana	29.987
Demanda Acuícola	12.140

Caudales ecológicos y puntos de interés

En cuanto a los caudales ecológicos, el modelo considera caudales mínimos mensuales en siete de las corrientes modeladas. Los valores asignados a cada corriente y mes vienen dados por el modelo desarrollado por Haro Monteagudo (2014), los cuales corresponden a los estipulados por la Confederación Hidrográfica del Duero y se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores de caudales mínimos mensuales considerados en el modelo

MESES	CAUDALES MÍNIMOS EN hm ³ /MES						
	Luna 74_a	Luna 42_b	Valdesamario 63	Tuerto 99_a	Tuerto 105	Órbigo 48_a	Órbigo 47_c
Octubre	1.385	3.098	0.089	0.289	2.791	9.910	3.098
Noviembre	1.674	3.627	0.101	0.280	2.701	10.446	3.627
Diciembre	2.228	4.867	0.133	0.347	3.254	13.687	4.867
Enero	2.686	5.538	0.144	0.318	3.073	14.651	5.538
Febrero	2.214	4.875	0.136	0.345	3.048	12.870	4.875
Marzo	2.743	5.849	0.158	0.361	3.464	16.553	5.849
Abril	2.867	5.971	0.165	0.379	3.629	15.708	5.971
Mayo	2.328	5.091	0.144	0.354	3.453	14.490	5.091
Junio	1.340	2.998	0.086	0.280	2.701	9.590	2.998
Julio	1.385	3.098	0.089	0.289	2.791	9.910	3.098
Agosto	1.385	3.098	0.089	0.290	2.791	9.910	3.098
Septiembre	1.340	2.998	0.086	0.280	2.701	9.590	2.998

Teniendo en cuenta la información disponible, los objetivos del presente trabajo y la configuración del modelo, se seleccionaron cuatro corrientes con características particulares a lo largo de todo el sistema como puntos de control y de evaluación de la metodología propuesta. Estas corrientes, de forma general, se consideran representativas de la cuenca, tal como se observa en la Figura 13.

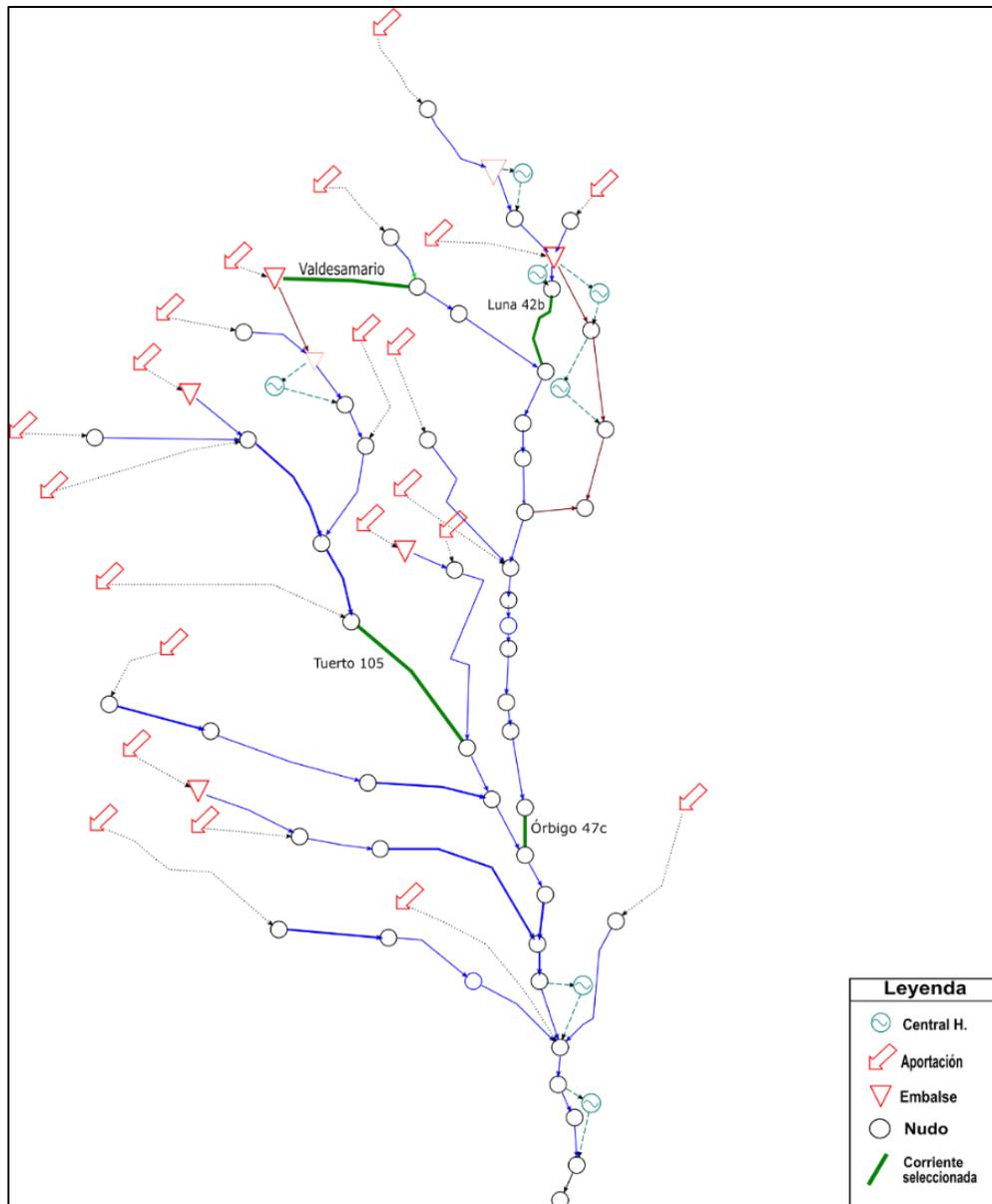


Figura 13. Puntos de control seleccionados para el análisis

Por un lado, Luna 42_b se encuentra en la parte alta de la cuenca, pero aproximadamente 40 km aguas abajo del embalse más importante del sistema y muy cerca de dos centrales hidroeléctricas. Esto propicia que el régimen de caudales que se presenta esté fuertemente regulado.

Por otro lado, la corriente Valdesamario 63 se ubica en la cuenca alta y justo aguas abajo del embalse Villameca, que es el segundo embalse más importante del sistema. Por lo tanto, se considera esta corriente como representativa de la influencia del embalse en cabecera de cuenca, y de cómo su impacto se puede alterar con la implementación de un régimen de caudales. Por su

parte, Tuerto 105 está ubicada en la cuenca media y todos sus afluentes se encuentran regulados. Finalmente, Órbigo 47_c representa la cuenca media-baja del sistema de explotación Órbigo. Sin embargo, a diferencia de Tuerto 105, algunos de sus afluentes cuentan con aportaciones por margen derecha que no están reguladas por estructuras. Esto permite conocer si estas aportaciones tienen alguna influencia importante sobre los indicadores de alteración hidrológica.

Con el análisis de estas cuatro corrientes se buscó evaluar la capacidad de recuperación del sistema frente a las alteraciones presentes en la cuenca y la eficacia de las medidas consideradas para mitigar el impacto.

Objetivos de planificación

En cuanto a los principales objetivos de planificación, la Confederación Hidrográfica del Duero busca establecer criterios que permitan *“alcanzar el buen estado ecológicos de las masas de agua y prevenir el deterioro adicional de las mismas”* (Confederación Hidrográfica del Duero, 2020).

En relación a este objetivo particular, se evalúan diferentes condiciones de caudal ecológico para conocer el efecto que estas variaciones puedan tener sobre los indicadores de alteración hidrológica, y por tanto, sobre el estado ecológico de las masas de agua.

4.2.3 Calibración del modelo de simulación

Para este trabajo se tomó como referencia el modelo realizado por Haro Monteagudo (2014). Este modelo, a su vez, fue una extracción actualizada del modelo utilizado y calibrado por la Confederación Hidrográfica del Duero para el Plan Hidrológico 2009. Teniendo en cuenta el origen del modelo, se considera que la calibración ya realizada al modelo actualizado es suficiente para los objetivos que se persiguen en este estudio.

Sin embargo, el modelo de la cuenca del Órbigo se calibró con datos mensuales observados. Por lo tanto, y teniendo en cuenta la metodología planteada, se utilizan series diarias para ampliar el alcance de la modelación. Para lograrlo, se trabajó con una extensión de AQUATOOL+ que permite replicar los cálculos de módulos de simulación y optimización de la gestión de cuencas, bajando la escala de tiempo de paso mensual a intervalos inferiores y garantizando una buena calidad de los resultados reescalados.

Por otro lado, este modelo incluye los elementos de gestión más importantes y representativos del sistema de explotación, así como las interacciones existentes entre ellos (Ver Anejo 1). En la Figura 14 se presenta un esquema en planta del modelo de AQUATOOL+ y los elementos considerados.

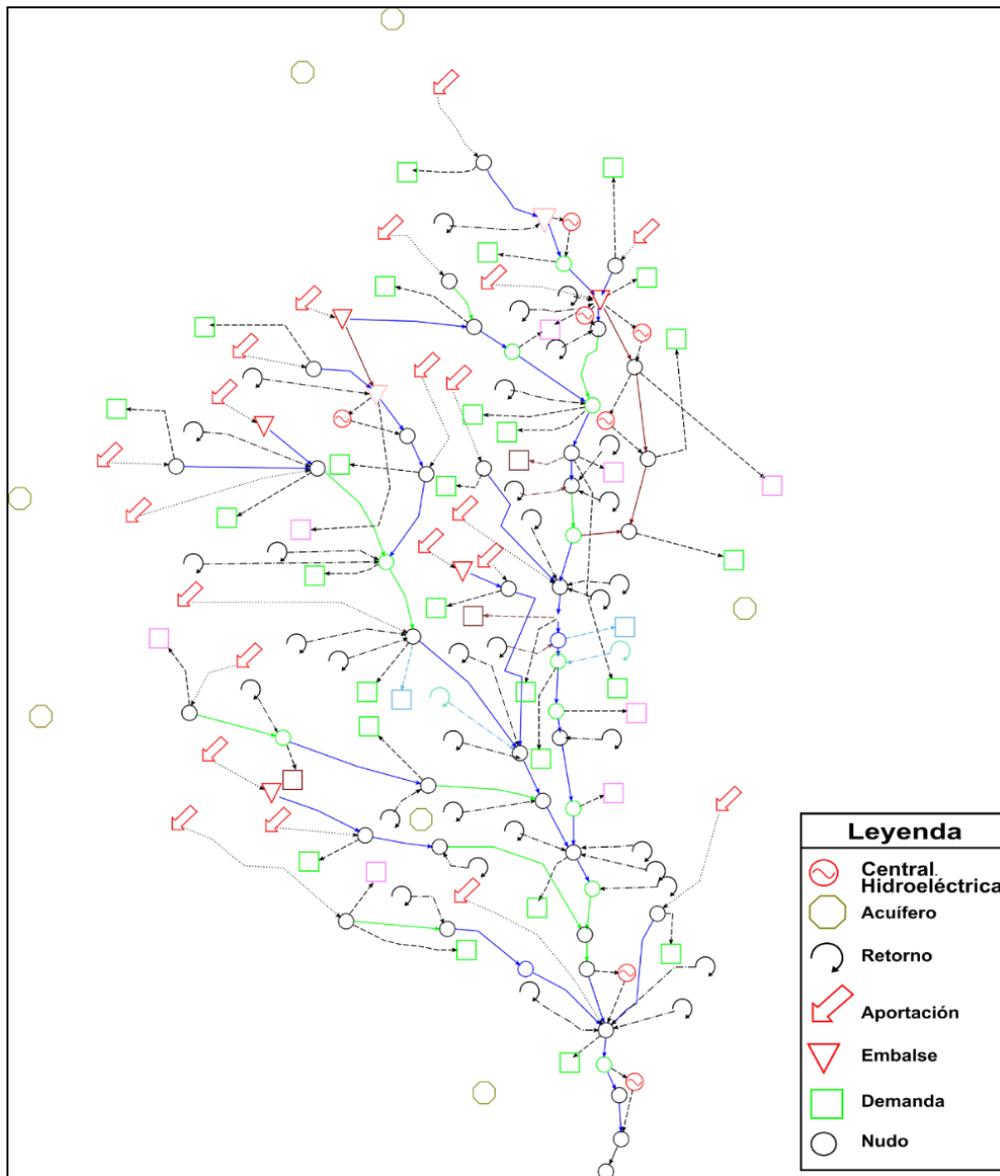


Figura 14. Esquema de modelación cuenca del río Órbigo

Como se puede observar en la figura, el modelo representa, además de las aportaciones y las diferentes corrientes del sistema, las demandas (urbana, industrial, piscícola y agrícola), los embalses presentes en la cuenca y las centrales hidroeléctricas. También se consideran los retornos de las demandas al sistema y la interacción con las aguas subterráneas.

4.2.4 Simulación del régimen natural

Para realizar la simulación del régimen natural existen diferentes metodologías (ver apartado 4.1.4). Teniendo en cuenta que el modelo de simulación ha sido desarrollado en AQUATOOL+, se considera óptima la simulación del régimen natural utilizando el modelo de gestión ya calibrado. Esto considerando la flexibilidad de la herramienta y las facilidades que conlleva a la hora de comparar los datos de simulación.

Para realizar la simulación del régimen natural se suprimen, en el modelo de simulación de la gestión del sistema, todos los elementos que representen algún tipo de regulación o alteración en la cuenca. Esto implica anular las estructuras de regulación, incluyendo las reglas de operación y los valores de volúmenes iniciales. Adicionalmente, se anulan las conducciones artificiales, las tomas de demandas y los bombeos modelados. De esta forma se obtienen caudales diarios en régimen natural para cada una de las corrientes consideradas en el modelo.

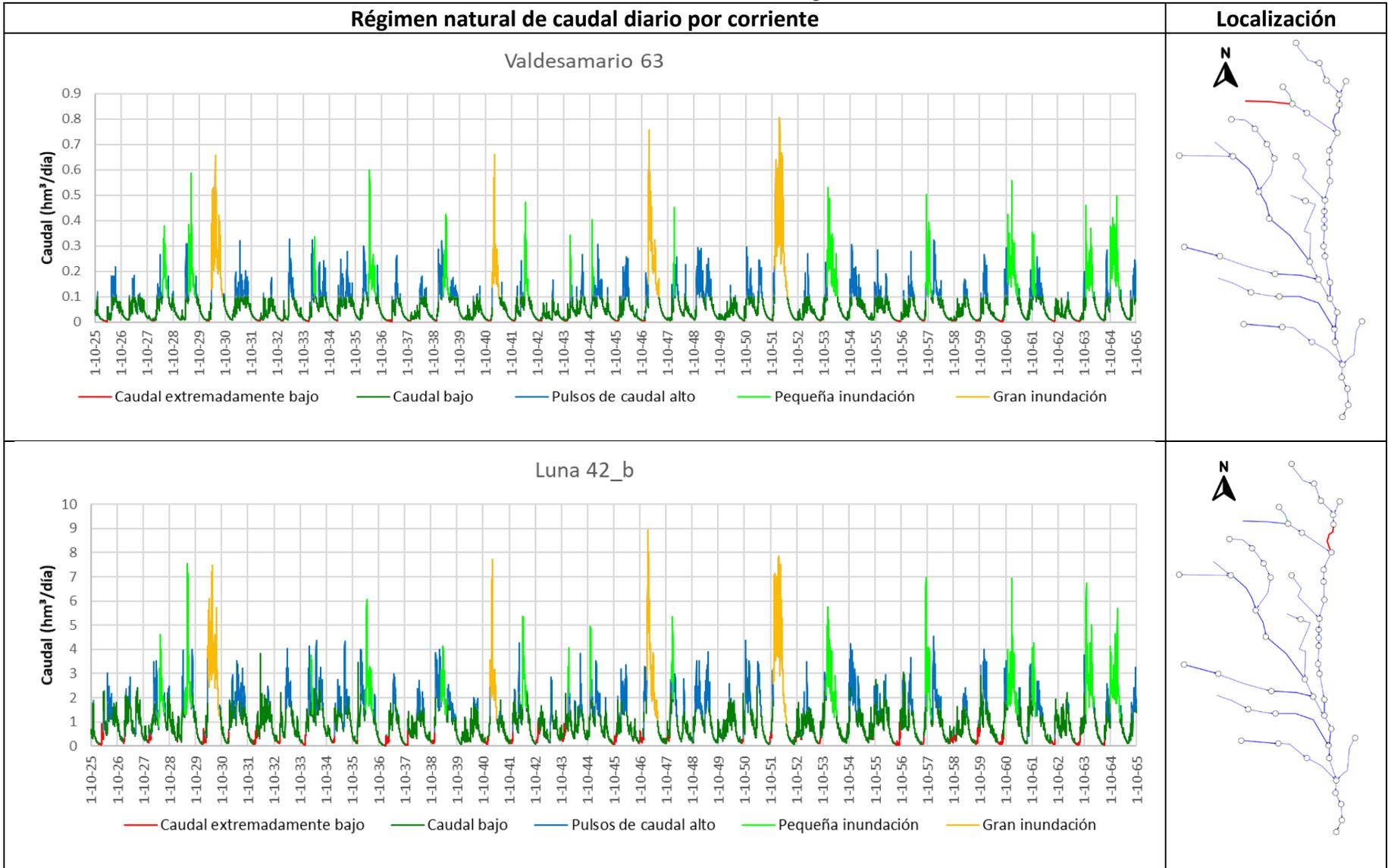
Esta simulación no solo permite caracterizar el posible comportamiento de la cuenca anterior a las intervenciones antrópicas, sino que establece la temporalidad y la magnitud de los diferentes componentes del caudal que se deben tener en cuenta en la planificación hidrológica.

En la Tabla 11 se muestran algunos de los resultados obtenidos en los puntos seleccionados como representativos de la cuenca. En esta se puede observar que las grandes inundaciones tienen una recurrencia de entre cinco y diez años, mientras que las pequeñas inundaciones presentan una recurrencia mucho menor, de 3 años en promedio.

También es posible visualizar que las tasas de cambio de caudal diario en el río Tuerto son bastante amplias, mientras que las máximas diferencias de caudales diarios sucesivos en corrientes como el río Órbigo son menos pronunciadas.

Además, se evidencia un comportamiento similar entre las corrientes ubicadas en la parte alta de la cuenca (Valdesamario y Luna), en donde los eventos extremos presentan una temporalidad similar. Por otro lado, el río Órbigo y el río Tuerto, localizados en la cuenca media baja, presentan eventos extremos más espaciados temporalmente, pero bastante más pronunciados. Esto se evidencia especialmente en los eventos de crecidas del río Tuerto.

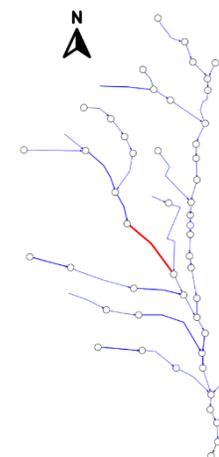
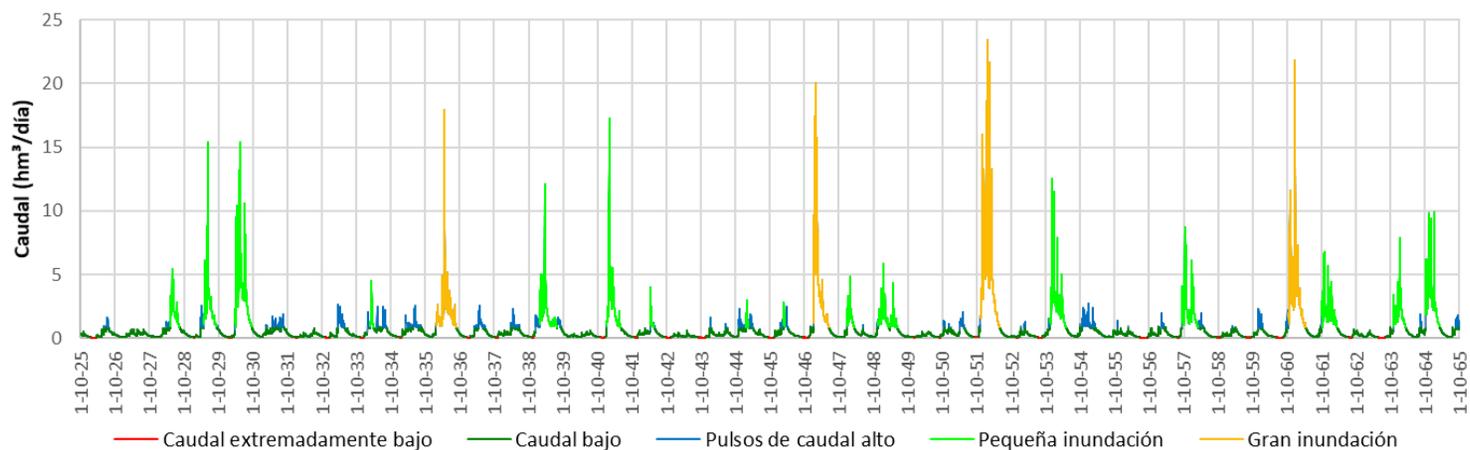
Tabla 11. Series de caudales diarios en régimen natural



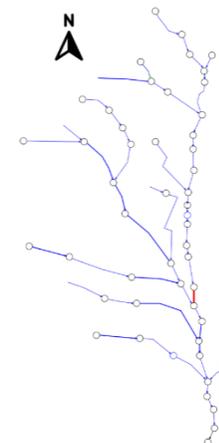
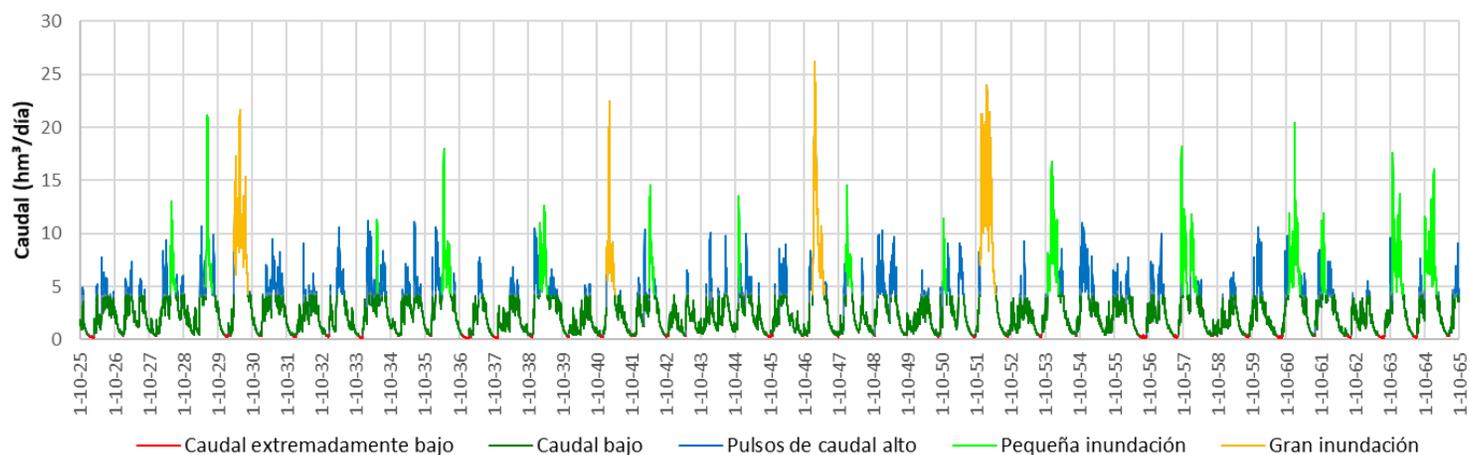
Régimen natural de caudal diario por corriente

Localización

Tuero 105



Órbigo 47_c



4.2.5 Simulación de escenarios

Para los escenarios de simulación se busca, en primer lugar, establecer un diagnóstico de la cuenca en la situación de gestión actual. En segundo lugar, se realizan simulaciones de escenarios que permitan un acercamiento al efecto del régimen de caudales ecológicos sobre los indicadores de alteración hidrológica.

Se consideraron, por tanto, dos escenarios de simulación adicionales al escenario actual:

- El primer escenario adicional reproduce el funcionamiento de la cuenca bajo condiciones extremas donde no estuviese definido ningún caudal ecológico para las corrientes del sistema
- El segundo escenario reproduce el que sería el funcionamiento de la cuenca con los caudales ecológicos proyectados para el plan hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero para 2022.

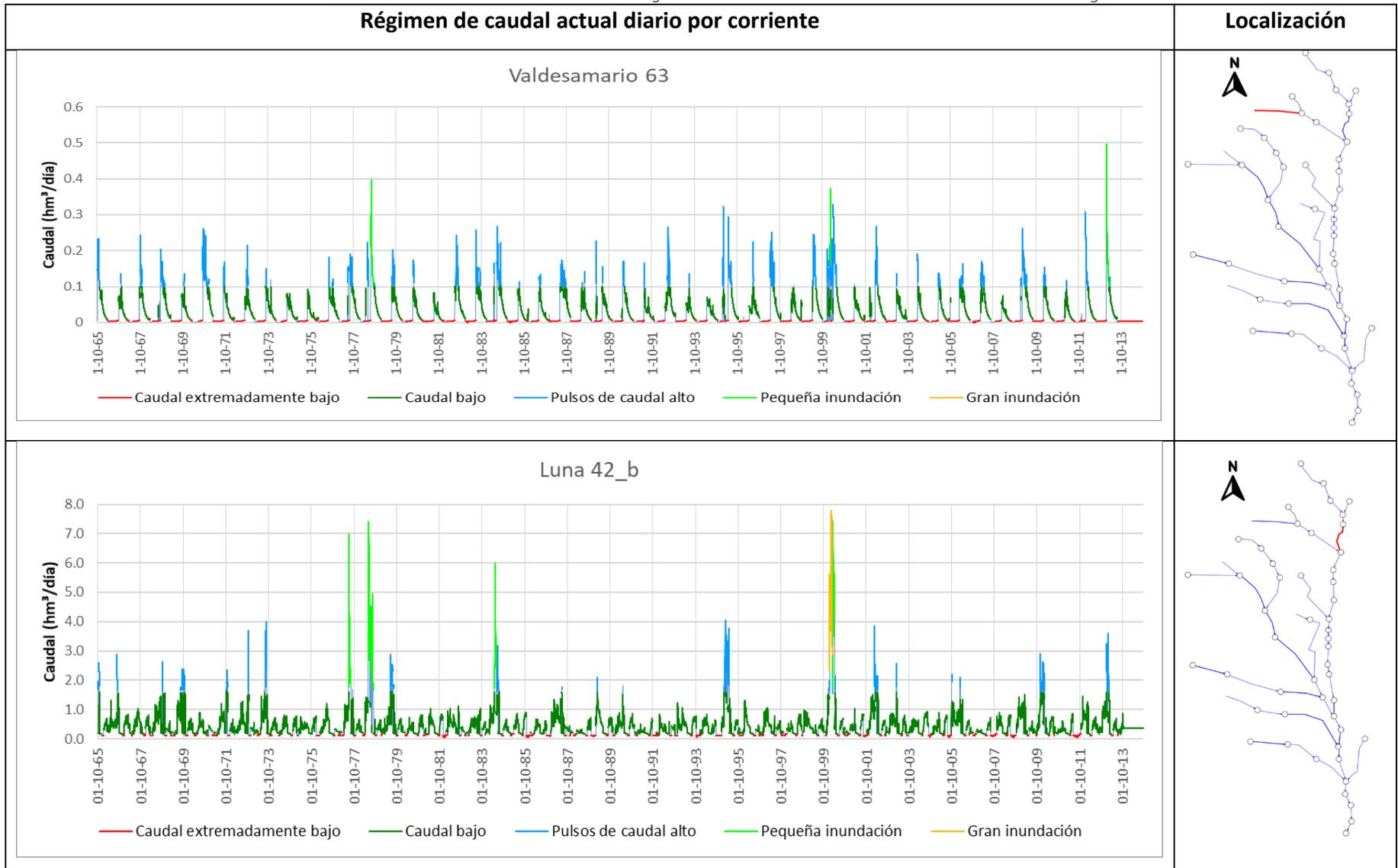
Escenario actual

Este escenario busca conocer el estado en el que se encuentra el sistema de explotación Órbigo con el fin de conocer su comportamiento y su relación con el régimen natural, e identificar las principales alteraciones que se presentan.

El modelo del escenario actual, que corresponde con el modelo calibrado (ver apartado 4.2.3) incluye la infraestructura de gestión vigente y las diferentes demandas que se presentan a lo largo de la cuenca. Con esta información es posible hacer un diagnóstico general de la influencia de la actividad humana sobre la cuenca y cómo esta ha modificado el régimen de caudales.

En la Tabla 12 se presentan las series de caudales obtenidas en la simulación del escenario actual. En cada una de las gráficas se muestra el comportamiento de los caudales a nivel diario de las diferentes corrientes evaluadas a lo largo de la cuenca del río Órbigo. Adicionalmente se diferencian por colores cada uno de los componentes del régimen de caudal.

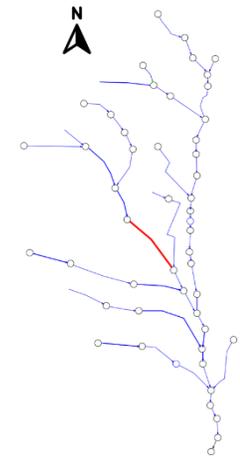
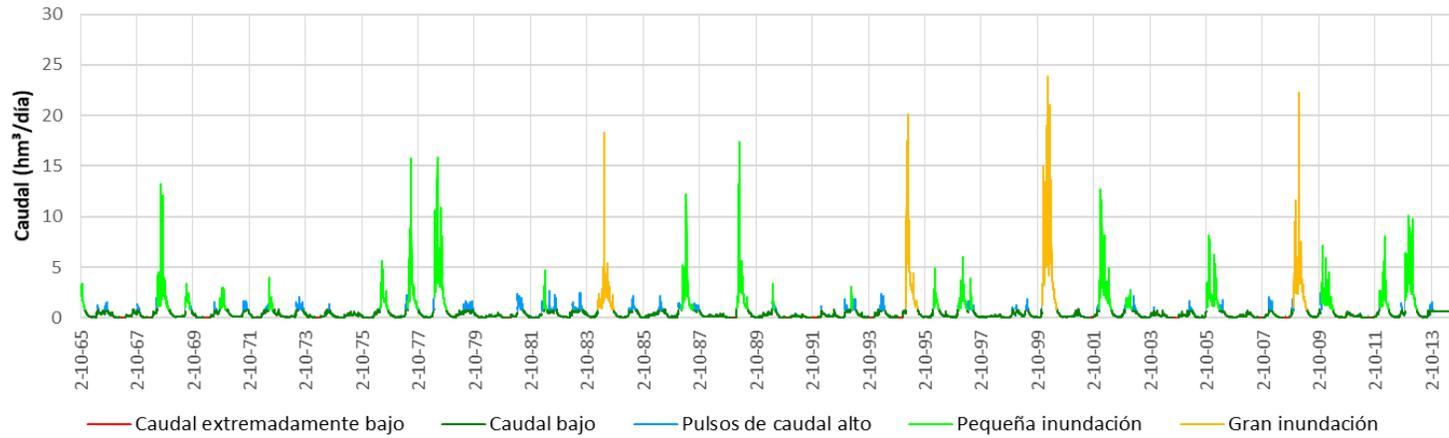
Tabla 12. Resultados de la simulación del régimen de caudales en el estado actual de la cuenca del Órbigo



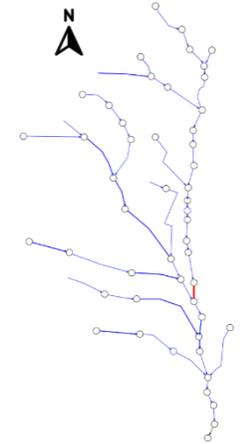
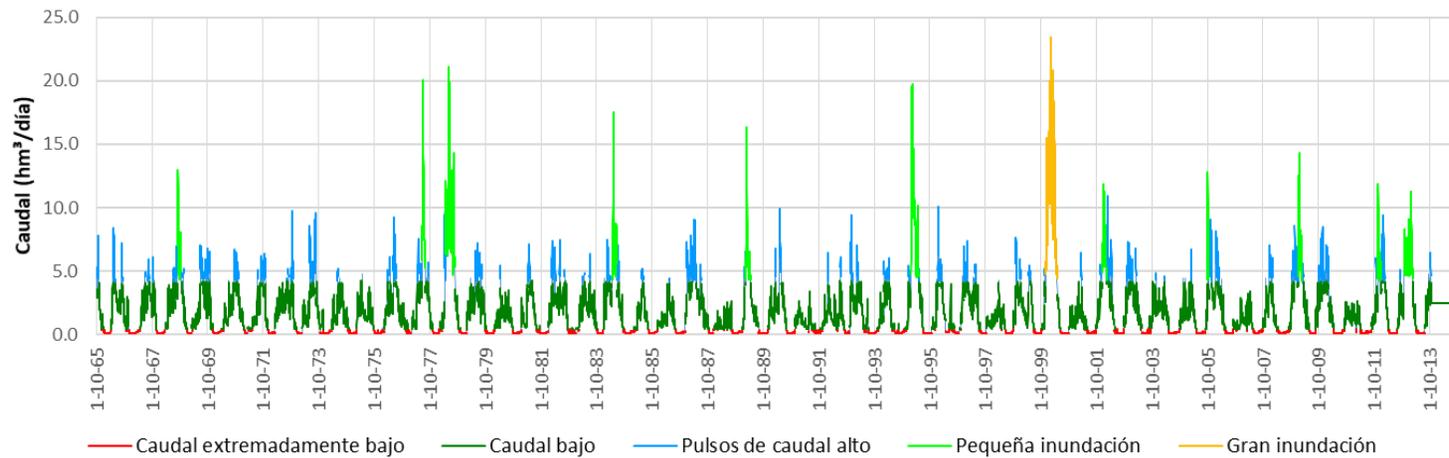
Régimen de caudal actual diario por corriente

Localización

Tuerto 105



Órbigo 47_c



En la tabla anterior se puede observar que la corriente Valdesamario históricamente presenta un comportamiento anual regular y uniforme, caracterizado por una baja presencia de pequeñas inundaciones y una completa ausencia de grandes inundaciones. Adicionalmente presenta pulsos de caudal alto y caudales bajos a lo largo de toda la serie considerada. Sin embargo, aunque se evidencian periodos cortos de escasez del recurso entre los pulsos de caudal, no se identifican prolongados periodos de escasez que puedan ser indicativos de sequías.

Por otro lado, Luna, Tuerto y Órbigo presentan un comportamiento similar entre ellos con presencia de todos los componentes del régimen de caudal. Sin embargo, el tramo del río Tuerto presenta picos muy pronunciados y baja presencia de pulsos de caudales altos. Adicionalmente, en Luna y Órbigo se presenta una baja frecuencia de grandes inundaciones.

Los caudales ecológicos considerados para esta simulación se presentan en la Tabla 13

Tabla 13. Caudales ecológicos considerados en la simulación del escenario actual

CAUDALES MÍNIMOS EN hm ³				
MESES	Luna 42_b	Valdesamario 63	Tuerto 105	Órbigo 47_c
Octubre	3.098	0.089	2.791	3.098
Noviembre	3.627	0.101	2.701	3.627
Diciembre	4.867	0.133	3.254	4.867
Enero	5.538	0.144	3.073	5.538
Febrero	4.875	0.136	3.048	4.875
Marzo	5.849	0.158	3.464	5.849
Abril	5.971	0.165	3.629	5.971
Mayo	5.091	0.144	3.453	5.091
Junio	2.998	0.086	2.701	2.998
Julio	3.098	0.089	2.791	3.098
Agosto	3.098	0.089	2.791	3.098
Septiembre	2.998	0.086	2.701	2.998

Escenario sin caudales ecológicos

Luego de analizar la simulación actual de la cuenca del río Órbigo, se plantea un segundo escenario sin caudales ecológicos. Este escenario permite establecer la relevancia de implementar caudales ecológicos en las diferentes corrientes que están siendo gestionadas, así como dimensionar el impacto que puede llegar a tener el ecosistema si no se consideran.

Teniendo en cuenta lo anterior, se simula un escenario en el que no se contemplan caudales mínimos en ninguna de las corrientes, esto para efectos de la modelación implica que el software les dará preferencia a las demandas consuntivas, como las agrícolas, aun cuando esto implique un flujo nulo en el río.

Sin cambiar ninguna de las características del modelo conceptual de gestión, salvo los caudales mínimos considerados inicialmente, y con la simulación del escenario actual, se hace posible establecer una relación entre el régimen de caudales impuestos por la gestión y la alteración hidrológica de la cuenca.

Al comparar las series de caudales obtenidas en el escenario sin caudales ecológicos y en el escenario actual, analizado en el apartado anterior, se evidencia que los comportamientos son similares, especialmente en los pulsos de caudal alto y las inundaciones.

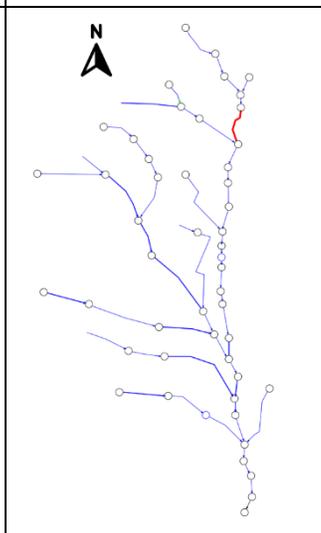
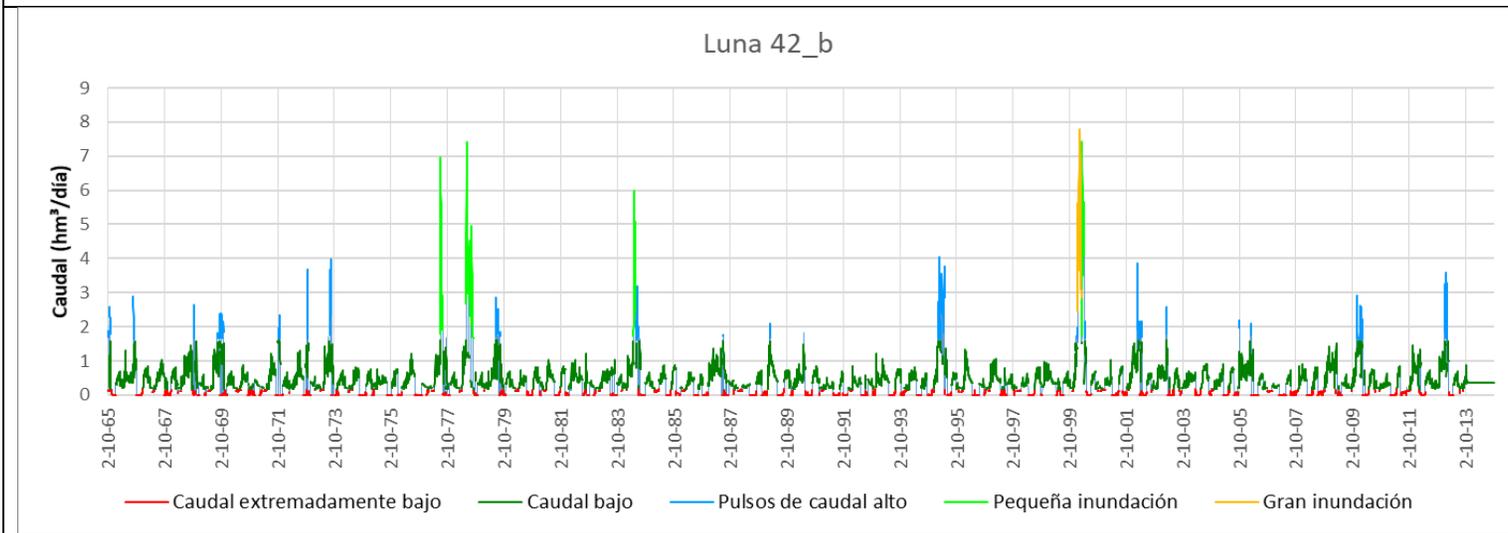
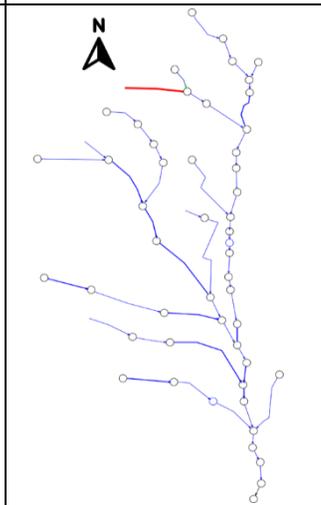
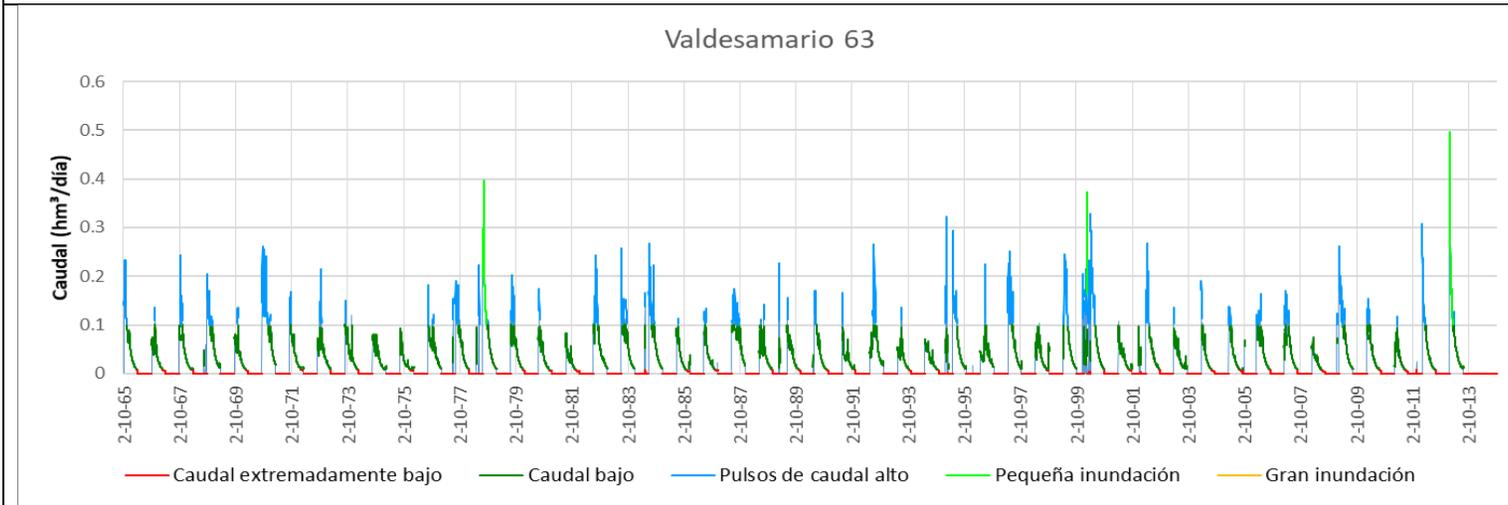
Sin embargo, los caudales bajos y extremadamente bajos presentan una disminución importante en algunas de las corrientes. Uno de los más afectados en este sentido es el río Luna que presenta valores de caudales diarios mínimos de $0.0057 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en el escenario actual el valor mínimo de caudal es de $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$.

En términos generales la disminución entre el promedio de los caudales bajos y extremadamente bajos entre el escenario actual y el escenario sin caudales ecológicos es del 5% para Valdesamario y para el río Luna del 7%. Mientras que los ríos Tuerto y Órbigo presentan diferencias mucho menos significativas del 0.08% y 0.1%, respectivamente. En la Tabla 14, se presentan las gráficas de los regímenes de caudal obtenidos en la simulación de este escenario.

Tabla 14. Resultados de la simulación del régimen de caudales sin caudales ecológicos.

Régimen de caudal diario por corriente

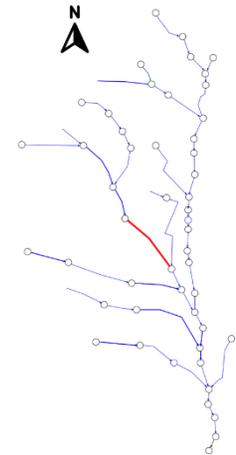
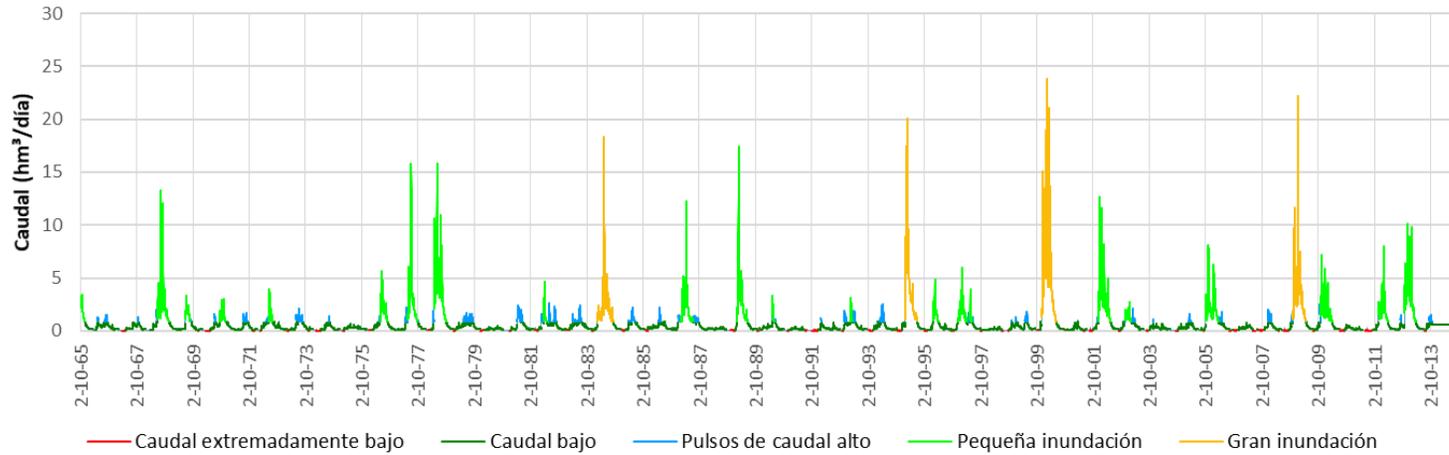
Localización



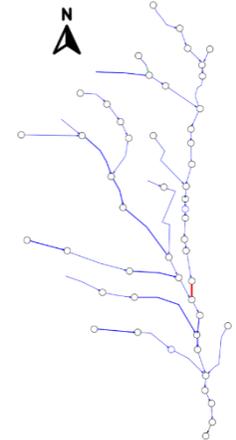
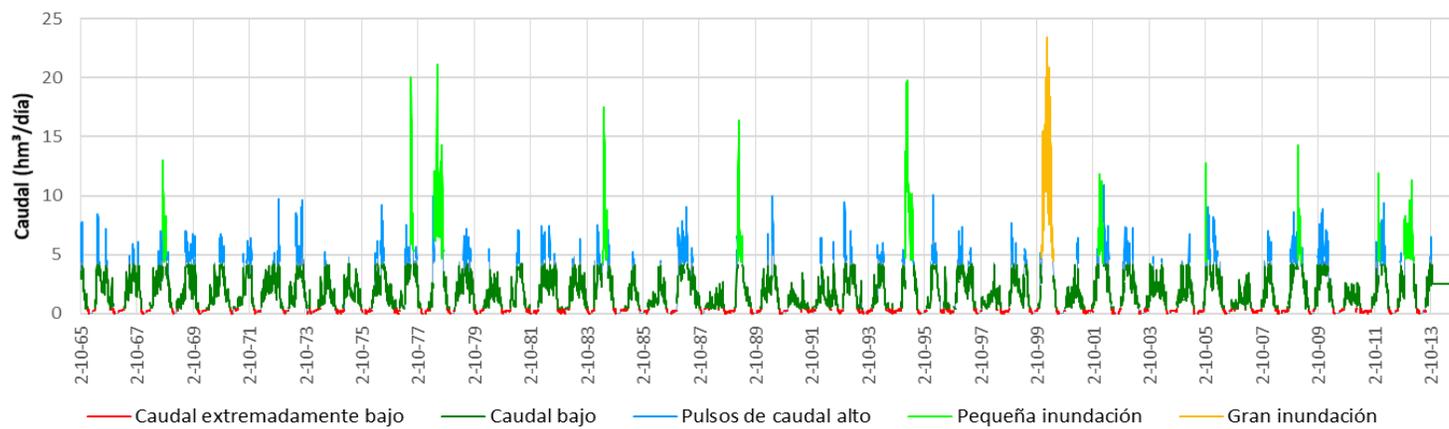
Régimen de caudal diario por corriente

Localización

Tuerto 105



Órbigo 47_c



Escenario proyectado

Una vez simulada la condición actual y establecida la respuesta de la cuenca a la no implementación de caudales ecológicos, se plantea un escenario con valores de caudales ecológicos generalizadamente mayores a los considerados en los apartados anteriores.

En este caso en particular, los datos de caudales ecológicos utilizados son los de caudales mínimos proyectados propuestos por la Confederación Hidrográfica del Duero para el plan hidrológico de 2022 consultados en octubre de 2020. Estos caudales se muestran en la Tabla 15 para las cuatro corrientes evaluadas.

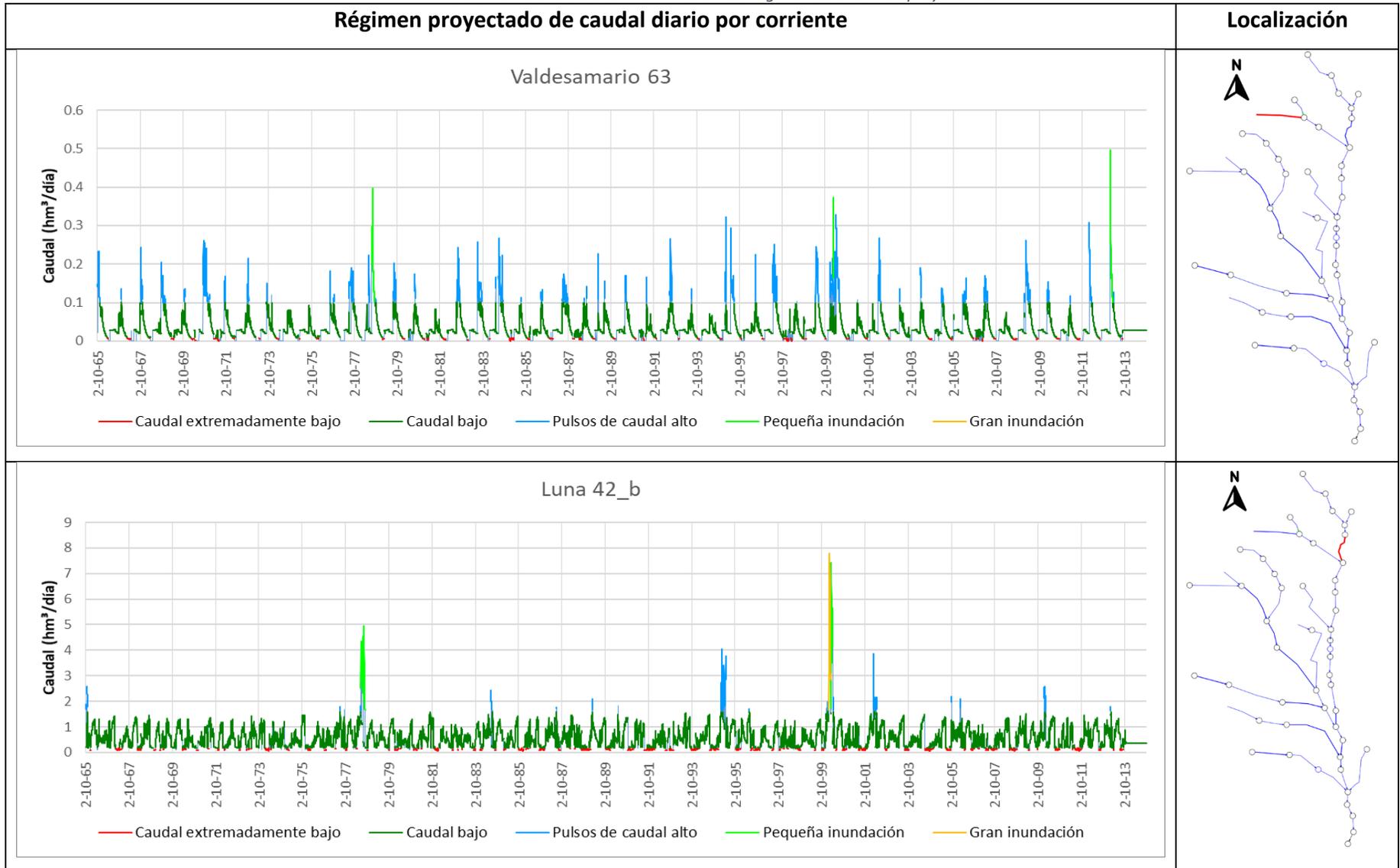
Tabla 15. Caudales ecológicos mínimos considerados para el escenario proyectado

MESES	CAUDALES MÍNIMOS EN HM ³			
	Luna 42_b	Valdesamario 63	Tuerto 105	Órbigo 47_c
Octubre	6.55	0.19	1.41	8.75
Noviembre	13.61	0.41	2.26	18.92
Diciembre	16.02	0.74	4.74	22.57
Enero	20.22	1.09	4.96	30.30
Febrero	17.68	0.95	4.28	30.28
Marzo	24.15	1.41	6.20	38.97
Abril	23.47	1.54	7.92	40.20
Mayo	21.77	1.35	7.12	37.52
Junio	12.98	0.83	4.47	23.10
Julio	7.01	0.48	2.50	13.39
Agosto	3.93	0.26	1.38	6.98
Septiembre	2.90	0.18	0.99	5.78

Como se puede evidenciar, al comparar los valores de caudales de la tabla anterior con los que se han considerado en el escenario actual, se evidencia un aumento importante a lo largo del año. Los incrementos más acentuados se presentan principalmente en los meses de noviembre a junio.

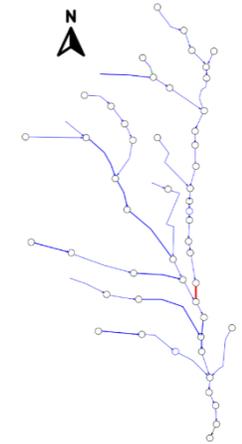
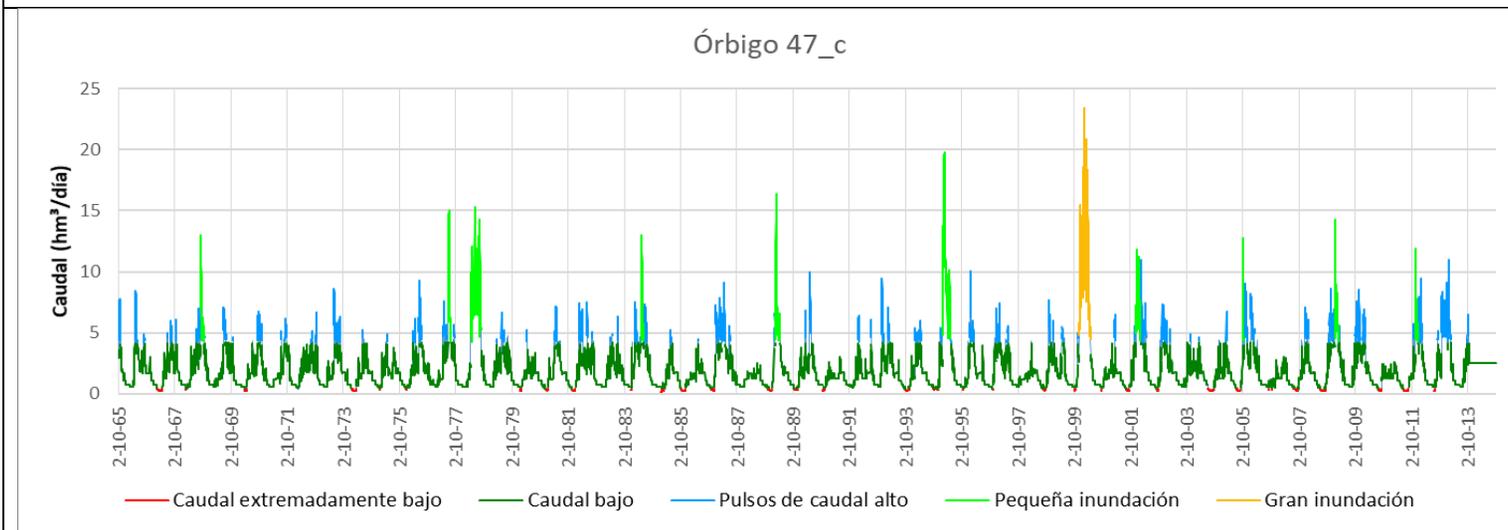
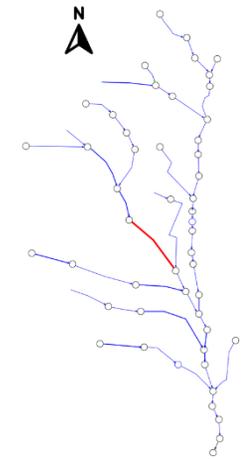
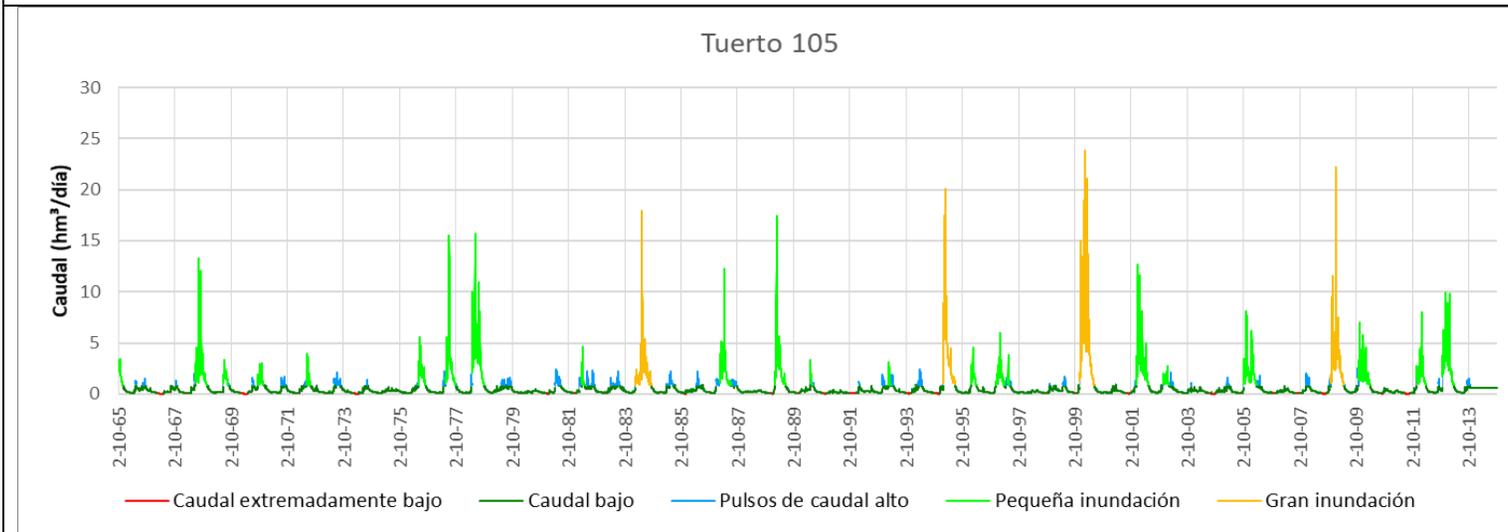
Esta simulación permitirá establecer el efecto de un aumento holgado en los caudales ecológicos sobre la cuenca evaluada y su influencia en los indicadores de alteración hidrológica. En la Tabla 16 se presentan las gráficas de los regímenes de caudal obtenidos en la simulación de este escenario.

Tabla 16. Resultados de la simulación del régimen de caudales proyectados



Régimen proyectado de caudal diario por corriente

Localización



Cada una de las corrientes analizadas presentan pequeñas diferencias a nivel cualitativo respecto al escenario actual. En particular, se evidencia de forma generalizada un aumento en la frecuencia de caudales bajos, especialmente en el río Luna, corriente en la cual también se presenta una disminución importante de las pequeñas inundaciones.

Adicionalmente, en corrientes como Valdesamario se presentan cambios particulares en la distribución temporal del caudal, cambiando evidentemente el comportamiento del régimen de caudales.

Sin embargo, para caracterizar cuantitativamente el efecto que tienen los caudales mínimos dependiendo de su magnitud, se hace necesario el cálculo de los índices de alteración hidrológica.

Comparativa de escenarios.

Además de describir el comportamiento de la serie temporal y los componentes del régimen de caudales, como resultado de las diferentes simulaciones, también se realizó un análisis de la diferencia de los valores de caudales que se están analizando en cada uno de los tramos para cada escenario evaluado. Esto con el fin de establecer una relación entre los caudales ecológicos propuestos y los resultados que se obtengan de los indicadores de alteración hidrológica.

En las Figuras 15, 16, 17 y 18 se muestran las curvas de distribución de caudales diarios resultantes tras las simulaciones para cada una de las corrientes objeto de estudio a lo largo de 40 años de simulación.

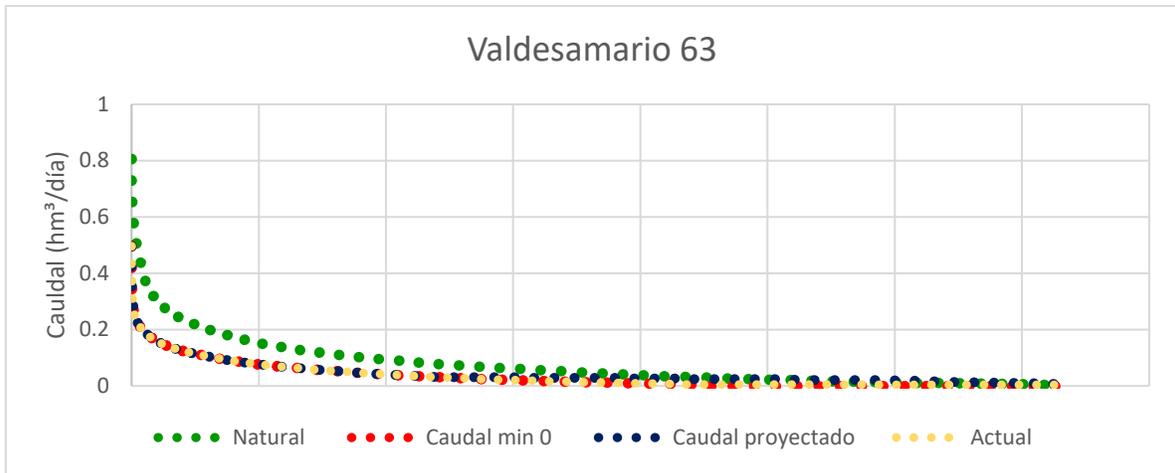


Figura 15. Curva de caudales de Valdesamario 63 para cada uno de los escenarios simulados

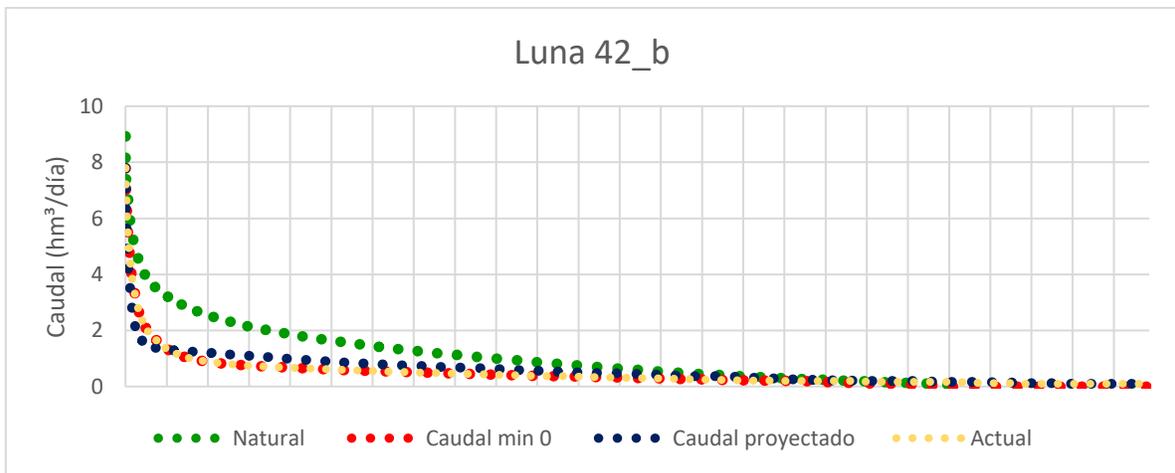


Figura 16. Curva de caudales de Luna 42_b para cada uno de los escenarios simulados

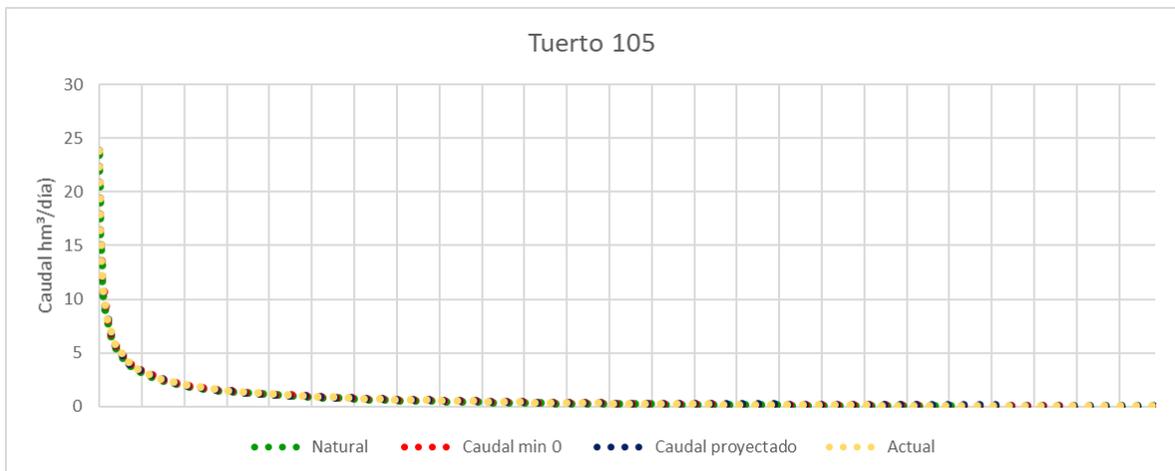


Figura 17. Curva de caudales de Tuerto 105 para cada uno de los escenarios simulados

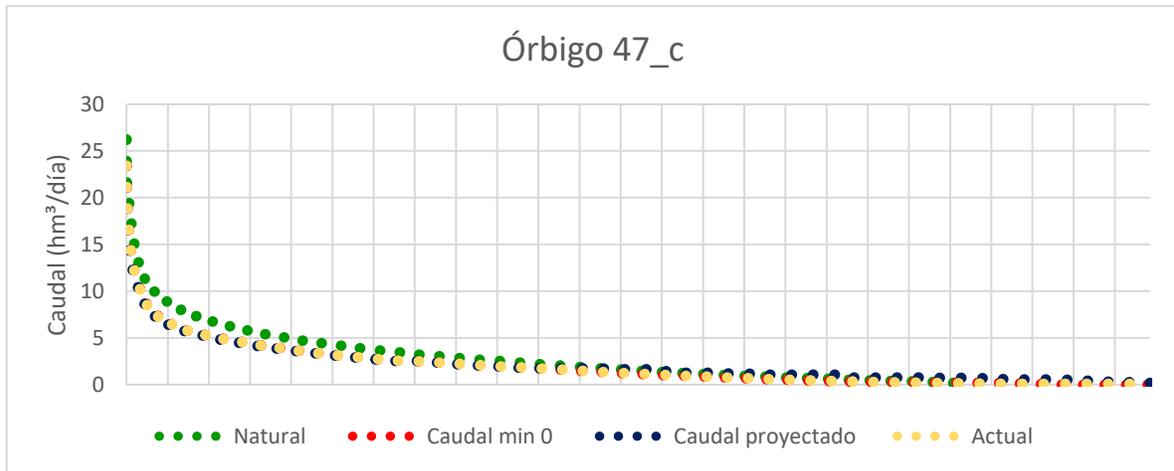


Figura 18. Curva de caudales de Órbigo 47_c para cada uno de los escenarios simulados

En las figuras anteriores se evidencia que la mayor diferencia se presenta entre los valores de caudales en régimen natural y los caudales simulados con condiciones de alteración, especialmente en la ocurrencia de caudales altos. En este sentido Tuerto presenta la menor diferencia entre los caudales en régimen natural y los caudales en régimen alterado, presentando un comportamiento muy similar. En contraposición, el río Luna presenta las mayores diferencias seguido por Valdesamario y finalmente Órbigo con una diferencia mucho menor. Estos resultados soportan la hipótesis de que las estrategias actuales para la definición de Caudales ecológicos se enfocan en un establecimiento de caudales mínimos, sin embargo, no se suelen tener en cuenta otros componentes importantes como los caudales altos (crecidas, inundaciones, etc.)

Por otra parte, los caudales bajos se presentan con valores muy similares en los cuatro escenarios para las cuatro corrientes evaluadas. Se puede observar que en Valdesamario y en Luna el escenario sin caudales ecológicos presenta valores ligeramente por debajo de los otros escenarios. En Tuerto y Órbigo, esta diferencia no es evidente.

4.2.6 Cálculo de índices de alteración

En el apartado anterior se han caracterizado las diferencias más relevantes en el comportamiento del régimen de caudales y sus componentes, tanto en el régimen natural, como en los diferentes escenarios considerados. Sin embargo, para cuantificar

objetivamente estas diferencias los indicadores de alteración hidrológica son una herramienta robusta. A continuación, se describe su aplicación y resultados.

En primer lugar, se han calculado para cada uno de los escenarios simulados, los 33 indicadores de alteración hidrológica con el software IHA7. Para facilitar el análisis de los resultados, estos se presentan subdivididos en tres grupos: magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales, magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales, y por último la tasa, frecuencia y duración de los pulsos y cambios de las condiciones hidrológicas.

Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales

Este grupo engloba los indicadores que evalúan las condiciones hidrológicas a nivel mensual, y que a su vez están relacionados con la disponibilidad de hábitat, de alimento y de agua para las diferentes especies dentro del ecosistema. Adicionalmente, están relacionados con la temperatura del agua y los niveles de oxígeno disuelto en las masas de aguas.

Una alteración importante en alguno de los meses puede generar condiciones adversas para las especies nativas y promover el asentamiento de especies invasoras. Por lo tanto, y teniendo en cuenta las condiciones mensuales que se presentan debido al régimen climático estacional en la cuenca del Órbigo, se hace el análisis para cada escenario de los indicadores que se presentan en los meses de invierno y verano de forma separada, tal como se muestra en las siguientes figuras.

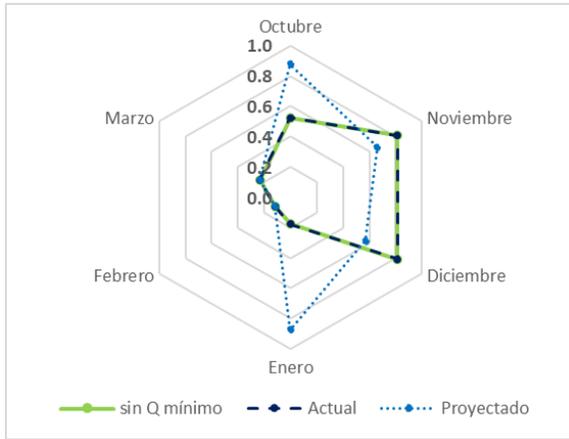


Figura 19 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Valdesamario 63 – meses de invierno

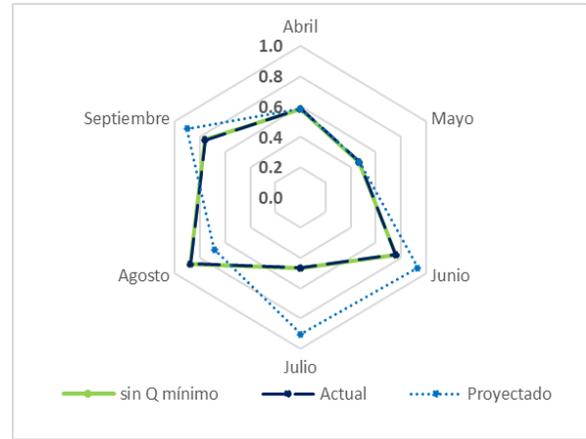


Figura 20 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Valdesamario 63 – meses de verano

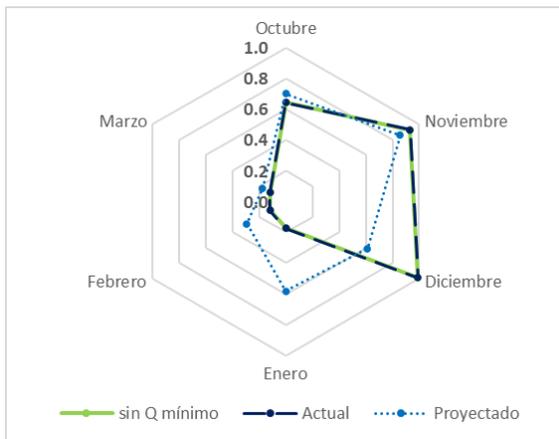


Figura 21 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Luna 42_b – meses de invierno

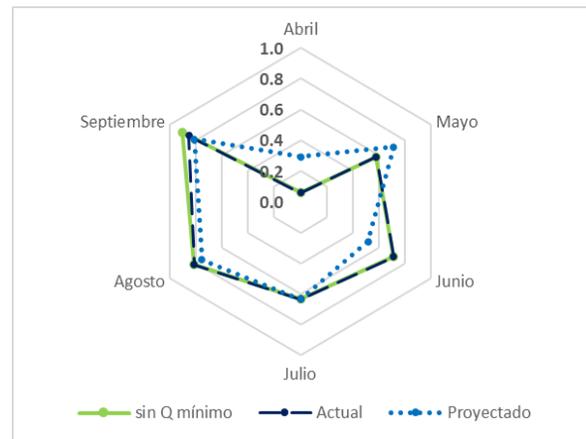


Figura 22 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Luna 42_b – meses de verano

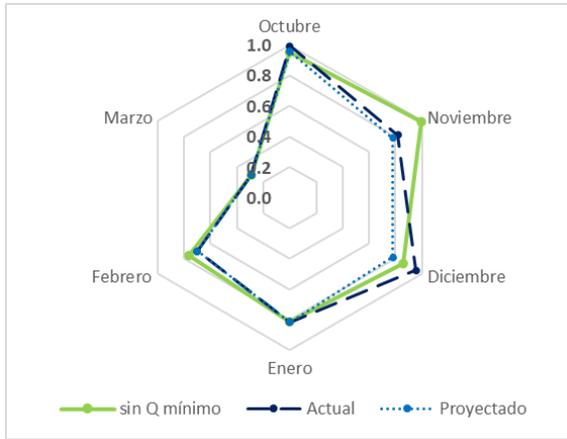


Figura 23 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Tuerto 105 – meses de invierno

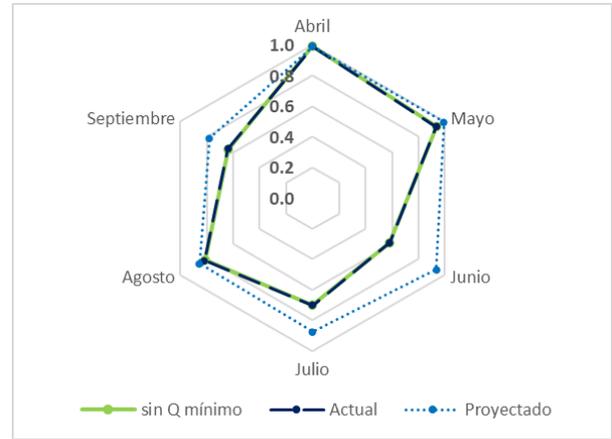


Figura 24 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Tuerto 105 – meses de verano

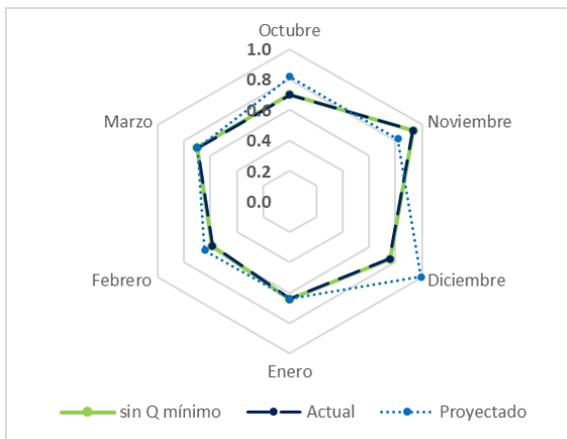


Figura 25 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Órbigo 47_c - meses de invierno

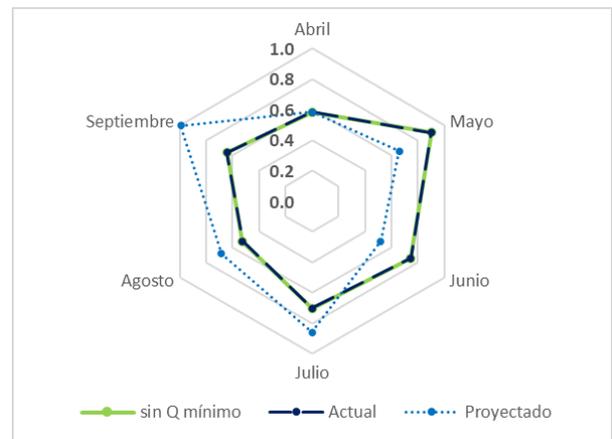


Figura 26 Indicadores de la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales para Órbigo 47_c - meses de verano

De las figuras anteriores se evidencian dos puntos importantes. En primer lugar, al comparar el comportamiento de los indicadores de alteración hidrológica para el escenario sin caudales ecológicos con el comportamiento de los indicadores para el escenario actual, se hace evidente que el régimen de caudales actual genera un estado de alteración de las magnitudes de las condiciones hidrológicas mensuales aproximadamente igual al que se tendría bajo un escenario sin caudales ecológicos.

En segundo lugar, el escenario proyectado promueve un cambio generalizado en el estado de los índices evaluados en comparación con los otros dos escenarios. Aunque matizar que, de acuerdo con los resultados, este cambio no siempre es positivo o se aproxima a un estado inalterado.

En particular, se aprecia una mejoría generalizada en los meses de octubre y enero. Sin embargo, noviembre y diciembre se presenta una mayor alteración con los valores proyectados en la mayoría de las corrientes. Esto puede deberse a que los valores considerados como caudales ecológicos en el escenario proyectado para estos meses, están ligeramente por encima de los caudales que en condiciones naturales pasaría por cada corriente.

El tramo de río que presenta menores alteraciones en este parámetro es el tramo 47_c del Órbigo, aunque el tramo del río Tuerto presenta valores muy favorables. Por otro lado, Valdesamario presenta la tasa más alta de mejoría con los caudales proyectados respecto a los otros escenarios considerados.

Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales

En este grupo se evalúan los indicadores relacionados con las condiciones hidrológicas extremas que se presentan dentro de cada año hidrológico. La importancia de analizar las condiciones hidrológicas extremas radica en la relación que estas tienen en la competición entre organismos, la estructuración y renovación natural del ecosistema y la capacidad del sistema para eliminar residuos.

De la misma forma que en el grupo anterior, se evalúan de forma independiente los indicadores relacionados con los caudales bajos y los indicadores referentes a los caudales altos.

Para los caudales bajos se evalúan ocho indicadores entre los que se encuentran los mínimos anuales de la media de uno, tres, siete, treinta y noventa días, y la cantidad de días con caudal cero, entre otros. Para los caudales altos se evalúan seis indicadores muy relacionados con los anteriores, pero valorando los caudales máximos anuales. Los resultados obtenidos de indicadores considerados se muestran en las figuras siguientes.

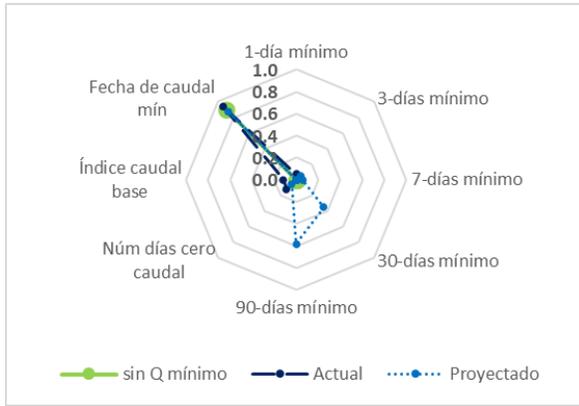


Figura 27 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Valdesamario 63 – Caudales bajos

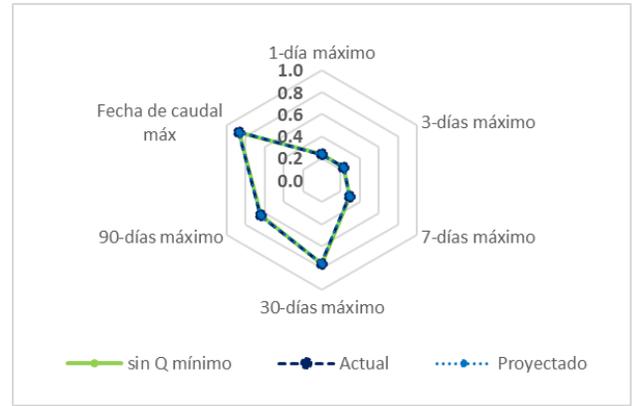


Figura 28 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Valdesamario 63 – Caudales altos

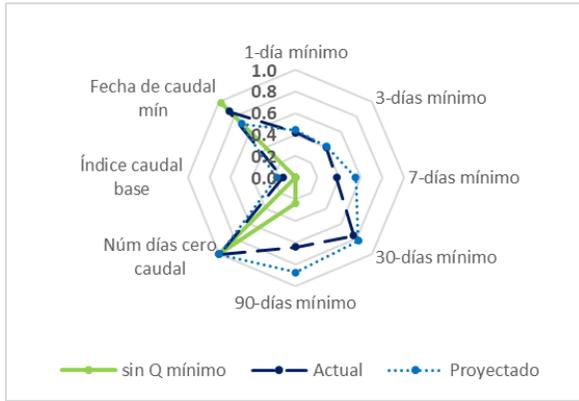


Figura 29 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Luna 42_b – Caudales bajos

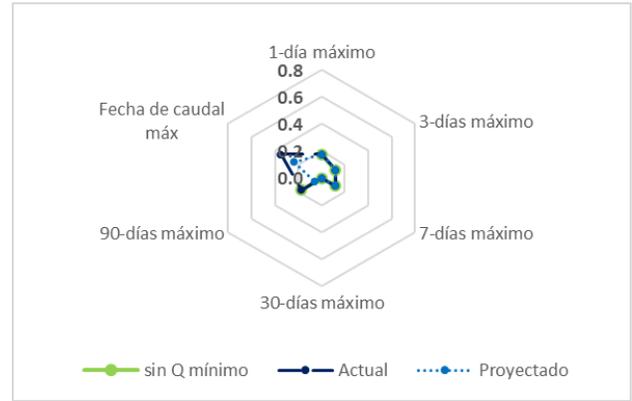


Figura 30 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Luna 42_b – Caudales altos

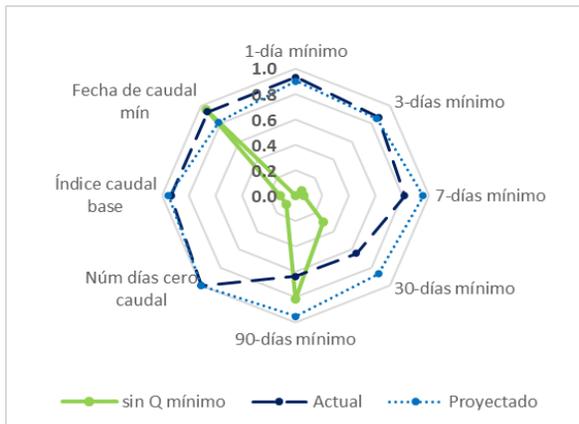


Figura 31 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Tuerto 105 – Caudales bajos

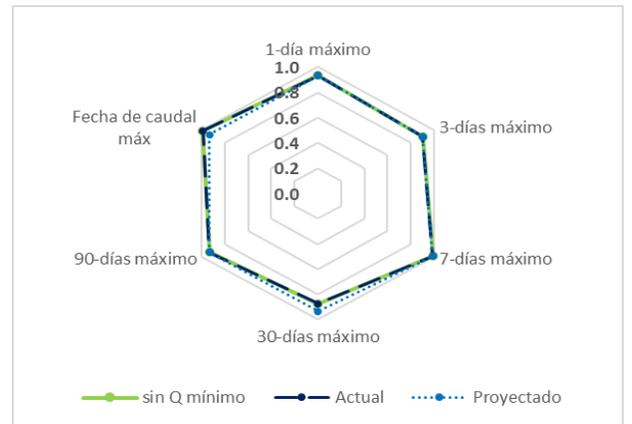


Figura 32 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Tuerto 105 – Caudales altos

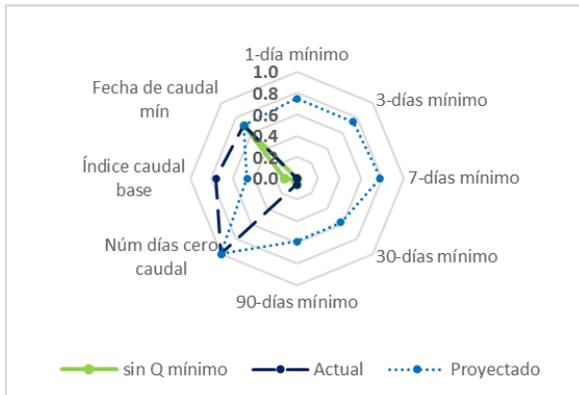


Figura 33 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Órbigo 47_c – Caudales bajos



Figura 34 Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para Órbigo 47_c – Caudales altos

Estos indicadores presentan en general alteraciones altas en especial para el escenario sin caudales ecológicos. Sin embargo, en el caso de los caudales bajos se evidencia una mejora importante a medida que los caudales ecológicos considerados son mayores, esto es especialmente evidente en los ríos Luna, Tuerto y Órbigo.

En cuanto a los caudales altos, estos presentan un comportamiento muy similar en los tres escenarios considerados, un hecho que tiene sentido si se tiene en cuenta que los caudales ecológicos propuestos no involucran caudales de crecidas.

Tasa, frecuencia y duración de los pulsos y cambios de las condiciones hidrológicas

Los indicadores evaluados en este apartado están relacionados con el estrés que pueden sufrir los organismos a partir de la alteración que se presente a las condiciones hidrológicas naturales, así como con el intercambio de nutrientes, la accesibilidad a diferentes sitios de alimentación y en el transporte de cargas de fondo.

En las figuras a continuación se presentan los resultados obtenidos de los indicadores hidrológicos relacionados con la tasa, frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos, así como con los cambios en las condiciones hidrológicas en general.

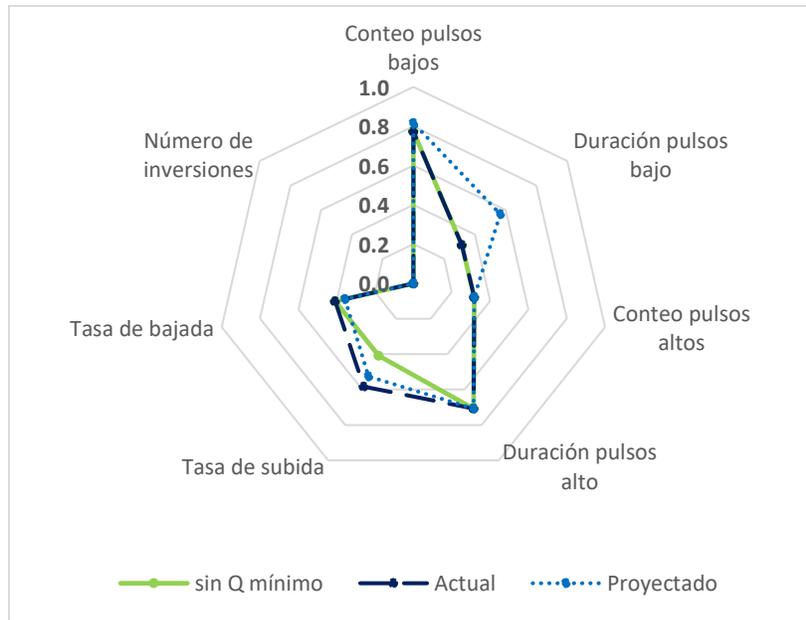


Figura 35 . Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Valdesamario 63

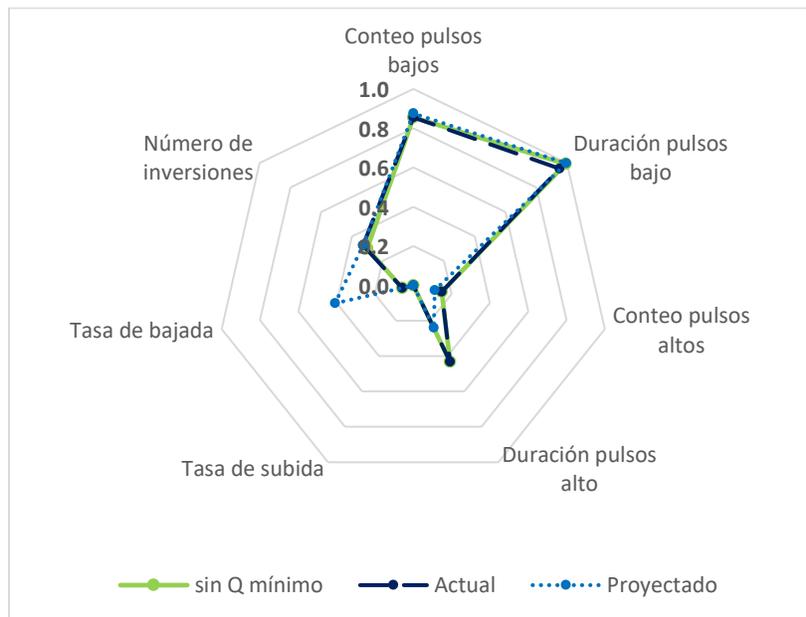


Figura 36 Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Luna 42_b

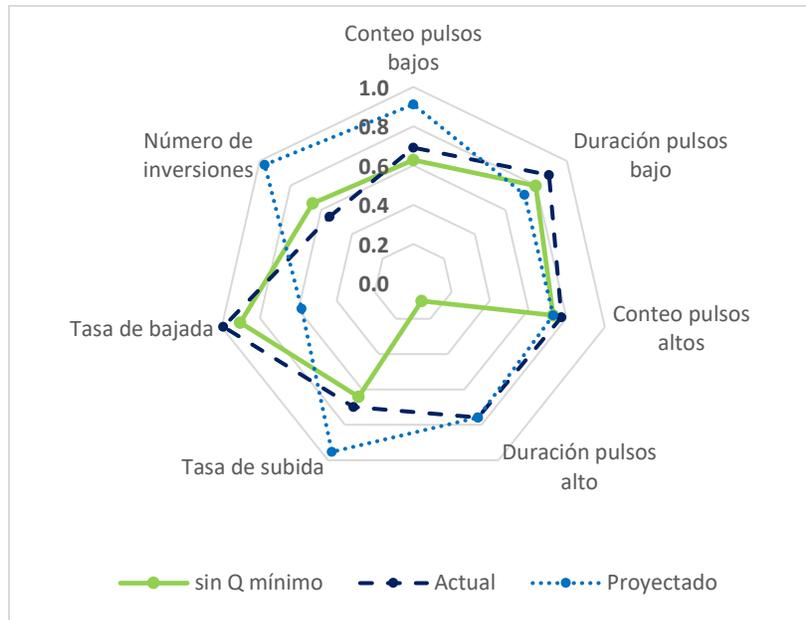


Figura 37 Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Tuerto 105

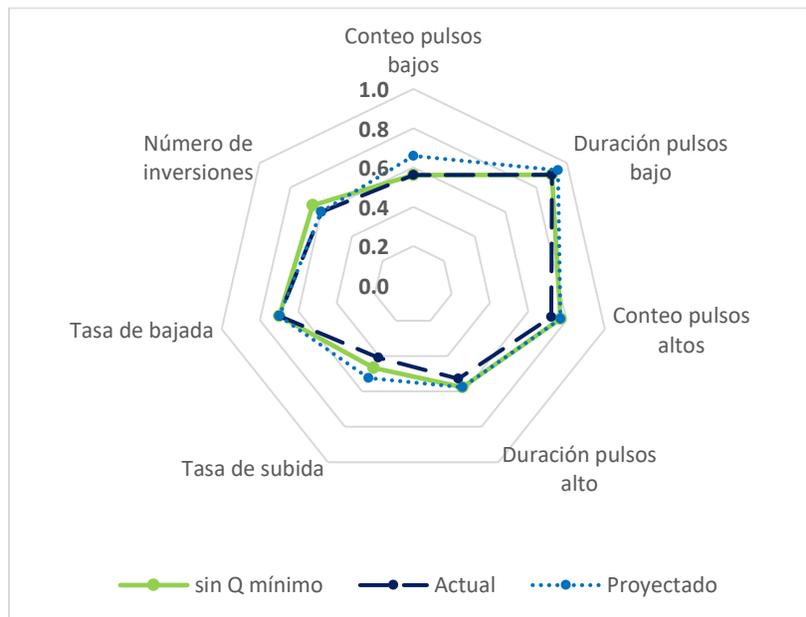


Figura 38 Indicadores de la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos para Órbigo 47_c

La evaluación de estos parámetros permite concluir que no existe una mejoría consistente y representativa de los indicadores de alteración hidrológica al variar las condiciones de régimen de caudal a partir de caudales mínimos impuestos. Sin embargo, se puede apreciar

una ligera mejoría en la duración de pulsos bajos en Valdesamario y en el conteo de pulsos bajos en Tuerto con los caudales proyectados.

Agregación de indicadores

Siguiendo la metodología propuesta, se agregan los indicadores de alteración hidrológica y se simplifican en 5 índices de alteración. Esto permite simplificar la información obtenida y tener una visión general del estado de la cuenca. Por otro lado, es un punto importante a la hora de tomar decisiones concernientes con la planificación hidrológica, ya que la agregación permite priorizar los indicadores que para efectos de la gestión sean más importantes y representativos.

Para efectos de este trabajo, se han considerado que todos los indicadores tienen la misma importancia, y por tanto los factores de ponderación tienen el mismo valor en cada uno de los grupos. Los valores considerados y las operaciones realizadas se pueden consultar en el Anejo 2. En la Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se presentan los índices obtenidos para cada una de las corrientes y para cada uno de los escenarios.

Tabla 17. Índices de alteración hidrológica en el río Valdesamario

Índice	Valdesamario 63		
	Actual	Sin Q min	Proyectado
EST _{INV}	0.45	0.45	0.56
EST _{VER}	0.65	0.65	0.75
EXT _{MIN}	0.15	0.11	0.25
EXT _{MAX}	0.51	0.51	0.51
PUL _{INT}	0.44	0.42	0.47

Tabla 18. Índices de alteración hidrológica en el río Luna

Índice	Luna 42_b		
	Actual	Sin Q min	Proyectado
EST _{INV}	0.50	0.50	0.54
EST _{VER}	0.61	0.62	0.62
EXT _{MIN}	0.57	0.28	0.62
EXT _{MAX}	0.16	0.16	0.12
PUL _{INT}	0.40	0.40	0.42

Tabla 19. Índices de alteración hidrológica en el río Tuerto

Índice	Tuerto 105		
	Actual	Sin Q min	Proyectado
EST _{INV}	0.76	0.78	0.68
EST _{VER}	0.78	0.78	0.90
EXT _{MIN}	0.85	0.30	0.91
EXT _{MAX}	0.94	0.94	0.94
PUL _{INT}	0.76	0.64	0.80

Tabla 20. Índices de alteración hidrológica en el río Órbigo

Índice	Órbigo 47_c		
	Actual	Sin Q min	Proyectado
EST _{INV}	0.72	0.72	0.77
EST _{VER}	0.68	0.68	0.72
EXT _{MIN}	0.31	0.11	0.70
EXT _{MAX}	0.58	0.59	0.61
PUL _{INT}	0.63	0.66	0.68

En términos generales se evidencia que, según lo ilustrado en las gráficas presentadas al inicio del numeral 4.2.6, el escenario proyectado presenta índices de alteración mejores que los de los otros dos escenarios. Es decir que ayuda de una mejor manera a reducir la alteración de la cuenca con dirección a un estado natural inalterado. También se hace evidente que los índices que presentan mayor alteración son los relacionados con las magnitudes y duraciones de las condiciones hidrológicas extremas anuales, mínimas para Valdesamario y Órbigo, y máximas para Luna. El río Tuerto por su parte presenta mayor alteración en la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos, aunque los valores de este índice son bastante favorables.

Por otro lado, la menor alteración se presenta en las magnitudes de las condiciones hidrológicas mensuales, en los meses de verano particularmente para Valdesamario y Luna y en los meses de invierno para el Órbigo. A diferencia de estos, el río Tuerto presenta la menor alteración en las condiciones hidrológicas extremas anuales máximas particularmente.

Finalmente, siguiendo la metodología aquí propuesta, y con el fin de simplificar y sintetizar la información disponible, se calculó el índice general de alteración. Este cálculo se realizó para cada una de las cuatro corrientes evaluadas que, si bien no constituyen un porcentaje representativo sobre el total de corrientes en la cuenca, si son representativas de los distintos grados de alteración en esta.

Al igual que para el cálculo de los índices agregados, a cada uno de los cinco índices calculados se le asigna un factor de ponderación. En este caso, el factor de ponderación es el mismo para todos los índices. En la Tabla 21 se presentan los índices generales obtenidos para cada corriente y cada escenario evaluado.

Tabla 21. índices de alteración general por corriente

Corriente	ESCENARIO		
	Actual	Sin Q min	Proyectado
Valdesamario 63	0.44	0.43	0.50
Luna 42_b	0.45	0.39	0.46
Tuerto 105	0.82	0.69	0.85
Órbigo 47_c	0.59	0.55	0.70

Los resultados de los índices generales permiten diferenciar los grados de alteración que presenta cada tramo de río evaluado. En la tabla anterior se puede observar que Tuerto 105 presenta los valores más favorables de alteración alcanzando valores de 0.85 y superando los 0.65 en todos los escenarios, seguido por Órbigo 47_c, Valdesamario 63 y Luna 42_b.

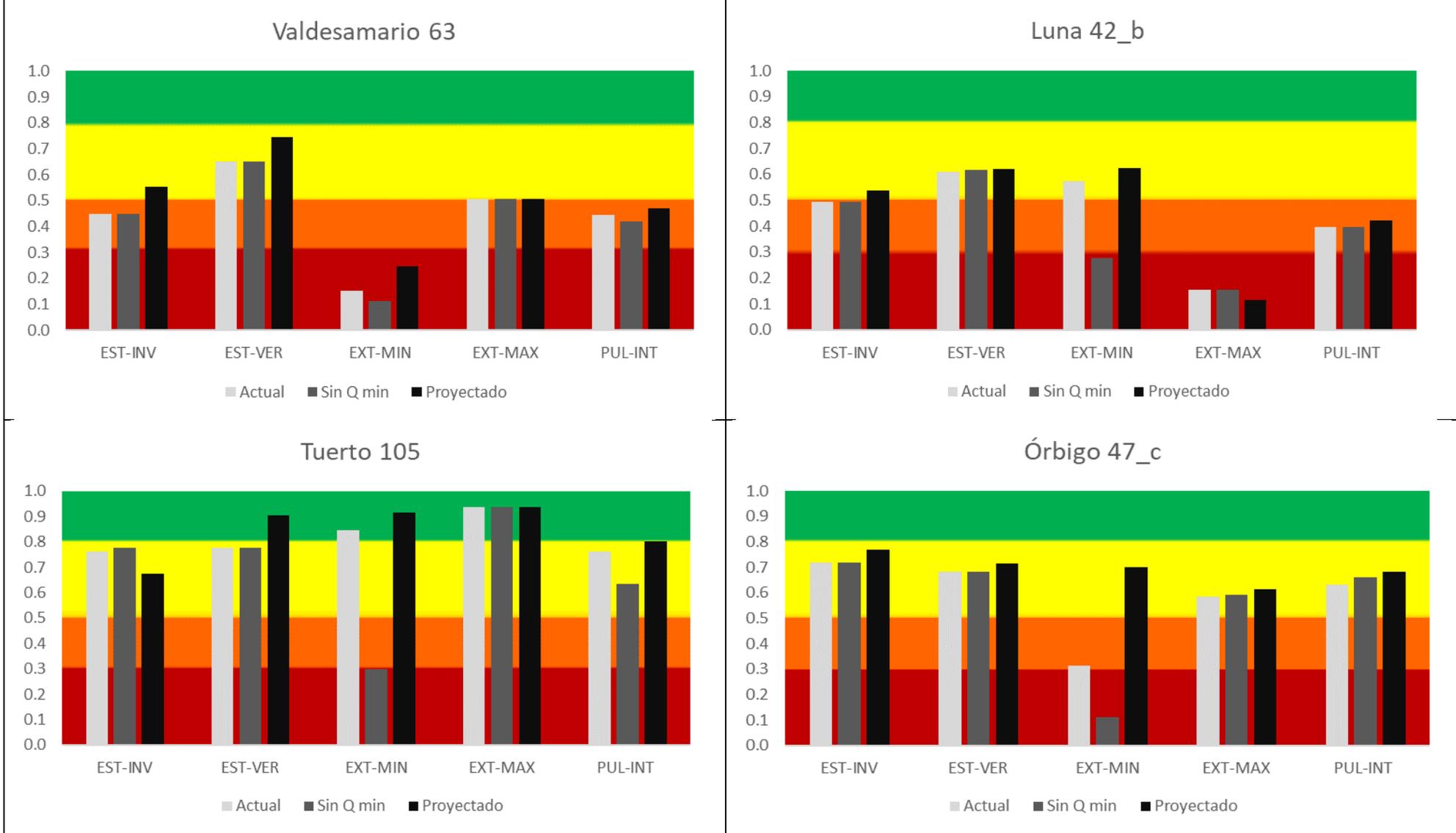
Adicionalmente, una vez más resulta claro que el escenario proyectado presenta mejores resultados de índices de alteraciones generales en todos los tramos seleccionados y el escenario en el que no se consideran caudales mínimos presenta los resultados más desfavorables.

4.2.7 Evaluación de los índices de alteración hidrológica

Finalmente, con el objetivo de realizar una valoración cualitativa que delimite los resultados obtenidos y facilite su interpretación, se presentan los resultados de los índices obtenidos enmarcados en los cuatro rangos de alteración hidrológica definidos por la metodología aquí propuesta. De esta manera se visualiza la diferencia que existe entre cada uno de los escenarios propuestos y el comportamiento frente a ellos de cada una de las corrientes seleccionadas.

En la Tabla 22 se presentan las gráficas de los índices de alteración obtenidos, así como cada uno de los rangos de evaluación considerados, siendo rojo muy alterado, naranja alterado, amarillo moderadamente alterado y verde poco alterado.

Tabla 22. Evaluación de los índices de alteración hidrológica por corriente



Se puede observar que el índice de magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales, en particular el de caudales mínimos (EXT-MIN) presenta una mayor sensibilidad a la variación de los caudales ecológicos considerados, con variaciones de hasta el 84% en Órbigo, en donde se evidencia la mayor variación. De la misma manera, este índice es el que presenta mayores valores de alteración hidrológica, para caudales mínimos en Valdesamario, Tuerto y Órbigo y para caudales máximos en Luna.

En cuanto al estado de las corrientes, en términos generales presentan un estado alterado y moderadamente alterado, aunque se encuentran corrientes como Tuerto que presentan valores dentro del rango poco alterado. La corriente evaluada en el río Tuerto y la evaluada en el río Órbigo presentan los valores de alteración más favorables de todas las consideradas. Esto se puede explicar teniendo en cuenta la ubicación de los tramos; al encontrarse en la parte media-baja de la cuenca reciben, a además de las aportaciones, algunos retornos de la parte alta de la cuenca. Por otro lado, parte de las aportaciones que recibe no están reguladas por embalses, lo que permite que se presenten todos los componentes del caudal.

En contraposición las corrientes seleccionadas en los ríos Valdesamario y Luna presenta los índices de mayor alteración. En estas la mayoría de los índices presentan valores inferiores a 0.5 lo que indica un estado alterado. Sin embargo, cabe anotar que en el escenario proyectado los índices presentan valores de menor alteración, salvo en el índice que evalúa la magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales de los caudales altos, del río Luna en particular.

Por último, se evalúan los índices generales. Estos índices simplifican la información de los índices anteriores, por lo que transmiten una idea del estado más general de las corrientes evaluadas y del comportamiento de las mismas frente a cada uno de los escenarios considerados.

En la Figura 39 se muestran los resultados de los índices generales por corriente y para cada uno de los escenarios considerados, con el fin de comparar el comportamiento de cada una de las corrientes bajo las diferentes condiciones impuestas.

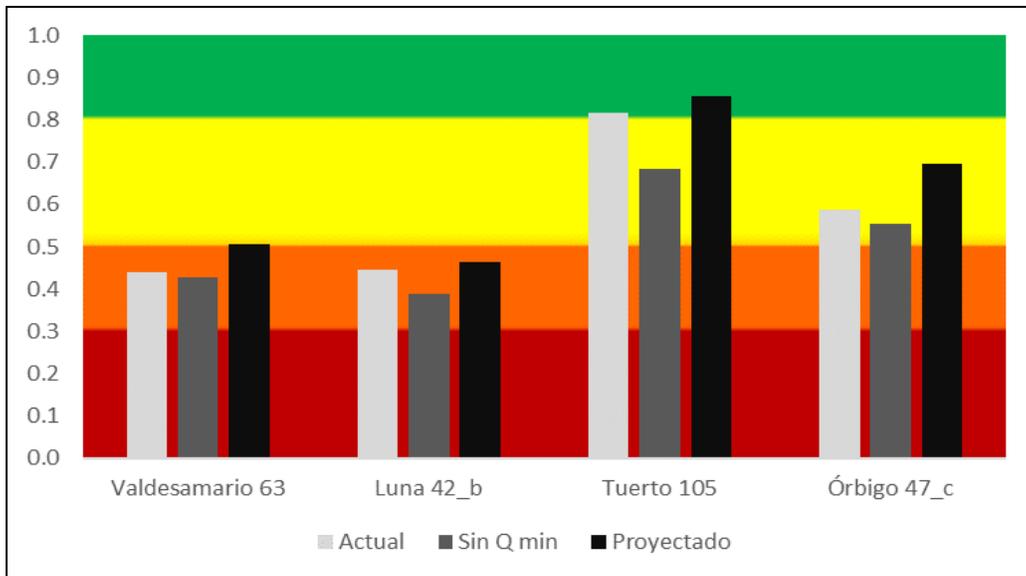


Figura 39. Índices generales por escenarios en la cuenca del río Órbigo

En la figura anterior se evidencia que a medida que los caudales ecológicos considerados son mayores, los índices presentan mejores resultados. Esta mejora es más evidente en las corrientes de la cuenca media y mucho más sutil en Valdesamario y Luna que son las corrientes consideradas en la parte alta de la cuenca del río Órbigo, lo cual corresponde a los resultados obtenidos anteriormente, tanto en los indicadores hidrológicos, como para los índices de alteración hidrológica por corriente.

Estos resultados muestran que a medida que los caudales mínimos impuestos aumentan, se evidencia una mejora en los índices de alteración hidrológica. Sin embargo, en un proceso real de toma de decisiones resultaría importante considerar qué tanto afecta este aumento de caudales mínimos al suministro de agua para las demandas en la cuenca. Esto porque, si bien uno de los objetivos principales de la planificación hidrológica es cuidar y proteger el dominio público hidráulico y las masas de agua, también se debe garantizar las demandas de agua, protegiendo su calidad y racionalizando su uso en armonía con el medio ambiente.

De esta forma, para ponderar la viabilidad de aumentar los caudales ecológicos respecto al cumplimiento de las demandas, se realizó un análisis adicional en el que se evalúa el cumplimiento de las demandas. En particular, se evaluaron las demandas agrícolas puesto que son las que se pueden ver mayormente afectadas con un aumento en las restricciones de caudal ecológico.

4.2.8 Evaluación de las soluciones

Teniendo en cuenta que la metodología propuesta está encaminada a la toma de decisiones de los gestores de cuencas, se considera necesario evaluar las diferentes alternativas de caudal ecológico, considerando las implicaciones que puede tener un aumento o disminución del régimen de caudales ecológicos en el cumplimiento de las demandas para el sostenimiento humano.

Por lo tanto, se hace una evaluación de cada uno de los escenarios propuestos de régimen de caudal ecológico en el que se incluyen el grado de cumplimiento anual, bianual y decadal de los criterios de garantías UTA.

Adicionalmente se evalúan las garantías con los valores definitivos establecidos en el nuevo plan de gestión de cuencas para la cuenca del Duero, los cuales se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23 Caudales ecológicos definitivos establecidos en el PHD 2022

MESES	LUNA 42_B	VALDESAMARIO 63	TUERTO 105	ÓRBIGO 47_C
Octubre	1.11	0.05	1.04	3.48
Noviembre	1.31	0.06	1.04	3.79
Diciembre	1.67	0.08	1.22	4.81
Enero	1.85	0.09	1.15	5.16
Febrero	1.84	0.09	1.26	5.02
Marzo	2.06	0.1	1.29	5.86
Abril	2.1	0.11	1.5	5.74
Mayo	1.84	0.09	1.29	5.12
Junio	1.11	0.05	1.04	3.48
Julio	1.11	0.05	1.04	3.48
Agosto	1.11	0.05	1.04	3.48
Septiembre	1.11	0.05	0.94	3.48

En la Tabla 24 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios considerados, incluyendo el escenario proyectado 2 que representa los valores de caudal ecológico establecidos para la cuenca del Órbigo en el plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Duero. En verde se muestran los valores de garantías que cumplen el criterio de garantía y en rojo los que no lo cumplen para cada escenario.

Tabla 24. Evaluación de las garantías anuales, bianuales y decadales para cada uno de los escenarios considerados

ESCENARIO		UDA																										
		13	14	15	16	17	18	20	21	22	23	24	27	31	36	37	38	39	44	45	52	224	314	315	316	317	332	
CRITERIO DE GARANTÍA	Anual	Sin Q eco	28	9	9	18	5	11	19	13	53	0	30	5	35	14	69	10	30	69	2	11	29	58	5	4	0	9
		Actual	31	10	10	17	11	16	27	9	53	0	31	26	35	28	69	12	32	69	30	17	29	72	30	0	0	16
		Proyectado 2	34	32	30	39	48	44	30	0	53	0	50	26	75	30	69	43	47	69	41	40	49	67	43	0	0	44
		Proyectado	95	81	76	92	83	81	84	0	53	0	95	83	100	90	69	77	86	69	92	76	90	100	97	0	0	78
	Bianual	Sin Q eco	28	9	9	18	5	11	19	13	92	0	30	5	35	14	128	10	30	116	2	11	43	58	5	4	0	9
		Actual	31	10	10	18	11	16	33	9	92	0	31	26	35	36	128	12	32	116	30	17	43	94	30	0	0	16
		Proyectado 2	42	41	41	42	52	48	55	0	92	0	57	26	109	51	128	46	57	116	42	43	59	98	43	0	0	48
		Proyectado	164	141	135	159	144	140	131	0	92	0	164	122	174	142	128	131	149	116	150	130	156	196	159	0	0	135
	Decadal	Sin Q eco	36	11	12	43	8	13	19	13	283	0	37	5	36	14	543	12	37	355	2	12	69	120	5	4	0	11
		Actual	39	16	15	42	19	24	57	9	283	0	37	43	36	59	543	20	39	355	54	24	69	161	54	0	0	23
		Proyectado 2	94	87	80	81	94	114	95	0	283	0	115	47	214	88	543	103	125	355	69	100	144	199	78	0	0	105
		Proyectado	462	353	340	471	430	429	258	0	283	0	494	207	553	275	543	406	455	355	274	397	467	419	277	0	0	415

Como se puede observar en la tabla anterior, en términos generales las demandas siguen un comportamiento acorde con las restricciones impuestas en cada uno de los escenarios evaluados. Es decir, en el escenario más restrictivo (escenario proyectado) la mayoría de las demandas presentan fallos en los tres criterios de garantías. En el escenario proyectado 2 que es menos restrictivo que el escenario proyectado, se presentan muy pocos fallos en los criterios anuales y bianuales, mientras que en el decadal el número de fallos es mayor. Por otro lado, en los escenarios actual y sin caudal ecológico no se presentan fallos significativos en ninguno de los criterios de garantías.

Sin embargo, existen cuatro demandas particulares que presentan un comportamiento muy desfavorable en todos los escenarios considerados, incluyendo el escenario en el que no se considera un caudal ecológico en ninguna de las corrientes. Para entender este comportamiento se presenta, en la Figura 40 un esquema de la ubicación de cada una de las demandas consideradas en el modelo.

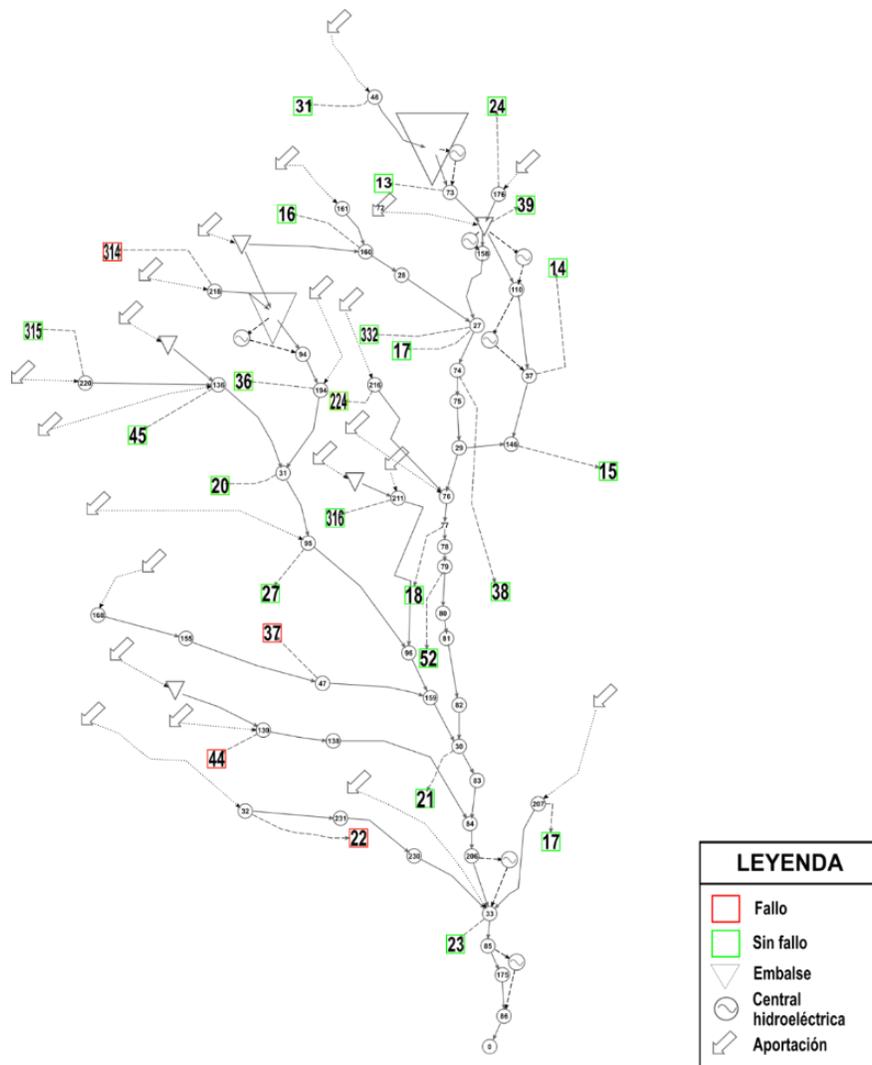


Figura 40. Esquema general de las demandas consideradas en la cuenca del río Órbigo

Como se evidencia en el esquema anterior, las cuatro demandas que presenta fallos recurrentes se encuentran en la zona más occidental de la cuenca. En esta zona se encuentran tres acuíferos importantes que abastecen parte de las demandas y que en este análisis en particular no se están considerando, por lo tanto, el fallo recurrente de estas demandas puede deberse a que el suministro depende de fuentes adicionales a las fuentes superficiales.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo establece una metodología que permite evaluar la alteración hidrológica que se presenta en el sistema fluvial de una cuenca cuando se modifican las características hidrológicas de la misma, en particular el régimen de caudales ecológicos. La propuesta metodológica está basada en la estimación del régimen natural de caudales, en la implementación de un modelo de gestión y en el cálculo de indicadores de alteración hidrológica para determinar las características del régimen de caudal que se podrían ver más afectadas.

La metodología propuesta se aplicó al caso de estudio de la cuenca del río Órbigo, en la Península Ibérica. Para ello, se seleccionaron cuatro tramos de río ubicados a lo largo de la cuenca y se consideraron tres escenarios de gestión: uno que representa la situación actual de la cuenca, el segundo representa una condición en la que no se consideran caudales ecológicos, y un tercero con los regímenes de caudales ecológicos inicialmente propuestos para el nuevo plan hidrológico. Al respecto de su aplicación y resultados se puede concluir que:

- Existen algunas metodologías para el cálculo de indicadores de alteraciones hidrológica, de las cuales, la desarrollada por The nature conservancy (IHA) plantea una evaluación más rigurosa, además de considerar parámetros adicionales como las tasas de ascenso y descenso de los caudales diarios. Por otra parte, esta metodología permite analizar cada uno los componentes del caudal de forma independiente.

Adicionalmente IHA es la metodología más actualizada y de fácil acceso, de las analizadas en el presente estudio, por lo que se considera como la más apropiada para el cálculo de indicadores de alteración hidrológica.

- De acuerdo con la caracterización hidrológica, se encontró que la cuenca del río Órbigo presenta un sistema de gestión complejo. Esta gestión ha generado una alteración importante respecto al régimen natural de la cuenca, destacando la

reducción temporal de grandes y pequeñas inundaciones en las cuatro corrientes analizadas y una homogeneidad del régimen de caudales en corrientes como Valdesamario. Lo anterior guarda una relación con la posible afectación en el hábitat de diferentes especies, así como en el ecosistema en general.

- Según los resultados obtenidos, las corrientes de Valdesamario y Luna, ubicadas en la parte alta de la cuenca presentan un estado alterado, mientras que la corriente del río Órbigo se clasifica como moderadamente alterada. Finalmente, el tramo analizado del río Tuerto se cataloga como poco alterado. Esto está relacionado directamente con las medidas de gestión implementadas en la parte alta de la cuenca y la capacidad de la misma para recuperarse. Por lo que se evidencia la relevancia de implementar herramientas de ayuda a la decisión que contemplen el impacto que las medidas propuestas puedan llegar a tener sobre el ecosistema.
- Adicional a la evaluación de la condición actual de la cuenca, se plantearon dos escenarios de gestión, donde el primero corresponde a un escenario crítico en el que no se contemplan caudales ecológicos, y el segundo que plantea un aumento generalizado de los caudales ecológicos en comparación con los actualmente implementados en la cuenca.

A partir de la evaluación conjunta de esos escenarios con el estado actual, fue posible evaluar los cambios en la alteración hidrológica por la implementación de diferentes medidas de gestión. Dentro de esta variación se evaluó que un aumento en los caudales ecológicos no necesariamente representa una mejora en todos los indicadores de alteración, uno de los menos afectados con este aumento en los valores de caudal fue la magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para los caudales altos.

En contraposición, la magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para caudales bajos fueron los parámetros más favorecidos con el aumento de caudales.

Finalmente, se concluye que estos resultados permitieron demostrar que la metodología propuesta permite realizar una evaluación rigurosa del estado de alteración hidrológica de diferentes cuencas o corrientes, y que pueden llegar a ser una herramienta útil en los procesos de toma de decisiones de los gestores de cuencas.

6 REFERENCIAS

- Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Tajo. (2011). *Conceptos y métodos sobre el régimen de caudales ecológicos*. Infraeco.
- Andreu, J., Capilla, J., & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 269-291.
- Aramburú Paucar, J. M., & Martínez Capel, F. (2020). *Evaluación del hábitat físico y caudales ecológicos en el río Serpis, municipio de Villalonga*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ardiles, S. (2015). La planificación hidrológica en España. *RIBAGUA*.
- Arthington, A., Bhaduri, A., Bunn, S., Jackson, S., Tharme, R., Tickner, D., . . . Ward, S. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows. *Front. Environ. Sci*, 6-45.
- Bernuy Vilca, D. (2019). *Determinación del régimen de caudales ecológicos en la cuenca del río Rímac*. Lima: Universidad nacional agraria.
- Bunn, S., & Arthington, A. (2002). Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. *Environmental Management*, 492-507.
- Confederación hidrográfica del Duero. (2015). *Plan hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero*. Valladolid.
- Confederación Hidrográfica del Duero. (Diciembre de 2020). *Mirame IDEDuero*. Obtenido de Mirame IDEDuero: http://www.mirame.chduero.es/DMADuero_09/index.faces
- de Lama Pedrosa, B. (2011). *Metodología de evaluación e identificación de políticas de adaptación al cambio climático en la gestión de recursos hídricos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Demarcación Hidrográfica del Duero. (2018). *Plan Especial de Sequía*. Confederación Hidrográfica del Duero.
- Díez Hernández, J. M. (2005). Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Ingeniería y Competitividad*, 11-18.
- Fermac Ingenieros consultores. (2017). *Actualización del inventario de recursos hídricos naturales y mejora de la caracterización de las masas de agua de la cuenca del Duero*. Confederación Hidrográfica del Duero.
- Fernández, H. R. (2017). The “Ecological Status” as a Concept for Management of the Salí-Dulce Basin (Tucumán, Argentina). *Acta zoológica lilloana*, 161-167.

- González, N., Hernández, M., & Romero, C. (2013). La planificación hídrica en el contexto de la ecohidrología. *Derecho y Ciencias Sociales*, 15-23.
- Haro Monteagudo, D. (2014). *Methodology for the optimal management design of water resources system under hydrologic uncertainty*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Hernández Salinas, F. D. (2017). *Determinación del régimen de caudales mínimos en cauces del sistema de explotación del río Órbigo*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- iagua. (2013). *iagua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/restauracion/13/07/18/el-proyecto-de-mejora-del-estado-ecologico-del-rio-orbigo-elegido-como-uno-de-los-mejores-proyect>
- IPH. (2008). *Instrucción de planificación hidrológica*. Orden Ministerial, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Jamett Domínguez, G., & Rodríguez Finotti, A. (2015). Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil. *REGA*, 83-96.
- Jódar-Abellán, A., Pla, C., & Valdes-Abellan, J. (2019). Los modelos hidrológicos como sistemas de soporte en la toma de decisiones. Evolución histórica. *Congreso Nacional del Agua 2019: innovación y sostenibilidad*, 1269-1285.
- Marcellus Metobwa, O. G., Mourad, K. A., & Ribbe, L. (2018). Water Demand Simulation Using WEAP 21: A Case Study of the Mara River Basin, Kenya. *International Journal of Natural Resource Ecology and Management*, 9-18.
- Martínez Santa-María, C., & Fernández Yuste, J. (2010). *Manual de usuario IAHRIS 2.2*. Madrid: CEDEX.
- Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. (2016). *Boletín oficial del estado - Disposiciones generales*. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. (2008). *Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Ortín León, A. (2017). *Estudio de alteración hidrológica en cuencas con elevado estrés hídrico: el caso de la cuenca del río Júcar*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Pardo Martínez, E., & Gilabert Cervera, F. J. (2010). Caudales ecológicos. *En III Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT*, 96-98.
- Paredes Arquiola, J., Martínez Capel, F., Solera Solera, A., & Aguilera Vidal, V. (2011). Implementing Environmental Flows in Complex Water Resources Systems Case Study: The Duero River Basin, Spain. *River research and applications*.

- Poff, L., Allan, D., Bain, M., Karr, J., Prestegard, K., Richter, B., . . . Stromberg, J. (1997). The Natural Flow Regime. *BioSciences*, 769-784.
- Poff, L., Tharme, R., & Arthington, A. (2017). Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies. *Water for the Environment*, 2003-236.
- Puig, A., Olguín Salinas, H., & Castro, A. (2016). Alteraciones del régimen hidrológico fluvial y consideraciones sobre caudales ambientales. *Revista jurídica de Buenos Aires*, 91-123.
- Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., & Braun, D. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation biology*, 1163-1174.
- Rodríguez Benlloch, F. J. (2019). *Aplicación de índices de sostenibilidad y alteración hidrológica en la gestión de la cuenca del río Guadalquivir*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodríguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., . . . Conde, D. (2011). *Fortalecimiento del concepto de caudales ambientales como herramienta para la gestión integrada de los recursos hídricos*. Montevideo : Vida Silvestre Uruguay.
- Solera Solera , A., Paredes Arquiola, J., & Andreu Álvarez, J. (2015). *Aquatool+, Manual de usuario*. Version 1.0.
- Tharme, R. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River research and application*, 397-441.
- Tharme, R. (2004). Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies. En FAO, *Proceedings of the second international symposium on the management of large rivers for fisheries* (págs. 37-65). Phnom Penh: FAO.
- The Nature Conservancy. (2011). *Indicadores de alteración hidrológica - Manual del usuario* . Versión 7.1.
- Wallin, M., Wiederholm , T., & Johnson, R. (2003). *Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters*. CIS Working Group 2.3.
- Whittemore, R., & Beebe, J. (2000). Epa's basins model: goog science or serendipitous modelling. *Journal of the American water resources*, 493-499.