

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Modelación de los efectos del cambio climático sobre la hidrología y el hábitat fluvial en la zona no regulada del río Palancia.

Título del TFM en inglés: Modeling of the effects of climate change on the hydrology and fluvial habitat in the unregulated section of the Palancia River.

Título del TFM en Valenciano: Modelació dels efectes del canvi climàtic sobre la hidrologia i l'hàbitat fluvial en el tram no regulat del riu Palància.

Alumno: Cristina Barea Sánchez.

Tutor: Dr. Francisco Martínez Capel.

Cotutor/es: Dr. Manuel Augusto Pulido Velázquez.

Director experimental: Dr. Héctor Macián Sorribes.

Fecha de Lectura: Diciembre, 2018.

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

Actualmente, los escenarios regionales de cambio climático en la Demarcación Hidrográfica del Júcar indican un aumento en las temperaturas y una reducción general en las precipitaciones, lo que afectará en gran medida a los recursos hídricos y a la biodiversidad. En concreto, este estudio se centra en el curso alto (no regulado) del río Palancia, desde su nacimiento hasta el embalse de El Regajo.

Se analizará un conjunto de escenarios climáticos RCPs, tanto a corto (2011-2040) como a medio plazo (2041-2070), y según su precisión en el periodo de control (1971-2000) un grupo será escogido para obtener series de caudales a escala mensual, con el fin de estimar la evolución futura de los caudales circulantes en el curso alto del Palancia. Dichas series de caudales se obtendrán empleando el modelo hidrológico de Témez, que será previamente calibrado para las cuencas

hidrológicas del tramo alto del Palancia empleando datos de caudales facilitados por la Confederación Hidrográfica del Júcar y datos meteorológicos procedentes de la base de datos Spain02.

Los escenarios escogidos de régimen de caudales futuros serán utilizados para realizar una simulación del hábitat de especies acuáticas, mediante la simulación del hábitat físico. En concreto se analizará la cantidad de hábitat disponible al menos para las dos especies de peces que dominan las comunidades nativas del río Palancia, la trucha común y la bermejuela. El tramo para la simulación del hábitat se localizará en zona truchera entre los municipios de Teresa y Jérica. Los escenarios de cambio climático permitirán simular varios caudales y evaluar la cantidad de hábitat disponible para ambas especies, y estimar los cambios que supondrán los escenarios escogidos de mayor precisión.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

Actualment, els escenaris regionals de canvi climàtic en la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer indiquen un augment en les temperatures i una reducció general en les precipitacions, la qual cosa afectarà en gran manera els recursos hídrics i a la biodiversitat. En concret, aquest estudi se centra en el curs alt (no regulat) del riu Palància, des del seu naixement fins a l'embassament del Regajo.

S'analitzarà un conjunt d'escenaris climàtics RCPs, tant a curt (2011-2040) com a mitjà termini (2041-2070), i segons la seua precisió en el període de control (1971-2000) un grup serà triat per a obtindre sèries de cabals a escala mensual, amb la finalitat d'estimar l'evolució futura dels cabals circulants en el curs alt del Palància. Aquestes sèries de cabals s'obtidran emprant el model hidrològic de Témez, que serà prèviament calibrat per a les conques hidrològiques del tram alt del Palància emprant dades de cabals facilitats per la Confederació Hidrogràfica del Xúquer i dades meteorològics procedents de la base de dades Spain02.

Els escenaris triats de règim de cabals futurs seran utilitzats per a realitzar una simulació de l'hàbitat d'espècies aquàtiques, mitjançant la simulació de l'hàbitat físic. En concret s'analitzarà la quantitat d'hàbitat disponible almenys per a les dues espècies de peixos que dominen les comunitats natives del riu Palància, la truita comuna i la bermejuela. El tram per a la simulació de l'hàbitat es localitzarà en zona

truchera entre els municipis de Teresa i Xèrica. Els escenaris de canvi climàtic permetran simular diversos cabals i avaluar la quantitat d'hàbitat disponible per a amb dues espècies, i estimar els canvis que suposaran els escenaris triats de major precisió.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

Currently, the regional scenarios of climate change in the Jucar Demarcation indicate an increase in temperatures and an overall reduction in precipitation, which greatly affect water resources and biodiversity. This study focuses on the (unregulated) upper course of the river Palancia, from his birth to El Regajo reservoir.

We will analyse a set of climate scenarios RCPs, both short-term (2011-2040) and medium term (2041-2070), and according to its accuracy in the period of control (1971-2000) a group will be chosen for flows on monthly scale series, in order to estimate the future evolution of the circulating flows in the upper course of the Palancia. These series of volumes will be obtained using the hydrological model of Temez, which will be previously calibrated for the watersheds of the high section of the Palancia using data from flow provided by the Jucar Confederation and data Spain02 database from meteorological.

The selected scenarios of future flow regime will be used to perform a simulation of the habitat of aquatic species, through the simulation of the physical habitat. We will analyse the amount of habitat available at least for two fish species that dominate the native communities of the Palancia River, the trout and the russet-red. The section for the simulation of the habitat will be in trout area between the municipalities of Teresa and Jerica. Climate change scenarios will allow simulate various flow rates and evaluate the amount of habitat available for both species, and estimate the changes that will result in the selected scenarios of greater precision.

Palabras clave español (máximo 5): Cambio climático, modelación hidrológica, simulación del hábitat físico, escenarios climáticos, río Palancia.

Palabras clave valenciano (máximo 5): Canvi climàtic, modelació hidrològica, simulació de l'hàbitat físic, escenaris climàtics, riu Palància.

Palabras clave inglés (máximo 5): Climate change, hydrological modelling, physical habitat simulation, climate scenarios, Palancia River.

"Nunca conocemos el valor del agua hasta que el pozo se seca"

Thomas Fuller

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis tutores Dr. Francisco Martínez Capel y Dr. Manuel Augusto Pulido Velázquez, además de a mi director experimental Dr. Héctor Macián Sorribes por la confiada depositada en mí y la paciencia y enseñanzas que me ha brindado durante estos meses.

Del mismo modo, agradecer al Dr. Rafael Muñoz Más y a mis compañeros por la ayuda que me han ofrecido y otorgado.

Por último, y no menos importante, agradecer a mis padres y a mis hermanos todo el apoyo y palabras de ánimo que me han dedicado durante el desarrollo del curso y del presente trabajo, sobre todo en los momentos difíciles.

INDICE

1. Introducción
2. Antecedentes y especies objetivo
3. Objetivos
4. Área de estudio
5. Metodología
 - 5.1. Estudio hidrológico
 - 5.1.1. Recolección de datos
 - 5.1.2. Subcuencas analizadas
 - 5.1.2.1. Subcuenca 0. Estación de aforo 8148.
 - 5.1.2.2. Subcuenca 1. Meandro de Teresa.
 - 5.1.2.3. Subcuenca 2. Tecnoma Bejís (Teresa)
 - 5.1.3. Modelación hidrológica
 - 5.1.3.1. Modelo de Thornhwaite
 - 5.1.3.2. Modelo de Témez
 - 5.2. Simulación del hábitat físico
 - 5.2.1. Selección del tramo de estudio
 - 5.2.2. Toma de datos
 - 5.2.3. Simulación hidráulica
 - 5.2.3.1. Calibración
 - 5.2.3.2. Análisis de sensibilidad
 - 5.2.3.3. Simulación de caudales
 - 5.2.4. Simulación del hábitat
 - 5.3. Escenarios Cambio Climático
 - 5.3.1. Generación de series temporales en escenarios de cambio climático.
6. Resultados y discusión
 - 6.1. Estudio hidrológico
 - 6.1.1. Modelo de Témez
 - 6.2. Simulación del hábitat físico
 - 6.2.1. Simulación hidráulica
 - 6.2.1.1. Calibración
 - 6.2.1.2. Análisis de sensibilidad
 - 6.2.1.3. Simulación de caudales

6.2.2. Simulación del hábitat	
6.3. Escenarios de Cambio Climático	
6.3.1. Valores de precipitación y temperatura	
6.3.2. Caudales de los escenarios de cambio climático	
6.4. Recomendaciones para la adaptación al Cambio Climático en el río Palancia	
7. Conclusiones	
8. Bibliografía.	

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas UTM de los puntos estudiados.	21
Tabla 2: Áreas y porcentajes correspondientes para los puntos Spain02 en la subcuenca 0.	25
Tabla 3: Áreas y porcentajes correspondientes para los puntos Spain02 en la subcuenca 1.	26
Tabla 4: Áreas y porcentajes correspondientes para los puntos Spain02 en la subcuenca 2.	27
Tabla 5: Bondad del ajuste en la calibración del modelo de Témex.	33
Tabla 6: Categorías empleadas para los sustratos en la simulación del hábitat.	36
Tabla 7: Distancia acumulada, cotas del thalweg y lámina de agua para cada transecto.	38
Tabla 8: Condiciones de contorno modificadas.	40
Tabla 9: Escenarios RCP con su Forzamiento Radiativo. (Fuente: Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC)	45
Tabla 10: Valores de la lámina de agua modelada y error obtenidos en la calibración hidráulica del tramo de estudio.	53
Tabla 11: Láminas de agua (WSE) para los diferentes caudales simulados.	57
Tabla 12: Caudales (m ³ /s) de la simulación de escenarios de cambio climático (promedio de julio, agosto y septiembre).	58
Tabla 13: Hábitat Potencial Útil para el periodo histórico y para cada uno de los escenarios de cambio climático.	59
Tabla 14: Precipitación media (mm/mes) de la subcuenca 0 para el modelo MOHC-RACMO22E.	63
Tabla 15: Temperaturas medias de la subcuenca 0 para el modelo MOHC-RACMO22E.	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de la media anual de caudales en España para la situación RCP8.5 en el año 2080. (Fuente: Proyecto EdGE)	15
Figura 2: Mapa de localización. (Fuente: elaboración propia)	20
Figura 3: Imágenes del río Palancia en el meandro de Teresa (Fuente: elaboración propia).	22

Figura 4: Mapa de subcuencas con estaciones, polígonos de Thiessen y río Palancia. (Fuente: elaboración propia).....	24
Figura 5: Mapa de la subcuenca 0 con sus estaciones señaladas. (Fuente: elaboración propia)	24
Figura 6: Mapa de la subcuenca 1 con sus estaciones señaladas. (Fuente: elaboración propia)	26
Figura 7: Mapa de la subcuenca 2 con sus estaciones señaladas. (Fuente: elaboración propia)	27
Figura 8: Esquema conceptual del modelo de Témez. (Fuente: elaboración propia)	30
Figura 9: Vista aérea del tramo de estudio. (Fuente: Google Earth)	35
Figura 10: Vuelo fotogramétrico de alta precisión del tramo de estudio cerca de Teresa realizado por el dron. (Fuente: vídeo realizado por Carlos Puig).....	36
Figura 11: Curva de simulación WSE-Q. (Fuente: elaboración propia)	41
Figura 12: Ejemplo de la curva de idoneidad de microhábitat de profundidad para la trucha común adulta en varios ríos. (Fuente: Cálculo de caudales ambientales en las cuencas de Segre, Matarranya, Senia, afluentes del bajo Ebro en Cataluña y validación biológica en tramos significativos de la red fluvial de Cataluña. 2º Informe: Curvas de idoneidad de microhábitat y datos obtenidos en campo para la modelización 2D).....	43
Figura 13: Concentración de CO2 para los distintos escenarios RCPs. (Fuente: Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.).....	46
Figura 14: Ejemplo de corrección del sesgo. (Fuente: Multivariate Adaptive Constructed Analogs (MACA) Statistical Downscaling Method, Universidad de Idaho.)	47
Figura 15: Calibración del caudal circulante de la subcuenca 0 por el método de Témez. (Fuente: elaboración propia).....	49
Figura 16: Calibración del caudal circulante de la subcuenca 1 por el método de Témez. (Fuente: elaboración propia).....	50
Figura 17: Calibración del caudal circulante de la subcuenca 2 por el método de Témez. (Fuente: elaboración propia).....	51
Figura 18: Perfil del terreno y lámina de agua del tramo de estudio con las secciones señaladas. (Fuente: elaboración propia).....	52
Figura 19: Calibración hidráulica del tramo de estudio. (Fuente: elaboración propia).....	53
Figura 20: Mapa de calados del tramo de estudio para el caudal de calibración = 0.112 m³/s. (Fuente: elaboración propia).....	54
Figura 21: Mapa de velocidades del tramo de estudio para el caudal de calibración = 0.112m³/s. (Fuente: elaboración propia).....	54
Figura 22: Mapa de rugosidades del sustrato en el tramo de estudio empleado en la calibración del modelo. (Fuente: elaboración propia)	55
Figura 23: Error obtenido tras las variaciones de calado en el análisis de sensibilidad de las condiciones de contorno. (Fuente: elaboración propia).....	56
Figura 24: Lámina de agua en el análisis de sensibilidad de las condiciones de contorno. (Fuente: elaboración propia).....	56
Figura 25: Curva HPU en función de los caudales simulados. (Fuente: elaboración propia)	58

Figura 26: Mapa del Hábitat Potencial Útil para la trucha juvenil y adulta respectivamente con el caudal histórico. (Fuente: elaboración propia)	59
Figura 27: Hábitat Potencial Útil para las etapas juvenil y adulta respectivamente en el escenario RCP4.5. (Fuente: elaboración propia)	60
Figura 28: Hábitat Potencial Útil para las etapas juvenil y adulta respectivamente en el escenario RCP8.5. (Fuente: elaboración propia)	61
Figura 29: Comparativa de precipitaciones medias entre el periodo histórico, el periodo de control y el periodo de control corregido para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E). (Fuente: elaboración propia).....	63
Figura 30: Comparativa de precipitaciones medias del periodo de control y los RCPs 4.5 y 8.5 a corto y medio plazo para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E) (Fuente: elaboración propia).....	64
Figura 31: Comparativa de temperaturas medias entre el periodo histórico, el periodo de control y el periodo de control corregido para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E) (Fuente: elaboración propia).....	65
Figura 32: Comparativa de temperaturas medias entre el periodo histórico y los RCPs 4,5 y 8.5 a corto y medio plazo para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E) (Fuente: elaboración propia).....	66
Figura 33: Caudales modelados a partir de los datos de los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5 (Fuente: elaboración propia).....	74

1. Introducción

La ictiología es una disciplina científica que estudia los peces. Surge a raíz del interés que despertaron en el ser humano los peces que viven en los ríos, debido a su gran importancia para él desde el punto de vista alimenticio como el histórico-cultural (Alcaraz-Hernández, 2011).

Las diferentes alteraciones que sufre el medio ambiente y el efecto del cambio climático están afectando a los ecosistemas en los que habitan estas especies y están provocando que sus poblaciones se estén viendo cada vez más reducidas. Dentro de estas variaciones en el medio natural destaca la actividad antropogénica, causando la contaminación de las aguas, la destrucción del hábitat natural, modificaciones en el régimen natural de los caudales de los ríos, etc. Una de las consecuencias de esta variación en el régimen de caudales es la introducción y proliferación de las especies invasoras, las cuales se están viendo favorecidas. (Marín Vivanco, 2008).

En la Península Ibérica, una de las especies de peces fluviales que destaca por su gran interés es la trucha común (*Salmo trutta*. Linnaeus, 1758) debido a su gran plasticidad ecológica.

Además de la trucha común, hay que tener en cuenta la presencia de especies de macroinvertebrados bentónicos, como las que pertenecen a los órdenes Trichoptera, Ephemeroptera y Plecoptera, que viven en el sustrato del lecho fluvial, puesto que tienen gran importancia a nivel ecológico al considerarse como importantes indicadores de la calidad del agua por su sensibilidad a la contaminación y perturbaciones en las aguas (Alonso & Camargo, 2005) así como a los cambios producidos por la actividad antropogénica, por ejemplo, la degradación del hábitat, el cambio de uso de suelo o la alteración hidrológica (Almeida , Alcaraz-Hernández, Merciai, Benejam, & García-Berthou, 2017).

Además de todo esto, la trucha común y los macroinvertebrados que se encuentran en el ecosistema fluvial se ven afectadas por las continuas variaciones que se producen sobre las características del hábitat fluvial (velocidad del agua, calado y anchura del cauce, alteración en la estructura y composición del sustrato). Ejemplos típicos de estas alteraciones son la construcción de presas o las

modificaciones que sufren las orillas de los cauces, ya sea por deforestación o por oscilaciones del caudal. Este último, se verá muy afectado por las alteraciones climáticas.

A parte de las alteraciones provocadas por la actividad antropogénica, hay que tener en cuenta el efecto del cambio climático que se define como “*el resultado de causas naturales, así como de la acción humana, y provoca variaciones en los parámetros climáticos (temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc.)*” (Ministerio de Agricultura, 2018). Estos cambios están generando conflictos entre las necesidades de los seres humanos y la conservación de las especies acuáticas.

El cambio global está generando que numerosas especies sensibles a la temperatura se estén viendo afectadas tanto en la distribución de sus hábitats, así como en la abundancia de individuos. Esto es debido a que las condiciones de agua fresca empeorarán por culpa de las situaciones que se proyectan en un futuro, donde se producen aumentos de las temperaturas y sequías prolongadas (Almodóvar, Nicola, Ayllón, & Benigno, 2011).

Dicho lo anterior, hay que destacar a la región mediterránea, la cual se verá afectada notablemente por este cambio en el clima al tratarse de un área vulnerable a las variaciones climáticas y con una disponibilidad de agua cada vez menor (Almodóvar, Nicola, Ayllón, & Benigno, 2011). La figura 1 ilustra la variación esperada en caudales de río Ibéricos para el escenario más desfavorable (RCP8.5) a largo plazo.

En las cuencas y hábitats fluviales de la Demarcación Hidrológica del Júcar, más concretamente en el sistema del río Palancia, localización del presente trabajo, el efecto del cambio climático está provocando que los ecosistemas naturales que recogen a las comunidades nativas, como la trucha común, estén sufriendo variaciones significativas, como el aumento de temperatura de sus aguas o la variación en los regímenes de caudales debido a la alteración de la precipitación. Junto a estas variaciones, el comportamiento de las especies también se está viendo afectado.

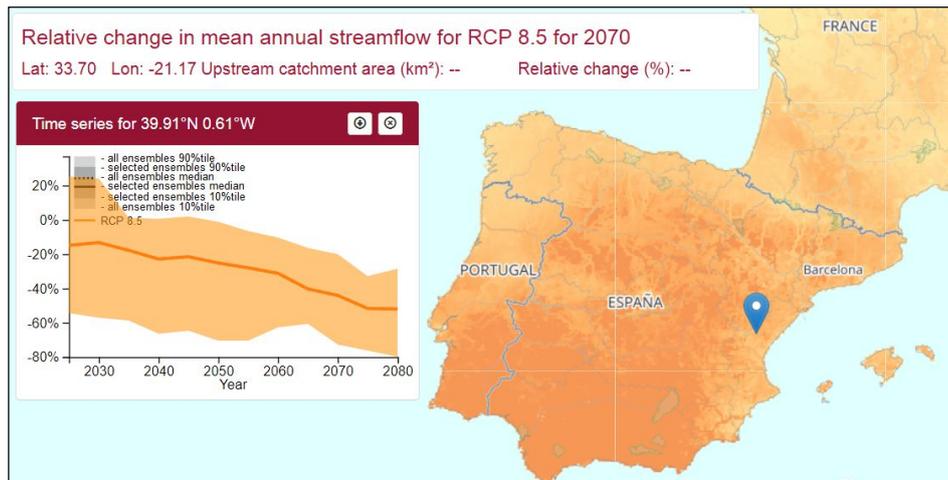


Figura 1: Mapa de la media anual de caudales en España para la situación RCP8.5 en el año 2080. (Fuente: Proyecto EdGE)

En definitiva, si se desean identificar los efectos negativos que provocan los diferentes impactos, ya sean fruto del cambio climático o debido a la acción humana, sobre los ecosistemas fluviales, donde se incluyen las diferentes especies y el régimen de caudales, es conveniente estudiar diferentes escenarios de cambio climático actuales y futuros (Muñoz-Mas, López-Nicolás, Martínez-Capel, & Pulido-Velázquez, 2015) así como realizar modelos hidrológicos, hidráulicos y de idoneidad del hábitat. Todos estos análisis se han elaborado en este trabajo.

2. Antecedentes y especies objetivo

La especie objeto de este trabajo es la trucha común (*Salmo trutta*. Linnaeus, 1758), la cual pertenece a la familia de los salmónidos. Su morfología depende de la localización y el hábitat, distinguiendo dos formas de trucha: la migradora o la trucha residente del ecosistema fluvial, la cual, tal y como indica su nombre, realiza todas sus actividades del ciclo vital en los ríos y será este tipo de trucha la que interese en este trabajo. Su emplazamiento original son los ríos de Europa, norte de África y Próximo Oriente, ausentándose en el Mediterráneo. A pesar de todo ello, diferentes causas (como el cambio climático o la pesca deportiva) han provocado que esta especie esté distribuida por todo el mundo (Almodóvar, 2001).

La trucha común se encuentra en cauces con aguas frías (Santiago, y otros, 2016), bien oxigenadas y limpias, lo que la convierte en una buena especie indicadora de la calidad de las aguas. Además, es sensible a la contaminación y a las transformaciones que puedan producirse en el cauce y en las riberas fluviales. Por todo ello, la trucha común se puede localizar en las cabeceras y en zonas altas y bien conservadas de casi todos los ríos de la Península Ibérica. (Almodóvar, 2001).

Más concretamente, en la Comunidad Valenciana los únicos hábitats naturales dónde se pueden encontrar poblaciones de trucha común de linajes genéticos ibéricos son los ríos Villahermosa, Vallanca, Ebrón y Palancia, localizándose en este último río el mejor tramo de alevines de trucha de la Comunidad Valenciana (Marín Vivanco, 2008) y, es al mismo tiempo, donde se centra el presente estudio.

Se han realizado numerosos estudios donde se han analizado los requerimientos de hábitat de la trucha común (*Salmo trutta*. Linnaeus, 1758.). La literatura científica mundial considera a la trucha común “*como una de las especies más estudiadas gracias a la alta plasticidad ecológica que presenta, lo que ha permitido que esta especie esté ampliamente distribuida por el mundo.*” (MacCrimmon, Marshall, & Gots, 1970).

Estudios experimentales señalan la importancia de conocer los indicadores decisivos medioambientales y los procesos bióticos con el objetivo de limitar sus impactos y realizar labores de conservación de estas especies (Muñoz-Mas, López-Nicolás, Martínez-Capel, & Pulido-Velázquez, 2015). La temperatura, por ejemplo, es

un indicador muy importante para los peces y otros organismos acuáticos, al tener una gran influencia en el posible éxito biológico de éstas, al afectar, por ejemplo, en las relaciones ecológicas, el crecimiento o en la energía prevista por el pez (Santiago, y otros, 2016). Siguiendo con el ejemplo anterior, en la Península Ibérica, la distribución de la trucha común está altamente controlada por la temperatura del agua. Existen, junto a la temperatura, otros indicadores igual de importantes del estado ecológico como la vegetación riparia, la presencia o ausencia de los macroinvertebrados y las diferentes especies piscícolas (Muñoz-Mas, López-Nicolás, Martínez-Capel, & Pulido-Velázquez, 2015).

Estudios como el de Alcaraz-Hernández *et al.* muestran como las perturbaciones mencionadas anteriormente, han provocado que la abundancia de las poblaciones de trucha común haya disminuido progresivamente. Esta especie requiere para sobrevivir un calado mínimo de agua, que en el caso de los ríos mediterráneos se ve alterado en época estival, al reducirse éste por el aumento de la anchura para un caudal dado, lo que dificulta su presencia en esta época del año. Además, el sustrato preferente para que la trucha común pueda realizar bien la freza está compuesto por cantos rodados y gravas, y éste determina la productividad de un río y se considera como un factor limitante en la población de los salmónidos.

Siguiendo con el punto anterior, otra característica necesaria para la trucha común está relacionada con la torrencialidad de los caudales, así, por ejemplo, ésta preferirá mesohábitats con caudales lentos que con caudales rápidos. Esto es así porque, aunque cuando se producen caudales lentos la disponibilidad media de los recursos alimenticios es menor que en caudales rápidos, éste ofrece mejor refugio en caso de producirse algún tipo de alteración, como periodos de sequía, al disponer de un calado apto para la especie (García de Jalón, 1992).

Otra perturbación descrita anteriormente es el efecto que tiene el cambio climático de modificar (aumentando o disminuyendo) la disponibilidad del hábitat de estas especies (Santiago, y otros, 2016). Otros estudios exponen que las poblaciones de especies sensibles presentes en los ríos de la región mediterránea se verán reducidas y extintas a causa del cambio climático, el cual provocará reducciones de caudal y sequías largas. Hay que mencionar que estas especies son consideradas de gran interés a la hora de elaborar estudios sobre el cambio climático (Muñoz-Mas, López-Nicolás, Martínez-Capel, & Pulido-Velázquez, 2015).

Por todo lo comentado anteriormente, es conveniente la realización de estudios que permitan conocer cómo en los hábitats fluviales de la Demarcación Hidrográfica del Júcar las diferentes perturbaciones antrópicas y del cambio climático está afectando a las poblaciones de estas especies y a la alteración de los regímenes de caudales. Para ello el uso de modelos hidráulicos y modelos de idoneidad del hábitat ayudarán a decidir sobre la gestión del agua.

3. Objetivos

El objetivo del siguiente trabajo es la modelación de los efectos del cambio climático sobre la hidrología y el hábitat fluvial en la zona no regulada del río Palancia con el fin de conservar el hábitat para especies comunes nativas como la trucha común (*Salmo trutta*. Linnaeus, 1758.).

Concretamente, se seleccionaron y analizaron un conjunto de escenarios climáticos RCPs, a corto (2011-2040) y a medio plazo (2041-2070), con el fin de estimar la evolución de los caudales circulantes en el curso alto del río Palancia.

Para lograr estos objetivos se han completado las siguientes fases:

- Un estudio hidrológico, en el que se incluye una modelación, calibración y validación hidrológica mediante el método de Thornhwaite (Thornhwaite, 1948) y el modelo de Témez (Témez, 1977).
- Un estudio de los escenarios climáticos RCPs para estimar la evolución futura de los caudales, mediante el modelo de Témez, y la comparación entre ellos.
- Una simulación del hábitat físico mediante una simulación hidráulica y del hábitat.
- Una simulación del hábitat físico bajo los caudales más limitantes para el hábitat en escenarios de Cambio Climático.

4. Área de estudio

El área de estudio se encuentra situado en la cuenca del río Palancia a su paso por el interior de la comarca del Alto Palancia, en la provincia de Castellón. Esta zona pertenece al sistema de explotación Palancia-Los Valles, el cual pertenece a la Demarcación Hidrológica del Júcar y la superficie total que abarca este sistema es de 1.086 km² (Júcar, 2015). Su localización y principales localidades junto a la zona de estudio se muestran en la figura 2.

El río Palancia nace en la sierra del Toro (provincia de Castellón) a 1618 m de altitud y desemboca en el término municipal de Sagunto. La longitud del río es, aproximadamente, de 85 km, el cual durante su curso recoge los aportes de diferentes fuentes y manantiales. A pesar de su extensión, las poblaciones de truchas más estables se encuentran localizadas en los primeros 40 km. Su cuenca está formada por rocas carbonatadas lo que influye directamente en la naturaleza fisicoquímica de sus aguas, otorgándoles dureza y un carácter básico (Alcaraz Hernández, Martínez Capel, Peredo, & Hernández Mascarell, 2007).



Figura 2: Mapa de localización. (Fuente: elaboración propia)

El clima presente en la zona de estudio es característico del clima mediterráneo continental, el cual se compone de temperaturas extremas, donde los inviernos son muy fríos y los veranos son cálidos y secos, y donde las precipitaciones son escasas, pero tienen lugar de forma más o menos regular (Jorge Monterde, 2017).

La vegetación de ribera que se puede encontrar en esta zona está condicionada por la presencia de agua en el suelo. Se puede encontrar vegetación no arbolada y arbolada, esta última en forma de bosques conviviendo con pastizales, juncales y cañaverales. (Costa, 1999).

La calidad del agua, en general en todos los tramos, se considera buena gracias a la poca presencia e incluso ausencia de vertidos, a pesar de existir una planta embotelladora de aguas minerales aguas arriba del municipio de Bejís, en la fuente conocida como "Los Clóticos".

Concretamente, este estudio se ha realizado en cuatro puntos localizados a lo largo del río Palancia, aproximadamente entre los términos municipales de Bejís y Jérica, ubicados en la cabecera del río (ver tabla 1). El área total de la cuenca es de 329 km² aproximadamente y la orografía de la zona "es muy abrupta con fuertes pendientes". (Marín Vivanco, 2008).

Tabla 1: Coordenadas UTM de los puntos estudiados.

Punto	Coordenadas		Localización
	X	Y	
Las escuelas (PA-1)	694732	4421238	Las escuelas
Modelo Tecnomá Bejís (Teresa)	699178	4418697	Aprox. a 1.4 km del cauce aguas arriba de Teresa
Meandro de Teresa	702046	4419019	Meandro de Teresa, aprox. a 2.7 km del cauce aguas abajo de Teresa.
Estación de aforo 8148-Río Palancia Jérica.	709863	4418891	Estación de aforo.

A pesar de tener los cuatro puntos que se muestran mostrados en la tabla anterior, el área de estudio se ha dividido en tres subcuencas, las cuales han sido analizadas individualmente y son:

- "Modelo Tecnomá Bejís (Teresa)".
- "Meandro de Teresa".
- "Estación de aforo 8148-Río Palancia Jérica".



Figura 3: Imágenes del río Palancia en el meandro de Teresa (Fuente: elaboración propia).

5. Metodología

5.1. Estudio hidrológico

El estudio hidrológico llevado a cabo en este trabajo pretende conocer la serie de caudales a escala mensual de las subcuencas anteriores y de este modo, poder realizar una comparación con los caudales de series futuras de los escenarios climáticos RCPs.

Para este estudio, se realiza la modelación de la serie de caudales mediante el modelo de Témez.

5.1.1. Recolección de datos

Los datos de las aportaciones acumuladas en régimen natural que se proporcionaron fueron del modelo PATRICAL. Para trabajar con ellos, la información de PATRICAL se ha tratado para ajustarla a las subcuencas del caso de estudio. El periodo de estudio comenzó en el año 1971 y esta aportación desacumulada fue el caudal observado dentro del modelo de Témez.

A partir del proyecto “Spain02”, el cual es una cuadrícula rotada de 0.11° que permite observar para cada subcuenca analizada en este estudio el grado de influencia de cada celda de la cuadrícula de Spain (Marino, 2008-2011) se obtuvieron los datos históricos climáticos de precipitación y temperatura medias usándose la herramienta Matlab®. En este caso, la cuenca se ha dividido en seis subzonas cada una con su punto Spain02 respectivo. (Figura 4)

Posteriormente, se trabaja con el programa de información geográfica ArcMap®, con el cual se obtuvo para cada una de las subcuencas la ponderación de los datos climáticos mediante el empleo de los pesos de Thiessen.

Tras la obtención de dichos datos fue posible comenzar a realizar el modelo hidrológico de la cuenca.

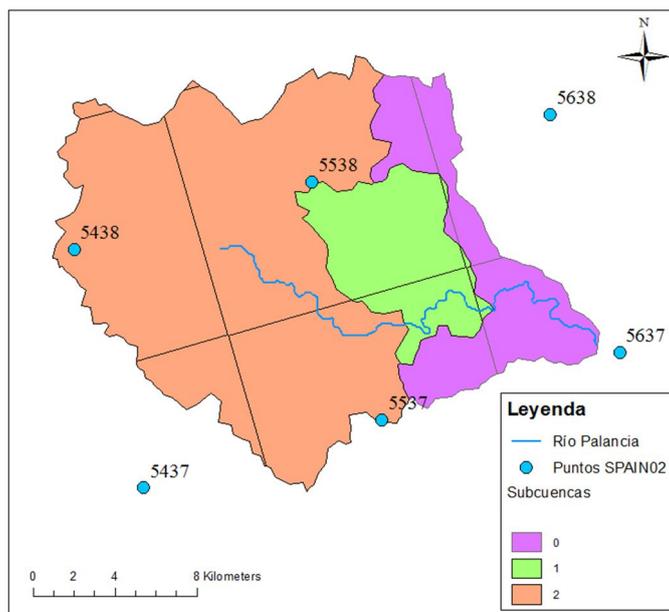


Figura 4: Mapa de subcuencas con estaciones, polígonos de Thiessen y río Palancia. (Fuente: elaboración propia)

5.1.2. Subcuencas analizadas.

5.1.2.1 Subcuenca 0. Estación de aforo 8148.

Tal como se ha comentado en el apartado anterior, la cuenca ha sido dividida en tres subcuencas. A continuación, se lleva a cabo el análisis de la subcuenca 0, que corresponde al punto localizado en la estación de aforo 8148-Jérica.

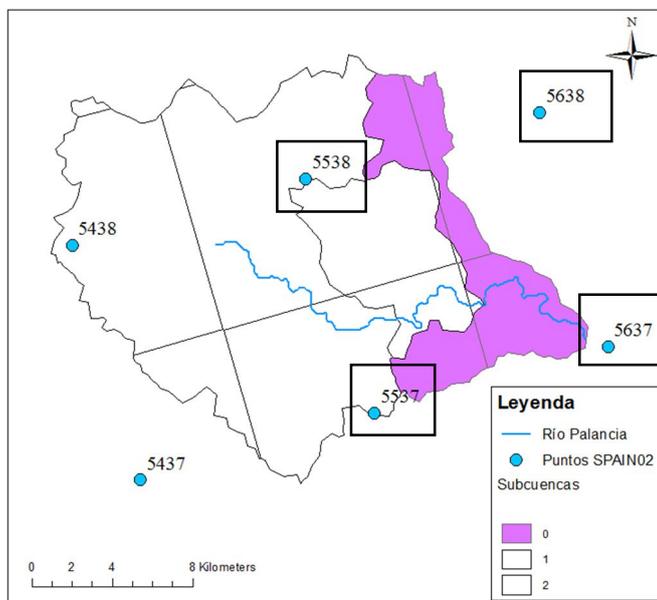


Figura 5: Mapa de la subcuenca 0 con sus estaciones señaladas. (Fuente: elaboración propia)

En la figura anterior se observa la subcuenca 0, representada de color morado, con las estaciones del proyecto “Spain02” más cercanas e influyentes señaladas. Las etiquetas de estas estaciones coinciden con las coordenadas de los puntos y corresponden a: 5537, 5538, 5637 y 5638.

La subcuenca 0 se superpuso con la malla de Spain02 para calcular los pesos de Thiessen, en los cuales se obtuvo el valor del área correspondiente a cada uno de ellos. De este modo fue posible calcular el porcentaje de área que corresponde a cada punto. El área total de esta subcuenca es de 58.07 km² y el sumatorio de los porcentajes calculados tendrá como resultado el 100%.

Tabla 2: Áreas y porcentajes correspondientes para los puntos Spain02 en la subcuenca 0.

Puntos Spain	Áreas	Pesos (%)
55-38	11.69	20.13
56-37	11.85	20.41
55-37	12.16	20.94
56-37	22.37	38.52
Total	58.07	100.00

Para calcular la precipitación se procedió a realizar una media aritmética ponderada de cada uno de los cuatro puntos “Spain02” más cercanos empleando los pesos de Thiessen, calculados anteriormente.

La fórmula correspondería a:

$$\text{Precipitación media ponderada} = \sum \left(\text{precipitación punto Spain} \times \frac{\text{peso punto Spain}}{100} \right)$$

Del mismo modo se llevó a cabo la temperatura media ponderada, para poder emplearla en el modelo de Thornthwaite, explicado más adelante.

5.1.2.2. Subcuenca 1. Meandro de Teresa.

La subcuenca 1 corresponde al punto localizado en el meandro de Teresa, aproximadamente a 2.7 km del cauce aguas abajo del municipio de Teresa.

En la siguiente figura está representada de color verde y corresponde con la subcuenca más pequeña con un área de 49.7 km². Comparte con la subcuenca 0 las mismas estaciones: 5537, 5538, 5637 y 5638.

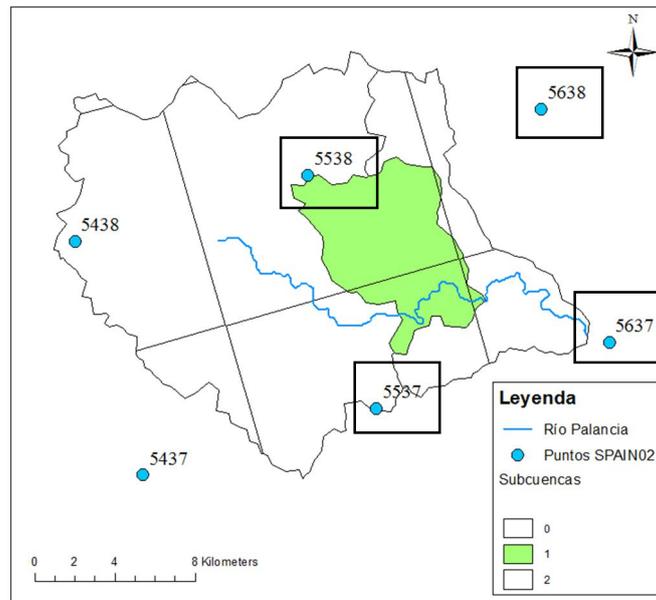


Figura 6: Mapa de la subcuenca 1 con sus estaciones señaladas. (Fuente: elaboración propia)

Los pesos de las áreas no coinciden con los mostrados en el apartado anterior. En este caso son:

Tabla 3: Áreas y porcentajes correspondientes para los puntos Spain02 en la subcuenca 1

Puntos Spain	Áreas	Pesos (%)
55-38	35.03	70.48
56-37	0.37	0.74
55-37	13.50	27.16
56-37	0.80	1.61
Total	49.70	100.00

El cálculo de la precipitación y de la temperatura se realizó del mismo modo que en la subcuenca 0.

5.1.2.3 Subcuenca 2. Tecnomá Bejís (Teresa).

Por último, la subcuenca 2 corresponde al punto del modelo Tecnomá Bejís, localizado aproximadamente a 1.4 km del cauce aguas arriba del municipio de Teresa.

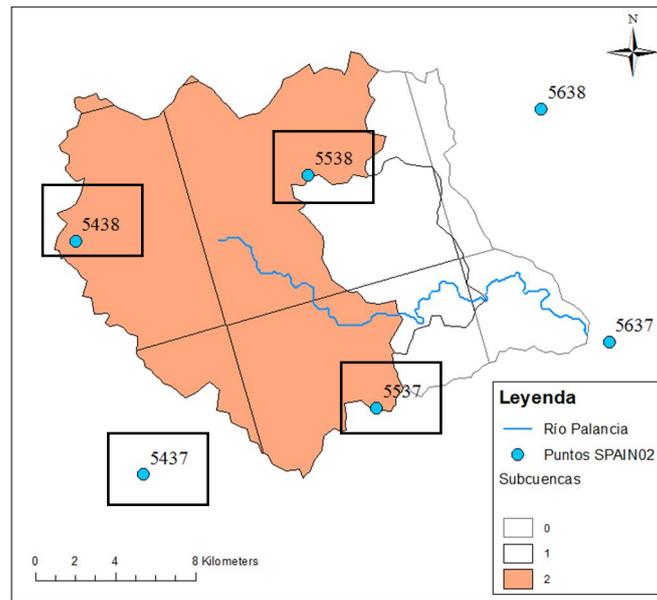


Figura 7: Mapa de la subcuenca 2 con sus estaciones señaladas. (Fuente: elaboración propia)

En la figura anterior se muestra representada con el color naranja y, a diferencia de las dos subcuencas anteriores, la subcuenca 2 no comparte todas las estaciones con éstas. Las estaciones que influyen a esta subcuenca son: 5437, 5438, 5537 y 5538.

Su área es de 221.22 km², siendo esta subcuenca la más grande de las tres. Los pesos de las áreas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4: Áreas y porcentajes correspondientes para los puntos Spain02 en la subcuenca 2.

Puntos Spain	Áreas	Pesos (%)
54-38	69.06	31.22
54-37	14.79	6.68
55-38	85.58	38.68
55-37	51.79	23.41
Total	221.22	100.00

Los cálculos para obtener la precipitación y la temperatura en esta subcuenca fueron los mismos que han sido empleados en la subcuenca 0 y la subcuenca 1.

5.1.3. Modelación hidrológica.

La modelación hidrológica consiste en la reproducción del funcionamiento de una cuenca hidrográfica con el fin de analizar la frecuencia de las posibles crecidas que se puedan producir en esa cuenca. Busca la simplificación de ésta y trabaja con un conjunto de ecuaciones, parámetros y variables de estado.

Dentro de las fases de la modelación hidrológica de una cuenca están la calibración y la validación, imprescindibles para el ajuste de la misma, en caso de que sea una cuenca monitorizada. La calibración trabaja con datos históricos y permite estimar unos parámetros de manera que las variables de estado observadas y las simuladas son comparadas; y la validación permite realizar un análisis del modelo en escenarios distintos al de la calibración.

Para el estudio hidrológico que se realizó se trabajó con el modelo de Témez, y se ha empleado el método de Thornhwaite para obtener un input que este modelo necesita (ETP) partir de otro que tenemos (T^a). Este modelo permite conocer la serie de aportaciones en escenarios futuros.

5.1.3.1. Modelo de Thornhwaite.

Antes de comenzar con el modelo de Thornhwaite, habrá que explicar qué es la evapotranspiración potencial (ETP) para comprender un poco mejor la variable esencial que emplea y con la que trabaja dicho método. Dicho esto, la evapotranspiración potencial (ETP) se define como *“la cantidad de agua que es devuelta a la atmósfera en forma de vapor desde un suelo completamente cubierto de vegetación y con un aporte continuo de agua y por tanto sin limitaciones de humedad”* (Thornhwaite, 1944). De modo que es la suma de dos fenómenos: la evaporación y la transpiración.

Este modelo, simple y normalmente aplicado en la hidrología, permite calcular la evapotranspiración potencial basándose en la resistencia aerodinámica y dependiendo de una única variable: la temperatura media mensual. Sin embargo, puede dar lugar a subestimaciones de la ETP en climas áridos y semiáridos.

El cálculo de la ETP se ve afectado, además de la variable mencionada anteriormente, por una corrección sobre la latitud, ya que ésta influye en el número de días y de horas de sol.

La fórmula de Thornhwaite es la siguiente:

$$ETP \text{ (mm/mes)} = 16 \times \left(\frac{10 \times T_i}{I} \right)^a \times f \times \frac{d_i}{30}$$

Donde:

- T_i : media de la temperatura del mes i ($^{\circ}\text{C}$)
- I : índice térmico anual. Este índice se calcula como:

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

- a : $f(I)$, cuyo valor se calcula:

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1792 \times 10^{-5} \times I + 0.49239$$

Donde:

- o f : duración de la luz solar en el mes i , dependiendo de la latitud y del mes.
- o d_i : número de días del mes i

En el siguiente trabajo, se ha calculado la ETP mensualmente para la serie de datos comprendidos entre enero de 1971 hasta marzo del 2008. Esto es así por los datos de aportación acumulada, y posteriormente desacumulada, de la red fluvial (Hm^3) en régimen natural proporcionados por el modelo Patrical.

Para el cálculo de la duración solar, necesaria en la fórmula de Thornhwaite, se ha empleado una tabla proporcionada por la Universidad Politécnica de Madrid. En dicha tabla se encuentra el número de horas de sol máximas (h/día) para el hemisferio Norte según las latitudes y mes del año en los que se produzca el estudio requerido.

En este estudio se calcula la ETP mensualmente y no diariamente, por lo que la tabla mencionada anteriormente es ideal, ya que la información que proporciona está calculada para el día 15 de cada mes al ser, aproximadamente, la mitad del mes. Por otro lado, se interpolarán los valores de latitudes de la tabla para coincidir exactamente con la latitud de los puntos del actual estudio.

5.1.3.2. Modelo de Témez

Para la modelación hidrológica precipitación-escorrentía, se empleó el modelo de Témez. Este modelo explica el ciclo hidrológico del agua y tiene en cuenta diferentes datos de entrada y de salida.

El modelo es pseudo-distribuido, es decir, la cuenca se ha dividido en tres subcuencas cada una con un desagüe que, seguidamente van a parar a un desagüe final común. Estas tres subcuencas tienen similitud climática debido a su cercanía y tamaño. El intervalo de tiempo que se ha escogido, al igual que en el modelo de Thornhwaite, es la escala mensual.

A continuación, se muestra un pequeño esquema conceptual del ciclo hidrológico del agua según el modelo de Témez, a escala mensual, para facilitar la comprensión de este.

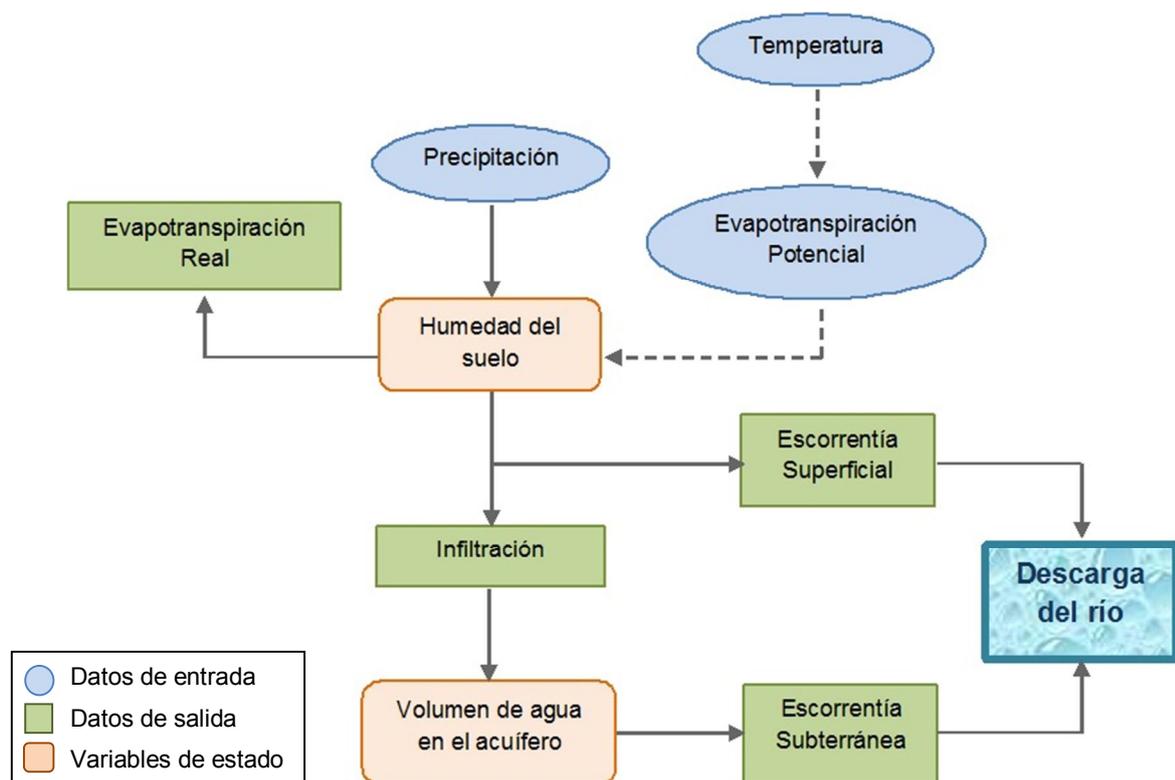


Figura 8: Esquema conceptual del modelo de Témez. (Fuente: elaboración propia)

En el anterior esquema se distinguen los datos de entrada que corresponden a:

- La precipitación (P), obtenida gracias a los datos que proporciona el proyecto "Spain02". Debido a que la cuenca está dividida en tres subcuencas, para poder trabajar con estos datos se tuvo que realizar una media ponderada de cada uno de los cuatro puntos del proyecto "Spain02" más cercanos a cada subcuenca.
- La evapotranspiración potencial (ETP), calculada anteriormente por el modelo de Thornhwaite gracias a los datos de temperatura que provienen del proyecto "Spain02" y fueron trabajados del mismo modo que los datos de precipitación.

Por otro lado, los datos de salida son: la evapotranspiración real (ETR), la infiltración (I) y recarga del acuífero, las escorrentías superficiales (Esc.Sup) y subterráneas (Esc.Subt) y la descarga del río (Qmod).

Y, por último, las variables de estado que son: la humedad inicial del suelo (H_i) y el volumen de agua en el acuífero (V inicial).

A parte de los datos anteriores, también existen los parámetros del modelo y son:

- La capacidad máxima del almacenamiento de humedad del suelo (H_{max}), medida en mm.
- El coeficiente de escorrentía, que es adimensional (C) y cuyos valores se encuentran entre 0 y 1.
- La infiltración máxima (I_{max}), que separa las escorrentías superficiales y subterráneas. Se mide como mm/mes.
- El coeficiente de descarga del acuífero (α) que regula el drenaje subterráneo. Este coeficiente se mide como mes^{-1} .

Los dos primeros parámetros, H_{max} y C, se encargan de regular el almacenamiento.

Para el cálculo del modelo de Témez se realizaron una serie de ecuaciones, cuyo proceso de cálculo es el siguiente:

1. Generación de escorrentía:

- Obtención del umbral de escorrentía (P_{oi}) y las pérdidas(δ):

$$P_{oi} \text{ (mm)} = C \times (H_{max} - H_{i-1})$$

$$\delta_i = H_{\max} - H_{i-1} + ETP_i$$

Donde:

- C: coeficiente de inicio excedente.
- Excedente de lluvia T (min):

Si:

$$P_i \leq P_o \rightarrow T_i = 0$$

$$P_i > P_o \rightarrow \frac{(P_i - P_o)^2}{P_i + \delta - 2P_o}$$

2. Almacenamiento superficial e infiltración:

- ETR y Humedad del suelo, H_i (mm):

$$ETR = \text{Min} (ETP, H_{i-1} + P_i - T_i)$$

$$H_i = \text{Max} (0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETR)$$

- Infiltración, I (mm):

$$I_i = I_{\max} \times \frac{T_i}{(T_i + I_{\max})}$$

- Escorrentía superficial, Esc.Sup (Hm^3):

$$\text{Esc. Sup} = (T_i - I_i) \times S$$

Donde:

- S: superficie de la cuenca (km^2)

3. Modelo subterráneo:

- Recarga del acuífero (R):

$$R_i = I_i \times S$$

Donde:

- S: superficie de la cuenca (km^2)

- Volumen restante en el acuífero, V_i (Hm^3):

$$V_i = V_{i-1} \times e^{-\alpha \times t} + \frac{R_i}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \times t})$$

- Escorrentía subterránea, Esc.Subt (Hm^3):

$$\text{Esc. Subt} = V_{i-1} - V_i + R_i$$

- Descarga total, Q_{mod} (Hm^3/mes):

$$Q_{\text{mod}} = \text{Esc. Sup}_i + \text{Esc. Subt}_i$$

Por otro lado, se dispone de los datos de caudal observado que corresponde a la aportación desaccumulada de la red fluvial en régimen natural.

Una vez se calcularon todas las ecuaciones a través de una hoja de cálculo Excel® que permitió conocer la descarga total, fue posible realizar una comparación con los datos de caudal observados mencionados anteriormente.

Así pues, se procedió a la calibración y validación del modelo de Témez. La calibración se realiza para comprobar que los caudales obtenidos mediante el modelo se ajustan lo más posible y de la manera más correcta a los valores de caudales observados, mientras que la validación se realiza para corroborar que el modelo funciona adecuadamente y para ello se emplean datos de caudales no utilizados en la calibración. El periodo de años elegido para la calibración abarca desde el 1971 hasta el 2002, y para la validación desde el 2003 hasta el 2007. Para ello se empleó el índice de Nash-Sutcliffe.

El índice de Nash es un criterio de eficiencia muy utilizado en la hidrología y su fórmula es:

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2}$$

Donde:

- Q_0^t : descargas observadas en tiempo t.
- Q_m^t : descargas modeladas en tiempo t.
- $\overline{Q_0}$: media de las descargas observadas.

El índice de Nash varía de $-\infty$ a 1. Un valor negativo indica que la media aritmética de los datos es mejor que el modelo, mientras que un valor positivo indica lo contrario, siendo mejor cuanto más se acerca a 1. Existen diferentes valores que indicaran la bondad del ajuste y se muestran en la siguiente tabla (Tomás Juan, 2015).

Tabla 5: Bondad del ajuste en la calibración del modelo de Témez.

Índice Nash	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Además, es necesario calcular la media del error cuadrático (MSE) entre el caudal aforado y el simulado, para ello se empleó la siguiente fórmula:

$$MSE = \frac{\sum(Q_m - Q_o)^2}{N}$$

Donde:

- Q_m : descargas modeladas
- Q_o : descargas observadas
- N: número de descargas

Para la calibración maximizando el índice de Nash se optimizan los cuatro parámetros de estado (H_{max} , C, I_{max} y α) empleando la función interna del programa de cálculo Excel® llamada *Solver*. Esta función emplea el llamado GRG Non Linear Solving algorithm (Lasdon, Waren, Jain, & Ratner, 1978), que modifica los parámetros iniciales y minimiza el valor de MSE para obtener el valor de Nash más próximo a 1. Como restricción se puso:

$$H_{max}, C, I_{max} \text{ y } \alpha \geq 0.001$$

5.2. Simulación del hábitat físico

La simulación del hábitat físico (Bovee, y otros, 1998), requerida por la Instrucción de Planificación Hidrológica de España para la determinación de caudales ecológicos, es la combinación de la simulación hidráulica y la simulación de idoneidad del hábitat y permite conocer, para el tramo estudiado, la relación entre el caudal circulante y el hábitat disponible.

Por un lado, la modelación hidráulica permite conocer las alteraciones espaciales y temporales que tienen lugar en los microhábitats. Y, por otro lado, el modelo de idoneidad del hábitat permite valorar la idoneidad que tienen para una o varias especies los diferentes microhábitats disponibles en el río. El microhábitat es el hábitat que tiene una serie de variables del hábitat físico (rugosidad del sustrato, velocidad y calado del agua) que son vitales para la especie piscícola. Los resultados se resumen en los índices generales de hábitat, como el denominado y más utilizado Hábitat Potencial Útil (HPU).

5.2.1. Selección del tramo de estudio

El tramo elegido para realizar la simulación del hábitat físico se encuentra situado en el meandro de Teresa, aproximadamente a 2.7 km del cauce aguas abajo del municipio de Teresa, y su longitud es aproximadamente de 200 m. Entre las subcuencas analizadas hidrológicamente, se encuentra dentro de la subcuenca 1.

Se ha elegido este tramo porque a poca distancia aguas arriba, aguas abajo del término de Teresa, se encuentra el azud de la Acequia Real de Sagunto, que toma el agua para dicha acequia y deja un tramo del río Palancia seco la mayor parte del año, a pesar de ser un tramo truchero. Por esta razón en dicha zona, derivada por la acequia, se consideró importante localizar el tramo de estudio. Esta parte de la acequia se construyó a causa de las pérdidas naturales al acuífero que sufría el río Palancia, el cual perdía casi la totalidad de su caudal (Sagunt, 2018). En la figura 9 se muestra la localización del tramo de estudio.



Figura 9: Vista aérea del tramo de estudio. (Fuente: Google Earth)

5.2.2. Toma de datos

Para obtener las condiciones hidráulicas (calado, velocidad media y tipo de sustrato) se siguieron los protocolos de estudios previos (Muñoz-Mas, y otros, 2016). Para el calado se empleó una vara graduada. Para obtener el modelo digital terrestre del cauce, mientras estaba seco, y además determinar el sustrato y la vegetación. Se empleó un dron que realizó un vuelo fotogramétrico de detalle y un miembro del equipo de investigación realizó la restitución del vuelo para obtener el modelo digital del terreno, mediante el programa Agisoft Photoscan Pro.

Respecto al tipo de sustrato y porcentaje de cada uno de ellos, se realizó una clasificación y una estimación de manera visual siguiendo la simplificación de la escala empleada por American Geophysical Union. Además, para realizar los modelos de idoneidad del hábitat, el índice del sustrato se resumió en unas categorías, cuyos valores se encuentran entre 0 (limo) y 8 (roca madre), mediante la suma ponderada de sus porcentajes (Mouton, Alcaraz-Hernández, De Baets, Goethals, & Martínez-Capel, 2011)

Tabla 6: Categorías empleadas para los sustratos en la simulación del hábitat.

Tipo de sustrato y vegetación	Categoría
Limo	0
Vegetación	1
Arcila	2
Arena	3
Gravilla	4
Grava	5
Cantos rodados	6
Bloques y grandes bloques	7
Roca madre	8



Figura 10: Vuelo fotogramétrico de alta precisión del tramo de estudio cerca de Teresa realizado por el dron. (Fuente: vídeo realizado por Carlos Puig)

5.2.3. Simulación hidráulica.

Una vez se recopilaron todos los datos necesarios, se dispuso a realizar la simulación hidráulica a través de la herramienta de simulación hidráulica River2D (Steffler & Blackburn 2002), y el software ArcGis®.

En primer lugar, a través de la observación en campo y con la ayuda de las dos ortofotos, mencionadas anteriormente, se fueron señalando en el software ArcGis® los polígonos de sustratos que conforman el cauce, los sustratos de tamaño más considerable (cantos, bloques, grandes bloques...) y la vegetación presente a lo largo del tramo, así como en las orillas. El criterio que se adoptó para señalar el sustrato más considerable fue el tamaño del mismo, es decir, se identificó aquellas piedras con un diámetro medio de 30-50 cm con tres o cuatro puntos, mientras que aquellas que superasen los 50 cm de diámetro medio, se señalaron con un mínimo de 5 puntos. Además, las orillas del cauce también se señalaron con puntos, con una distancia entre ellos de 0.5 m aproximadamente.

Además, al inicio del tramo de estudio se generó, mediante la incorporación de nodos, una prolongación del cauce de entrada mediante el programa de ArcGis® cuyo objetivo es *“generar un cauce regular en que se den unas condiciones de flujo estable y regulares, para mejorar las condiciones de contorno del modelo”* (Martínez-Capel, 2006). La distancia que se tomó entre ellos es igual a 0.5m.

Junto a esto, se incluyeron las diferentes rugosidades correspondientes a cada tipo de sustrato, las cuales serán necesarias para comenzar con la simulación y la calibración del modelo.

Por otro lado, se llevó a cabo el estudio del perfil del río o thalweg. Para ello, se observó el modelo digital del terreno (MDT) y se dividió el tramo del río con una serie de transectos según se produjera en él una corriente o una poza. Señalar que se analizó en estos transectos las diferentes cotas del terreno y la lámina de agua, interesando en el primer caso aquellas cotas de menor valor, de manera que gracias a la unión de estas cotas fue posible obtener la línea que constituye el thalweg. En el caso de la lámina de agua en cada transecto se realizó una interpolación entre los diferentes datos de lámina de agua obtenidos en campo, dado que en muchos casos, los transectos se encontraban localizados entre dos mediciones y no tenían un valor conocido.

Tabla 7: Distancia acumulada, cotas del thalweg y lámina de agua para cada transecto.

Transecto	Distancia acumulada	Lámina de agua	Cota thalweg
1	0	573.42	572.90
2	24	573.76	573.47
3	67	574.05	573.83
4	83	574.21	573.84
5	119	574.19	573.54
6	137	574.77	574.61
7	148	575.02	574.76
8	159	575.25	575.08
9	172	575.42	575.28
10	181	575.52	575.29
11	190	575.64	575.45
12	200	575.72	575.39

A continuación, se trabajó con el programa de simulación hidráulica River2D, que consta de tres fases de trabajo (con herramientas informáticas).

Primera fase: A partir de los puntos generados a través el programa ArcGis®, mencionado previamente, se generó el archivo *.BED. En este archivo se fueron señalizando las orillas del cauce y el sustrato con un tamaño más considerable (cantos rodados, bloques y grandes bloques) que se encuentra en el lecho del río empleando las líneas de rotura, además de crear como modelo digital de elevaciones del cauce, una red irregular de triángulos (TIN). Este archivo *.BED consta de un total aproximado de 10300 nodos, lo cuales constan de sus coordenadas y rugosidad absoluta.

Segunda fase: Una vez generado este archivo, se generó el archivo *.MESH. El cual corresponde a la malla de cálculo, y en él se indicó el caudal de entrada ($Q=0.112\text{m}^3/\text{s}$) y la condición de contorno final, que corresponde a la altura de la lámina de agua ($H=573.45\text{m}$). Al igual que en el *.BED, la malla de cálculo triangula

los nodos formando un TIN. En esta triangulación, se diferenciaron varios tamaños de triángulos (0.25, 0.5 y 1.5 m) según el grado de detalle requerido con el fin de obtener un ajuste a la topografía real. De este modo el cauce y el sustrato de tamaño considerable, mencionado anteriormente, posee una triangulación más detallada con un tamaño de triángulo menor. Una vez triangulada y suavizada dicha triangulación se generó la malla de cálculo final, la cual tiene un número de nodos mayor, con un total aproximado de 11540. Esta malla de cálculo establece la auténtica topografía final que se empleó en la última fase del River2D.

Tercera fase: Esta fase corresponde a la simulación hidráulica, en la cual, una vez creada la malla de cálculo, se establecieron las condiciones de contorno, que indicaron en los límites del modelo su comportamiento. Se señaló la altura de la superficie de la lámina de agua a la entrada del tramo con un valor de 578m, de este modo se generó el archivo *.CDG y se ejecutó el modelo. Este modelo se basa en las ecuaciones de Saint Venant, que son resueltas por el programa mediante el método de elementos finitos.

5.2.3.1. Calibración

Llegados a este punto, se realizó la calibración del modelo hidráulico. Es decir que se realizó una simulación del caudal de calibración y con ella se ajustaron los parámetros que, en este estudio, corresponde a la rugosidad del sustrato mediante el factor K_s . En este caso, a mayor rugosidad, mayor será la velocidad y menor será la altura de la lámina de agua. Para ello, se llevó a cabo una campaña de hidrometría ($Q=0.112 \text{ m}^3/\text{s}$) en la que se midió la altura de la lámina de agua (573.45 m) a lo largo del tramo y en la cual se trabajó con una estación dGPS (Prexisto) del instituto IGIC.

La calibración del modelo hidráulico se realizó modificando las distintas rugosidades absolutas de los sustratos presentes en el cauce hasta lograr que el error entre las cotas de la lámina de agua de cada transecto medidas en campo y las cotas modeladas estuviese comprendido entre -5 y +5 cm, pudiéndose producir en algún transecto aislado un error mayor. De esta manera fue posible conocer cómo de influyente es el coeficiente en la respuesta del modelo (calado y velocidad).

Por otro lado, se realizó una validación visual de la velocidad. Para ello, se emplearon dos mediciones de velocidad tomadas en el campo, en dos transectos muy cerca del extremo más arriba del tramo de simulación. Ambas mediciones se compararon con la velocidad de obtenida en el modelo de calibración.

5.2.3.2. Análisis de sensibilidad

A continuación de la calibración, se realizó un análisis de sensibilidad de las condiciones de contorno aguas abajo. Al disponer sólo de una medición de caudal ($Q=0.112 \text{ m}^3/\text{s}$), se prolongó el tramo de río aguas abajo hasta una sección en la que se produce un estrechamiento del cauce y en el que es posible que se produzca un cambio de régimen lento a régimen rápido. Además, se fijaron en esa última sección las condiciones de contorno del modelo hidráulico, de este modo el tramo de estudio está independizado y no se verá afectado.

Se efectuó un estudio modificando el calado original (medido) de 573.45 m en ese transecto final aguas abajo, aumentándolo y disminuyéndolo en 2, 4, 6 y 8 cm (Tabla 7). El objetivo de este análisis es conocer, introduciendo errores en la última sección, a partir de qué transecto situado aguas arriba la sensibilidad es baja o nula y de este modo se pueden excluir los transectos que no son interesantes para la simulación del hábitat (se excluye de posteriores cálculos de hábitat el transecto/s sensibles a dichos errores).

Tabla 8: Condiciones de contorno modificadas.

Cm	Altura lámina de agua (m)	Cm	Altura lámina de agua (m)
-2	573.43	+2	573.47
-4	573.41	+4	573.49
-6	573.39	+6	573.51
-8	573.37	+8	573.53

5.2.3.3. Simulación de caudales

Antes de continuar se comprobó que el coeficiente de Manning era aceptable. Se empleó la siguiente ecuación (Strickler 1923) para canales sin el cauce lleno:

$$K_{st} = \frac{21.1}{D_{50}^{1/6}} = \frac{1}{n}$$

Donde:

- n: coeficiente de rugosidad de Manning
- D_{50} : diámetro medio del material del lecho obtenido de la visita al campo siguiendo la metodología de estudios llevados a cabo por Sutherland (1987) y Bunte and Steven (1923).

Una vez comprobado el coeficiente de Manning y tras realizar la calibración y el análisis de sensibilidad, se simularon en el modelo de calibración diferentes caudales hasta un valor que se aproxima a 2.5 veces el caudal empleado en la misma ($Q=0.112\text{m}^3/\text{s}$).

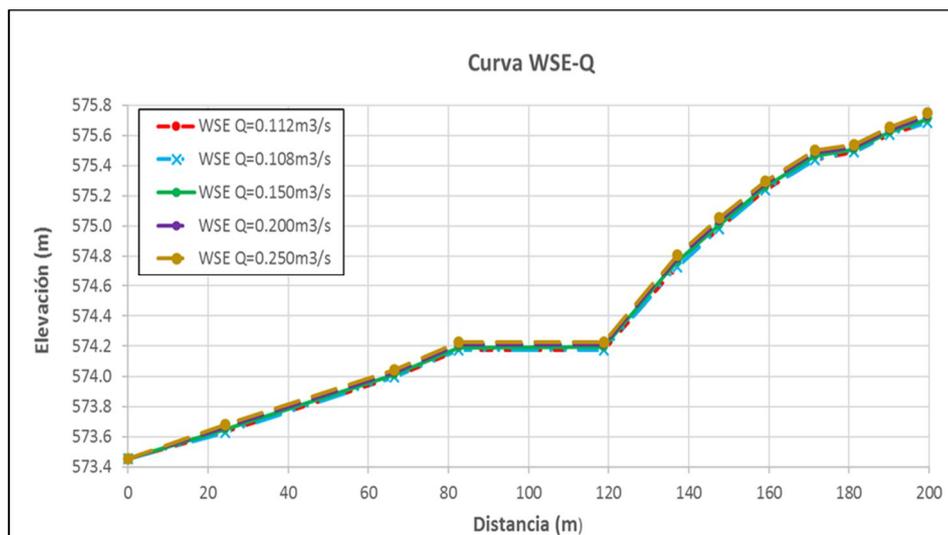


Figura 11: Curva de simulación WSE-Q. (Fuente: elaboración propia)

5.2.4. Simulación del hábitat

Una vez conocidas las condiciones hidráulicas se lleva a cabo la modelización del hábitat para poder evaluar el hábitat bajo el caudal circulante. Se emplearon curvas de idoneidad del hábitat, que permiten conocer qué grado de idoneidad de las diferentes variables del hábitat (velocidad, calado, sustrato, etc.) en cada una de las especies acuáticas, ya sea a lo largo de su vida, en una etapa de su desarrollo o con un tamaño determinado (Martínez-Capel, 2011).

Para conocer cómo afectará el cambio climático en el hábitat fluvial, se han analizado los caudales obtenidos de los escenarios a corto (2011-2040) y medio (2041-2070) plazo de los RCP4.5 y RCP8.5 de cada modelo climático estudiado.

En este trabajo se evaluó por separado el hábitat para la trucha común en dos etapas distintas de su vida: juvenil y adulta, que representan periodos biológicamente significativos.

Las curvas de idoneidad del hábitat empleadas fueron desarrolladas en la época veraniega (julio, agosto y septiembre) para las etapas vitales representativas de la trucha común en verano debido a que es en esta época del año y en estos periodos de vida cuando esta especie se encuentra más limitada por el escaso caudal y escaso hábitat, y es por tanto, más sensible (Martínez-Capel, 2006).

Concretamente se han analizado estos meses porque esta es la época de caudales mínimos, es decir, cuando se esperan menores caudales y, por tanto, donde el cambio climático puede producir efectos más contundentes y perjudiciales para la población de trucha común. Debido a que el caudal de calibración es muy bajo, los caudales que se simulaban debían encontrarse alrededor de este valor, es por eso por lo que se simulaban los caudales bajos de esta época del año.

Las curvas de idoneidad de la trucha común en la época juvenil se obtuvieron de las curvas realizadas a partir de estudios realizados en el Júcar. Las curvas de este estudio se consideran idóneas por su aplicabilidad a otros ríos mediterráneos. Para la época adulta de la trucha común, las curvas de idoneidad fueron tomadas de estudios previos. Tras analizar diferentes estudios, entre los que destacan las curvas de Raleigh, se escogieron los relativos al río Stanislaus (California) puesto que las curvas se centran en las actividades en las que el pez es más dependiente del flujo.

Sin embargo, éste fue modificado para adaptarlo mejor al tramo de estudio (Martínez Capel, 2007).

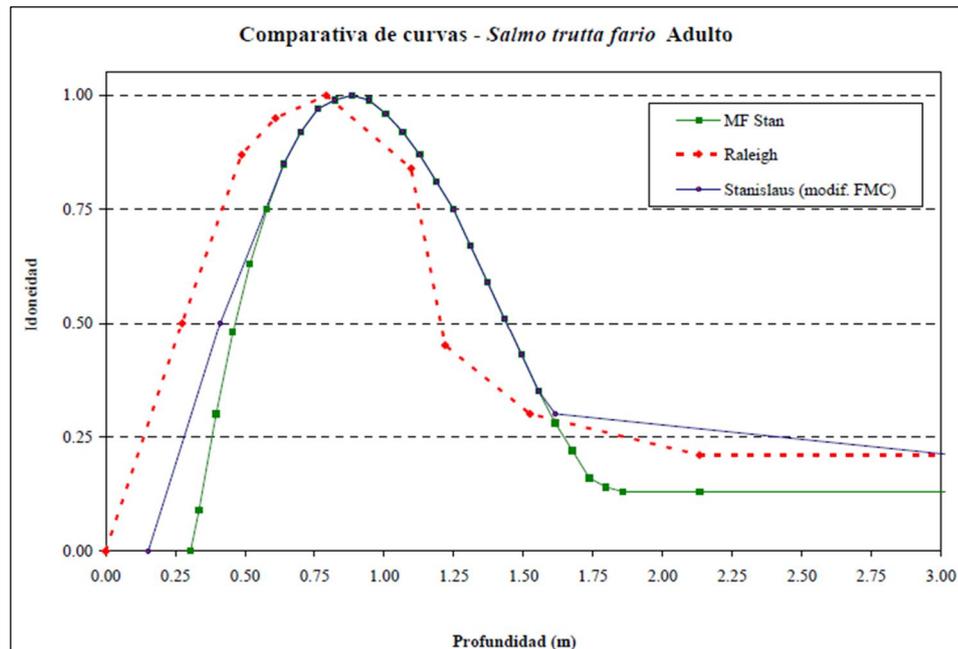


Figura 12: Ejemplo de la curva de idoneidad de microhábitat de profundidad para la trucha común adulta en varios ríos. (Fuente: Cálculo de caudales ambientales en las cuencas de Segre, Matarraña, Senia, afluentes del bajo Ebro en Cataluña y validación biológica en tramos significativos de la red fluvial de Cataluña. 2º Informe: Curvas de idoneidad de microhábitat y datos obtenidos en campo para la modelización 2D)

En primer lugar, se llevó a cabo para los caudales de los escenarios de cambio climático obtenidos en la modelación hidrológica (*Anexo I: Estudio hidrológico*) en los meses anteriores, el cálculo de la media, la mediana y los percentiles 25 y 75. Debido a que el promedio de las medias de los escenarios de corto y medio plazo de los modelos se asemejan mucho, se decidió emplear el promedio de estas medias, tanto en el caso del RCP4.5 y RCP8.5, como un solo caudal.

Los valores de caudales que se observan en el mes de septiembre, en los modelos de cambio climático MPI-CCLM4 (escenario RCP4.5 y RCP8.5) y MPI-REMO2 (RCP4.5), no representan la situación de mínimos anuales de verano, sino más bien a la presencia de lluvias otoñales al tratarse de datos extremos. Como anteriormente se ha supuesto que el caudal de verano está multiplicado por 2, en comparación estos valores son muy elevados y no representan la situación de los caudales bajos que suelen producir la situación de “cuello de botella” de las

poblaciones. Teniendo en cuenta esto, los valores de caudales con datos extremos altos producidos en el mes de septiembre no se han tenido en cuenta en el análisis del periodo de hábitat mínimo para la trucha común.

Prosiguiendo con la simulación del hábitat, el siguiente paso fue la simulación de los caudales bajo escenarios de cambio climático con la herramienta de modelación hidráulica River2D. Gracias al análisis de sensibilidad realizado anteriormente, los transectos para la evaluación del hábitat no se encontraron sujetos a errores relevantes.

Para poder obtener el Hábitat Potencial Útil, HPU (WUA en inglés) el programa requiere las curvas de idoneidad o preferencia de la trucha común y el índice de sustrato.

Las curvas de idoneidad aceptables por el programa son de profundidad, velocidad y atributos, sustrato en este caso. La elección de las mismas es muy importante, puesto que *“se ha demostrado que es el factor fundamental para obtener el resultado final.”* (Martínez-Capel, 2006). En el índice de sustrato, es decir, la rugosidad del sustrato del lecho del cauce, se emplean las categorías de sustrato obtenidas en el apartado 5.2.2 *Toma de datos*.

Una vez introducidas las curvas de idoneidad y el índice de sustrato, el programa nos proporciona el WUA para la especie y etapa de vida deseada.

5.3. Escenarios de Cambio Climático

Existe un consenso científico en torno a la idea de que la actividad humana está generando variaciones en el clima global generando el conocido cambio climático. En el Quinto Informe de Evaluación (AR5¹) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC²) del año 2013 se muestra con más claridad el cambio climático y su conclusión es contundente: *“el cambio climático es real y la es la actividad humana es la principal causante”* (ONU, s.f.).

¹ AR5: Fifth Assessment Report.

² IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Para conocer la futura evolución de las variables climáticas se realizaron diferentes proyecciones futuras o escenarios del cambio climático. Estos escenarios se definen según el IPCC como *"descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro"*. Y, sus objetivos pretenden *"ayudar a los usuarios a prepararse para el futuro"*.

En un primer momento, el SRES³ 2000 distinguió cuatro líneas evolutivas con sus correspondientes escenarios: A1, A2, B1 y B2. En ellos se mostraba un mundo futuro con diferentes características desde el punto de vista poblacional y desde el socioeconómico. Y según sea ese mundo futuro existirá más o menos concentración de dióxido de carbono.

Recientemente, los escenarios climáticos se han actualizado y se les conoce con el nombre de escenarios RCPs⁴. Estos escenarios se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100, que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m², (Ministerio de Sanidad, s.f.) y se clasifican en cuatro escenarios cuyos nombres corresponden al forzamiento radiativo característico de cada uno de ellos: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 Y RCP2.6.

Tabla 9: Escenarios RCP con su Forzamiento Radiativo. (Fuente: Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC)

Escenarios	Forzamiento Radiativo (FR)	Tendencia del FR	Concentración de CO ₂ en 2100
RCP2.6	2.6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6.0 W/m ²	Creciente	670 ppm
RCP8.5	8.5 W/m ²	Creciente	936 ppm

³ SRES: Special Report on Emission Scenarios

⁴ RCPs: Representative Concentration Pathways

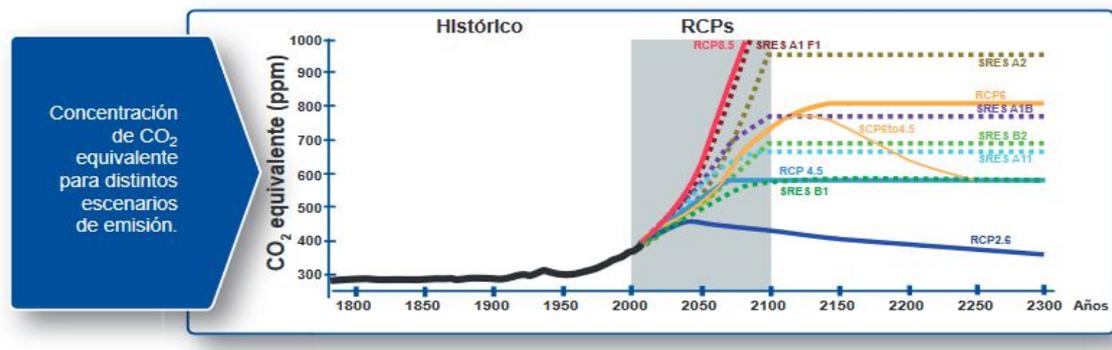


Figura 13: Concentración de CO₂ para los distintos escenarios RCPs.
(Fuente: Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.)

En este caso se trabajó con diferentes modelos y escenarios de cambio climático procedentes del proyecto Euro-CORDEX⁵, el cual surge por la necesidad de tener un marco coordinado para evaluar y mejorar las técnicas regionales de downscaling climática (RCD⁶) y producir una nueva generación de proyecciones climáticas, (CORDEX, 2016) de manera que estén disponibles para ser aplicadas en escalas locales.

Los escenarios de cambio climático del presente trabajo son resultado de los modelos climáticos que son tanto los globales (GCMs⁷) como los regionales (RCMs⁸) (Christensen *et al.* 2014). Tras realizar una comparativa entre ellos con los puntos del proyecto "Spain02", que recoge los datos climáticos del territorio español, los modelos elegidos para trabajar fueron: MPI-REMO-r2, MPI-CCLM4 y MOHC-RACMO22E. En lugares cercanos se observó que eran los que mejor funcionaban.

En los tres modelos se trabajó con datos climáticos históricos y datos climáticos futuros con series temporales a corto y medio plazo para los escenarios los RCP4.5y RCP8.5. En el RCP4.5 las concentraciones de CO₂ alcanzan un máximo valor próximo al año 2100 y después se estabiliza. Sin embargo, el RCP8.5 predice un aumento de las concentraciones de CO₂ en el tiempo, más allá del año 2100,

⁵ CORDEX: Coordinated Regional Downscaling Experiment.

⁶ RCD: Regional Climate Downscaling.

⁷ GCMs: Global Climate Models

⁸ RCMs: Regional Climate Models

obteniendo los mayores niveles de concentración (Riahi, Grübler , & Nakicenovic, 2007). Este último escenario corresponde a la situación más pesimista.

El periodo de tiempo que engloban los datos históricos se corresponde desde el año 1971 hasta el año 2000, los de corto plazo desde el año 2011 hasta el 2040 y los de medio plazo desde el año 2041 hasta el 2070.

5.3.1 Generación de series temporales en escenarios de cambio climático.

Los datos climáticos de precipitación y temperatura de cada serie temporal se obtuvieron de simulaciones descritas por el CORDEX y de la malla de cálculo de los modelos se extrajeron las celdas que cubrían cada subcuenca, para calcular en cada una de ellas la precipitación y la temperatura usando los pesos de Thiessen.

Una vez tenemos los datos climáticos se procede a su corrección para poder adaptar los resultados del modelo climático al entorno local. Para ello se aplicó la corrección “cuantil a cuantil” de las series climáticas del modelo para el periodo de control, ajustándolas a los datos de Spain02 con la herramienta “*qmap*” de *R Package* (Gudmundsson, Bremnes, Haugen, & Engen-Skaugen, 2012)

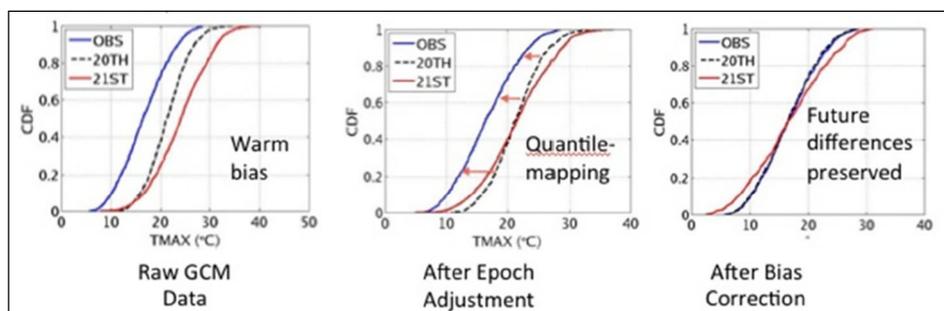


Figura 14: Ejemplo de corrección del sesgo. (Fuente: Multivariate Adaptive Constructed Analogs (MACA) Statistical Downscaling Method, Universidad de Idaho.)

Generados los nuevos valores de precipitación y temperatura fue posible comparar estas series temporales de los escenarios climáticos a corto y medio plazo con la serie de datos del periodo de control.

A continuación, se obtuvieron los valores de la nueva evapotranspiración potencial (ETP) necesaria para alimentar al modelo de precipitación esorrentía a partir de los valores de temperatura corregidos.

Conocidos los valores corregidos de la precipitación y de la ETP, fue posible conocer, a través del modelo de Témez, los nuevos caudales modelados de las series temporales de los escenarios climáticos para cada modelo, y así realizar una comparativa de los mismos con el caudal del periodo de control conseguido anteriormente.

6.Resultados y discusión

6.1 Estudio hidrológico

6.1.1. Modelo de Témez.

A continuación, se muestran los resultados de la comparación de los caudales observados y modelados tras la realización del modelo de Témez y su posterior calibración mediante el índice de Nash-Sutcliffe para cada una de las subcuencas.

Subcuenca 0:

La subcuenca 0 corresponde al punto de estudio de la Estación de Aforo 8148 situada en Jérica y su superficie es igual a 58.07 km².

Tras realizar en el modelo de Témez la calibración de los valores de caudal modelado, se observa cómo se ha producido un correcto ajuste de los parámetros estudiados (H_{max} , C , I_{max} y α). En la calibración de la subcuenca se ha obtenido un índice de Nash igual a 0.87, el cual, dentro de los valores de bondad del ajuste explicados en el apartado del “Modelo de Témez”, se clasifica como “excelente”. Sin embargo, el valor del índice de Nash que se ha obtenido en la validación es igual a 0.60.

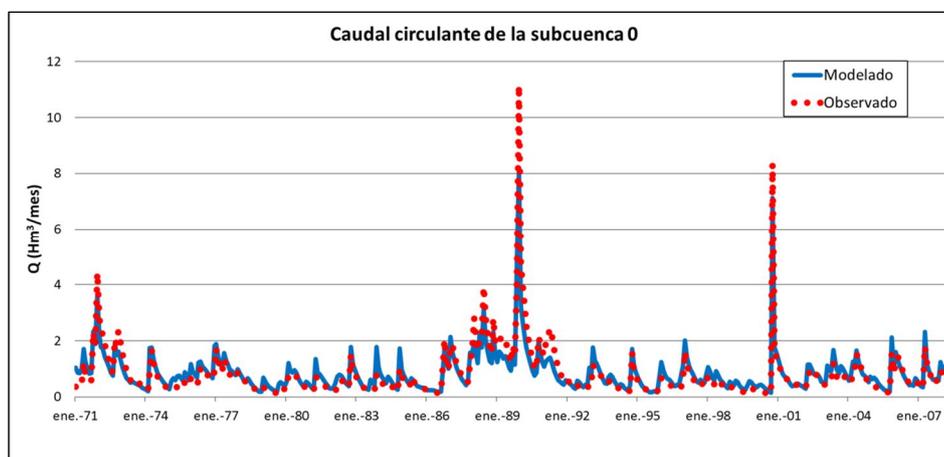


Figura 15: Calibración del caudal circulante de la subcuenca 0 por el método de Témez. (Fuente: elaboración propia)

En la figura anterior se aprecian a simple vista dos picos ascendentes del caudal, el primero en diciembre del año 1989 y el segundo en octubre del año 2000, llegando el caudal observado a superar los 10 Hm³/mes. El caudal modelado por

Témez se encuentra situado en valores inferiores, situándose en torno a los 7 - 8 Hm^3/mes . Este aumento de caudal puede estar relacionado con la precipitación que sufrió esa zona en ese periodo de tiempo, registrándose valores de precipitación superiores a los 300 mm/mes.

Sin embargo, el caudal circulante en el resto de la serie temporal sigue una dinámica similar, en el que se producen aumentos de caudal parecidos, los cuales van seguidos de disminuciones de este.

Subcuenca 1:

La subcuenca 1, corresponde al punto localizado en el meandro de Teresa y consta de una superficie de 49.7 km^2 .

Tras realizar la calibración del mismo modo que en la subcuenca 0, se obtiene un índice de Nash igual a 0.88, cuyo valor se clasifica como “excelente” dentro de la bondad del ajuste. En la validación el valor obtenido para el índice de Nash es de 0.65.

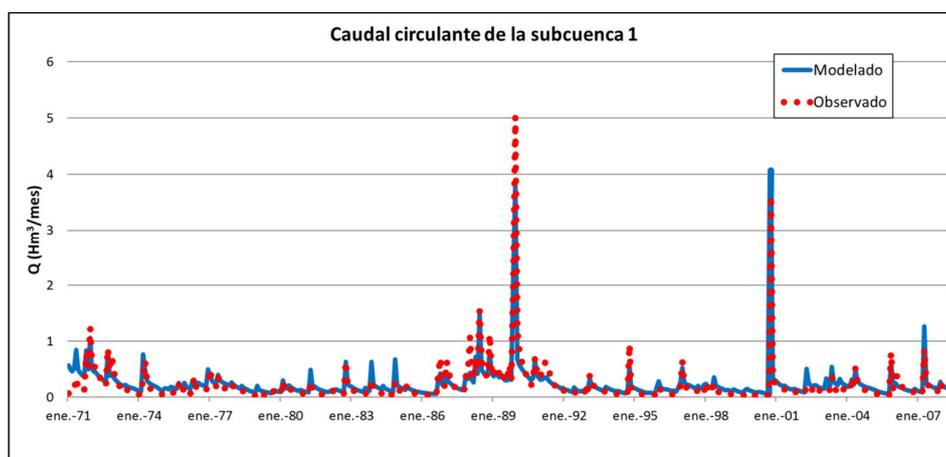


Figura 16: Calibración del caudal circulante de la subcuenca 1 por el método de Témez. (Fuente: elaboración propia)

Observando la figura se aprecian picos de caudal coincidentes con los meses en los que se producen los picos en la subcuenca 0. Este aumento de caudal tiene lugar en el mes de diciembre del año 1989 y en el mes de octubre del año 2000. Se observa como alcanza, en el caso del caudal observado, valores entre los 4 y 5 Hm^3/mes y valores próximos a 4 Hm^3/mes en el caso del caudal modelado. En este periodo de tiempo se registran valores de precipitación elevados, lo que puede dar respuesta a las crestas observadas en la figura.

Para el resto de los meses de la serie temporal ambos caudales son mucho menor, llegando solo en dos meses (junio del año 1988 y abril del año 2007) a superar el Hm^3/mes .

Subcuenca 2:

Corresponde al punto llamado Tecнома Bejís (Teresa), situado aproximadamente a 1.4 km del cauce aguas arriba, y consta de una superficie de 221.22 km^2 .

A diferencia de las dos subcuencas anteriores, el índice de Nash para esta subcuenta está clasificado en la bondad de ajuste como “muy bueno”, debido a que su valor es de 0.79, sin embargo, el valor obtenido para la validación es igual a 0.73.

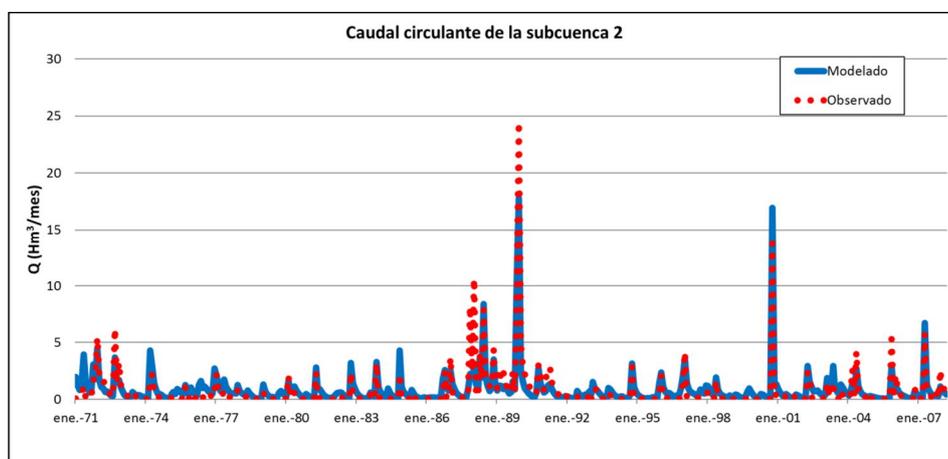


Figura 17: Calibración del caudal circulante de la subcuenca 2 por el método de Témez. (Fuente: elaboración propia)

En la figura, al igual que en las subcuencas anteriores, se aprecian dos picos en los caudales circulantes observados con valores próximos a 25 y 15 Hm^3/mes en diciembre del año 1989 y octubre del año 2000 respectivamente. En el caso de los caudales circulantes modelados, los valores se encuentran próximos a los 17 Hm^3/mes . En esas fechas se registran valores importantes de precipitación, en torno a los $300 \text{ Hm}^3/\text{mes}$, lo que puede explicar este aumento en el caudal.

Se aprecia en un desplazamiento de los valores de los caudales observados y modelados en los meses de enero y junio de 1988. En este periodo el caudal modelado se encuentra situado en unos meses anteriores, por lo que avanza en el tiempo.

6.2. Simulación del hábitat físico.

6.2.1 Simulación hidráulica

Tras el estudio de las cotas del thalweg y las alturas de la lámina de agua en los diferentes transectos en los que se dividió el río, el perfil que se obtuvo se muestra en la siguiente figura.

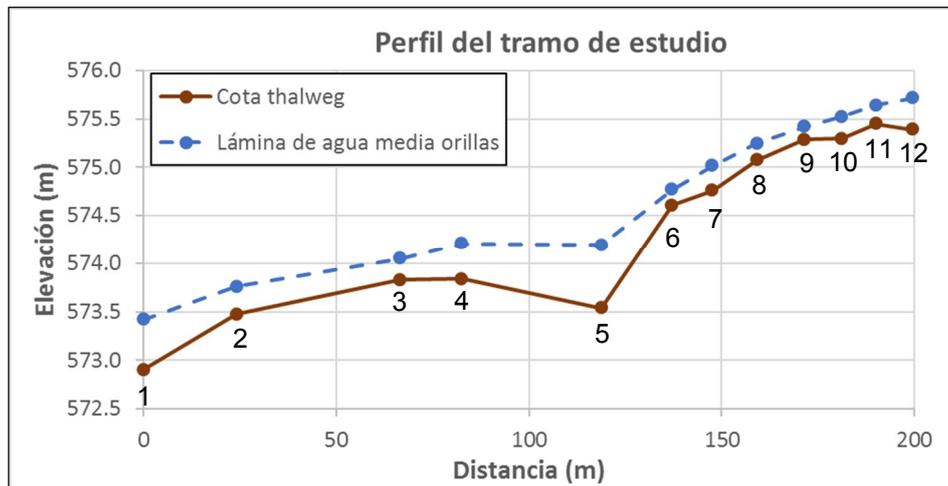


Figura 18: Perfil del terreno y lámina de agua del tramo de estudio con las secciones señaladas. (Fuente: elaboración propia)

En él se puede intuir como a lo largo del tramo de estudio se producen diferentes regímenes de velocidades (rápido y lento) y características geomorfológicas (presencia de rápidos y pozas). En los cuatro primeros transectos es posible que se produzca un régimen lento, por lo que el flujo del tramo de estudio estaría controlado desde aguas abajo, mientras que a partir del transecto número 6, se produciría un flujo en régimen rápido el cual vendría controlado desde aguas arriba. Entre medio de estos transectos (transecto 4-5) tiene lugar una poza, y desde el transecto 2, hacia aguas arriba es donde se llevó a cabo la evaluación del hábitat de la especie piscícola: trucha común.

6.2.1.1. Calibración

Siguiendo el análisis de la simulación, y una vez conocido el perfil del tramo de estudio, el resultado que se obtuvo al realizar la calibración hidráulica indica que en los transectos donde se localiza la poza la cota descende, mientras que en los datos de campo esa cota indicaba que la superficie del agua ascendía, suceso que no

tiene lugar cuando los caudales son tan bajos, por lo que se puede considerar que, en este caso, se obtiene mejor resultado que la medida de campo.

Además, los errores en la calibración de la velocidad que se obtuvieron se encuentran situados entre los valores aceptables, siendo estos de -0.01 y -0.03 cm. En este caso, la medición más precisa y, por tanto, el menor error obtenido, corresponde a la velocidad que se logró mediante el empleo del GPS.

Tabla 10: Valores de la lámina de agua modelada y error obtenidos en la calibración hidráulica del tramo de estudio.

Transectos	Distancia acumulada	Cota thalweg	Lámina de agua media orillas campo	WSE modelada	Error
1	0	572.90	573.42	573.45	0.03
2	24	573.47	573.76	573.63	-0.13
3	67	573.83	574.05	574.00	-0.05
4	83	573.84	574.21	574.17	-0.03
5	119	573.54	574.19	574.18	-0.02
6	137	574.61	574.77	574.73	-0.03
7	148	574.76	575.02	574.98	-0.03
8	159	575.08	575.25	575.24	-0.01
9	172	575.28	575.42	575.44	0.02
10	181	575.29	575.52	575.49	-0.03
11	190	575.45	575.64	575.61	-0.03
12	200	575.39	575.72	575.69	-0.03

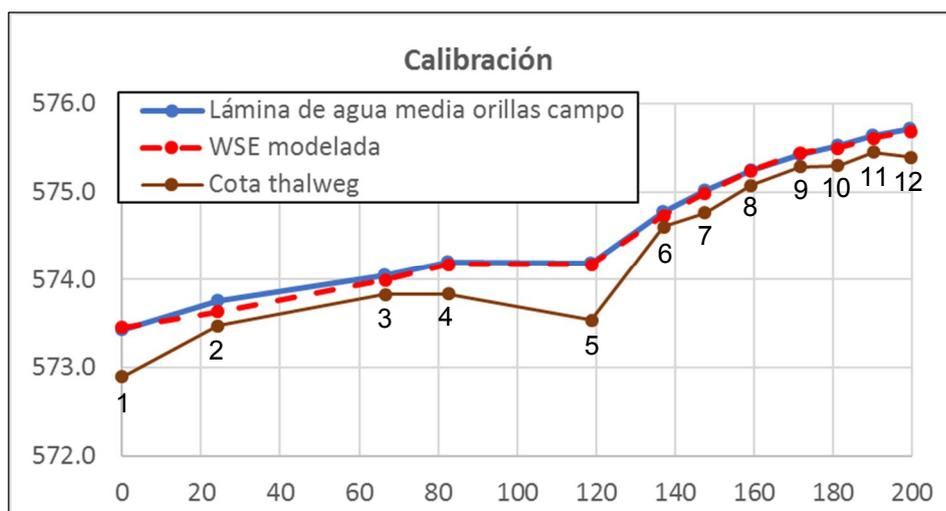


Figura 19: Calibración hidráulica del tramo de estudio. (Fuente: elaboración propia)

A continuación, las tres figuras siguientes muestran los mapas de calado, velocidad, y rugosidad del sustrato obtenidos por la herramienta River2D para el caudal de calibración ($0.112\text{m}^3/\text{s}$).

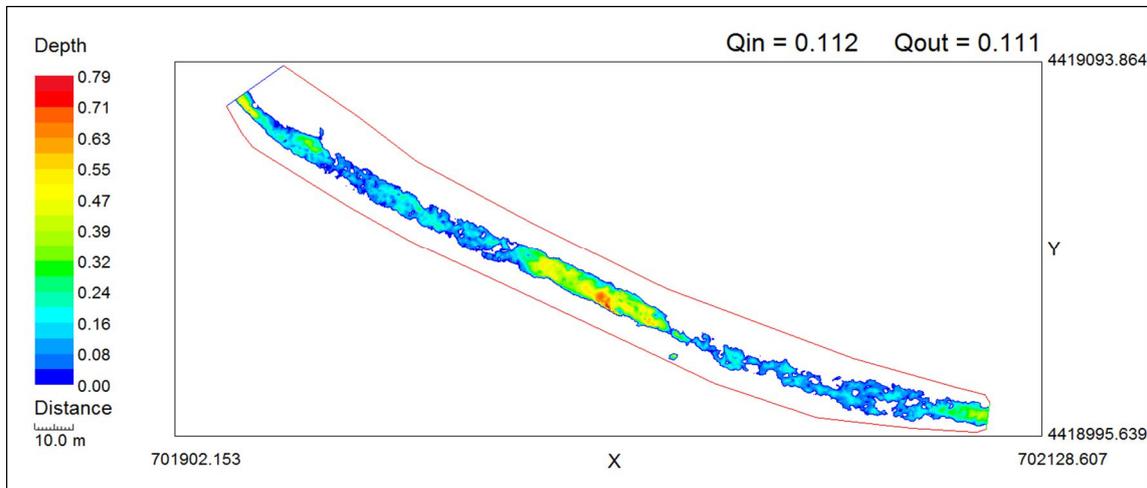


Figura 20: Mapa de calados del tramo de estudio para el caudal de calibración = $0.112\text{ m}^3/\text{s}$. (Fuente: elaboración propia).

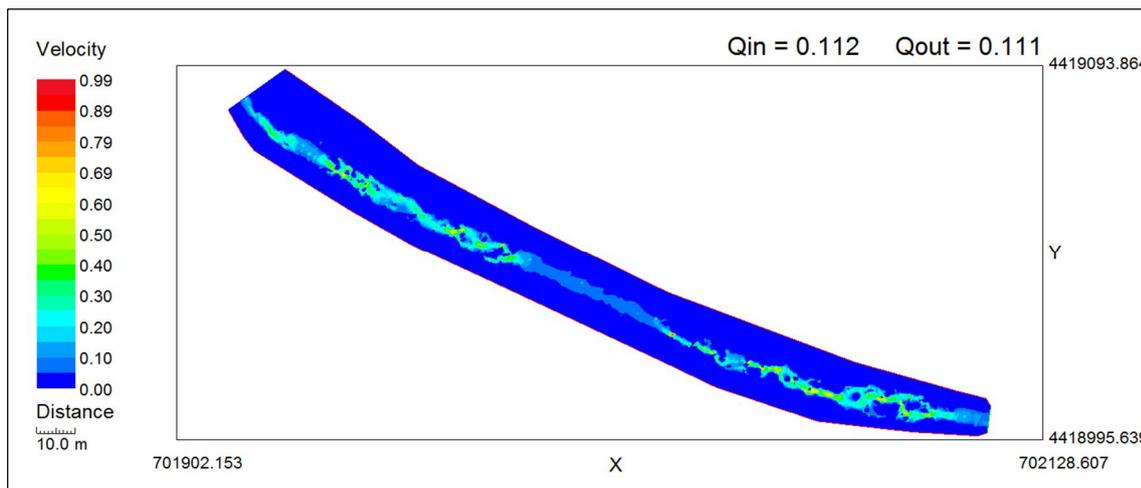


Figura 21: Mapa de velocidades del tramo de estudio para el caudal de calibración = $0.112\text{m}^3/\text{s}$. (Fuente: elaboración propia)

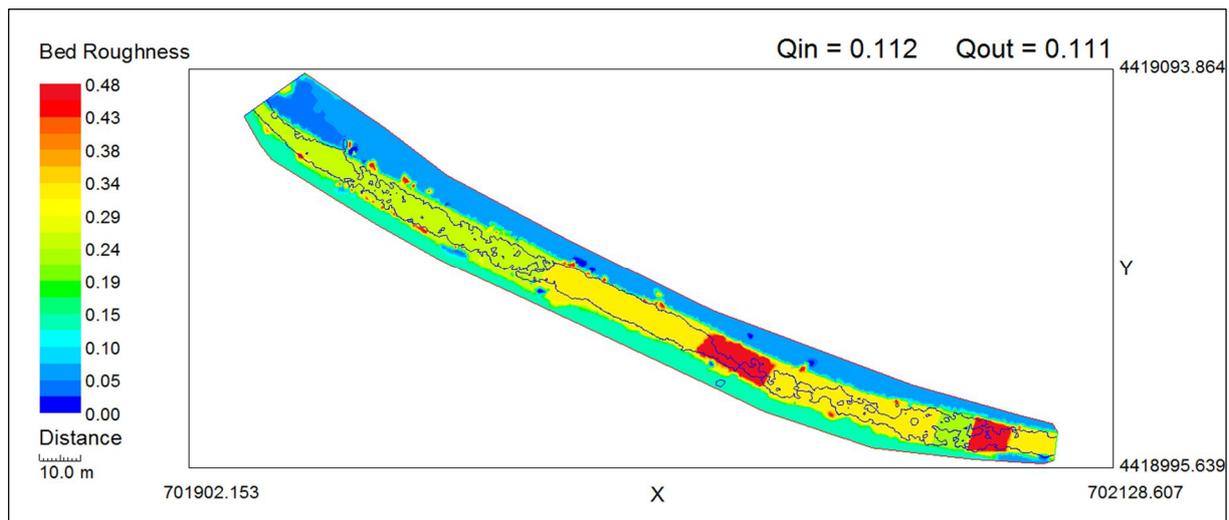


Figura 22: Mapa de rugosidades del sustrato en el tramo de estudio empleado en la calibración del modelo. (Fuente: elaboración propia)

6.2.1.2. Análisis de sensibilidad

Por otro lado, el análisis de sensibilidad de las condiciones de contorno obtenido (Figura 23) demostró como las condiciones de contorno aguas abajo no influyen en el tramo de estudio. Los errores, tanto positivos como negativos, obtenidos tras las variaciones del calado en el transecto localizado más aguas abajo (transecto 1) van aproximándose hasta alcanzar el valor original, lo que indica que es a partir de ese punto dónde se va a realizar la simulación del hábitat, al ser los transectos que van a influir en ella.

Al realizar el análisis de sensibilidad, el tramo de estudio que tendrá la simulación del hábitat se reduce, pasando de una longitud aproximada de 200 m a tener una nueva longitud igual a 176 m, lo que supone un 88% del tramo inicial y una buena representación del mismo. Además, el análisis de sensibilidad obtenido demostró como en este caso, el sustrato no es demasiado influyente en el caudal del río, ya que ni los calados ni las velocidades varían demasiado respecto al original. Se pueden observar todos los análisis en el *Anexo II: Simulación del hábitat físico*.

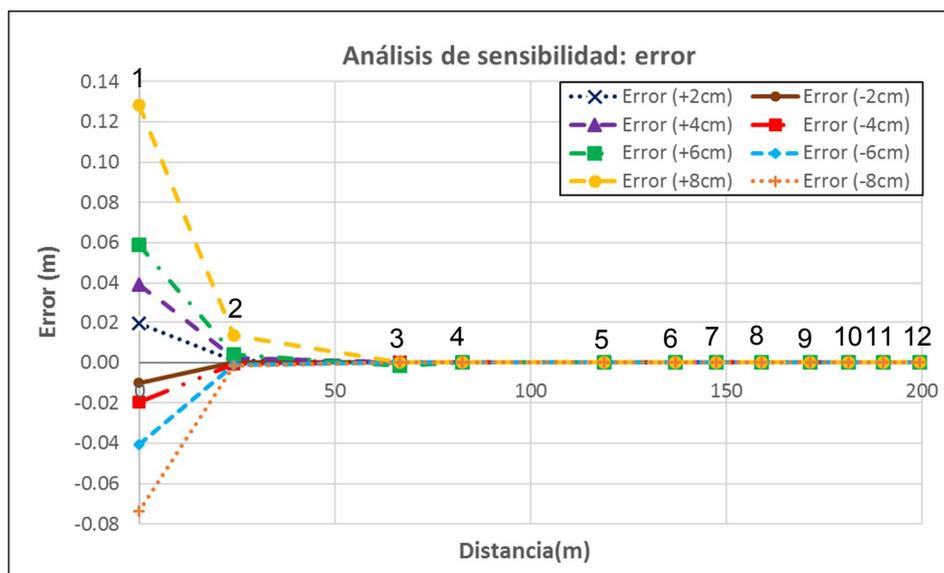


Figura 23: Error obtenido tras las variaciones de calado en el análisis de sensibilidad de las condiciones de contorno. (Fuente: elaboración propia)

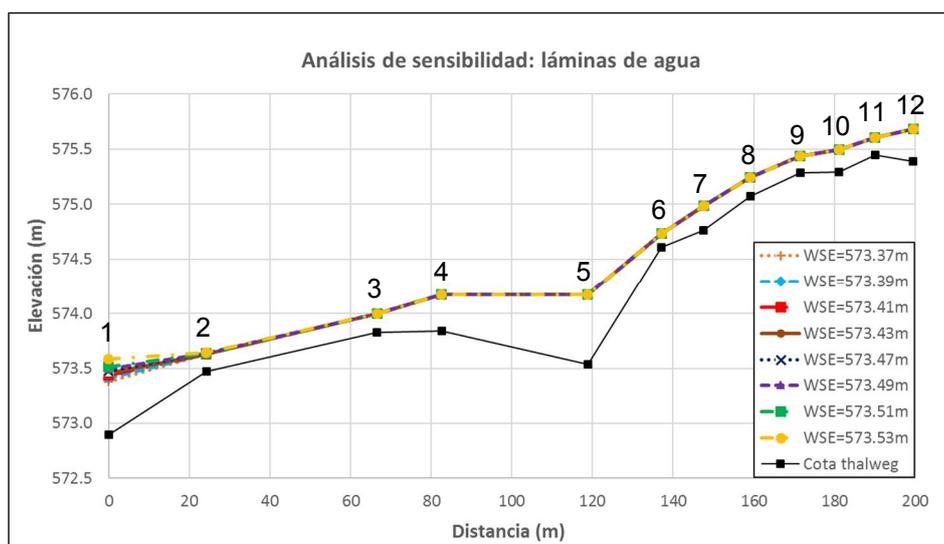


Figura 24: Lámina de agua en el análisis de sensibilidad de las condiciones de contorno. (Fuente: elaboración propia)

6.2.1.3. Simulación de caudales.

El coeficiente de Manning que se obtuvo es igual a 0.055, lo que lo convierte en un coeficiente aceptable, ya que tras consultar el libro “Hidráulica de Canales Abiertos” (Chow, 1994), el valor de Manning que le corresponde al tramo de estudio se debe situar entre 0.045 y 0.060.

Los caudales y alturas de láminas de agua (WSE) que se obtuvieron muestran como el valor de estas últimas aumentan con el aumento de caudal. La mayor lámina de agua tiene un valor de 575.747m y se sitúa en el transecto 12 para el caudal de 0.250m³/s. Comparándola con el valor del caudal simulado se aprecia como la lámina de agua aumenta 0.062m, por lo que no se aprecia un aumento significativo.

Tabla 11: Láminas de agua (WSE) para los diferentes caudales simulados.

Transectos	WSE	WSE	WSE	WSE	WSE
	Q=0.112m ³ /s	Q=0.108m ³ /s	Q=0.150m ³ /s	Q=0.200m ³ /s	Q=0.250m ³ /s
1	573.453	573.453	573.454	573.456	573.457
2	573.632	573.630	573.648	573.664	573.678
3	573.998	573.996	574.012	574.029	574.043
4	574.173	574.171	574.191	574.210	574.226
5	574.175	574.173	574.193	574.213	574.228
6	574.732	574.728	574.764	574.790	574.810
7	574.985	574.982	575.008	575.032	575.054
8	575.241	575.238	575.260	575.279	575.295
9	575.441	575.438	575.462	575.484	575.502
10	575.493	575.491	575.507	575.524	575.539
11	575.607	575.605	575.622	575.639	575.653
12	575.685	575.683	575.705	575.727	575.747

6.2.2 Simulación del hábitat.

Los resultados conseguidos indicaron que en los meses estivales elegidos (julio, agosto y septiembre) los caudales medios de los diferentes escenarios de cambio climático, así como el del periodo histórico, no alcanzan el valor de calibración al no superar ninguno de ellos los 0.078 m³/s, como puede verse en la tabla 12. Las medias, medianas y caudales percentiles 25 y 75 para cada uno de los escenarios y modelos se pueden observar más detalladamente en el *Anexo II: Simulación del hábitat físico*.

Tabla 12: Caudales (m³/s) de la simulación de escenarios de cambio climático (promedio de julio, agosto y septiembre).

Modelo	RCP4.5(cp y mp)	RCP8.5 (cp y mp)
Q MOHC-RACMO22E	0.070	0.078
Q MPI-CCLM4	0.063	0.062
Q MPI-REMO2	0.057	0.060
Q HISTÓRICO	0.068	

En la figura 25 se muestra la curva HPU en función de los caudales simulados, para la etapa juvenil como adulta. Se observa en ella como

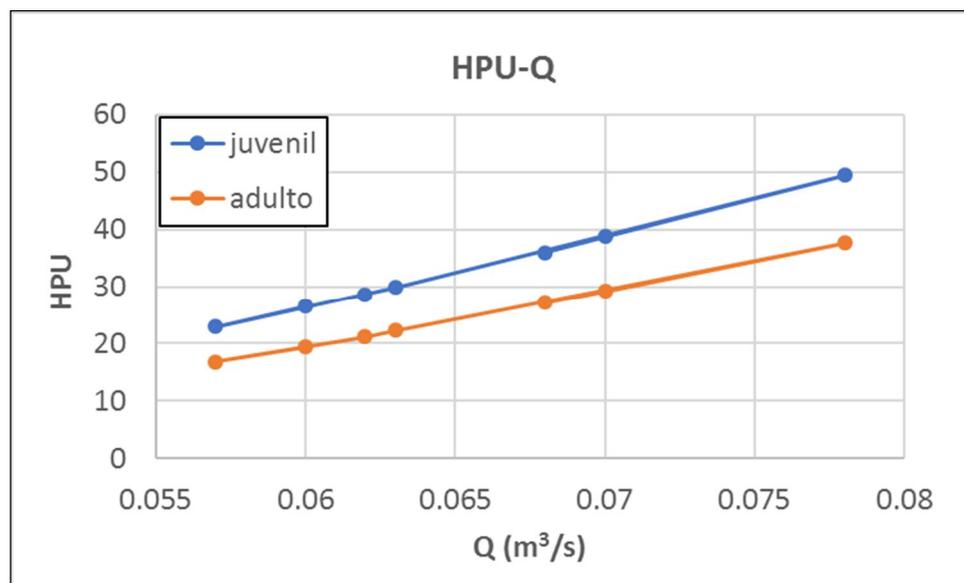


Figura 25: Curva HPU en función de los caudales simulados. (Fuente: elaboración propia)

Tras la simulación de estos caudales en la herramienta River2D se obtuvieron los valores del Hábitat Potencial Útil (HPU, WUA en inglés). En los resultados mostrados en la figura 26 se observa como el HPU, en el periodo histórico, para la trucha en su etapa juvenil, así como en su etapa adulta, se sitúa en el inicio del tramo de estudio y detrás de la poza. El resto de los mapas del River2D para cada uno de los escenarios de cambio climático se pueden observar en el *Anexo II: Simulación del hábitat físico*.

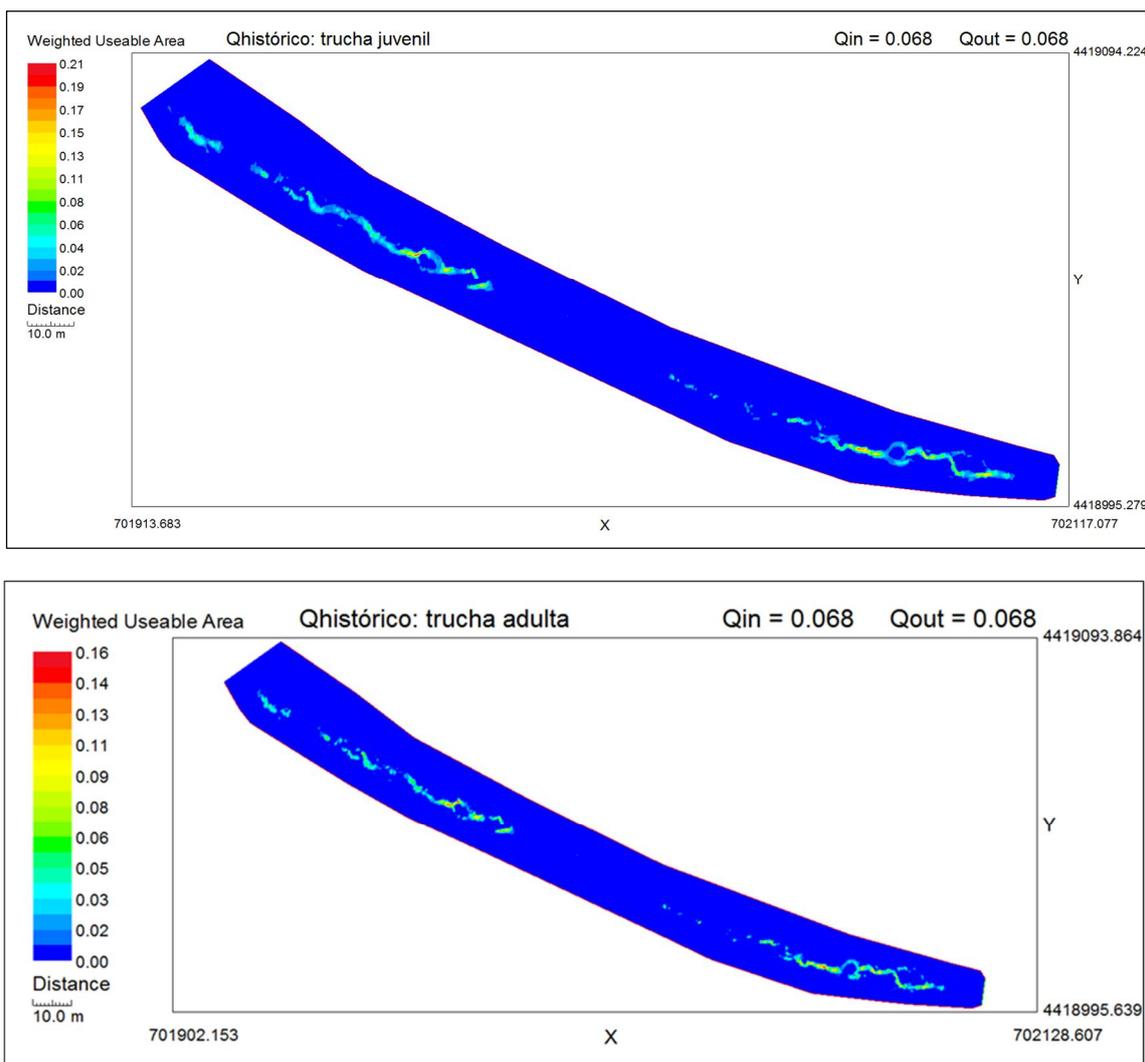


Figura 26: Mapa del Hábitat Potencial Útil para la trucha juvenil y adulta respectivamente con el caudal histórico. (Fuente: elaboración propia)

Los resultados de Hábitat Potencial Útil para el periodo histórico y para escenarios futuros se muestran en las tablas 13

Tabla 13: Hábitat Potencial Útil para el periodo histórico y para cada uno de los escenarios de cambio climático.

		Histórico					
		Juvenil	Adulto				
		36.02	27.14				
		MOHC-RACMO22E		MPI-CCLM4		MPI-REMO2	
RCP		Juvenil	Adulto	Juvenil	Adulto	Juvenil	Adulto
4.5		38.77	29.19	29.84	22.24	22.95	16.81
8.5		49.44	37.66	28.64	21.13	26.46	19.41

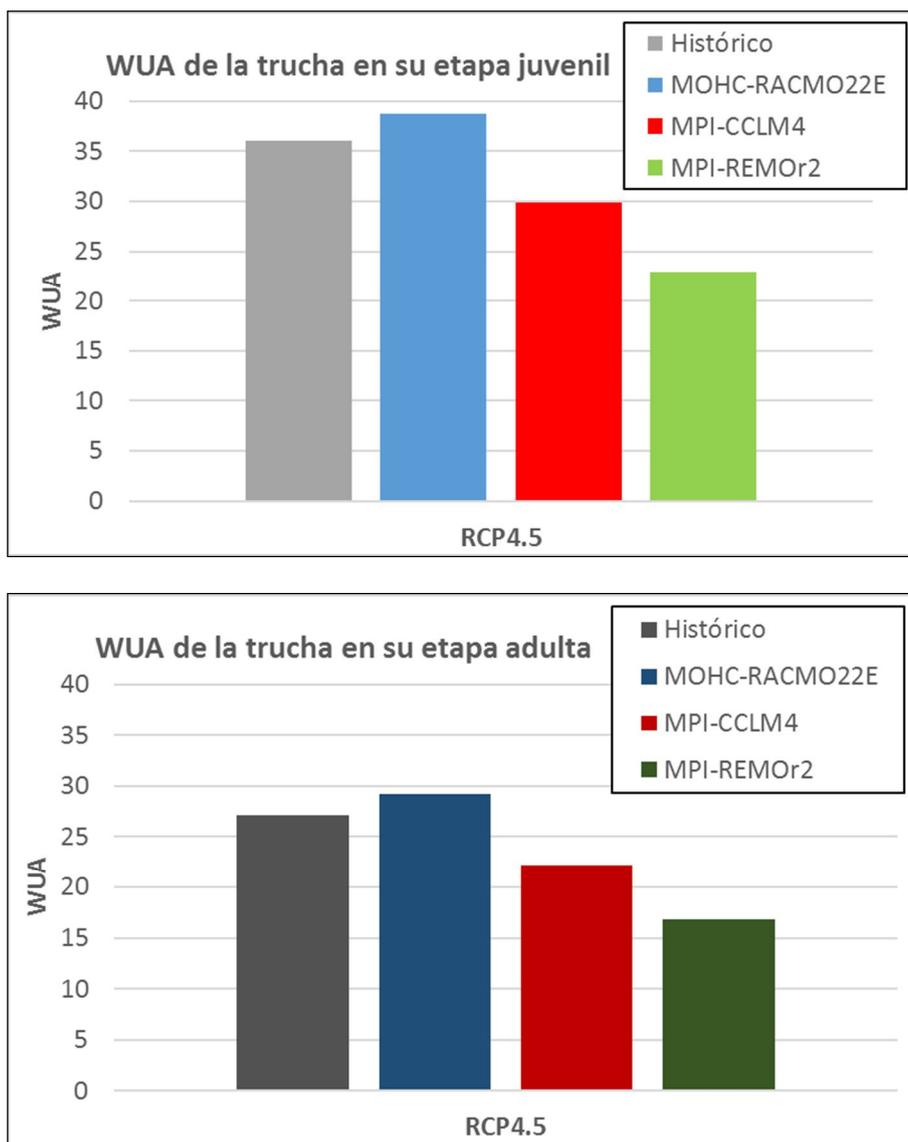


Figura 27: Hábitat Potencial Útil para las etapas juvenil y adulta respectivamente en el escenario RCP4.5. (Fuente: elaboración propia)

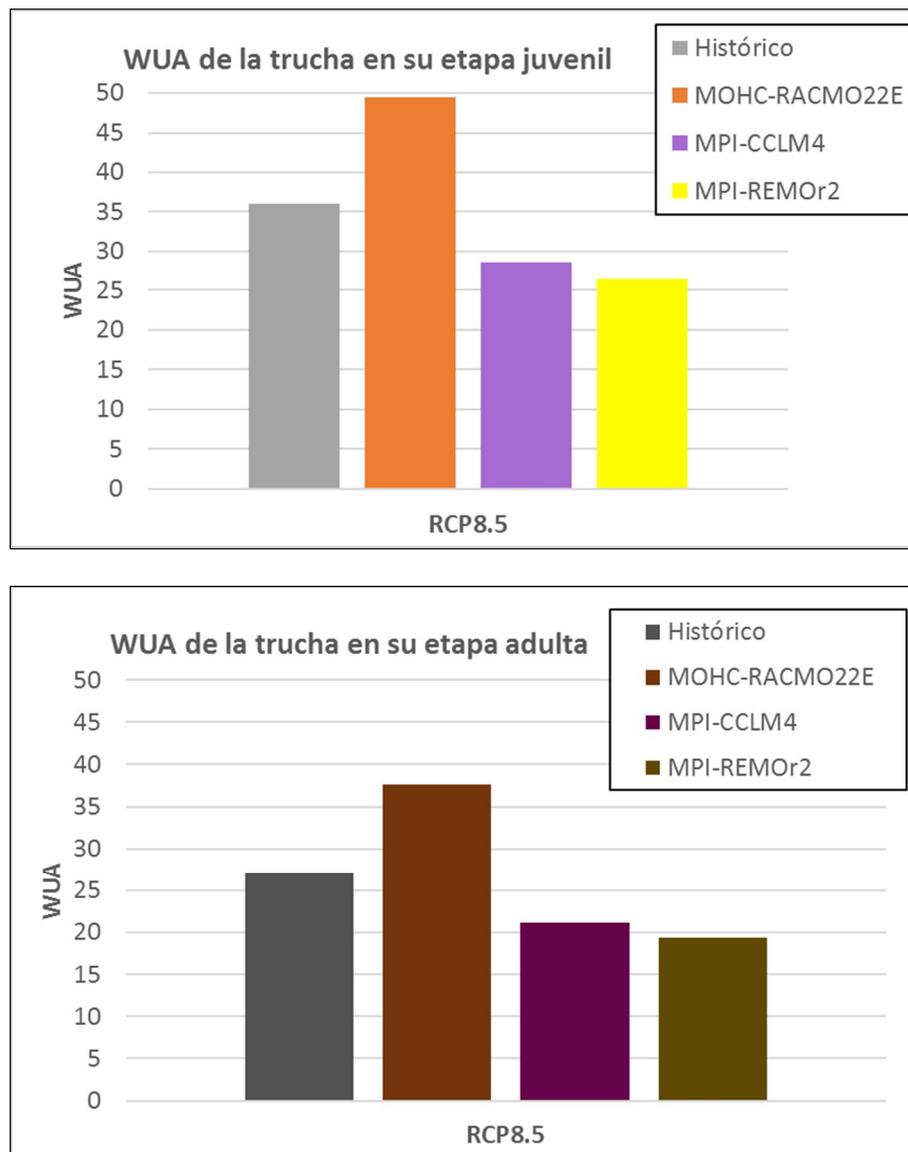


Figura 28: Hábitat Potencial Útil para las etapas juvenil y adulta respectivamente en el escenario RCP8.5. (Fuente: elaboración propia)

En las figuras anteriores se muestra como en el caso de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 el HPU de la trucha común en todos los modelos climáticos es mayor en la etapa juvenil que en la etapa adulta. Ahora bien, si se comparan estos valores con los obtenidos en el periodo histórico, éstos se sitúan por debajo, a excepción del modelo MOHC-RACMO22E, que se sitúa por encima. Esto está relacionado con los caudales obtenidos bajo escenarios de cambio climático. Los caudales para los modelos MPI-CCLM4 y MPI-REMO2 se sitúan en torno a los mismos valores, mientras que en el caso del MOHC-RACMO22E, el caudal se sitúa por encima de estos.

Analizando el HPU promedio de los diferentes escenarios, se observó como la reducción de HPU para la trucha común en su etapa adulta en el escenario RCP4.5 es la más alta (99.4%), mientras que en el escenario RCP8.5 en la etapa juvenil se produce la menor reducción del HPU (99.08%). Esto indica que la reducción de caudal está altamente relacionada con la pérdida de HPU.

6.3. Escenarios de Cambio Climático

Para los modelos de cambio climático, con sus respectivos escenarios, se llevó a cabo una serie de cálculos, análisis y comparativas de sus valores de precipitación, temperatura y, posteriormente, de caudales.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los modelos y para cada una de las subcuencas.

6.3.1. Valores de precipitación y temperatura de los escenarios de Cambio Climático.

Modelo MOHC-RACMO22E:

Los resultados en todas las subcuencas de este modelo son semejantes. Las precipitaciones descienden y se encuentran situadas, en la mayoría de los meses, por debajo de la precipitación histórica. En los escenarios RCP4.5mp se producen mayores precipitaciones que en el RCP4.5cp. Sin embargo, en el caso de los RCP8.5 se produce el efecto contrario, siendo mayores las precipitaciones del corto plazo que las producidas en el medio plazo.

Respecto a las temperaturas, éstas aumentan para todos los casos, siendo más importantes en los meses estivales.

Como ejemplo del siguiente modelo se presenta la subcuenca 0, las otras subcuencas se pueden observar en el *Anexo I: Estudio hidrológico*.

Subcuenca 0:

- Precipitación:

Las precipitaciones medias obtenidas para la subcuenca 0 del modelo MOHC-RACMO22E se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 14: Precipitación media (mm/mes) de la subcuenca 0 para el modelo MOHC-RACMO22E.

MOHC-RACMO22E Subc_0 Pmedia							
Mes	histórico	control	control corregido	4.5 (2011-2040)	4.5 (2041-2070)	8.5 (2011-2040)	8.5 (2041-2070)
Enero	40	48	37	17	25	41	26
Febrero	35	34	26	25	27	28	21
Marzo	35	57	43	30	30	50	37
Abril	54	83	66	51	46	60	64
Mayo	58	100	78	67	82	84	63
Junio	42	61	48	48	35	50	34
Julio	20	28	21	23	15	23	23
Agosto	35	53	42	50	49	51	42
Septiembre	59	100	81	58	66	53	55
Octubre	70	82	65	62	84	92	75
Noviembre	58	64	50	46	56	37	70
Diciembre	56	34	25	29	39	30	38

Se puede apreciar como los valores de precipitación para los periodos históricos y los periodos de control disciernen considerablemente, obteniendo grandes diferencias entre los valores en los meses de marzo, abril, mayo, agosto y septiembre, coincidiendo con el inicio del segundo y cuarto trimestre del año. Esta diferencia se puede apreciar mejor en la siguiente figura, en la cual se muestran en un gráfico los diferentes periodos de control corregidos y sin corregir, respecto al periodo histórico.

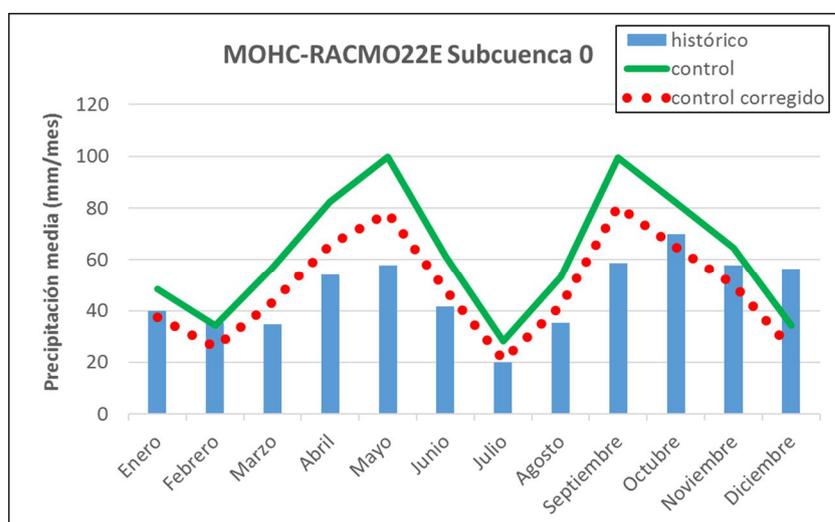
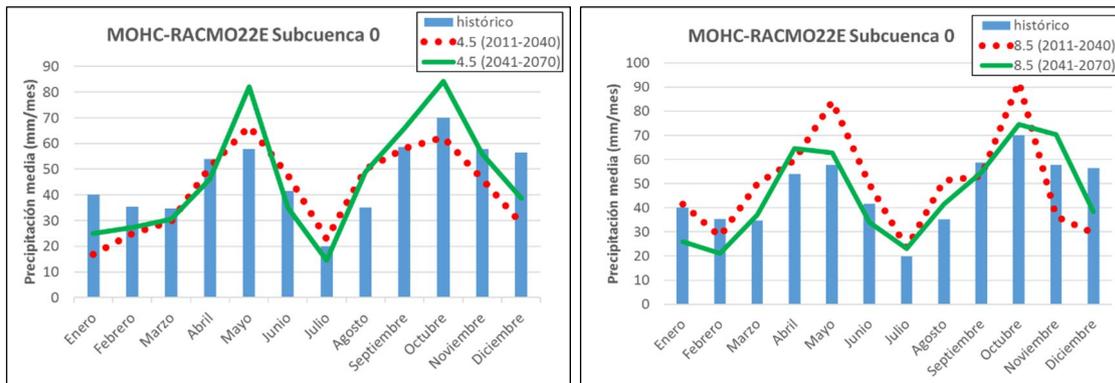


Figura 29: Comparativa de precipitaciones medias entre el periodo histórico, el periodo de control y el periodo de control corregido para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E). (Fuente: elaboración propia)

A continuación, se muestran las gráficas de las precipitaciones mensuales de los escenarios RCPs 4.5 y 8.5 a corto (2011-2040) y a medio plazo (2041-2070).

Figura 30: Comparativa de precipitaciones medias del periodo de control y los RCPs 4.5 y 8.5 a corto y medio plazo para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E) (Fuente: elaboración propia).



En el escenario RCP4.5, se puede observar como la precipitación para ambos escenarios parte de valores inferiores a los obtenidos en el periodo histórico. Ambos escenarios siguen la misma tendencia en los meses siguientes aumentando sus precipitaciones, hasta el mes de mayo en el que se produce un pico en sus valores, llegando a superar los valores del periodo histórico. Tras este aumento, se produce un descenso brusco de las precipitaciones en los meses estivales. En los tres meses siguientes se produce un ascenso pronunciado de las precipitaciones llegando en el caso del RCP4.5 mp⁹ a superar los valores históricos, sin embargo, en el caso del RCP4,5 cp¹⁰ se mantienen igual o incluso disminuyen. Para finalizar el año, hay un descenso de precipitaciones para ambos escenarios, quedando muy por debajo de los valores del periodo histórico.

En la figura de la derecha, se puede observar las variaciones en la precipitación en los escenarios RCPs 8.5 cp y mp. A diferencia del escenario RCP4.5, no existe tanta similitud entre los valores obtenidos a corto y medio plazo. Los mayores picos de precipitación se producen en el escenario 8.5cp, produciéndose en los meses de mayo y octubre, superando notablemente a los valores históricos. Tras estos aumentos se aprecian descensos bruscos en los valores quedando en el mes de noviembre por debajo de la precipitación histórica. En general para este escenario las precipitaciones se encuentran por encima del periodo histórico, exceptuando el mes de febrero, septiembre, noviembre y diciembre. Respecto al escenario a medio plazo, las precipitaciones siguen la tendencia de los valores históricos, siendo en

⁹ mp: medio plazo

¹⁰ cp: corto plazo.

algunos casos un poco superior a éste o bastante más inferior (enero, febrero, diciembre).

- Temperatura:

En la siguiente tabla se muestran las temperaturas medias mensuales obtenidas para la subcuenca 0.

Tabla 15: Temperaturas medias de la subcuenca 0 para el modelo MOHC-RACMO22E.

MOHC-RACMO22E Subc_0 Tmedia							
Mes	histórico	control	control corregido	4.5 (2011-2040)	4.5 (2041-2070)	8.5 (2011-2040)	8.5 (2041-2070)
Enero	7.95	3.56	7.90	8.66	9.89	9.61	10.17
Febrero	8.83	4.68	8.84	10.04	10.76	10.52	11.34
Marzo	10.64	7.10	10.98	12.10	12.55	11.76	12.71
Abril	12.24	9.34	12.83	13.88	14.79	13.78	15.01
Mayo	15.69	13.25	16.18	16.88	17.07	17.18	18.48
Junio	19.73	17.86	20.31	21.13	22.38	21.54	22.86
Julio	22.65	21.22	23.04	24.44	26.11	24.34	26.62
Agosto	22.86	20.98	22.84	23.66	24.91	24.21	25.78
Septiembre	19.79	16.42	19.07	20.55	21.48	21.07	22.43
Octubre	15.29	11.46	14.60	16.25	17.26	16.47	17.92
Noviembre	11.47	7.39	11.24	12.45	12.76	12.65	13.80
Diciembre	8.90	4.60	8.81	10.15	10.46	10.32	11.10

Se puede apreciar como los valores para el periodo de control están por debajo de los niveles históricos, pero como tras realizar la corrección de los mismos mediante la corrección del sesgo, estos valores se sitúan en los mismos niveles que los del periodo histórico.

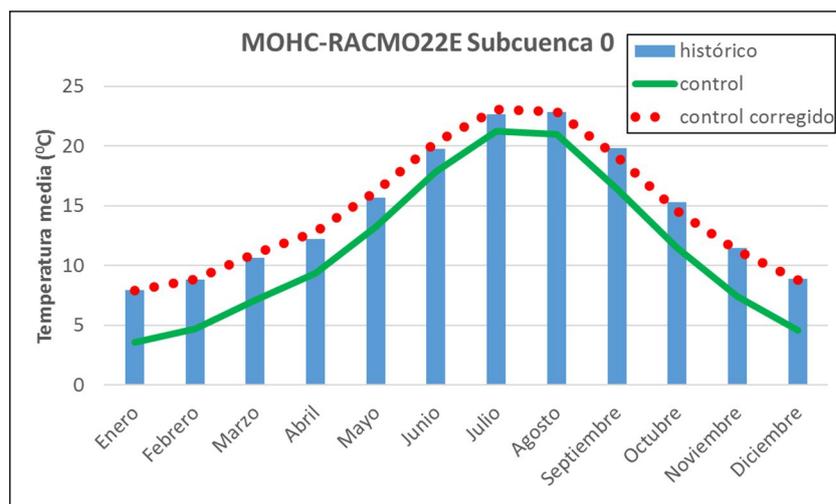


Figura 31: Comparativa de temperaturas medias entre el periodo histórico, el periodo de control y el periodo de control corregido para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E) (Fuente: elaboración propia).

Respecto los valores de los escenarios climáticos, tanto los RCP4.5 cp y mp y los RCP8.5 cp y mp, se sitúan por encima de los valores por encima de la temperatura media del periodo histórico. En ambos casos, las temperaturas de los escenarios aumentan del corto periodo al medio periodo, llegando incluso a aumentar en el mes de julio entre 3 y 4°C.

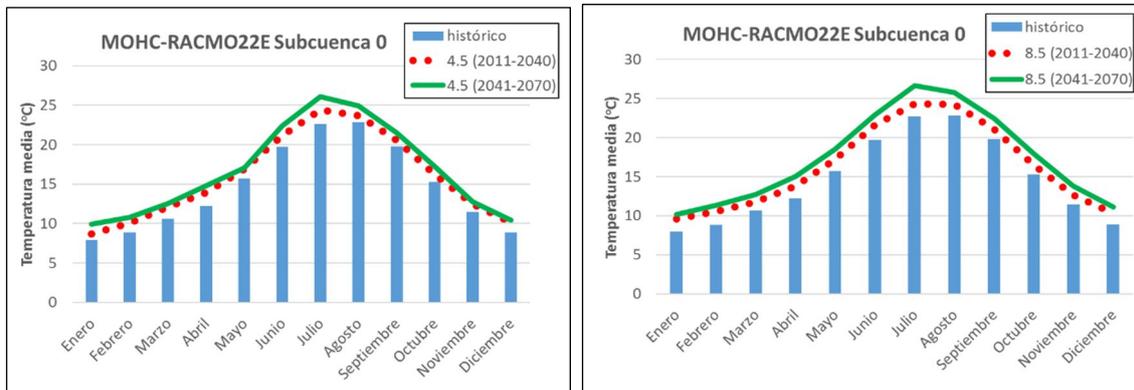


Figura 32: Comparativa de temperaturas medias entre el periodo histórico y los RCPs 4,5 y 8.5 a corto y medio plazo para la subcuenca 0 (MOHC-RACMO22E) (Fuente: elaboración propia).

Modelo MPI-CCLM4:

Subcuenca 0:

- Precipitación:

El valor de precipitación del periodo de control corregido y sin corregir no sufren apenas diferencia, sin embargo, al compararlo con los valores históricos, se aprecia como al inicio del año éstos están por debajo del periodo de control, pero en los meses de agosto, septiembre y octubre se sitúan por encima. A pesar de estas oscilaciones, las tres series siguen la misma tendencia: primero los niveles de precipitación sufren una pequeña reducción, después un aumento, seguido de un brusco descenso para inmediatamente ir aumentando hasta finalizar con un pequeño descenso.

En el escenario RCP4.5 los valores de precipitación parten de niveles por encima de los valores históricos, pero en el caso del periodo a medio plazo, los valores sufren una disminución hasta el mes de agosto, a partir del cual, sufren un aumento hasta final de año donde volverán a descender ligeramente. En el periodo de tiempo 2011-2040, correspondiente al corto plazo, los valores de precipitación sufren

oscilaciones, produciéndose un destacado pico en el mes de octubre, donde la precipitación aumentará considerablemente.

En el escenario RCP8.5 no se producen grandes oscilaciones en los valores de precipitación. A corto y a medio plazo, los niveles de precipitación parten por encima del periodo histórico, sin embargo, posteriormente van siguiendo su misma tendencia situándose, en muchos meses, por debajo de sus niveles.

- Temperatura:

La temperatura en la subcuenca 0 se sitúa en los mismos valores que en el periodo histórico, aumentando ligeramente en los escenarios RCP4.5 y 8.5 a medio plazo (2041-2070). Se produce el mayor aumento de los niveles de temperatura en los meses de julio y agosto, coincidiendo de esta manera con la época estival.

Subcuenca 1:

- Precipitación:

Los valores obtenidos en el periodo de control, con y sin corregir, y el periodo histórico son prácticamente iguales a la subcuenca 0, por lo que el comportamiento que siguen no varía.

De la misma manera ocurre con los escenarios RCP4.5 y 8.5. Los valores de éstos sufren escasas variaciones, entre 2-3 mm/mes, por lo que el comportamiento general de las precipitaciones no se diferencia del comportamiento observado en la subcuenca 0. Una diferencia respecto a la subcuenca 0, se obtiene en el caso del RCP8.5 a corto plazo. En él, los valores de las precipitaciones parten de niveles superiores de los de medio plazo y se sitúan en todo momento por encima o igual a éste.

- Temperatura:

La temperatura de la subcuenca 1 no se diferencia a penas de la temperatura de la subcuenca 0. Al igual que ocurría en la subcuenca anterior, en la subcuenca 1 los valores de mayor temperatura se producen en los meses de verano, julio y agosto, y en los escenarios climáticos a medio plazo.

Subcuenca 2:

- Precipitación:

Al igual que en las dos subcuencas anteriores, la comparativa entre los meses de control corregido, sin corregir y los históricos, siguen la misma tendencia y por tanto, su comportamiento es tremendamente similar.

Las precipitaciones en los escenarios climáticos son muy similares a la subcuenca 1. En el caso del RCP8.5 a medio plazo, los niveles de precipitación aumentan en comparación con la subcuenca 1, sin embargo, siguen manteniéndose por debajo del nivel histórico en la mayoría de los meses.

- Temperatura:

La temperatura de la subcuenca 2, a diferencia de las subcuencas anteriores, sufre un desplazamiento temporal. En el periodo de control corregido, la curva de la temperatura se desplaza hacia los meses de mayo, junio y julio, produciéndose el máximo en el mes de junio. Sin embargo, los valores del periodo histórico y de control siguen la misma tendencia que en las subcuencas anteriores, estando los valores de control ligeramente por debajo de los históricos y produciéndose el máximo en los meses de julio y agosto.

En los escenarios RCP4.5 y 8.5, a corto y medio plazo, los valores máximos están desplazados hacia los meses de junio y julio y son similares entre ellos, superando los niveles del periodo histórico. El periodo histórico queda desplazado a los meses de julio y agosto, y es estos meses donde se dan los valores máximos de temperatura.

Modelo MPI-REMO2:

Subcuenca 0:

- Precipitación:

Los niveles del periodo histórico muestran diferencias respecto a los valores de los periodos de control corregidos y sin corregir, los cuales no muestran apenas diferencia entre ellos. Para ambos periodos de control, los niveles de precipitación comienzan en niveles situados por debajo del periodo histórico. Comienzan a

augmentar, situándose por encima de este último a partir del mes de marzo, llegando el pico más alto en el mes de junio, en el cual se obtienen valores muy por encima del periodo histórico, con una diferencia de 30 mm/mes entre ellos. El descenso más pronunciado y en el que se muestra la mayor diferencia se produce en el mes de diciembre, en el que las precipitaciones llegan a disminuir 24mm/mes.

En los escenarios RCP4.5 a corto plazo, las precipitaciones presentan un aumento importante en el mes de julio, con una diferencia entre los valores del periodo histórico y el periodo a corto plazo (2011-2040) de 21 mm/mes. En este periodo de tiempo también se produce un descenso brusco en el paso del mes de noviembre a diciembre, obteniendo valores muy por debajo del periodo histórico, pasando de 61 mm/mes en el mes de noviembre a 20 mm/mes en el mes de diciembre. Además, en el periodo histórico del mes de diciembre, el valor de las precipitaciones se encuentra en valores de 56 mm/mes. En el periodo a medio plazo (2041-2070), no se producen ascensos bruscos de la precipitación, sin embargo, al igual que ocurre en el periodo anterior, en el mes de diciembre las precipitaciones descienden considerablemente respecto al periodo histórico, reduciéndose 36 mm/mes.

En el escenario RCP8.5, a corto y medio plazo, los valores de precipitación se mantienen por debajo de los valores históricos, siendo solo superados en los meses de junio y julio en el escenario RCP 8.5 a corto plazo y en el mes de julio en el escenario RCP 8.5 a medio plazo.

- Temperatura:

Las temperaturas en el periodo de control se sitúan por debajo de los valores de precipitación del periodo histórico, pero tras realizar la corrección del periodo de control, los nuevos valores se sitúan en los mismos niveles que los históricos.

En el caso de los escenarios RCP4.5 y 8.5 para todas sus series temporales, las temperaturas se sitúan por encima de los valores del periodo de control. Situándose por encima de la serie a corto plazo la serie a medio plazo.

Subcuenca 1:

- Precipitación:

A diferencia de la subcuenca 0, los valores del periodo de control se diferencian de los valores del periodo de control corregidos, estando estos últimos por encima. En ambos casos, las precipitaciones a principio y a final del año se sitúan por debajo de los valores del periodo histórico. Sufren el mayor aumento en el mes de junio, llegando a aumentar en el periodo de control corregido 44 mm/mes respecto al periodo histórico. Tras este ascenso, se produce un descenso de los valores llegando a permanecer más o menos estable.

En el escenario RCP4.5 a corto y medio plazo ocurre lo mismo que en el periodo de control. Ambos comienzan y terminan el año por debajo del valor del periodo histórico, pero en este caso, el aumento a corto y medio plazo se sitúan en meses diferentes. Para el RCP4.5 a corto plazo, el mayor aumento de las precipitaciones tiene lugar en el mes de junio, mientras que para el RCP4.5 a medio plazo se sitúa en el mes de septiembre. A partir de este mes, las precipitaciones sufren un descenso uniforme, disminuyendo hasta el mes de diciembre en un 30% su valor. Y comparando con el periodo histórico se reduce de 59 mm/mes a 19 mm/mes.

En el escenario RCP8.5 a corto y medio plazo todos los valores de precipitación se sitúan por debajo de los valores del periodo histórico, exceptuando el mes de junio y julio en el RCP8.5 a corto plazo, y el mes de julio en el RCP8.5 a medio plazo. En el primer caso, la precipitación aumenta en el mes de junio alcanzando los mayores valores para ese escenario, 66 mm/mes, y en el segundo caso, los valores de precipitación en julio están 25 mm/mes por encima del valor del periodo histórico. El mayor descenso se produce en el mes de febrero en el escenario a medio plazo, quedando la precipitación en valores en torno a los 15 mm/mes, llegando a ser superado incluso por el mes de agosto del periodo histórico (20 mm/mes).

- Temperatura:

La temperatura no muestra diferencia respecto a la subcuenca 0. El periodo de control, cuyos valores se sitúan por debajo del periodo histórico, queda corregido alcanzando sus valores de este modo a los niveles del periodo histórico.

En el caso de los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5, la temperatura aumenta obteniendo los valores más elevados en los meses de verano.

Subcuenca 2:

- Precipitación:

Los valores del periodo de control, control corregidos e históricos se asemejan mucho a la subcuenca 1. Al igual que en la subcuenca 1, en la subcuenca 2 los valores más elevados tienen lugar en el mes de junio, sin embargo, para el caso del periodo de control corregido el valor será superior que el alcanzado en la subcuenca 1, y en el periodo de control sin corregir, el valor obtenido será menor.

La precipitación del escenario climático RCP4.5 sigue la misma tendencia que la precipitación de la subcuenca 1. Los mayores valores de precipitación se producen en meses y época diferentes a corto y a medio plazo, siendo en el mes de mayo y en el mes de octubre respectivamente. El descenso más considerable y uniforme tiene lugar en el último trimestre del año, pasando de valores de 67 mm/mes en el mes de septiembre a valores de 21 mm/mes en el mes de diciembre. Además, en este último mes las precipitaciones sufren una importante disminución, pasando de 61 mm/mes en el periodo de control a 21 mm /mes en ambos escenarios RCP4.5.

En el escenario climático RCP8.5 las precipitaciones tienen el mismo comportamiento que en la subcuenca 1. El mayor ascenso de los valores a corto plazo se produce en el mes de junio y a medio plazo en el mes de agosto. El mayor descenso se produce en febrero en el escenario a medio plazo.

- Temperatura:

Al igual que en las dos subcuencas anteriores, el periodo de control, cuyos valores son inferiores a los del periodo histórico, son corregidos hasta alcanzar el mismo valor que el periodo histórico. Además, en los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5, a corto y medio plazo, las temperaturas son más elevadas que los valores del periodo histórico y es en los meses de verano del periodo 2041-2070 donde se obtienen los mayores valores.

Todas las tablas y gráficas de los anteriores apartados se pueden consultar en el *Anexo I: Estudio hidrológico*.

6.3.2. Caudales de los escenarios de Cambio Climático.

Subcuenca 0:

Tras realizar un análisis y una comparativa de los caudales, mediante el modelo de Témez, en los modelos de cambio climático elegido, se detecta que para la subcuenca 0, el modelo de cambio climático más favorable, en líneas generales, es el que corresponde al modelo MPI-CCLM4.

Para los escenarios RCP4.5 a corto (2011-2040) y medio plazo (2041-2070) el modelo más optimista es el MPI-CCLM4. En él se predice un aumento de caudal por encima del nivel del periodo histórico. En el escenario a corto plazo se produce, en los meses de marzo, abril y octubre, y es en este último mes cuando se obtiene el máximo valor del caudal. Esto es debido a que es en esos meses cuando se producen las mayores precipitaciones, obteniendo el máximo valor en octubre (94 mm/mes). Para el resto de los meses, el caudal se mantiene dentro de los valores del periodo histórico. Sin embargo, en el escenario a medio plazo, los mayores caudales se producen desde el mes de enero hasta el mes de abril. El máximo valor, 1.48 Hm³/mes, se produce en el mes de enero, coincidiendo con el valor de máxima precipitación (73 mm/mes), y a partir de este mes el caudal sigue una tendencia decreciente hasta el mes de agosto, donde se obtiene el menor caudal. Tras este descenso, se produce un aumento de caudal hasta el mes de noviembre. En este escenario el caudal se mantiene por encima de los valores obtenidos en el periodo histórico, exceptuando el mes de octubre, en el que el valor está ligeramente por debajo del valor del periodo de control.

No obstante, para los escenarios RCP8.5 a corto plazo y medio plazo el mejor modelo para la subcuenca corresponde al MOHC-RACMO22E. A corto plazo, se obtiene un aumento de caudal importantes y superior al nivel del periodo de control en todos los meses del año, a excepción de los dos últimos meses de año en los cuales el caudal se mantiene o se sitúa por debajo del periodo de control. El aumento más significativo de caudal se produce en el mes de octubre con un caudal próximo a los 1.6 Hm³/mes, y es en este mes cuando se produce la precipitación más importante para esa serie temporal (75mm/mes). A medio plazo, el caudal se mantiene alrededor de los niveles del periodo de control, estando en algunos meses

por debajo (febrero y diciembre). En el mes de noviembre se produce el mayor aumento de caudal.

El modelo climático más desfavorable para la subcuenca 0 corresponde al MPI-REMO2. En dicho modelo el caudal que se obtiene se sitúa por debajo de los valores del periodo histórico, llegando a estar al mismo nivel o ligeramente por encima de éste en muy pocas ocasiones. Cabe destacar, que es en este modelo donde se producen las precipitaciones más escasas, lo cual afectará a los caudales.

En la siguiente figura se muestra la comparación de los caudales obtenidos para todos los escenarios RCP de los diferentes modelos de cambio climático.

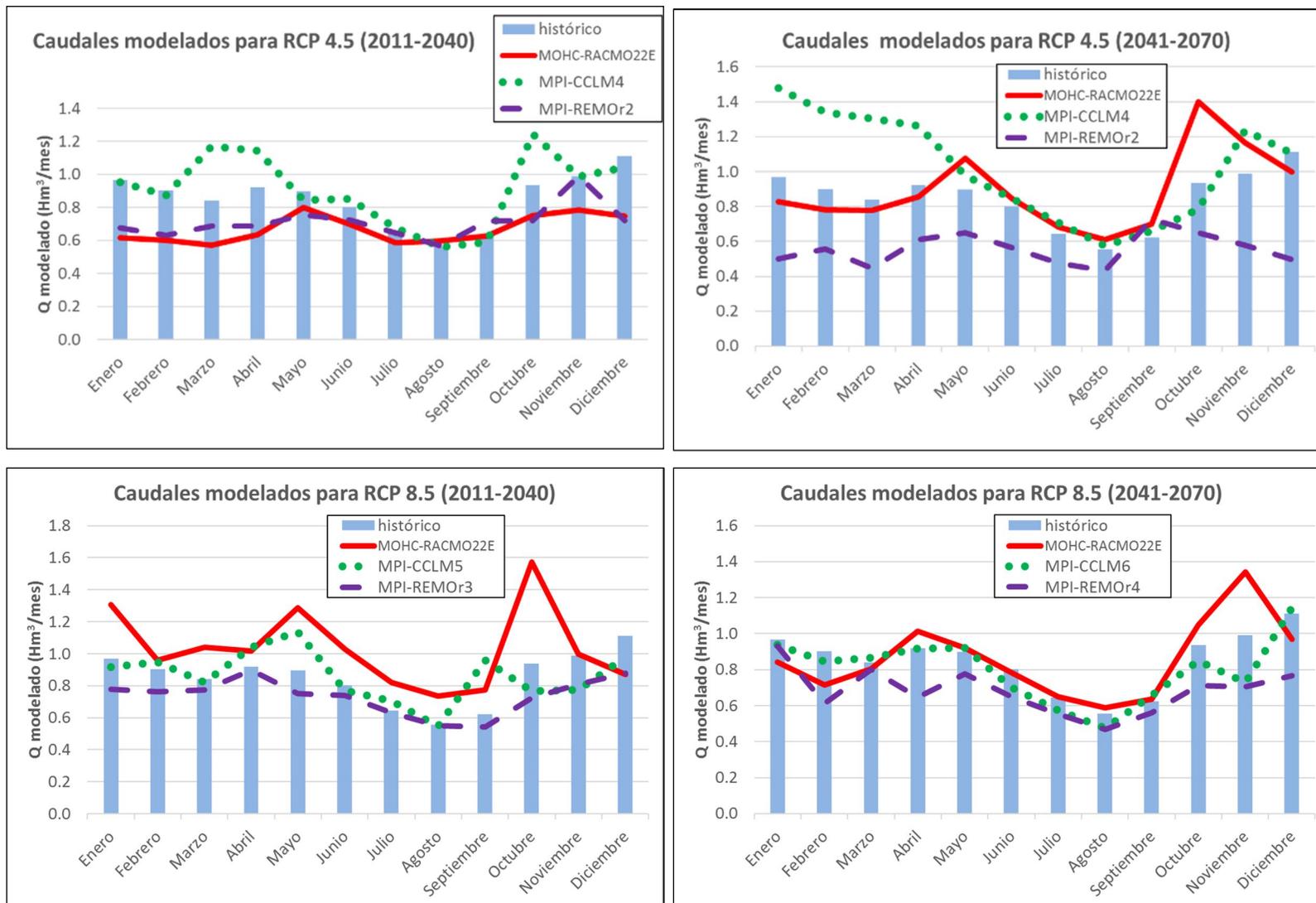


Figura 33: Caudales modelados a partir de los datos de los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5 (Fuente: elaboración propia)

Subcuenca 1:

En la subcuenca 1 se analizan y obtienen los caudales del mismo modo que en la subcuenca 0, observable en el *Anexo I: Estudio hidrológico*. Al realizar la comparativa entre los modelos de cambio climático, se obtiene como modelo más favorable a nivel general el correspondiente al MOHC-RACMO22E.

Sin embargo, para el escenario RCP4.5 a corto y medio plazo el modelo con el que se obtiene más caudal es el MPI-CCLM4. A corto plazo, se obtienen dos ascensos significativos de caudal en los meses de marzo y octubre, debido a que en esos meses hay un aumento de las precipitaciones, quedando el caudal durante el resto de los meses con valores muy semejantes a los del periodo histórico. En el escenario a medio plazo, el mayor ascenso de caudal tiene lugar en los primeros meses del año, obteniendo el mayor valor en el mes de enero, cuando se registra la mayor precipitación de la serie temporal, con un valor de 75 mm/mes. Se produce un descenso del caudal a partir de este último mes llegándose a estabilizar hasta el mes de noviembre, cuando se producirá un ascenso de éste.

Para todos los periodos del escenario RCP8.5, el modelo MOHC-RACMO22E es el que proporciona más caudal. A corto plazo, el caudal se mantiene por encima del periodo histórico en todos los meses del año a excepción del mes de diciembre, que se sitúa por debajo del nivel histórico. El mayor aumento de caudal se produce en el mes de octubre, coincidiendo con la máxima precipitación (92mm/mes), si lo comparamos con los niveles históricos para ese mes, pasando de un caudal igual a 0.33 Hm³/mes a un valor de 0.79 Hm³/mes. Al principio del año también se dan valores alto de caudal, llegando hasta los 0.6 Hm³/mes. A medio plazo, los meses en los que se obtiene mayor caudal es en octubre y noviembre, es en este último donde se produce el mayor ascenso. El caudal se sitúa por debajo de los niveles históricos en muy pocas ocasiones.

Al igual que en la subcuenca 0, el peor modelo de cambio climático es el MPI-REMO2, ya que el caudal se sitúa en la gran mayoría de los meses por debajo del periodo histórico, posiblemente debido a que es en este modelo cuando se registran las menores precipitaciones.

Subcuenca 2:

En el caso de la subcuenca 2, el modelo más favorable que proporciona mayores caudales es el MOHC-RACMO22E, coincidiendo de este modo con la subcuenca 1.

Sin embargo, para los escenarios a corto y medio plazo del RCP4.5 el modelo que proporciona mayores caudales es el MPI-CCLM4. El caudal en el periodo de años que abarca desde el año 2011 al 2040 sufre dos ascensos significativos, uno en el mes de marzo y otro en el mes de octubre, siendo en este último donde se produce el mayor caudal con un valor que sobrepasa los 2 Hm³/mes. Se produce en este mes las mayores precipitaciones, con valores de 95 mm/mes. En la época estival, el caudal que se obtiene se sitúa al nivel del periodo histórico y en los meses de enero, mayo, noviembre y diciembre, el caudal se sitúa en niveles inferiores, pero sin mostrar grandes diferencias. En el escenario RCP4.5 a medio plazo (2041-2070), el caudal modelado más grande se produce en el mes de enero, coincidiendo con el valor más grande de precipitaciones (78 mm/mes), y tras él, el caudal irá descendiendo hasta alcanzar el mínimo nivel en el mes de agosto. Al comenzar el último cuatrimestre del año, el caudal vuelve a aumentar.

El escenario RCP8.5 no comparte el mismo modelo que el escenario anterior, por lo que, en este caso, el modelo más favorable es el MOHC-RACMO22E. A corto plazo, el caudal se mantiene por encima del nivel histórico a lo largo de casi todos los meses obteniendo el máximo caudal en el mes de octubre, con una diferencia próxima a los 2 Hm³/mes en comparación con el caudal del periodo histórico de ese mismo mes. Tan solo en los meses de noviembre y diciembre el caudal se sitúa por debajo de los niveles obtenidos en el periodo histórico. Es en diciembre cuando se produce el descenso más grande, reduciéndose su valor a más de la mitad, pasando de 1.56 Hm³/mes del periodo histórico al 0.51 Hm³/mes del modelo. El escenario a medio plazo presenta, al igual que en el periodo anterior, la mayor parte de sus caudales por encima del nivel del periodo histórico obteniendo el mayor de los caudales en el mes de noviembre. A pesar de lo señalado anteriormente, existen más valores por debajo del caudal histórico que en el RCP8.5 a corto plazo. Los niveles de caudal modelado en los meses de diciembre, enero y febrero se sitúan por debajo del obtenido históricamente, llegando a ser inferior al 0.5 Hm³/mes.

Por el contrario, el modelo más desfavorable para la subcuenca 2 es el MPI-REMO_r2. Este modelo proporciona caudales modelados por debajo de los valores históricos en la gran mayoría de los meses y escenarios estudiados, y al igual que ocurre en las otras dos subcuencas estudiadas, las precipitaciones en este modelo son las más pequeñas.

Sus gráficos se pueden observar en el *Anexo I: Estudio hidrológico*.

6.4. Recomendaciones para la adaptación al Cambio Climático en el río Palancia.

El estudio que se ha realizado sobre los diferentes efectos del cambio climático que van a producirse en el río Palancia, lleva a la necesidad de tomar una serie de medidas de adaptación.

Por un lado, las condiciones hidrológicas e hidráulicas se muestran alteradas, de modo que se producen variaciones en los caudales y en el ecosistema fluvial, afectando a la trucha común que se encuentra habitando en él. La trucha común se muestra amenazada al reducirse los lugares de refugio y la posibilidad de encontrar sustrato alimenticio y zonas de freza. Por lo que es importante que las condiciones de su hábitat sean apropiadas para cubrir estas necesidades. Por lo que cabe destacar la importancia del caudal ecológico ante la reducción de la disponibilidad de caudal en el tramo de estudio en el río y la previsión futura de los descensos de caudal.

Por otro lado, actualmente la calidad del agua que circula por el tramo de río estudiado se considera de buena calidad, al no presentar cantidades importantes de vertidos, incluso llegando a la ausencia de los mismos. Así pues, el problema en este tramo es de cantidad de agua (principalmente empleada para la agricultura en zonas bajas de la cuenca), no de calidad del agua

Otra medida a tener en cuenta sería la mejora de la conectividad del río. A pesar de que en este trabajo no trate este asunto, es importante tenerla en cuenta puesto que afectará a la migración de los peces y con ella, a la supervivencia de los mismos. Esta conectividad se realizaría mediante la construcción de pasos de peces o a través de la eliminación de posibles obstáculos. Sin embargo, respecto a esta

conectividad, habría que estudiar la posible proliferación de especies exóticas, como la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792), ya que es capaz de adaptarse mejor a posibles nuevas condiciones y compite con la trucha común por los mismos recursos vitales.

7. Conclusiones.

Teniendo en cuenta la limitación que presenta el tramo de río en este estudio, ya que sufre variaciones importantes en su caudal a lo largo del año (suele presentarse seco o con un caudal muy pequeño), y la dificultad para obtener mediciones, se han cumplido los objetivos planteados y se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El modelo hidrológico realizado mediante el modelo de Témez es práctico y efectivo debido a que el índice de Nash era muy bueno y excelente para las diferentes subcuencas analizadas.
- El tramo de estudio empleado para la simulación del hábitat abarca el 88% del total del tramo elegido, por lo que se trata de un porcentaje elevado. Esto quiere decir que el análisis de sensibilidad permitió conservar la mayoría del segmento que fue simulado hidráulicamente.
- El Hábitat Potencial Útil obtenido en el periodo histórico muestra como tanto para la trucha común en su etapa juvenil, así como en su etapa adulta, se sitúan al inicio del cauce y al final de la poza, al ser una zona donde la velocidad es baja.
- Tras simular los caudales bajo escenarios de cambio climático se observó que el Hábitat Potencial Útil (HPU) de la trucha común, en la etapa juvenil y adulta, se sitúa al inicio del cauce y al final de la poza, del mismo modo que ocurre en el periodo histórico. En estas zonas la velocidad es baja (valores entre 0.30 y 0.36 m/s) y ahí se encuentran los mejores microhábitats.
- Se observó como la trucha común prefiere zonas donde el sustrato del lecho es más grueso, el cual tiene una elevada presencia de cantos rodados junto a gravas.
- El mayor valor del HPU se obtiene en el caudal de $0.078\text{m}^3/\text{s}$, el cual pertenece al RCP8.5 del modelo climático MOHC-RACMO22E para la trucha común en su etapa juvenil.
- Analizando el valor del HPU obtenidos en los escenarios de cambio climático, se observa como el descenso del caudal lleva consigo una reducción del hábitat de la trucha común. Si este descenso sigue aumentando, debido a que el estudio se sitúa en una cuenca mediterránea y donde los pronósticos futuros de precipitación y temperatura no son favorables, provocará la desaparición de

estos hábitats para la trucha común. Es por ello, la necesidad de respetar los caudales ecológicos implantados.

- Relacionado con el punto anterior, tal y como se ha comentado el efecto del cambio climático tendrá consecuencias sobre los ecosistemas fluviales, y a las especies que habitan en ellos, lo que repercutirá de manera directa o indirecta a los seres humanos. Es por ello, que se debería actuar con medidas de adaptación y mitigación, a nivel global como local, para evitar en la mayor medida de lo posible dicho efecto.
- Comparando los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5, se observa como los efectos en los escenarios de cambio climático varían según el modelo climático empleado, de esta forma, los valores de precipitación y temperatura tienen un grado de incertidumbre al variar estos considerablemente, aunque mantienen cierto grado de semejanza.
- El modelo hidrológico del modelo climático más favorable para las subcuencas analizadas corresponde al MPI-CCLM4, ya que para los tres casos de estudio el caudal se ve favorecido al situarse en niveles por encima o iguales del periodo histórico. Para el resto de los modelos, las subcuencas verán un descenso de sus caudales, lo que afectará negativamente a la trucha común que vive en el ecosistema fluvial.

8. Bibliografía.

- Alcaraz Hernández Juan Diego. (2011). *Estado de las poblaciones de trucha en los ríos de la Comunidad Valenciana y caracterización de sus hábitats*. Tesis Doctoral. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- <<http://hdl.handle.net/10251/14271>> [Consulta: 10 de abril 2018]
- Alcaraz Hernández, J. D., Martínez Capel, F., Peredo, M., & Hernández Mascarell, A. B. (2007). Relaciones entre densidades y biomásas de *Salmo trutta fario* y mediciones del mesohábitat en tramos trucheros de la Comunidad Valenciana. *Limnética*, 159-167.
- Almeida , D., Alcaraz-Hernández, J., Merciai, R., Benejam, L., & García-Berthou, E. (2017). Relationship of fish indices with sampling effort and land use change in a large Mediterranean river. *Science of Total Environment*, 605-606, 1055-1063.
- Almodóvar, A. (2001). La Trucha Común hacia una Nueva Estrategia de Conservación. En *Atlas y Libro Rojo de los Peces Continentales de España* (págs. 304-311). Madrid.
- Almodóvar, A., Nicola, G. G., Ayllón, D., & Benigno, E. (2011). Global warming threatens the persistence of Mediterranean brown trout. *Global Change Biology* , 1549-1560.
- Alonso, A., & Camargo, J. (2005). Estado actual y perspectivas en el empleo de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos como indicadora del estado ecológico de los ecosistemas fluviales españoles. *Ecosistemas*, 87-99.
- Bovee, K., & Zuboy, J. (1988). *Taller sobre el desarrollo y evaluación de los criterios de idoneidad del hábitat: una recopilación de ponencias y debates presentados en la Universidad Estatal de Colorado*. (pág. 407). Fort Collins, Colorado: F.a.W.S US Department of the Interior.
- Bovee, K., Lamb, B., Bartholow, J., Stalnaker, C., Taylor, J., & Henriksen, J. (1998). Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. *U.S. Geological Survey Information and Technology*.

- Chow, V. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- CORDEX, W. (2016). Obtenido de <http://www.icrc-cordex2016.org/index.php/about/what-is-cordex>
- Costa, M. (1999). *La vegetación y el paisaje en las tierras valencianas*. Madrid: Editorial-Rueda.S.L.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrogeología subterránea*. Barcelona: Omega.
- EdGE. Copernicus Climate Change Service. (s.f.). Obtenido de <http://edge.climate.copernicus.eu/Apps/#climate-change>
- García de Jalón, D. (1992). Dinámica de las poblaciones piscícolas en los ríos de montaña ibéricos. *Ecología*, 281-296.
- Gudmundsdson, L., Bremnes, J., Haugen, J., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - A comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3383-3390.
- Júcar, P. H. (2015). *Memoria Anejo 6- Sistemas de explotación y balances. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021*.
- Lasdon, L., Waren, A., Jain, A., & Ratner, M. (1978). Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming . *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 34-50.
- MacCrimmon, H. R., Marshall, T. L., & Gots, B. L. (1970). World Distribution of Brown Trout, *Salmo trutta*: Further Observations. *Journal Fisheries Research Board Canada*, 811-818.
- Marín Vivanco, R. (2007-2008). Estudio de las poblaciones de trucha común en el río Palancia, Bejís. 1-19.
- Marino, M. d. (2008-2011). Obtenido de <https://meteo.unican.es/trac/estcena/wiki/Datos/Observaciones>
- Martínez Capel, F. (2007). *Cálculo de caudales ambientales en las cuencas de Segre, Matarraña, Senia, afluentes del bajo Ebro en Cataluña y validación*

biológica en tramos significativos de la red fluvial de Cataluña. 2º Informe: Curvas de idoneidad de microhábitat y datos obtenidos.

Martínez-Capel, F. (2006). *Càlcul de cabals ambientals i validació biològica en trams significatius de la xarxa fluvial de Catalunya. Annex 9: Modelització en dues dimensions.*

Matthews, K., & Berg, N. (1997). Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California Stream pools. *Journal of Fish Biology*, 50-67.

Ministerio de Agricultura, P. y-M. (2018). Obtenido de <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/>

Ministerio de Sanidad, S. S. (s.f.). Obtenido de http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/Nuevos_escenarios_emision_RCPs.htm

Mouton, A. M., Alcaraz-Hernández, J. D., De Baets, B., Goethals, P. L., & Martínez-Capel, F. (2011). Data driven fuzzy habitat suitability models for brown trout in Spanish Mediterranean rivers. *Environmental Modelling and Software*, 615-622.

Muñoz-Mas, R., López-Nicolás, A., Martínez-Capel, F., & Pulido-Velázquez, M. (2015). Shifts in the suitable habitat available for brown trout (*Salmo trutta* L.) under short-term climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 686-700.

Muñoz-Mas, R., Martínez-Capel, F., Schneider, M., & Mouton, A. (2012). Assessment of brown trout habitat suitability in the Jucar River Basin (SPAIN): Comparison of data-driven approaches with fuzzy-logic models and univariate suitability curves. *Science of The Total Environment*, 440, 123-131.

Muñoz-Mas, R., Papadaki, C., Martínez-Capel, F., Zogaris, S., Ntoanidis, L., & Dimitriou, E. (2016). Generalized additive and fuzzy models in environmental flow assesment: A comparison employing the West Balkan trout (*Salmo farioides*; Karaman, 1938). *Ecological Engineering*, 365-377.

ONU. (s.f.). Obtenido de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>

Riahi, K., Grübler, A., & Nakicenovic, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 887-935.

Sagunt, C. G. (2018). Obtenido de <http://www.acequiamayordesagunto.com/index.php/infraestructuras/canal-teresa-viver>

Santiago, J. M., García de Jalón, D., Alonso, C., Solana, J., Ribalaygua, J., Pórtoles, J., & Monjo, R. (2016). Brown trout thermal niche and climate change expected changes in the distribution of cold water fish in central Spain. *Ecohydrology*, 514-528.

Sutherland AJ. 1987. Static armour layers by selective erosion. In Thorne CR, Bathurst JC, Hey RD. (eds.). *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons: Chichester, UK: 243–267.

Tomás Juan, R. (2015). *Análisis de impactos y adaptación al cambio climático en el sistema del río Júcar: Indicadores de alteración hidrológica en la cuenca del Júcar e impacto del cambio climático*. Trabajo Final de Grado. Valencia: Universitat Politècnica de València,

<http://hdl.handle.net/10251/59253>> [Consulta: 17 de abril 2018]

