



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA
AMBIENTAL**

Curso 2020-2021

**Evaluación del impacto de cambios del uso del
suelo y climáticos sobre el régimen hidrológico de
un río aplicando el modelo SWAT**

**Assessing the impact of land use and climate changes on the
hydrological regime of a river using the SWAT model**

GUILLERMO CALVO VAQUERO

TUTOR/ES DEL TRABAJO: LUCIA DE STEFANO

CARLOTTA VALERIO



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA
AMBIENTAL

Curso 2020-2021

**Evaluación del impacto de cambios del uso del
suelo y climáticos sobre el régimen hidrológico de
un río aplicando el modelo SWAT**

**Assessing the impact of land use and climate changes on the
hydrological regime of a river using the SWAT model**

GUILLERMO CALVO VAQUERO

TUTOR/ES DEL TRABAJO:

LUCIA DE STEFANO

CARLOTTA VALERIO

Fdo.:

Fdo.:



ANEXO I: DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

D./Dña. Guillermo Calvo Vaquero
con NIF 47581473Q, estudiante de Máster en la Facultad de
Geología de la Universidad Complutense de Madrid
en el curso 2020-2021, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado
Evaluación del impacto de cambios del uso del suelo y climáticos sobre el régimen hidrológico de un río
aplicando el modelo SWAT

y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/ es/son:

Lucia De Stefano y Carlotta Valerio

DECLARO QUE:

El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 29 de Julio de 2021

Fdo.:

Esta DECLARACIÓN debe ser insertada en primera página de todos los trabajos fin de máster conducentes a la obtención del Título.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. ZONA DE ESTUDIO	4
3.1 Localización	4
3.2 Contexto Climático	5
3.3 Contexto Geológico	6
3.4 Contexto Hidrogeológico	8
3.5 Suelos y usos del suelo	9
4. METODOLOGÍA	12
4.1 Recogida y pre-tratamiento de los datos	12
4.2 Creación del modelo SWAT	14
4.2.1 Creación de la cuenca hidrográfica	15
4.2.2 Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)	16
4.2.3 Ajuste de los parámetros de entrada y correr SWAT	18
4.3 Planteamiento y simulación de los escenarios	19
4.3.1. Escenario 1. (CRDY_CC)	20
4.3.2. Escenario 2. (CRIR_SCC)	21
4.3.3. Escenario 3. (CRIR_CC)	23
4.3.4. Escenario 4. (FRST_SCC)	23
4.3.5. Escenario 5. (FRST_CC)	25
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
5.1 Pretratamiento de los datos	26
5.2 Desarrollo del modelo y calibración	27
5.3 Escenarios de simulación	36
6. CONCLUSIÓN	47
7. BIBLIOGRAFÍA	48

RESUMEN

El modelo SWAT es modelo hidrogeológico ampliamente usado para la estimación de caudales a partir de datos meteorológicos y mapas de usos del suelo. Dicho modelo se aplicó para el estudio de los efectos de posibles cambios climáticos y de usos del suelo sobre la variación en los caudales generados en la cuenca del Arroyo Guatén, tributario del río Tajo.

Tras construir, calibrar y validar el modelo se plantearon 5 escenarios de simulación variando los usos del suelo y las condiciones climáticas. En cuanto a los usos del suelo, se varió la proporción de cultivo de secano presente en la cuenca, sustituyéndose por cultivos de regadío y bosques mixtos. Para las condiciones climáticas se planteó un escenario en el que se aprecia un aumento de las temperaturas y un descenso de las precipitaciones.

La combinación de los diferentes usos del suelo con las diferentes condiciones climáticas dió como resultado un descenso generalizado de los caudales estimados, confirmando así la importancia de utilizar modelos de simulación para predecir los efectos de posibles cambios de usos del suelo o para anticipar cómo podrían cambiar los caudales circulantes debido al cambio climático.

1. INTRODUCCIÓN

A la hora de gestionar una cuenca es muy importante tener en cuenta cualquier cambio que se produzca en las características de esta, pues cualquier variación acarrea un cambio en el comportamiento hidrológico de la cuenca. El caudal medido de un río depende de varios parámetros, como son las condiciones climáticas, el tipo de suelo o el propio uso que se dé a dicho suelo. Estudios como el realizado por Yang *et al.* (2017) apuntan a que los factores más importantes que condicionan el comportamiento hidrológico de una cuenca son los usos del suelo y los efectos del cambio climático. Por ende, es necesario el estudio de dichas variables para entender y cuantificar cómo pueden variar las condiciones hidrogeológicas de una cuenca de cara al futuro.

Con el fin de comprender y analizar este comportamiento existen programas específicos capaces de desarrollar modelos hidrológicos, es decir, una representación simplificada del comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica. Algunos de estos modelos son el modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT), el modelo Variable Infiltration Capacity (VIC), TOPMODEL, HBV o MIKESHE (Gayathri *et al.*, 2015).

Cada modelo requiere diferentes datos de partida y presenta un mejor o peor rendimiento para determinados estudios dependiendo de su funcionamiento. Estudios como los realizados por Yange *et al.* (2000) y Gayathri *et al.* (2015) tratan y comentan la eficiencia de cada uno de los modelos, comparándolos entre sí y dando una idea de cuán eficientes son. El modelo SWAT, por ejemplo, es una herramienta de libre uso que permite simular la producción de agua en cuencas hidrográficas, así como el estudio de otras variables como la producción de sedimentos y el análisis de la calidad de las aguas a partir de una calibración manual directa muy sencilla. El modelo VIC es muy eficiente a la hora de la gestión de las masas de agua destinadas a la agricultura, o el modelo MIKESHE, debido a que requiere de gran cantidad de datos y parámetros físicos, hace que solo sea posible su aplicación a pequeñas zonas de estudio (Gayathri *et al.*, 2015).

En el caso de este estudio se utilizará el modelo SWAT, ya que es el modelo más ampliamente utilizado para el tipo de análisis que se quiere realizar y se dispone de los datos que requiere para poderse utilizar. El modelo SWAT se caracteriza por ser capaz de simular caudales a partir de datos meteorológicos y los usos del suelo, los cuales son los que nos interesa estudiar. Además, el estudio realizado Martínez-Salvador y Conesa-García (2020) corrobora la efectividad de este modelo en ambientes Mediterráneos como los presentes en España, por lo que lo hace idóneo para el estudio que se va a realizar.

Los cambios en los usos del suelo forman parte de la evolución natural de una cuenca hidrográfica, por lo que el estudio de dichos cambios es crucial para poder predecir los

cambios en los caudales que se registrarán en la misma. Cambios en los cultivos, la edificación de suelos urbanos, o incluso la deforestación por incendios forestales o tala intencional provocan un cambio en los usos del suelo de una cuenca, lo que provoca una alteración en el comportamiento hidrológico de la cuenca y por ende un cambio en los caudales medidos. Por este mismo motivo, el estudio de los cambios del suelo y su impacto en la hidrología de la cuenca es un campo ampliamente estudiado tanto fuera de España (p.ej. Marie Mireille et al. 2019; Ghaffari et al. 2009) como en la propia península ibérica (p. ej. Jodar-Abellan *et al.*, 2019; Mongil-Manso *et al.*, 2021).

De entre todos los estudios realizados, muchos de ellos se sirven del modelo SWAT para llevar a cabo sus análisis. El modelo SWAT se ha utilizado para analizar las variaciones hidrológicas debido a los cambios en los usos del suelo en todo el mundo (Ghaffari *et al.*, 2009; Romanowicz *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2020), incluyéndose España (Jodar-Abellan *et al.*, 2019; Senent-Aparicio *et al.*, 2018; Pulido Velázquez *et al.*, 2015)

Además de permitir la simulación de los cambios en los usos del suelo, el modelo SWAT también es capaz de simular escenarios de cambio climático, tal como se aprecia en estudios como el realizado por Kiprotich *et al.* (2021), Pérez-Sánchez *et al.* (2020) o Martínez-Salvador *et al.* (2021).

Debido a las capacidades del programa, lo más común es la combinación de ambos estudios, pudiendo verse reflejado en multitud de análisis como los realizados por Peraza-Castro *et al.* (2018) o Senent-Aparicio (2018).

Así pues, para el desarrollo de este estudio se utilizará el modelo SWAT en su versión para QGIS (QSWAT) para comparar los caudales registrados en la cuenca del Arroyo Guatén, España, con los que se obtienen de la modelización de diferentes escenarios de cambios en los usos del suelo y los efectos de cambio climático.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio se centra en simular y analizar la variación en los caudales de agua superficial en el Arroyo Guatén para diferentes usos del suelo y escenarios de cambio climático mediante la herramienta Soil & Water Assessment Tool (SWAT) en su versión para QGIS (QSWAT),

Con este fin, el primer objetivo será la realización y calibración de un modelo hidrológico para la cuenca del Arroyo Guatén, un tributario del río Tajo. Tras la calibración de dicho modelo, se procederá a realizar las simulaciones de variación en los usos del suelo y escenarios de cambio climático.

Para el desarrollo de las simulaciones se propondrán dos escenarios de usos del suelo, respaldados por la tendencia de evolución y cambios de los usos del suelo observados durante las últimas décadas en España. Además, se plantearán tres escenarios más de cambio climático, uno sin alterar los usos del suelo y otros dos para cada uno de los escenarios de cambio de los usos del suelo propuestos. Para cada escenario estudiado se cuantificará la variación de los caudales circulantes (según el modelo) con respecto a las condiciones de referencia actuales.

3. ZONA DE ESTUDIO

La elección de la cuenca del Arroyo Guatén se debe a que esta cuenta con una estación de aforo cerca de su desembocadura hacia el río Tajo, así como una estación climatológica en el interior de la propia cuenca, requisitos indispensables para el desarrollo del modelo.

La presencia de una estación de aforo en la cuenca es vital para el desarrollo del modelo, puesto que es necesario contar con un registro histórico de los caudales medidos en la cuenca para poder calibrar el modelo hidrológico. Por otro lado, la presencia de una estación climatológica en el interior de la cuenca nos permite desarrollar el modelo con una mayor precisión, pues nos asegura que las condiciones climáticas utilizadas sean características y representativas de la cuenca estudiada.

3.1 Localización

La zona de estudio se trata de la cuenca del Arroyo Guatén, el cual forma parte de la cuenca del río Tajo, concretamente del sistema de explotación de Tajo Izquierda (Figura 1). Se trata de un arroyo con nacimiento en Humanes de Madrid, en la Comunidad de Madrid, que discurre por las localidades de Yeles y Torrejón de la Calzada, hasta desembocar como tributario del río Tajo cerca de la localidad de Villaseca de la Sagra, en la provincia de Toledo, en la Comunidad Autónoma de Castilla La Mancha.

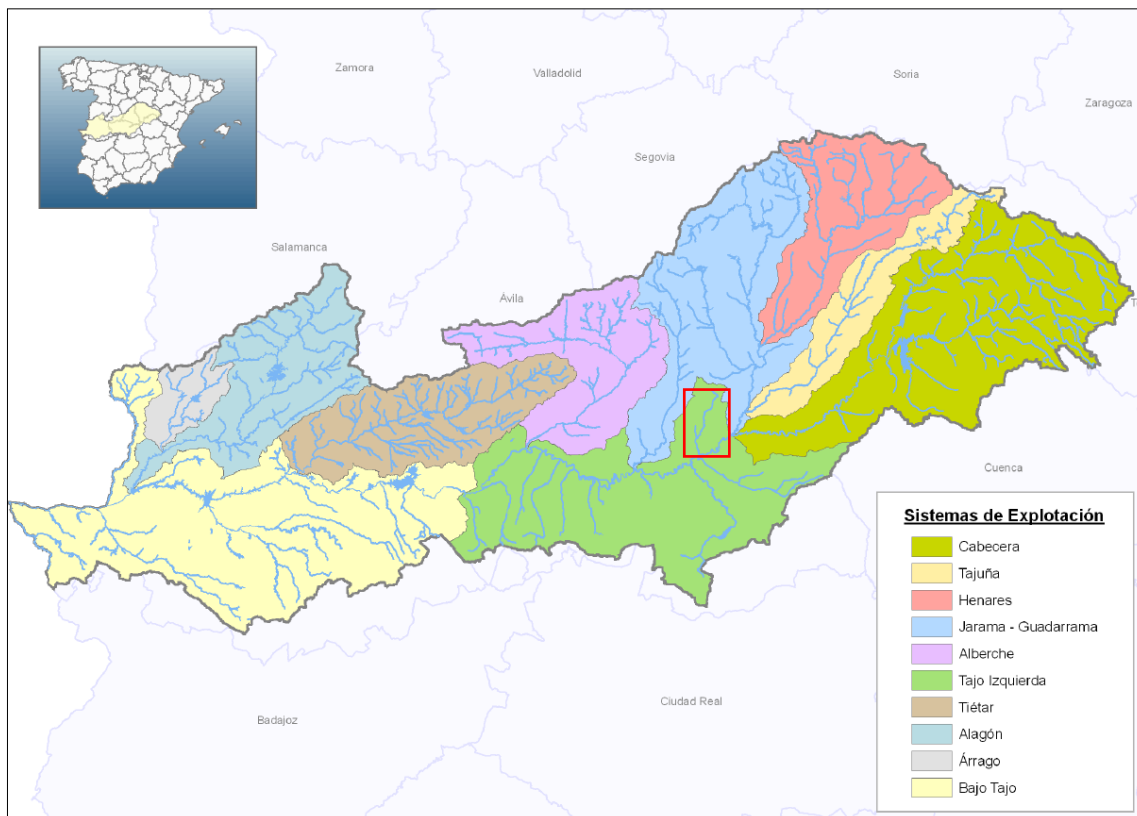


Figura 1. Localización geográfica del Arroyo Guatén dentro de la cuenca del Tajo. Escala 1:3.000.000. (MITECO, 2015)

3.2 Contexto Climático

La climatología de la zona se ha descrito en base a los datos aportados por una estación meteorológica dentro de la cuenca de estudio (estación p401-38) para los años 2000-2014. La climatología de la zona es representativa del clima mediterráneo continentalizado, con veranos calurosos con temperaturas máximas medias de 25°C e inviernos con temperaturas máximas medias de 9°C, presentando de una temperatura media anual de 15°C. Las precipitaciones se concentran entre los meses de octubre y mayo, pudiendo identificar un periodo seco con escasas lluvias entre los meses de junio y septiembre (Figura 2). La precipitación acumulada media anual es de 341 mm, destacando como en el mes de julio la precipitación diaria no llega a superar los 0,2 mm (Tabla 1) (AEMET, Global Weather Data for SWAT).

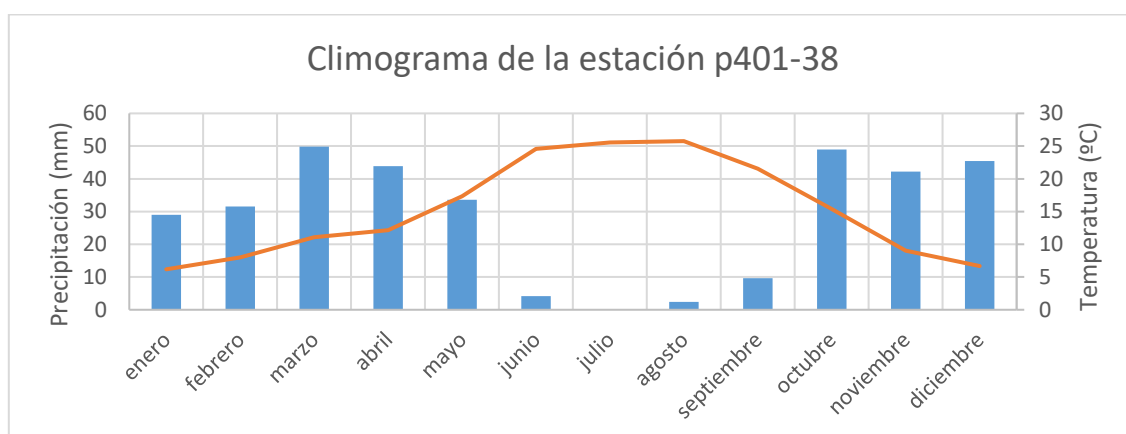


Figura 2. Climograma para la estación presente en la cuenca de estudio. (Basado en los datos aportados por Global Weather Data for SWAT)

La humedad del aire presenta valores medios anuales del 50%, con máximos del 80% en los meses de invierno y 40% en los meses de verano. Por otro lado, el viento también presenta variaciones leves a lo largo de todo el año, con unos valores anuales medios de 2,7 m/seg. (Global Weather Data for SWAT)

Mes	T media (°C)	P media acumulada (mm)	Mes	T media (°C)	P media acumulada (mm)
Enero	6,18	29	Julio	25,54	0
Febrero	8,01	32	Agosto	25,76	2
Marzo	11,06	50	Septiembre	21,56	10
Abril	12,14	44	Octubre	15,36	49
Mayo	17,33	34	Noviembre	9,02	42
Junio	24,57	4	Diciembre	6,67	45
			Media anual	15,27	341

Tabla 1. Valores medios mensuales de temperatura y valores medios de precipitación acumulada para la zona de estudio entre los años 2000-2010 para la zona de estudio. (Basados en los datos aportados por Global Weather Data for SWAT)

3.3 Contexto Geológico

La descripción de las litologías presentas en la zona de estudio está basada en los datos aportados por el mapa geológico de España distribuido por el Instituto Geológico y Minero Español (IGME), concretamente de las hojas 604 y 605, correspondientes a las zonas de Villaluenga de la Sagra y Aranjuez respectivamente.

En la cuenca del Arroyo Guatén se localizan materiales tanto miocenos como cuaternarios. Los materiales miocenos afloran en la mayor parte de la cuenca, pudiendo encontrar materiales del mioceno inferior, medio y superior (Figuras 3 y 4).

En cuanto a los materiales del mioceno inferior, se pueden observar afloramientos de lutitas rojas y conglomerados masivos, areniscas y arcillas localizadas en la zona inferior de la cuenca. Adyacentes a estas, aflorando en la zona este de la cuenca se pueden encontrar yesos tableados y nodulares intercalados entre arcillas verdes, grises, marrones y rojas, además de lutitas rojas, pardo rojizas y grises, con alternancia entre los yesos y las lutitas.

En cuanto a los materiales del mioceno medio, se pueden encontrar arcosas y lutitas, abarcando la mitad superior de la cuenca. Además, en zonas puntuales de la cuenca se localizan afloramientos de areniscas micáceas y carbonatos blancos.

Los materiales del mioceno superior se localizan en la zona más norte de la cuenca, consistiendo en calizas y dolomías micríticas con sílex y niveles de sepiolita. Además, se pueden apreciar arcosas y lutitas del mioceno superior en menor medida en una pequeña sección al este de la cuenca.

Por último, los materiales cuaternarios se tratan de limos, arenas, arcillas, gravas y cantos producto de la actividad fluvial del Arroyo Guatén, localizándose sobre el cauce del mismo arroyo a lo largo de toda la cuenca.

Cuaternario	Pleistoceno		Limos y arcillas con cantos dispersos. Localmente, arcillas yesíferas
	Holoceno		Arenas, gravas y cantos, ocasionalmente limos y arcillas. Localmente cementados
Mioceno	Superior		Calizas y dolomías micríticas con sílex y niveles de sepiolita
			Arcosas gruesas y lutitas ocre
	Medio		Arcosas blancas y lutitas ocre o rojizas
			Lutitas verdes y rosadas, areniscas micáceas y carbonatos blancos
			Carbonatos alternando con lutitas verdes, ocre y rojas o con margas blancas. Localmente areniscas micáceas y sílex
			Arenas arcósicas finas, arenas micáceas y lutitas verdosas y ocre
			Arcosas con cantos
	Inferior		Lutitas rojas, pardorajizas, verdes y grises, localmente nódulos de yeso y de areniscas. Alternancias de yesos y lutitas.
			Yesos tableados y nodulares intercalados entre arcillas verdes, grises, marrones y rojas.
			Conglomerados masivos, areniscas y arcillas. Debris
			Lutitas rojas con niveles de areniscas y edafizaciones

Figura 3. Leyenda para el mapa geológico de la cuenca del Arroyo Guatén (Basado en IGME, mapa Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000)

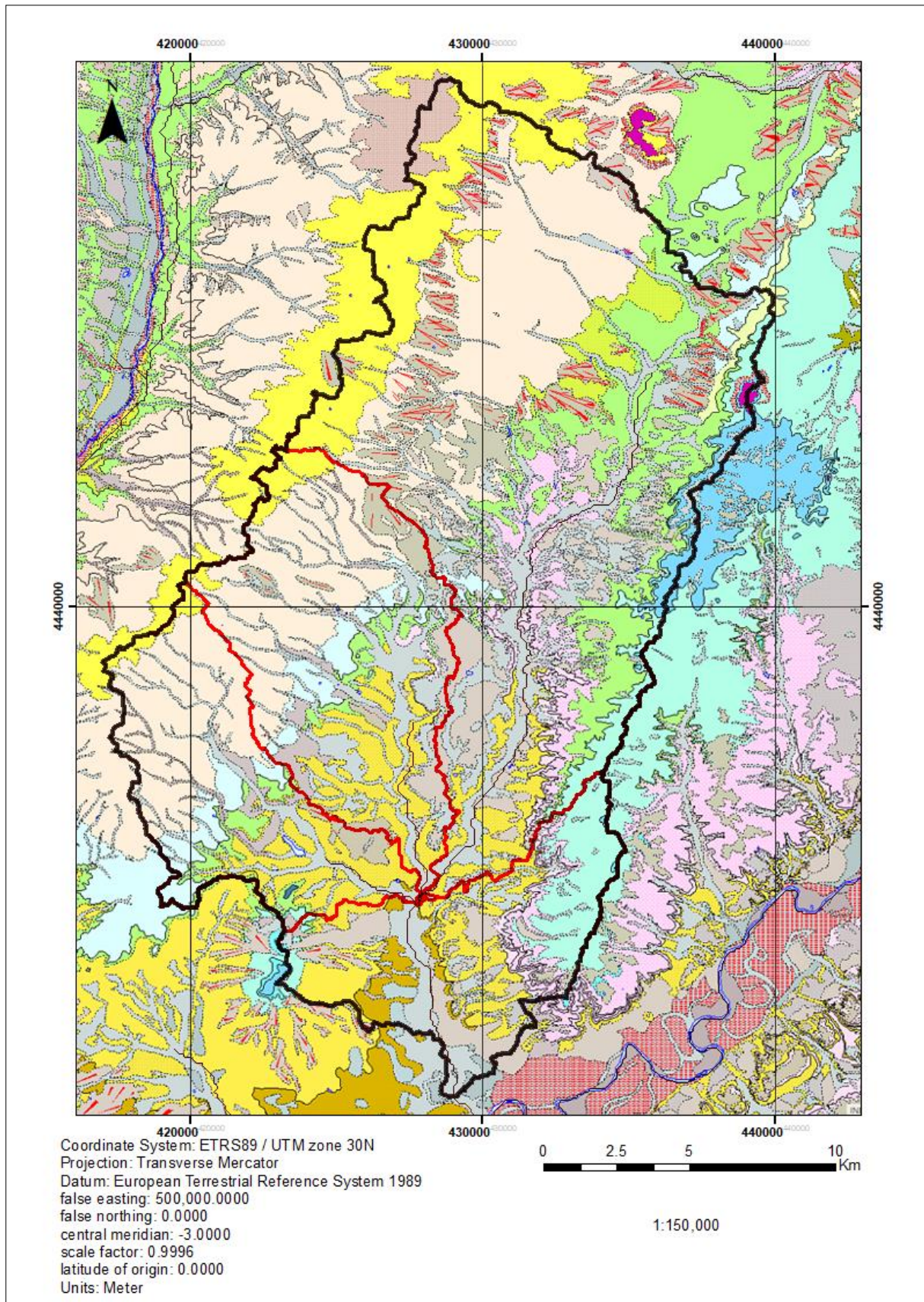


Figura 4. Mapa geológico de la cuenca del Arroyo Guatén (IGME, mapa Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000) En negro se representa la cuenca del Arroyo Guatén, mientras que en rojo que delimitan las subcuenclas generadas durante el desarrollo del modelo mediante el modelo SWAT.

3.4 Contexto Hidrogeológico

En cuanto a la hidrogeología de la zona, en la cuenca se pueden diferenciar cuatro tipos de ambientes principales:

- Llanuras aluviales y terrazas bajas, formadas principalmente por arenas, gravas y limos. Conforman acuíferos libres con porosidad intergranular y una permeabilidad media - alta, localizándose a lo largo del cauce principal del arroyo.
- Glacis y terrazas formadas por limos, arenas y conglomerados. Estos conforman acuíferos libres discontinuos, con porosidad intergranular y permeabilidad media – baja. Se localizan principalmente en las zonas más próximas al cauce.
- Materiales del mioceno medio-superior, conformados principalmente por arenas, limos, arcillas y calizas que conforman acuitardos. Acuíferos confinados o semiconfinados con porosidad intergranular y una permeabilidad entre baja y muy baja. Se localiza principalmente en la zona norte de la cuenca.
- Materiales del mioceno inferior-medio, formados principalmente por evaporitas, yesos carbonatados y arcillas. Conforman acuíferos aislados con karstificación, con una permeabilidad entre muy baja e impermeable. Se localizan repartidos por toda la cuenca, abundando en la zona sur de la misma.

Los acuíferos de la zona se agrupan en dos grandes unidades definidas por el Plan Hidrográfico de la Demarcación del Tajo (MITECO, 2015):

- 030.95. Talavera. Una masa de agua subterránea que conforma un acuífero poroso, moderadamente productivo, el cual abarca la zona sur de la cuenca.
- 030.011. Madrid: Guadarrama – Manzanares. Una masa de agua subterránea que conforma un acuífero poroso, moderadamente productivo, el cual abarca la zona norte de la cuenca.

En cuanto a las masas de agua superficial, la única masa de agua superficial presente en la cuenca es el propio Arroyo Guatén, Se trata de un río muy modificado, con extracciones de agua para el regadío de los cultivos de regadío presentes en el norte de la cuenca y en menor medida para la acuicultura. (MITECO, 2015). Presenta un caudal medio anual de 0,65 m³/seg, y los caudales medidos oscilan entre un caudal mensual mínimo registrado de 0,01 m³/seg y un caudal mensual máximo registrado de 2,47 m³/seg. (CEDEX, 2018)

3.5 Suelos y usos del suelo

La cuenca del Arroyo Guatén abarca una extensión de 42.428 hectáreas, cuyo uso principal se centra en la agricultura de secano. De acuerdo con el mapa Corine para los usos del suelo del año 2018 (IGN, 2018), dicha actividad abarca más del 65% de la superficie total de la cuenca.

El resto de los usos del suelo no superan el 10% del área total de la cuenca, ocupando más de un 5% de la superficie únicamente el tejido urbano (8,8%) y los olivares (7,43%).

En contraste al cultivo de secano, menos de un 2% de la superficie de la cuenca está destinada al cultivo de regadío, centrándose en dos puntos de la cuenca:

- Una pequeña parte de 170 ha en la zona norte de la cuenca, abastecida por captaciones del propio arroyo próximo a los cultivos (MITECO, 2015).
- Una mayor extensión de unas 600 ha en la zona sur de la cuenca, coincidiendo con su desembocadura hacia el río Tajo.

El resto de los usos del suelo se describen en la tabla 2 así como en la figura 5.

Uso del Suelo	Área (ha)	% área de la cuenca
Tierras de labor en secano	27826,55	65,58
Tejido urbano	3735,33	8,8
Olivar	3151,76	7,43
Terrenos agrícolas con vegetación natural	2085,87	4,92
Instalaciones deportivas y recreativas	1781,79	4,2
Praderas	1174,77	2,77
Zonas industriales	886,46	2,09
Tierras de labor en regadío	756,12	1,78
Redes de transporte	669,17	1,58
Bosques de coníferas	201,49	0,47
Tejido urbano discontinuo	103,79	0,24
Vegetación esclerófila	57,59	0,14

Tabla 2. Usos del suelo y su extensión en la cuenca de estudio (Mapa Corine de los usos del suelo, 2018).

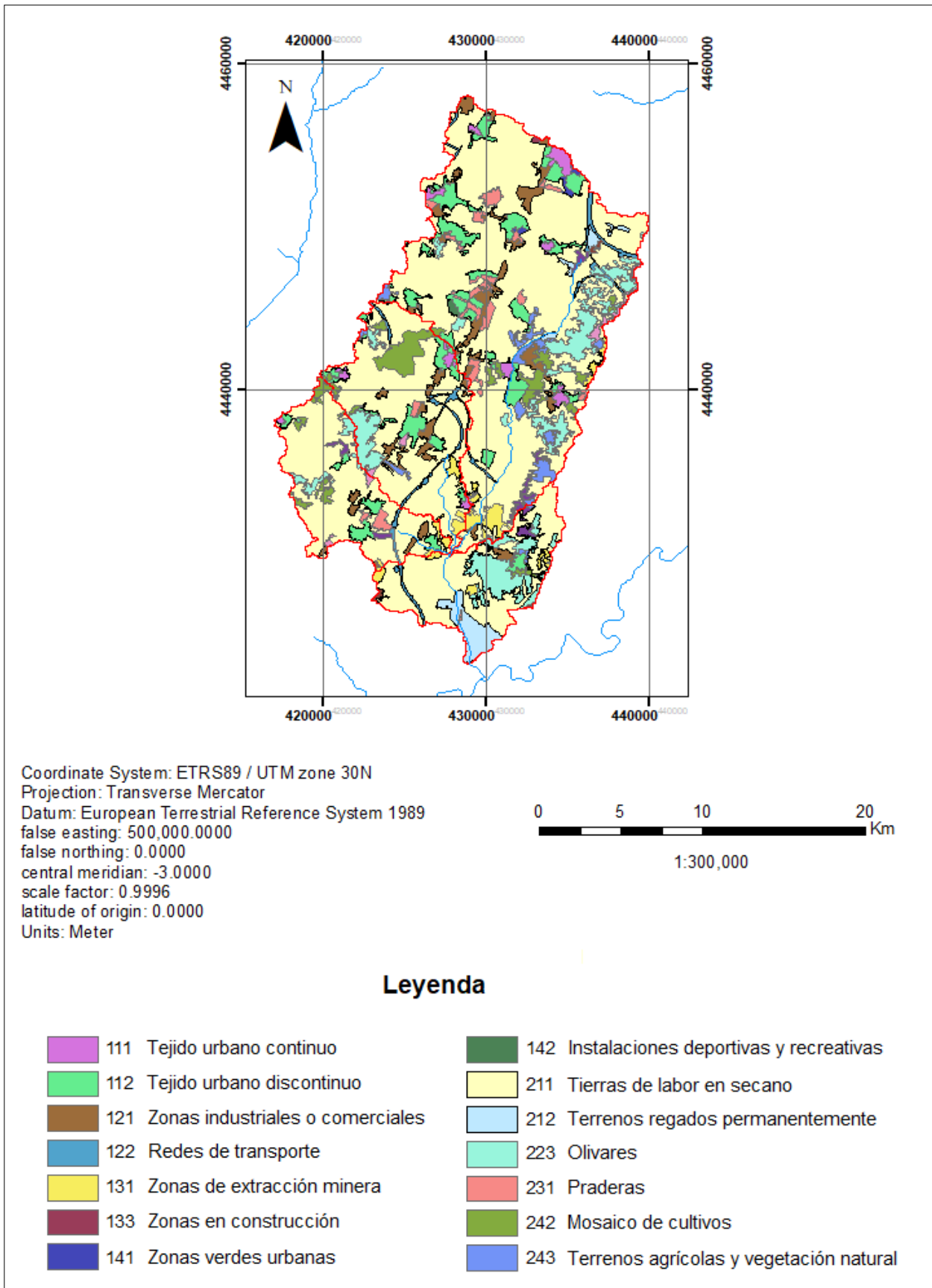


Figura 5. Distribución de los usos del suelo en la cuenca del Arroyo Guatén. En rojo se representa el límite de cuenca y las subcuencas generadas para el Arroyo Guatén mediante el modelo SWAT (Basado en el mapa de usos del suelo Corine, 2018)

En cuanto a los suelos que se encuentran en la cuenca, atendiendo al mapa global de suelos aportado por la página web de SWAT se distinguen tres tipos de suelos diferentes (Figura 6):

- Fluvisol éútrico (Lv8-2ab-6584). Corresponde a un 41% de la superficie total de la cuenca, apareciendo en la región occidental de la cuenca. Son suelos principalmente formados por depósitos recientes de origen fluvial.
- Cambisol Cálcico (Bk48-2-3b-6475). Abarca un 39% de la superficie total de la cuenca, apareciendo en la región central y oriental de la cuenca. Son suelos producto de la alteración de rocas, sobre todo depósitos de origen eólico, coluvial, o en este caso, aluvial.
- Luvisol vértico (Je87-2-3a-3149). Cubre un 20% de la superficie total de la cuenca, apareciendo en la zona norte de la cuenca. Se trata de suelos principalmente arcillosos desarrollados principalmente sobre materiales no consolidados, como es el caso de depósitos aluviales.

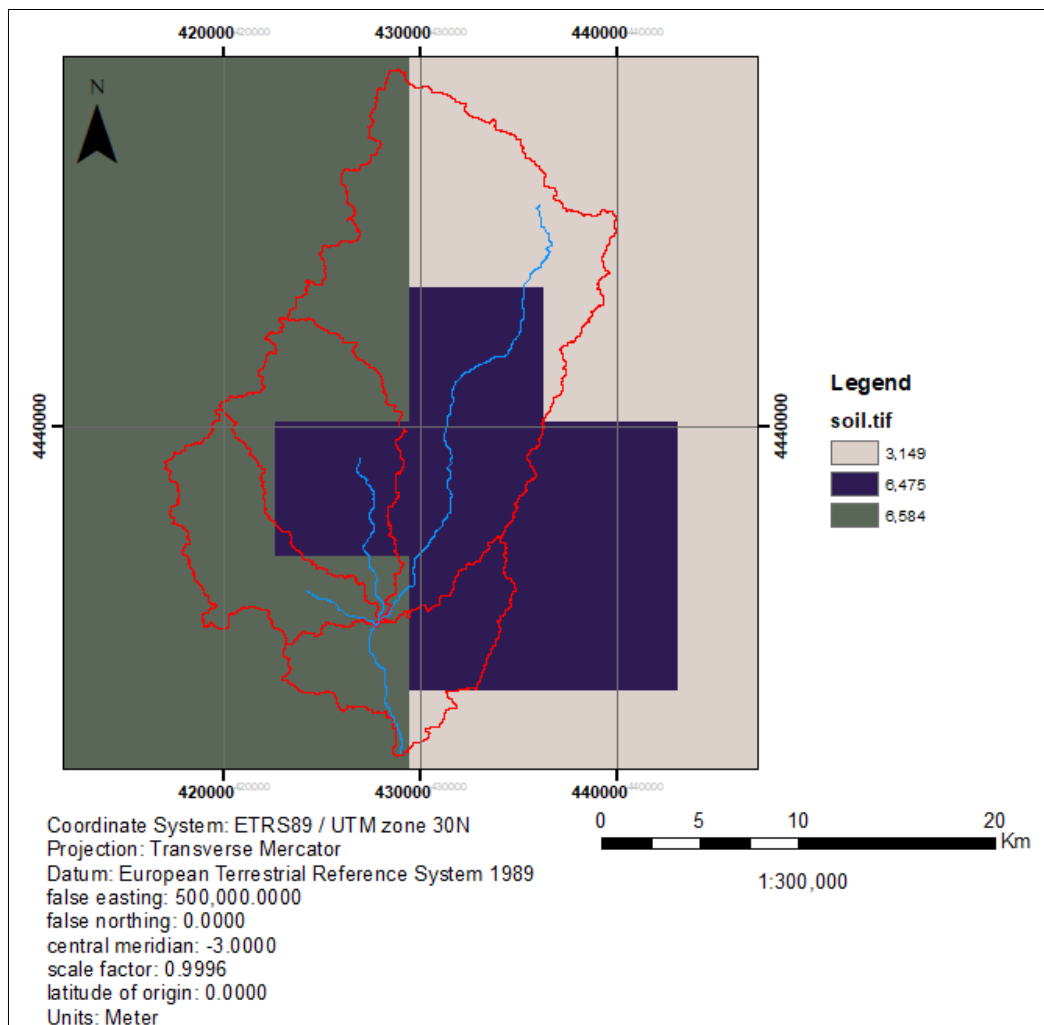


Figura 6. Distribución espacial de los tipos de suelos presentes en la cuenca del Arroyo Guatén. En rojo se representa el límite de cuenca y las subcuencas generadas para el Arroyo Guatén mediante el modelo SWAT (Mapa de suelos global, SWAT)

4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este TFM se aplicará el modelo SWAT en su versión para QGIS (QSWAT). El modelo SWAT es un modelo físico de lluvia-escorrentía capaz de simular y cuantificar el impacto de los usos del suelo y condiciones climática en la respuesta hidrológica de una cuenca. Como tal, el modelo SWAT simula el ciclo hidrológico de la cuenca en base a la ecuación general del balance hídrico, definido en el manual teórico de SWAT (Neitcsh et al, 2011) como:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Todos los parámetros se expresarán en mm, donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo, SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo para el día i , t es el tiempo en días, R_{day} es la cantidad de precipitación para el día i , Q_{surf} es la cantidad de agua superficial para el día i , E_a es la cantidad de evapotranspiración para el día i , w_{seep} es la cantidad de agua que se infiltra en la zona vadosa para el día i , y Q_{gw} es la cantidad de agua presente en el flujo de base para el día i .

Para la construcción del modelo SWAT se llevarán a cabo una serie de pasos, los cuales se presentan a continuación.

4.1 Recogida y pre-tratamiento de los datos

El modelo SWAT requiere una serie de datos de partida para la creación del modelo, destacando entre ellos los datos meteorológicos y los mapas de los usos del suelo. Los datos que se han recogido y utilizado para la creación del modelo son:

- Mapa Corine de los usos del suelo del año 2018 con escala 1:100.000, obtenido desde el centro de descargas del IGN.
- Mapa global de usos del suelo para Europa/Asia del año 1993 y una resolución de 400x400 m, proporcionado por la propia página de SWAT.
- Mapa global de suelos para Europa/Asia del año 1995, con escala 1:5.000.000, proporcionado por la propia página de SWAT.
- Mapa de ríos de España en formato shapefile del año 2007, con escala 1:25.000, obtenido de la página del MITECO.
- Caudales diarios obtenidos de la estación de aforo presente en la cuenca (estación 3232) obtenidos del CEDEX, con un rango de tiempo diario entre el 1 de enero de 1997 y el 14 de julio de 2014.
- MDT 25x25 m para la zona de la cuenca (hojas 0581,0582, 0604 y 0605), con una resolución de 25x25 m, obtenidos desde el centro de descargas del IGN.

- Datos meteorológicos de la estación meteorológica presente en la cuenca obtenidas en la página Global Weather Data for SWAT (estación p401-38), con una resolución temporal diaria entre el 1 de enero de 1997 y el 14 de julio de 2014. Dichos datos son los valores diarios de precipitación (mm), temperatura máxima y mínima (°C), energía solar (MJ/m²), velocidad del viento (m/seg) y humedad relativa (fracción).

Los enlaces web para todas las fuentes de obtención de los datos se recoge en la tabla 3.

Datos utilizados	Fuente
MDT25m. Hojas 0581,0582, 0604 y 0605	https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp
Mapa global de usos del suelo	https://swat.tamu.edu/data/
Mapa global de suelos	https://swat.tamu.edu/data/
Mapa Corine de usos del suelo (2018)	https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp
Mapa de ríos de España	https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/red-hidrografica.aspx
Caudales diarios (estación 3232)	https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-codigo.asp
Datos meteorológicos (estación p401-38)	https://globalweather.tamu.edu/

Tabla 3. Fuente de descarga para cada uno de los datos utilizados para el desarrollo del modelo.

Tras haber obtenido todos los datos necesarios para el desarrollo del modelo, se realizará un tratamiento preliminar de los mismos para evaluar su calidad y cargarlos en el modelo. Se realizará un análisis preliminar centrado en la exploración de los datos meteorológicos y de caudales en busca de anomalías. Se considerará anomalía cualquier valor sospechoso de ser erróneo y se corregirá mediante interpolación entre los valores inmediatamente anterior y posterior. A modo de ejemplo, valores puntuales muy elevados de caudal respecto de los inmediatamente anteriores y posteriores sin presencia de un evento lluvioso o de infraestructuras de regulación que justifiquen dicha crecida se interpretarán como errores.

Por otro lado, se compararán los datos diarios de precipitación obtenidos por la estación meteorológica con los caudales medidos por la estación de aforo en la cuenca. Esta comprobación se llevará acabo con la finalidad de comprobar cómo se relacionan los valores de caudal con los valores de precipitación, pues las épocas con precipitación elevada deberían registrar caudales elevados, del mismo modo que una ausencia de precipitaciones debería dar lugar a caudales bajos.

4.2 Creación del modelo SWAT

Tras comprobar la calidad de los datos de partida y que estos sean aptos para el desarrollo del modelo, se procede a la construcción del modelo SWAT. La creación del modelo sigue 3 pasos principales, definidos por el propio modelo y resumidos de forma esquemática en la figura 7.

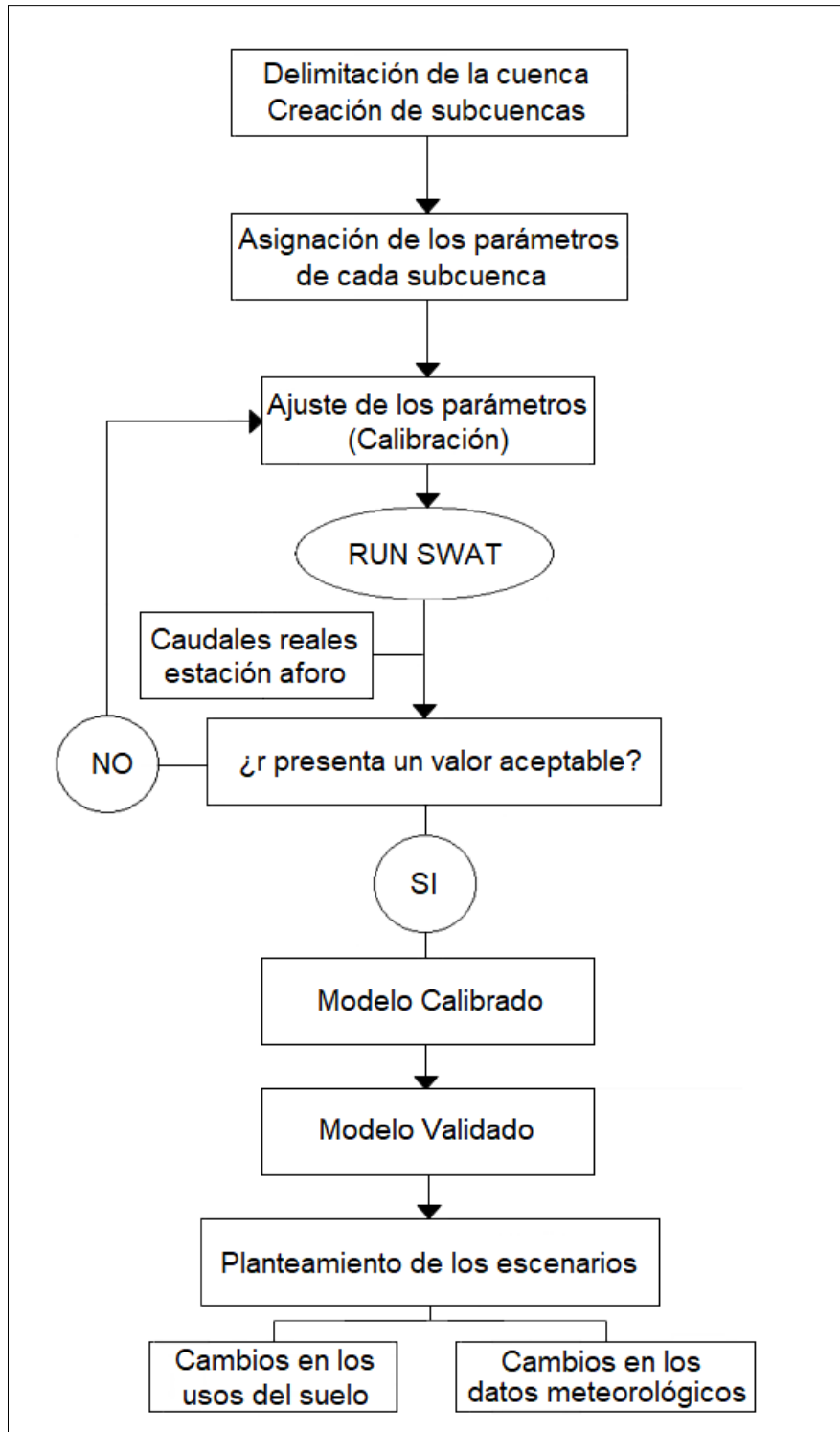


Figura 7. Modelo de flujo para el desarrollo del modelo SWAT y la simulación de escenarios.

4.2.1 Creación de la cuenca hidrográfica

El primer paso que requiere SWAT es la creación de la unidad básica de trabajo, la cuenca hidrográfica, la cual será subdividida en unidades menores denominadas subcuencas (subbasins). Esta subdivisión es altamente beneficiosa a la hora de realizar el modelo cuando existen diferentes áreas de la cuenca donde predominan usos y tipos de suelo lo suficientemente diferentes en propiedades como para producir un impacto en la respuesta hidrológica de la cuenca. La división de la cuenca en unidades menores permite diferenciar unas zonas de otras, funcionando como unidades independientes, lo cual permite asignar diferentes usos del suelo, tipos de suelo y propiedades a cada parte de la cuenca de forma independiente y por ende realizar un modelo más próximo a la realidad de la cuenca.

Para delimitar la cuenca, el modelo requiere primeramente de un mapa digital de elevaciones (MDT) de la zona que se va a tratar. A partir del relieve, el modelo es capaz de identificar y crear la red de drenaje, en base a la cual se crearán las diferentes subcuencas. Cuanto más compleja sea la red de drenaje más subcuencas generará el modelo, pues el modelo creará una subcuenca por cada uno de los ríos y arroyos que se generen en la red de drenaje.

La creación de la red de drenaje se realiza de forma automática por el modelo en función del relieve, pero también es posible importar una red de drenaje preexistente para facilitar su delimitación. Para la realización de este estudio se utilizará el mapa de ríos de España aportado por MITECO. Además, el modelo requiere asignar un umbral (threshold) para la creación de la red de drenaje. Dicho parámetro corresponde al área mínima para formar un río como ramificación de la red de drenaje principal. Cuanto mayor sea el umbral que se asigne, más agua será necesaria que drene para que se considere como un río, haciendo menos compleja la red de drenaje y por ende generando menos subcuencas. Para la creación de este modelo se asignará el valor por defecto de 32,33 km² como umbral para la creación de las subcuencas.

Por último, es necesario delimitar cuales son las entradas (inlets) y salidas (outlets) de agua superficial de la cuenca. Para la cuenca de estudio se asignará una sola salida de agua, situada en la zona inferior de ésta y coincidiendo con la localización de la estación de aforo. De este modo los valores de caudal que simule el modelo para ese punto podrán compararse con los recogidos por la estación de aforo, ya que presentarán las mismas condiciones al tratarse del mismo punto y recoger todo el agua de la cuenca.

Tras definir toda esta información, el modelo es capaz de generar los límites de la cuenca y dividirla en subcuencas, mostrando una vista previa de las subcuencas que se van a generar. Finalmente, antes de continuar y generar las subcuencas, el modelo permite editar las subcuencas con la posibilidad de unir varias en una sola.

4.2.2 Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)

Tras definir los límites de la cuenca y las subcuencas, el modelo SWAT requiere definir varios datos de entrada o *inputs* para cada subcuenca para construir el modelo. Uno de estos *inputs* son las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), las cuales consisten en una descripción que combina las condiciones del suelo presentes en la zona, incluyendo información sobre el tipo de suelo, el uso del suelo y la pendiente.

Para la creación de las HRU es necesario el uso de mapas de tipos de suelo y de usos del suelo, además de delimitar los intervalos de pendiente que se consideren oportunos. Una vez importados los mapas y definido los intervalos de pendiente el modelo permite la asignación de una o varias HRU para cada una de las subcuencas. En el caso de querer generar una sola HRU para cada subcuenca, el modelo permite asignar el uso del suelo, tipo de suelo, pendiente o HRU dominante como el representativo de toda la subcuenca. A modo de ejemplo, aplicando este método, una subcuenca con una HRU que ocupe un 51% de la superficie total de la subcuenca se consideraría dominante en dicha subcuenca y se asignaría esa HRU para toda la subcuenca, obviando el resto de HRU. Por otro lado, para la asignación de varias HRU para cada subcuenca, el modelo permite filtrar por uso del suelo, tipo de suelo o pendiente, delimitando un porcentaje de extensión mínimo para que se considere como representativo y se tenga en cuenta para la creación de las HRU. A modo de ejemplo, fijando un mínimo de 10% solo se tendrán en cuenta aquellos usos del suelo, suelos o rangos que pendientes que abarquen al menos un 10% de la subcuenca, ignorando para la delimitación de las HRU todos aquellos por debajo del 10%.

Para el desarrollo del modelo se compararán ambos métodos, utilizando para la creación del modelo final el que presente un ajuste mejor entre los caudales simulados y los observados en la estación de aforo presente en la cuenca. Pese a la simplificación que conlleva la creación de una sola HRU, debido a que la cuenca de estudio presenta un uso del suelo mayoritario (el cultivo de secano) ocupando más del 65% de la superficie total de esta, es posible realizar esta simplificación y atribuir todo el terreno de la subcuenca a dicho uso del suelo.

En cuanto a los mapas de usos del suelo, se realizarán dos modelos iniciales, uno utilizando el mapa de usos del suelo global aportado por la página de SWAT, mientras que el segundo utilizará el mapa de usos del suelo Corine del año 2018. Esto se llevará a cabo con la finalidad de comprobar qué mapa se ajusta mejor y comprobar si el mapa de usos del suelo global aportado por SWAT es representativo o no de la zona.

Para el mapa de suelos, debido a la ausencia de datos locales, se utilizará el mapa de suelos global aportado por la página de SWAT. Finalmente, los intervalos de pendientes definidos para el modelo serán de 0-8%, 8-30% y 30-9999%.

Para poder utilizar el mapa Corine en SWAT, es preciso crear una correlación entre los códigos que utiliza el mapa Corine y los códigos que usa la base de datos de SWAT para cada tipo de uso del suelo. Las correlaciones pertinentes se muestran en la tabla 4.

CODE CLC	Descripción	CODE SWAT	Name SWAT
111	Tejido urbano continuo	URBN	Residential
112	Tejido urbano discontinuo	URBN	Residential
121	Zonas industriales o comerciales	UCOM	Commercial
122	Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	UTRN	Transportation
124	Aeropuertos	UTRN	Transportation
131	Zonas de extracción minera	UIDU	Industrial
132	Escombreras y vertederos	UIDU	Industrial
133	Zonas en construcción	UIDU	Industrial
141	Zonas verdes urbanas	URBN	Residential
142	Instalaciones deportivas y recreativas	UCOM	Commercial
211	Tierras de labor en secano	CRDY	Dryland Cropland and Pasture
212	Terrenos regados permanentemente	CRIR	Irrigated Cropland and Pasture
221	Viñedos	GRAP	Vineyard
222	Frutales	APPL	Apple
223	Olivares	OLIV	Olives
231	Praderas	PAST	Pasture
242	Mosaico de cultivos	AGRL	Agricultural Land-Generic
243	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	AGRL	Agricultural Land-Generic
244	Sistemas agroforestales	FRST	Forest-Mixed
311	Bosques de frondosas	FRSD	Forest-Deciduous
312	Bosques de coníferas	FRSE	Forest-Evergreen
313	Bosque mixto	FRST	Forest-Mixed
321	Pastizales naturales	PAST	Pasture
323	Vegetación esclerófila	DWHT	Durum Wheat
324	Matorral boscoso de transición	RNGB	Range-Brush
333	Espacios con vegetación escasa	AGRC	Agricultural Land-Close-grown
411	Humedales y zonas pantanosas	WETL	Wetlands-Mixed
511	Cursos de agua	WATR	Water
512	Láminas de agua	WATR	Water

Tabla 4. Correlación entre los códigos del mapa Corine y la base de datos de SWAT

4.2.3 Ajuste de los parámetros de entrada y correr SWAT

Otro de los *inputs* que requiere el modelo SWAT son los datos meteorológicos, requiriendo valores diarios de temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Para la creación de este modelo, se recurrirá a los datos meteorológicos aportados por la estación meteorológica p401-38 localizada en el interior de la cuenca, obtenidos mediante la página web *Global Weather Data for SWAT*. Una vez introducidos los valores meteorológicos y creadas las HRU, el modelo SWAT generará un fichero para cada uno de los *inputs*, permitiéndonos editarlos independientemente con el fin de poder calibrar el modelo que se está creando.

Una vez seleccionado el intervalo de tiempo que abarcará la simulación y la resolución temporal de los mismos (resultados diarios, mensuales o anuales), se puede correr el modelo. Además, el modelo permite asignar un periodo de calentamiento (*NYSKIP*, *Number Years Skipped*) durante el cual el programa correrá, pero no devolverá resultados. Este periodo de calentamiento servirá para generar las condiciones iniciales de agua en el suelo y evitar así posibles errores en los resultados obtenidos. Tras correr el modelo, SWAT permite la exportación y visualización de los resultados.

El modelo se correrá seleccionado dos periodos de tiempo distintos: un primer periodo de calibración seguido de un segundo periodo de validación del modelo.

Primero se realizará la calibración del modelo, que consistirá en ir ajustando los parámetros de entrada del modelo de modo que los caudales simulados presenten un ajuste aceptable respecto de los datos de caudal reales obtenidos de la estación de aforo. Dicha calibración abarcará los años 2000-2010, con 3 años como periodo de calentamiento del modelo. El nivel de ajuste entre los datos de caudales simulados y los reales medidos en la estación de aforo permite dar la calibración por válida o, por lo contrario, decidir que es necesario mejorarla. Una vez que el coeficiente de correlación de Pearson entre sendos caudales tenga un valor aceptable, el modelo se considera calibrado y se procederá a la validación de este.

La validación consistirá en correr el modelo con los parámetros de entrada obtenidos en la calibración, pero utilizando otro intervalo de datos de precipitación y caudal. Este segundo periodo de validación se realizará para los años 2011-2014.

4.3 Planteamiento y simulación de los escenarios

Tras haber desarrollado, calibrado y validado el modelo se han propuesto cinco escenarios de simulación para poder observar la variación de los caudales simulados en la zona de estudio. Los escenarios propuestos se centran en la variación de los usos del suelo y de las condiciones climáticas con el fin de simular los efectos del cambio climático.

Cada uno de los escenarios se comparará con los resultados del modelo validado (al que de ahora en adelante se denominará como “*Baseline*”) con el fin de analizar la variación en los caudales y la hidrología respecto de la situación de partida.

Los escenarios de simulación en cuanto a los cambios en los usos del suelo se han planteado de acuerdo con la tendencia de evolución de los usos del suelo que se ha podido observar en estudios como OSE (2006), Fernández & Corbelle (2017) y Guaita *et al.* (2008) entre otros.

En dichos estudios se han podido observar que la principal tendencia en cuanto a evolución de los usos del suelo que afectan a la cuenca de estudio consiste en la reducción de las superficies de cultivo de secano, con las siguientes tendencias en Castilla La Mancha:

- Una expansión del cultivo de regadío en detrimento del cultivo de secano. Estudios como el realizado por Fernández & Corbelle (2017) y OSE (2006) sugieren el abandono de las tierras de cultivo de secano, sustituyéndolas por cultivos herbáceos de regadío asociados al cereal de primavera. Esta expansión del cultivo de regadío es corroborada en estudios de la evolución de los usos del suelo centrados en los mapas del uso del suelo Corine (OSE, 2006; Hewitt & Escobar, 2017). El 96% de las nuevas tierras de cultivos de regadíos que se han podido apreciar en las últimas décadas provienen de tierras con cultivos de secano (OSE, 2006).
- La segunda tendencia de cambio de usos del suelo consiste en el abandono de las tierras de cultivos de secano y la expansión de las zonas forestales de transición sobre estas (Martinez *et al.*, 2007; Guaita *et al.*, 2008). Tras el abandono de las zonas de cultivo de secano, la vegetación autóctona comienza a repoblar dichos terrenos, con la aparición de zonas forestales de transición. Además, la reforestación antrópica también favorece la expansión de estos bosques, repoblando las zonas de cultivos de secano abandonadas.

Por otro lado, los escenarios de cambio climático se simularán de acuerdo con los resultados de Barranco *et al.* (2018). Se optó por utilizar los datos presentados para el escenario RCP 8.5 con predicción para el año 2040-2070. Dicho escenario corresponde a los mayores valores estimados por las previsiones de cambio climático para dicho lapso temporal, por lo que

representa el escenario más desfavorable y extremo, lo que hace que sea el escenario más interesante de analizar.

Se tomarán los valores medios de cambio para las temperaturas y las precipitaciones propuestas para dicho escenario RCP 8.5. El resto de los parámetros meteorológicos (humedad relativa, energía solar y velocidad del viento) no presentarán variación respecto de los valores de referencia, pues de acuerdo con los estudios desarrollados por Kiprotich *et al.* (2021) y Cousino *et al.* (2015), la variación en dichos parámetros no afecta de forma significativa a los resultados de las simulaciones de cambio climático.

Así pues, los cinco escenarios de simulación propuestos se recogen en la tabla siguiente:

Escenario	Cambio del uso del suelo	Presencia de cambio climático
Baseline	No	No
CRDY_CC	No	Si
CRIR_SCC	Aumento 10% cultivo de regadío	No
CRIR_CC	Aumento 10% cultivo de regadío	Si
FRST_SCC	Aumento 15% bosque mixto de transición	No
FRST_CC	Aumento 15% bosque mixto de transición	Si

Tabla 5. Descripción de los diferentes escenarios de simulación.

Por simplicidad, cada uno de los escenarios se nombrará con dos códigos separados por un guion bajo. El primer código hará referencia código SWAT del uso del suelo que se aplica (CRDY en el caso del cultivo de secano, CRIR en el caso del cultivo de regadío y FRST en el caso del bosque mixto) mientras que el segundo código hará referencia a la presencia o ausencia de escenario de cambio climático (CC cuando se aplique, SCC cuando no lo haga). A modo de ejemplo, el escenario 1 se denominará como CRDY_CC, haciendo referencia al cultivo de secano y al planteamiento de caso de cambio climático.

4.3.1. Escenario 1 (CRDY_CC)

Para el primer escenario de simulación no se tendrán en cuenta cambios en los usos del suelo, sino que se planteará un escenario de cambio climático para la situación actual de la cuenca. De acuerdo con el estudio realizado por Barranco *et al.* (2018), las previsiones de cambio climático para el periodo de tiempo 2040–2070 para el escenario que se va a considerar (RCP 8.5) plantean un aumento medio de las temperaturas de 2,3°C, con una disminución del 8% en las precipitaciones diarias.

Así pues, partiendo de los valores de temperatura y precipitación disponibles para el periodo 2000-2014 (el estudiado para el desarrollo del modelo), se aplicarán dichas tasas de cambio

simulando un escenario de cambio climático para la cuenca en las mismas condiciones a las actuales. El resto de los parámetros serán los mismos definidos en la calibración del modelo.

4.3.2. Escenario 2 (CRIR_SCC)

Para el segundo escenario de simulación se tendrá en cuenta un cambio en los usos del suelo, planteando la sustitución parcial de terrenos de cultivo de secano a regadío. De acuerdo con la tendencia de evolución de los usos del suelo de la zona estudiada, en la zona de Castilla La Mancha se ha podido observar una expansión del cultivo herbáceo ligado al cereal de primavera (trigo, cebada, avena y centeno son los más representativos de España), proviniendo el 96% de estas nuevas tierras de regadío de zonas de secano. (Fernández & Corbelle, 2017). Los estudios plantean una sustitución en la superficie de cultivo en secano de entre el 3% y el 10% por superficie de cultivo de regadío. En el caso de este escenario de simulación, se propondrá una sustitución del 10% de la superficie de cultivo de secano a regadío.

En la cuenca actualmente se localizan dos áreas principales de cultivos de regadío, una en la región norte de la cuenca, con zonas pequeñas y localizadas de regadío, mientras que la otra se localiza al sur de la cuenca, con una extensión mucho más considerable de cultivos. Para el desarrollo del escenario, se supondrá que las nuevas zonas de cultivo de regadío no serán zonas esporádicas alejadas de las ya existentes, sino que las actuales zonas de cultivo en regadío se expandirán en detrimento de las zonas de cultivo de secano adyacentes. De este modo, ya que la mayor concentración de cultivos de regadío se localiza en la región sur de la cuenca (subcuenca 5), se expandirá el terreno de cultivo de regadío en dicha zona.

Para poder comparar este escenario de simulación con el modelo calibrado y validado desarrollado previamente, se partirá de la misma premisa y se crearán las HRU con la condición del HRU dominante para cada subcuenca del mismo modo que se realizó para la calibración de la *Baseline*. Se editó el mapa Corine de usos del suelo de modo que la superficie correspondiente a cultivos de secano (CRDY) para la subcuenca 5 pase a ser cultivo de regadío (CRIR). De este modo, la superficie de secano en la cuenca disminuye en un 10% aproximadamente mientras que el tipo de suelo se mantiene constante respecto de la validación del modelo. Así pues, las HRU para las subcuencas 1-4 permanecerán constantes, mientras que la HRU para la subcuenca 5 pasará de ser "CRDY/Lv8-2ab-6584/0-8.0" a "CRIR/Lv8-2ab-6584/0-8.0".

Debido a que el nuevo uso del suelo es un cultivo de regadío, se introducirá una nueva variable de riego automático para dicho cultivo. Este parámetro consiste en la simulación de toma de agua del propio cauce del río para suplir el riego que necesiten los nuevos terrenos de cultivo en regadío. Este es un factor importante para tener en cuenta, pues la extracción de agua del

cauce para el riego supone un descenso en los caudales obtenidos, sobre todo en los meses de verano donde las presiones de riego son mayores y hay una mayor demanda de agua debido a la escasez de las precipitaciones y las elevadas temperaturas.

A la hora de definir este parámetro de irrigación, el modelo SWAT permite seleccionar entre dos demandas de agua diferentes que desencadenen el regadío: demanda de agua por parte de las plantas o contenido de agua en el suelo. Para el desarrollo de este modelo se utilizará la opción de contenido de agua en el suelo, pues es la opción mejor simula la realidad de los cultivos de regadío (Chen et al. 2017).

Para imponer esta nueva condición, se introducirá el operador “*Auto-irrigation*”, el cual simula estas captaciones de agua cuando las necesidades de agua de la planta no se puedan satisfacer solo con la lluvia. Los parámetros tenidos en cuenta para definir este operador se recogen en la tabla 6.

Parámetro	Valor
GENERAL PARAMETERS	
Irrigation Source	Reach
Subbasin ID	5
AUTO-IRRIGATION PARAMETERS	
Schedule	By date
Intervalo de activación	1 April – 1 September
Water Stress Identifier (WSTRS_ID)	Soil Water Content
Water Stress Threshold that triggers irrigation (Auto_WSTRS)	0.95
Irrigation efficiency (IRR_EFF) (Fracción)	1
Amount of water applied each time auto irrigation is trigged (RR_MX) (mm)	25.4
Surface Runoff ratio (IRR_ASQ)	0
Irrigation code (IRR_SCA)	1 (Reach)
Irrigation source location (IRR_NOA)	5

Tabla 6. Valores para los parámetros de riego tomados en cuenta para el desarrollo del escenario.

El intervalo de tiempo propuesto para el regadío se corresponde con la época de riego, coincidiendo con los meses más secos de verano entre el 1 de abril y el 1 de septiembre. Por otro lado, el valor de la cantidad de agua aplicado durante el riego (RR_MX) se ha considerado como el valor estándar, de acuerdo con el estudio de Chen et al. (2017).

Además de estas modificaciones, uno de los parámetros que ha de ajustarse para la calibración del modelo es el denominado número de curva (CN_2), el cual depende el tipo de suelo y el uso que se le dé. El número de curva es un parámetro hidrológico que permite

caracterizar el potencial de escorrentía que se genera en una cuenca hidrográfica en función de las condiciones físicas del territorio, como es el caso de los usos del suelo y el tipo de suelo. Tras la calibración del modelo, el número de curva se ajustó para corresponder al cultivo de secano (CRDY), pero al introducir un nuevo uso del suelo, este valor ha de ajustarse. Así pues, para el cultivo en regadío se aplicará el valor 75, determinado en el manual de SWAT (Neitcsh *et al.*, 2011). El resto de los parámetros utilizados para la simulación serán los mismos aplicados en la calibración y validación del modelo.

4.3.3. Escenario 3 (CRIR_CC)

Para el tercer escenario se tendrá en cuenta la misma situación presentada en el escenario 2 combinada con un escenario de cambio climático. Las condiciones de cambio climático propuestas para este escenario serán las mismas que las propuestas para el escenario 1, es decir, un aumento de las temperaturas de 2.3°C y un descenso de las precipitaciones diarias del 8%.

4.3.4. Escenario 4 (FRST_SCC)

Para el cuarto escenario de simulación se tendrá en cuenta el segundo cambio en los usos del suelo, planteando la sustitución parcial de terrenos de cultivo de secano a zonas forestales. Como ya se ha mencionado previamente, la tendencia de evolución de los usos del suelo de la zona estudiada, en la zona de Castilla La Mancha se ha podido observar como las zonas de cultivos de secano abandonadas comienzan a ser repobladas de forma natural por zonas boscosas de transición y repoblación de bosques (Martínez *et al.*, 2007).

Estudios como los realizados por Guaita *et al.* (2008), Martínez *et al.* (2007) o Pulido Velázquez *et al.* (2015) estiman que esta sustitución es de entre el 10% y 20%, por lo que para el desarrollo de este escenario de simulación se propondrá una sustitución del 15% de la superficie total de cada subcuenca de cultivos de secano (CRDY) a bosques mixtos (FRST).

Para el desarrollo de este escenario, con el fin de poder comparar esta simulación con la calibración realizada del modelo, se editará el mapa Corine de usos del suelo de modo que para cada subcuenca se puedan generar dos HRU diferentes. La primera corresponderá al bosque de transición (FRST) ocupando un 15% del terreno, mientras que el resto de la subcuenca corresponderá al cultivo de secano (CRDY) (Figura 8).

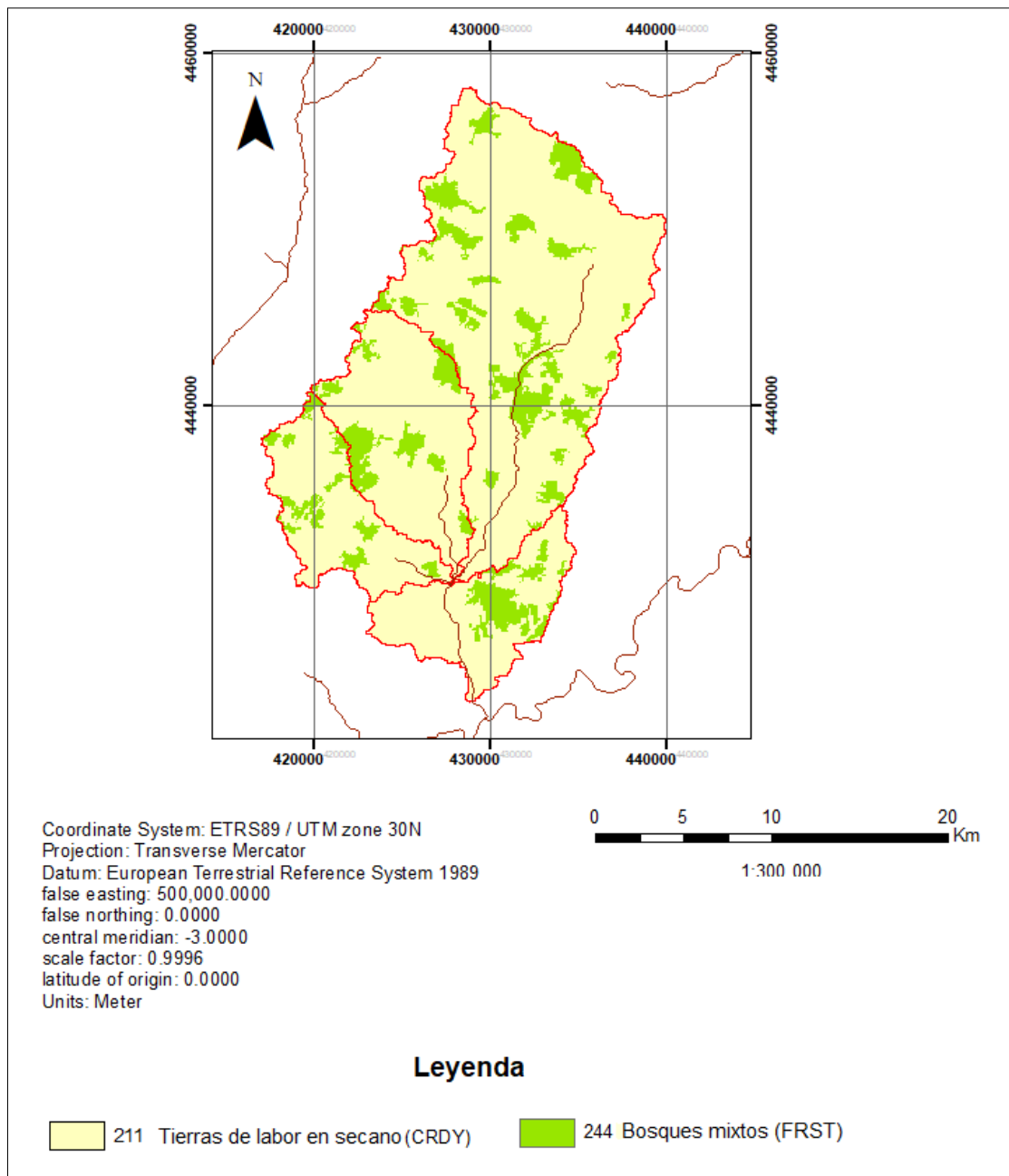


Figura 8. Mapa Corine de los usos del suelo editado para la simulación de los escenarios FRST_SCC y FRST_CC.

Para realizar estas HRU, en vez de asignar la HRU para cada subcuenca como el HRU dominante, se recurrirá a una asignación filtrando por uso del suelo, tipo de suelo y pendiente. Se asignará un filtro del 15% para los usos del suelo, de modo que cualquier uso del suelo que super el 15% de la superficie total de la subcuenca creará un HRU para dicho uso del suelo. La pendiente y los tipos de suelos no variarán respecto de la calibración, por lo que la diferencia será la aparición de una segunda HRU en cada subcuenca correspondiente al bosque de transición (FRST) que abarque un 15% de las mismas. Así pues, las HRU generadas serán las recogidas en la tabla 7.

Subcuenca	HRU 1	Descripción	HRU 2	Descripción
1	CRDY/Je87-2-3a-3149/0-8.0	Cultivo de secano, Fluvisol Éútrico	FRST/Je87-2-3a-3149/0-8.0	Bosque mixto de trasición, Fluvisol Éútrico
2	CRDY/Bk48-2-3b-6475/0-8.0	Cultivo de secano, Cambisol cálcico	FRST /Bk48-2-3b-6475/0-8.0	Bosque mixto de trasición, Cambisol cálcico
3	CRDY/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Cultivo de secano, Luvisol Vértico	FRST /Lv8-2ab-6584/0-8.0	Bosque mixto de trasición, Luvisol Vértico
4	CRDY/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Cultivo de secano, Luvisol Vértico	FRST /Lv8-2ab-6584/0-8.0	Bosque mixto de trasición, Luvisol Vértico
5	CRDY/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Cultivo de secano, Luvisol Vértico	FRST /Lv8-2ab-6584/0-8.0	Bosque mixto de trasición, Luvisol Vértico

Tabla 7 HRU generadas para el escenario FRST_SCC.

Del mismo modo que para las simulaciones CRIR, el número de curva para este nuevo cultivo ha de asignarse manualmente, por lo que se asignará un valor de CN₂ para los HRU asociados a este nuevo uso del suelo de 60, determinado igualmente por el manual de SWAT (Neitcsh et al, 2011). El resto de los parámetros utilizados para la simulación serán los mismos aplicados en la calibración y validación del modelo.

4.3.5. Escenario 5 (FRST_CC)

El quinto y último escenario consiste en la misma situación de uso del suelo presentada en el escenario 4, combinada con las condiciones de cambio climático fijadas para el escenario 1.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se procede a presentar y comentar los resultados obtenidos en cada uno de los pasos de la metodología.

5.1 Pretratamiento de los datos

Al analizar los datos de caudal medidos por la estación de aforo se pudieron observar algunos datos puntuales que se consideraron anómalos por presentar valores mucho mayores que los inmediatamente anteriores y posteriores sin que hubiese un evento lluvioso o de infraestructura de regulación que pudiese justificarlos. Dichos valores se interpretaron como un error, por lo que se eliminaron sustituyendo dichos valores por la media entre los valores inmediatamente anterior y posterior (Tabla 8).

Fecha	Valor Anómalo (m³/seg)	Valor Corregido (m³/seg)
1/10/2003	4,766	0,6535
23/5/2007	12,534	2,249
11/8/2009	9,398	1,014
6/3/2010	21,315	3,6365

Tabla 8. Valores anómalos de caudales observados y corregidos para la estación de aforo.

Por otro lado, los valores de precipitación se compararon con los observados en una estación meteorológica cercana a la población de Recas, a 15 km de la estación localizada en el interior de la cuenca. Ambas estaciones presentan un coeficiente de correlación de Pearson de 0,95, pudiendo observar cómo cualquier valor extremo ocurría en ambas estaciones simultáneamente y, por ende, se interpretó que no había ninguna anomalía en la serie de datos. A la hora de desarrollar el modelo, sin embargo, solo se utilizó una sola estación meteorológica (la presente en el interior de la cuenca), ya que al presentar una correlación tan alta el uso de sendas estaciones hubiese sido redundante.

A continuación, se compararon los valores de caudal y precipitación con el fin de comprobar que los caudales circulantes eran coherentes con la precipitación registrada. Se pudo apreciar cómo los caudales máximos se registran en las épocas de máximas precipitaciones, registrándose los caudales mínimos en los meses de verano (Figura 9). Cabe destacar que durante los meses de verano (junio – septiembre) la precipitación es prácticamente nula y que el caudal mínimo registrado durante dicho periodo es de 0,2 m³/seg.

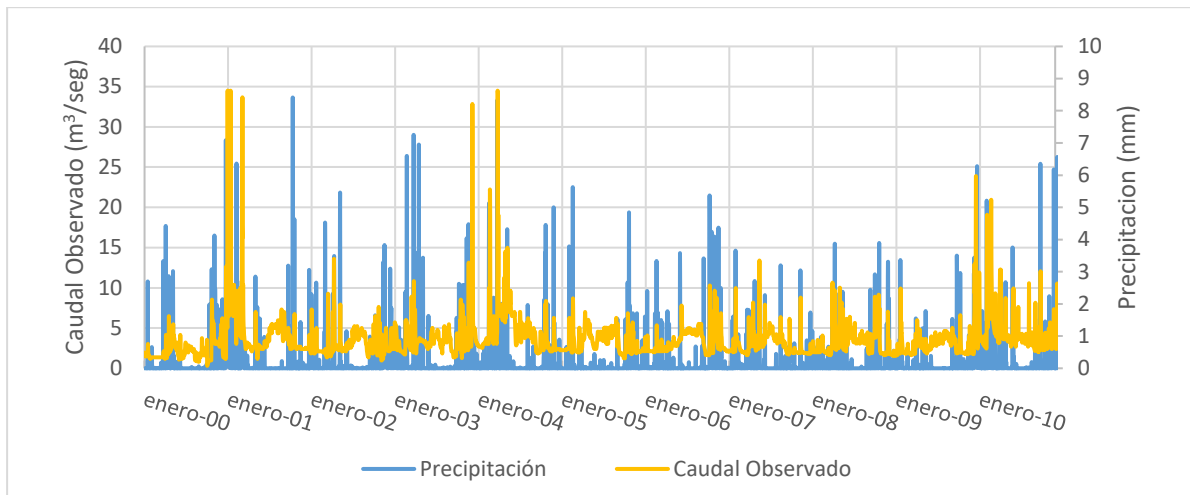


Figura 9. Relación entre precipitación y caudal observado para la cuenca entre los años 2000 y 2010.

5.2 Desarrollo del modelo y calibración

Tras la creación de la red de drenaje y delimitar el punto de salida de agua de la cuenca, el modelo generó la cuenca hidrográfica y 5 subcuencas para la zona de estudio (Figura 10).

Se construyeron dos modelos diferentes, uno para cada uno de los mapas de usos del suelo disponibles (Mapa global SWAT y mapa Corine de los usos del suelo de 2018) con el fin de comprobar cuál daba mejores resultados de simulación. Para cada modelo se realizaron además dos variantes, generando una o varias HRU para cada uno de los casos para comprobar cual presentaba un mejor ajuste.

En el caso del modelo con el mapa de usos del suelo global, los caudales observados y simulados presentan un valor de coeficiente de Pearson (r) de 0,43 generando una sola HRU, mientras que este disminuye a 0,34 generando varias HRU (Figura 11). Sin embargo, los caudales medios correspondientes son bastante dispares, pudiendo apreciar cómo el modelo sobreestima el caudal simulado en ambos casos.

Al utilizar el mapa de usos del suelo Corine, se obtienen tendencias y valores muy parecidos ya que el modelo sigue sobreestimando el caudal medio y el coeficientes de correlación de Pearson (r) tiene un valor de 0,43 en el caso de generar un solo HRU y de 0,37 generando varias HRU (Figura 12). La comparativa entre los modelos generados por ambos mapas del suelo se recoge en la Tabla 9.

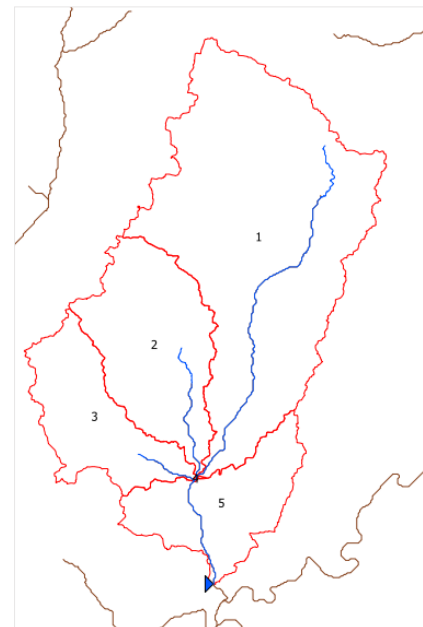


Figura 10. Subcuencas generadas para la zona de estudio. La flecha azul indica la localización de la estación de aforo y el punto de salida de agua de la cuenca.

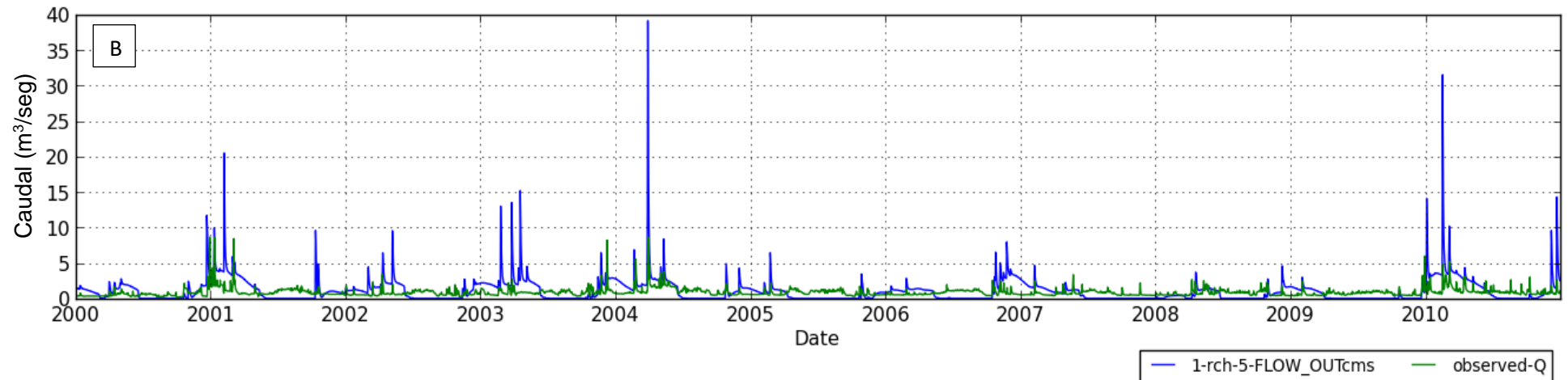
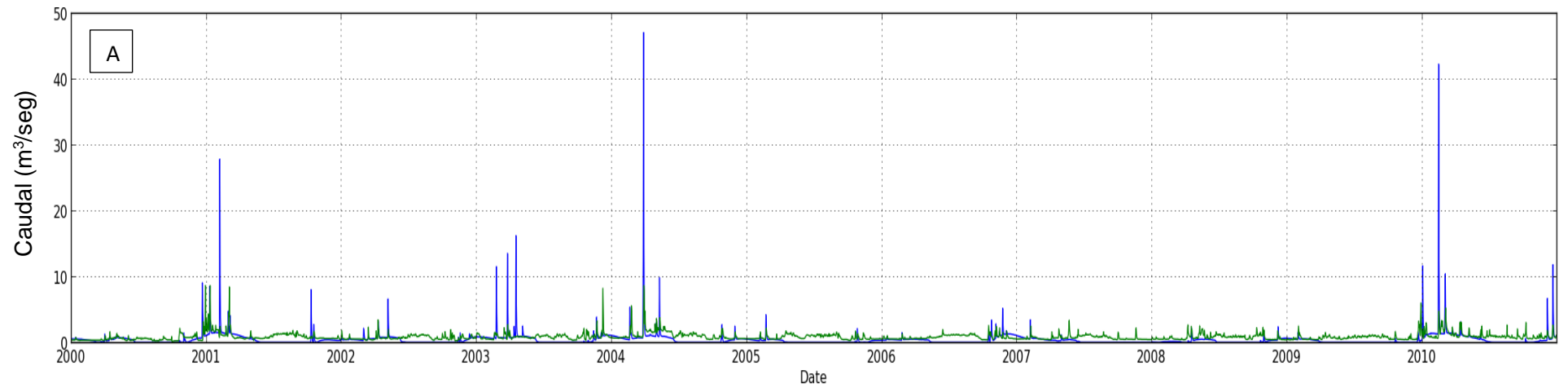


Figura 11. Resultados preliminares para caudal simulado entre 2000 y 2010 utilizando los mapas globales generando una sola HRU (A) y varias HRU (B). En azul se presentan los caudales simulados mientras que en verde los caudales observados en la estación de aforo.

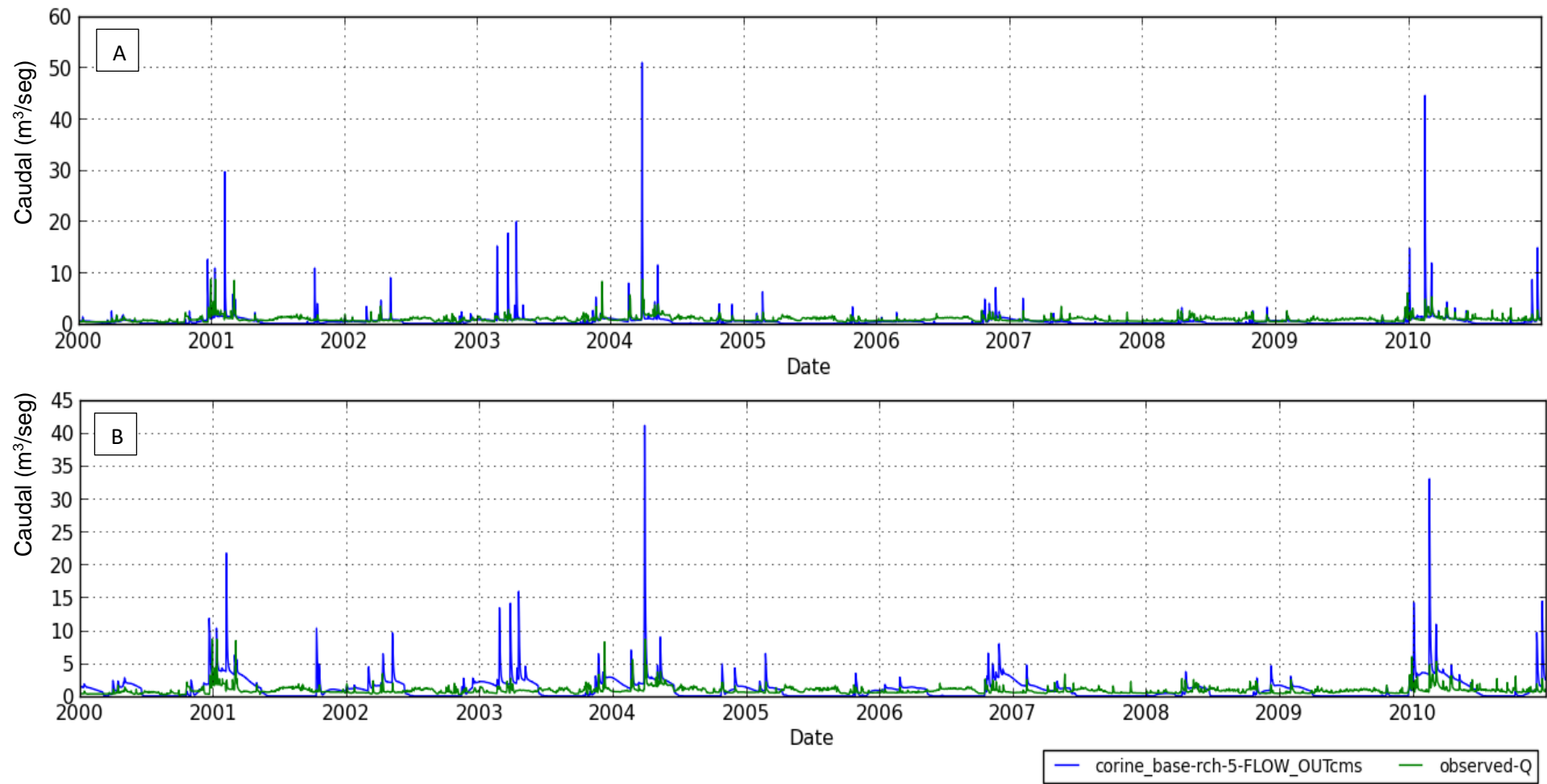


Figura 12. Resultados preliminares para caudal simulado entre 2000 y 2010 utilizando el mapa Corine para los usos del suelo generando una sola HRU (A) y varias HRU (B).

Variable	Mapas globales		Mapa Corine		Datos medidos en la estación de aforo
	1 HRU	Varios HRU	1 HRU	Varios HRU	
r	0,43	0,34	0,43	0,37	---
Caudal diario medio (2000-2010) (m³/seg)	1,089	0,443	1,095	0,492	0,865

Tabla 9. Comparativa de los resultados preliminares del ajuste para cada uno de los mapas de uso del suelo utilizados.

De los resultados obtenidos se puede comprobar que el mejor ajuste se obtiene mediante la generación de una sola HRU para cada subcuenca. Comparando las HRU generadas mediante el método de la HRU dominante, se observa que en el caso del mapa Corine (2018) toda la cuenca es asignada como terreno de cultivo de secano. Por otro lado, en el caso del mapa global de usos del suelo (1993) aparecen también otros usos del suelo como son las zonas de matorral o zonas mixtas de cultivo y zonas de bosque. La descripción para cada una de las HRU generadas mediante este método se recoge en la tabla 10.

Subcuenca	HRU mapa global	Descripción	HRU mapa Corine	Descripción
1	CRDY/Je87-2-3a-3149/0-8.0	Cultivo de secano, Fluvisol Éútrico	CRDY/Je87-2-3a-3149/0-8.0	Cultivo de secano, Fluvisol Éútrico
2	CRDY/Bk48-2-3b-6475/0-8.0	Cultivo de secano, Cambisol cálcico	CRDY/Bk48-2-3b-6475/0-8.0	Cultivo de secano, Cambisol cálcico
3	SHRB/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Matorral, Luvisol Vértico	CRDY/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Cultivo de secano, Luvisol Vértico
4	SHRB/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Matorral, Luvisol Vértico	CRDY/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Cultivo de secano, Luvisol Vértico
5	CRWO/Bk48-2-3b-6475/0-8.0	Mixto cultivo y forstal, Cambisol cálcico	CRDY/Lv8-2ab-6584/0-8.0	Cultivo de secano, Luvisol Vértico

Tabla 10. Comparativa de las HRU generadas para cada tipo de mapa de uso del suelo.

Así pues, se concluye que la utilización del mapa de usos del suelo Corine o el mapa global de usos del suelo aportado por SWAT no conlleva grandes diferencias en los resultados obtenidos, pero si lo hace la generación de una o varias HRU. Debido a esto para el resto del estudio se utilizará el mapa de usos del suelo Corine, ya que este supone una versión más actualizada y con mayor resolución de los usos del suelo para la cuenca de estudio, generando para ello una sola HRU mediante el método del HRU dominante, pues este método presenta un mejor ajuste del modelo.

De la comparación entre el caudal observado y el caudal simulado (Figura 11 y 12) se puede apreciar cómo la principal discordancia entre ambos es que en los meses de verano (junio-septiembre) la simulación arroja caudales nulos, mientras que la estación de aforo sí hay registros de cierto caudal circundante. Así pues, para que el ajuste sea mejor se modificaron los parámetros de SWAT que influyen en el flujo de base del modelo, además de realizar varios ajustes en otros parámetros de SWAT. Los valores finalmente seleccionados se encuentran en la tabla 11:

Parámetro	Inicial	Calibrado
Initial SCS runoff curve number for moisture condition II (NC_2)	82	79
Soil evaporation compensation factor (ESCO)	0,98	0,95
Baseflow Alpha factor (ALPHA_BF) (días)	0,048	0,005
Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow (QwQmin) (mm)	1000	150
Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap to occur (RevapMn) (mm)	750	900
Deep aquifer percolation fraction (Rchrg_Dp) (fracción)	0,05	0,01
Available water capacity of the soil layer (Sol_Awc) (mm/mm)	0	0,06
Surface runoff lag time in the HRU (Surlag) (Días)	2	1

Tabla 11. Parámetros utilizados para la calibración del modelo.

Tras esta calibración manual, los caudales medios simulados y observados presentaron un valor similar, con un coeficiente de correlación de Pearson (r) aceptable para las condiciones presentes en la cuenca (Tabla 12, Figura 13).

Variable	Previo calibración	Tras la calibración	Tras la validación	Caudal diario medio observado (2000-2010) (m ³ /seg)
r	0,43	0,48	0,45	-
Caudal diario medio simulado (2000-2010) (m ³ /seg)	1,089	0,858	0,787	0,866

Tabla 12. Parámetros finales del proceso de calibración y validación para el modelo entre los años 2000 y 2010.

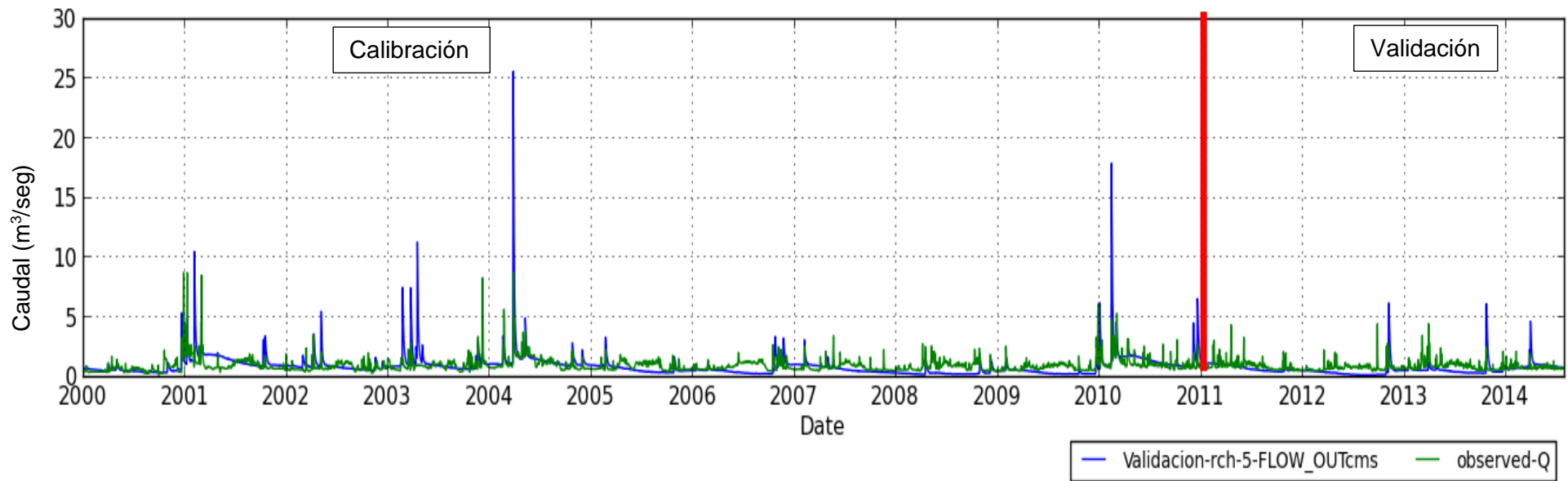


Figura 13. Caudal simulado (azul) respecto del caudal observado (verde) para el periodo de tiempo 2000-2014.

Analizando los resultados de la calibración y validación se pueden remarcar varias observaciones.

- La tendencia general del caudal simulado se ajusta suficientemente a la del caudal observado, pudiendo apreciar cómo durante los primeros 5 años de la simulación (2000-2005) (Figura 15.A) los caudales simulados para todo el año se ajustan a los valores de caudal real medido en la estación de aforo. Sin embargo, bajo las mismas condiciones de calibración los caudales simulados los últimos 5 años de simulación (2005-2010) presentan unos caudales mucho menores durante los meses de verano (Figura 15.B). Esta situación se ha tratado de corregir mediante la calibración, pero siempre se ha observado esta tendencia. La diferencia entre los caudales observados y simulados en los meses de verano es la causa principal de que el ajuste no haya sido mejor, por lo que tras comprobar que los meses de invierno sí se ajustaban y se generaba un caudal de base lo más cercano posible al observado se concluyó que este era el mejor ajuste posible.
- El ajuste entre caudales es mejor en el periodo de calibración que en la validación (Figura 15.C), aunque la tendencia general se mantiene, representando las subidas de caudal en los periodos de lluvias de los meses de invierno y presentando un caudal de base en los meses de verano.

Los valores del coeficiente de correlación de Pearson para el periodo de calibración no son muy elevados, pero aun así se tomará el valor de 0,48 del modelo calibrado como aceptable debido a que, como se ha comentado previamente, los caudales simulados siguen la tendencia general y se ajustan bastante bien para los meses de invierno. Para tratar de entender por qué no se ha conseguido un mejor ajuste se proponen los siguientes motivos:

- Primeramente, la ausencia de datos locales de los suelos de la zona. Debido a la ausencia de mapas locales de los tipos de suelo, se ha utilizado el mapa de tipos de suelo global, lo cual ha podido provocar discrepancias en los resultados obtenidos.
- La principal discrepancia entre los caudales simulados y los observados en la estación de aforo aparece en los meses de verano, donde el modelo arroja valores muy bajos de caudal, llegando incluso a obtener valores nulos en los últimos años de la simulación. La ausencia de precipitaciones durante los meses de verano no es justificación para que los caudales sigan esta tendencia, pues en la realidad se ha comprobado por parte de la estación de aforo que, pese a la ausencia de precipitaciones, durante dichos meses sí que hay un flujo superficial. Así pues, la aparición de este flujo puede ser debida a que el Arroyo Guatén se trate de un arroyo

ganador, obteniendo aportes de agua por parte de las masas de agua subterráneas presentes en la zona. El mapa hidrogeológico para la zona de estudio desarrollado por el IGME (Figura 14), parece indicar que por lo menos en parte el recorrido del Arroyo Guatén existe una interacción acuífero-río en el que el cuerpo superficial recibe aportaciones subterráneas, lo que justifica la existencia de un flujo de base en ausencia de precipitación. El uso de mapas globales para los suelos de la zona puede haber influido en la correcta simulación de la dinámica entre las aguas subterráneas y superficiales, subestimando la contribución del acuífero, lo que explicaría la ausencia de este caudal de base durante los meses de verano.

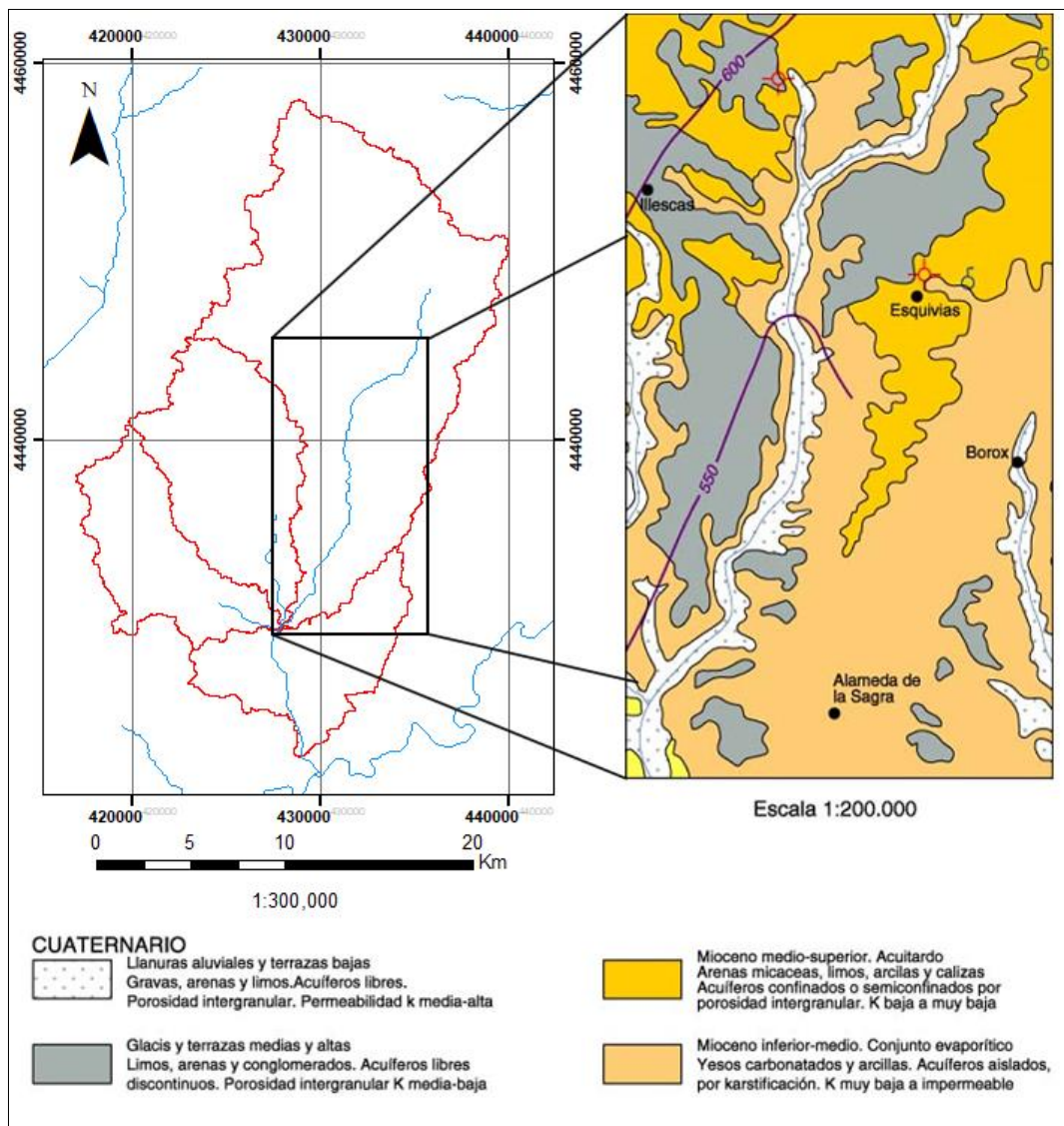


Figura 14. Mapa Hidrogeológico para la sección este del arroyo Guatén. Las líneas moradas representan las isopiezas de la zona, medidas en metros sobre el nivel del mar. (Obtenido del mapa Magna para la hoja 605, IGME)

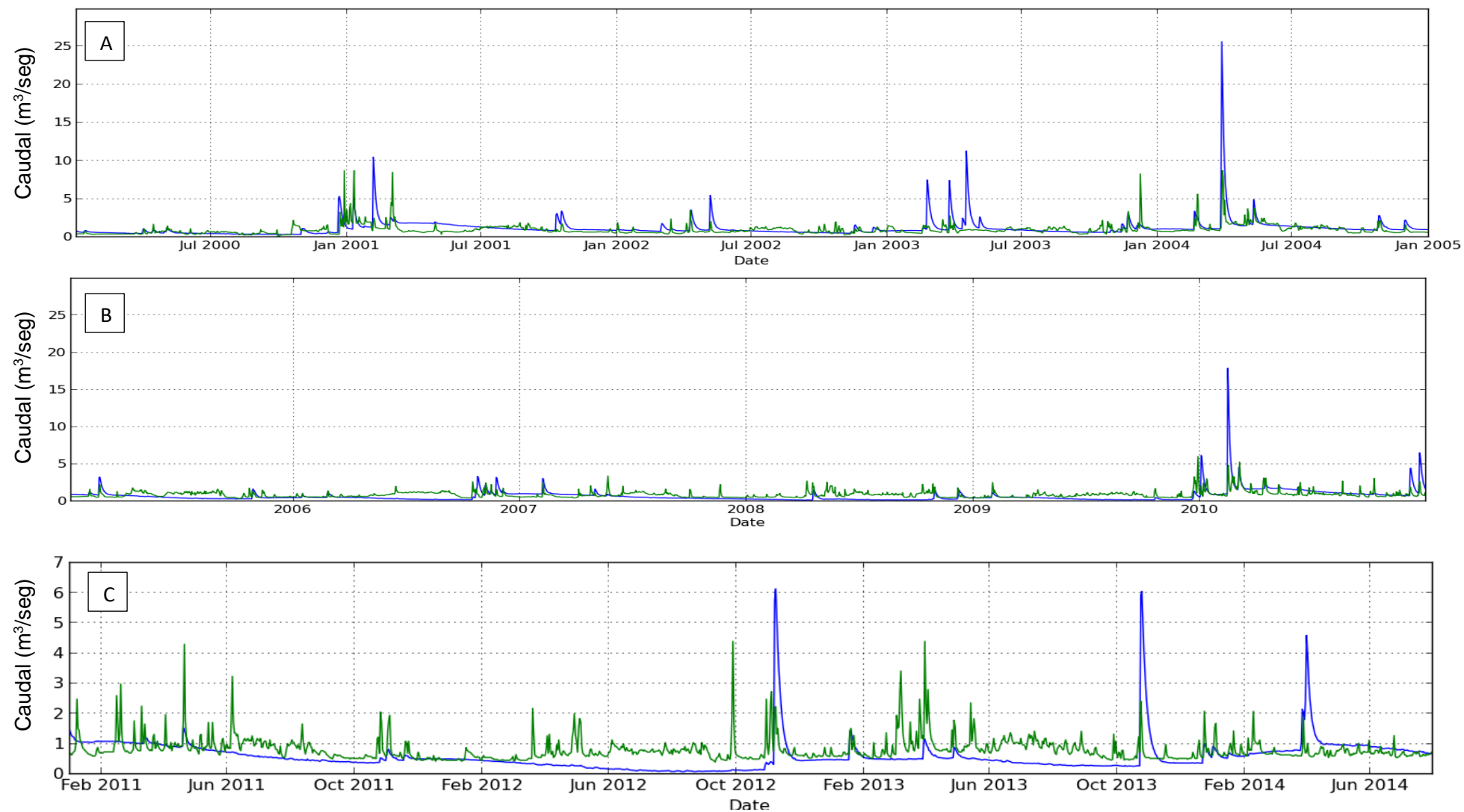


Figura 15. En azul se representa el caudal simulado por el modelo, mientras que en verde el caudal observado en la estación de aforo. A. Calibración del modelo para los años 2000-2005. B. Calibración del modelo para los años 2005-2010. C. Validación del modelo para los años 2011-2014.

5.3 Escenarios de simulación

Cada simulación se realizó para el periodo 2000-2014 con 3 años de calentamiento del modelo (1997-2000). La evolución temporal de los caudales diarios simulados resultantes de la aplicación de cada uno de los escenarios se representa gráficamente en las figuras 15 a 17.

Para cada uno de los escenarios se obtuvo un gráfico en el que se resume el balance hídrico (Figuras 18-22) además de calcularse los caudales medios. En dicho gráfico se representan varios datos acerca del balance hídrico en cada escenario, todos ellos calculados como la media anual y expresados en mm. De entre todos los datos del balance hídrico que se presentan, los que más relevancia tienen para nuestro estudio son los siguientes:

- Evaporation and Transpiration (ET): Hace referencia al valor de evapotranspiración real. Este representa qué cantidad de agua es devuelta a la atmósfera por parte de la acción conjunta de la evaporación y la transpiración de las plantas.
- Surface Runoff: Representa la escorrentía superficial, es decir, el agua que fluye por la superficie del suelo a favor de la pendiente.
- Lateral Flow (Lateral Subsurface Flow): Corresponde a la escorrentía subsuperficial, es decir, el agua que fluye en los 2 primeros metros de suelo en el espacio entre la superficie y la zona saturada en agua.
- Return Flow: Representa el flujo de base, es decir, el volumen de agua generado por el aporte de las aguas subterráneas.
- Infiltration: Hace referencia a la infiltración. Representa la cantidad de agua que entra en el suelo desde la superficie.

Así pues, dichos valores junto al caudal medio para cada uno de los escenarios se recogen en la tabla 13.

Escenario	Q med (m3/seg)	ET (mm)	Escorrentía superficial (mm)	Escorrentía subsuperficial (mm)	Flujo de base (mm)	Infiltración (mm)
Baseline	0,787	228,3	13,36	0,48	56,85	49,99
CRDY_CC	0,557	222,1	8,74	0,76	34,9	37,2
CRIR_SCC	0,559	244,8	13,98	0,92	53,92	57,68
CRIR_CC	0,392	233,9	9,33	0,79	39,59	42,38
FRST_SCC	0,778	229	11,51	0,31	48,2	51,4
FRST_CC	0,553	222,4	7,5	0,27	36,25	38,62

Tabla 13. Comparativa de los valores de caudal medio, evapotranspiración y flujos de agua para el escenario de referencia y las diferentes simulaciones realizadas.

En el caso de los escenarios CRIR, debido al factor de auto irrigación que se utilizó, se calcularon también los volúmenes de agua destinados al regadío, siendo un valor medio de 194,66 mm anuales en el caso de CRIR_SCC y 136,39 mm en el caso de CRIR_CC.

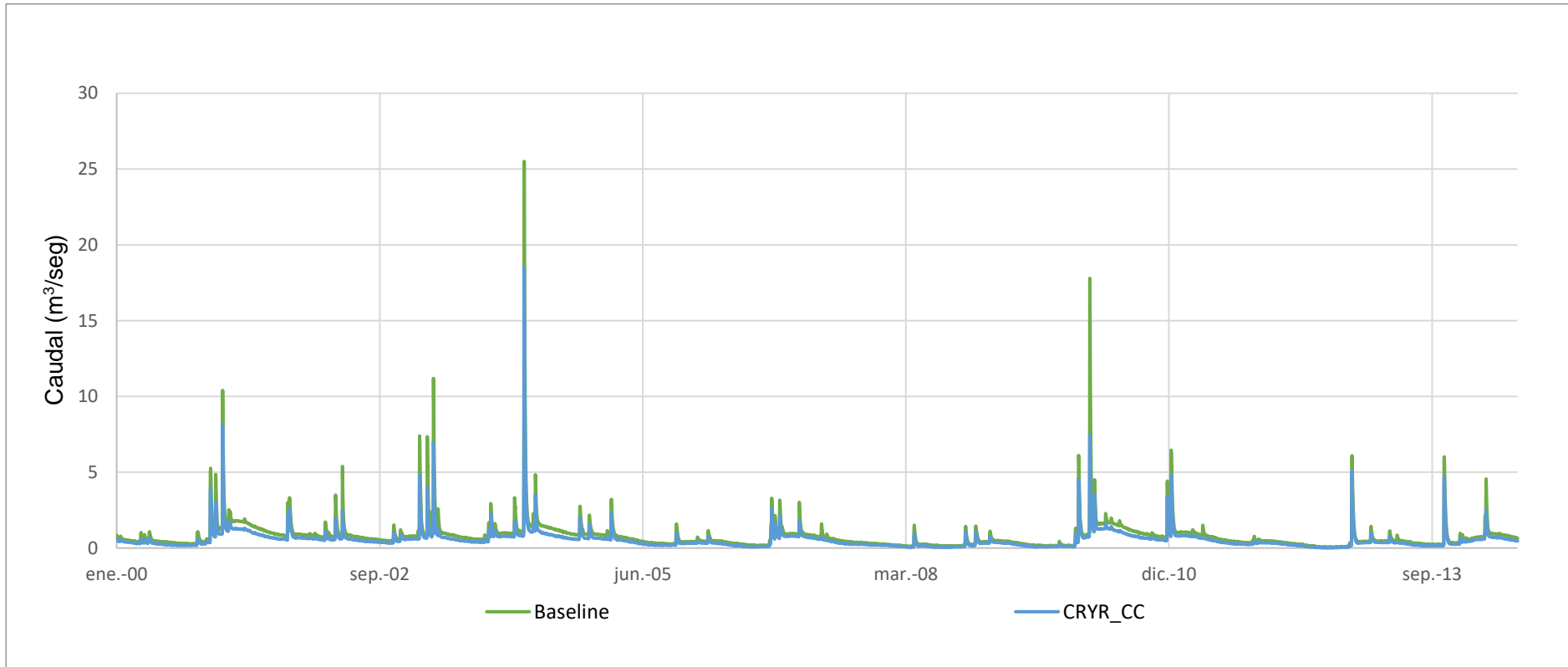


Figura 16 Comparativa entre los caudales diarios simulados para el escenario CRDY_CC y *Baseline* para los 14 años de simulación.

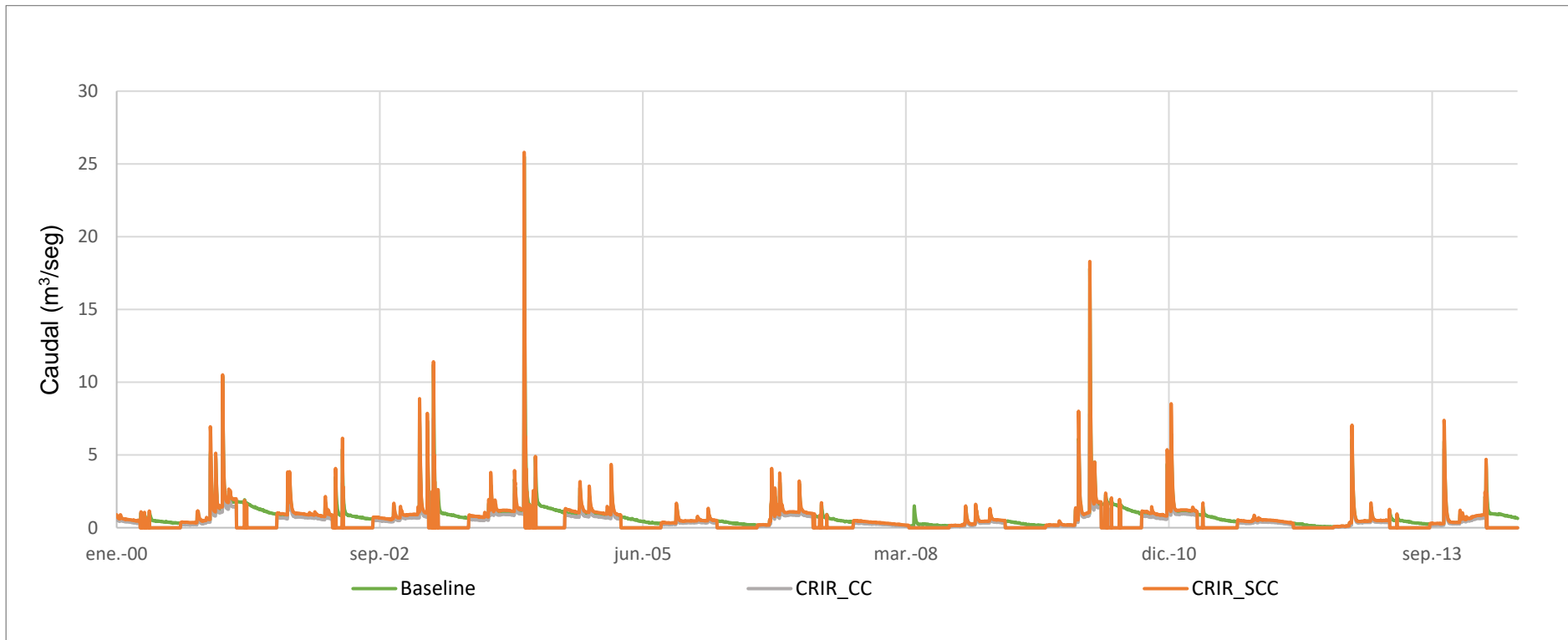


Figura 17 Comparativa entre los caudales diarios simulados para el escenario CRIR_SCC y CRIR_CC para los 14 años de simulación.

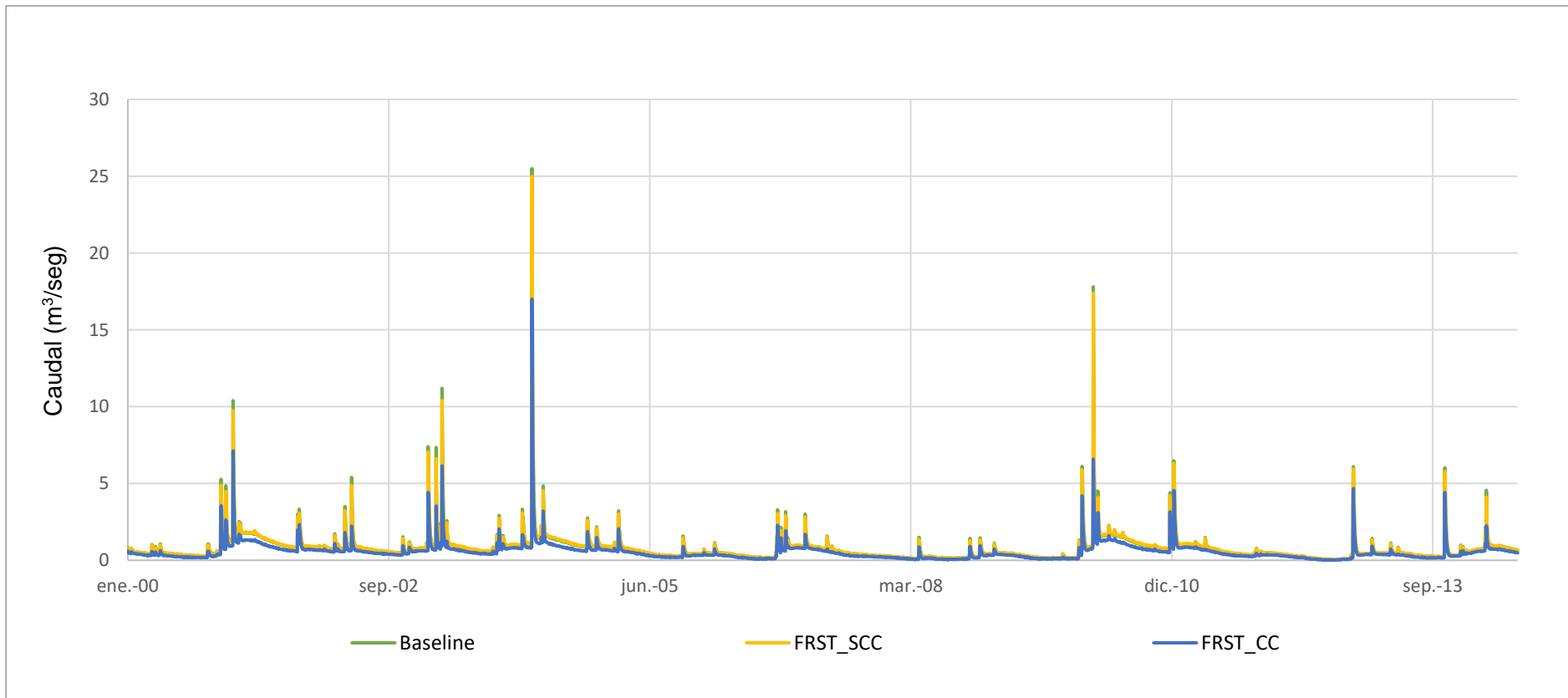


Figura 18 Comparativa entre los caudales diarios simulados para el escenario FRST_SCC y FRST_CC para los 14 años de simulación.

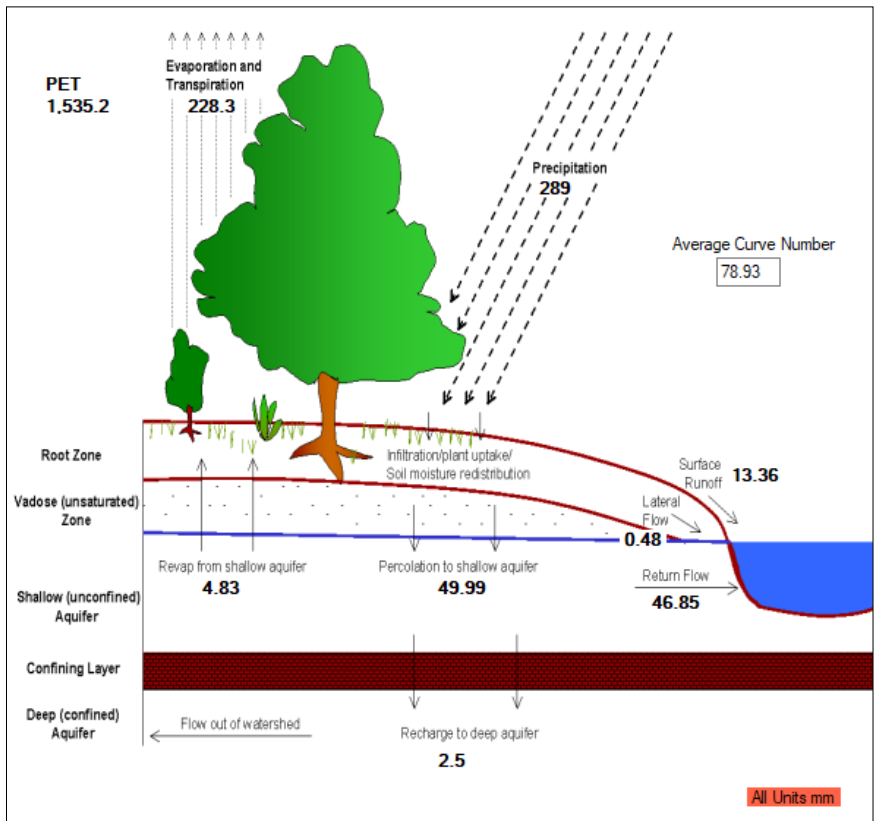


Figura 19. Balance hídrico obtenido para la simulación "Baseline"

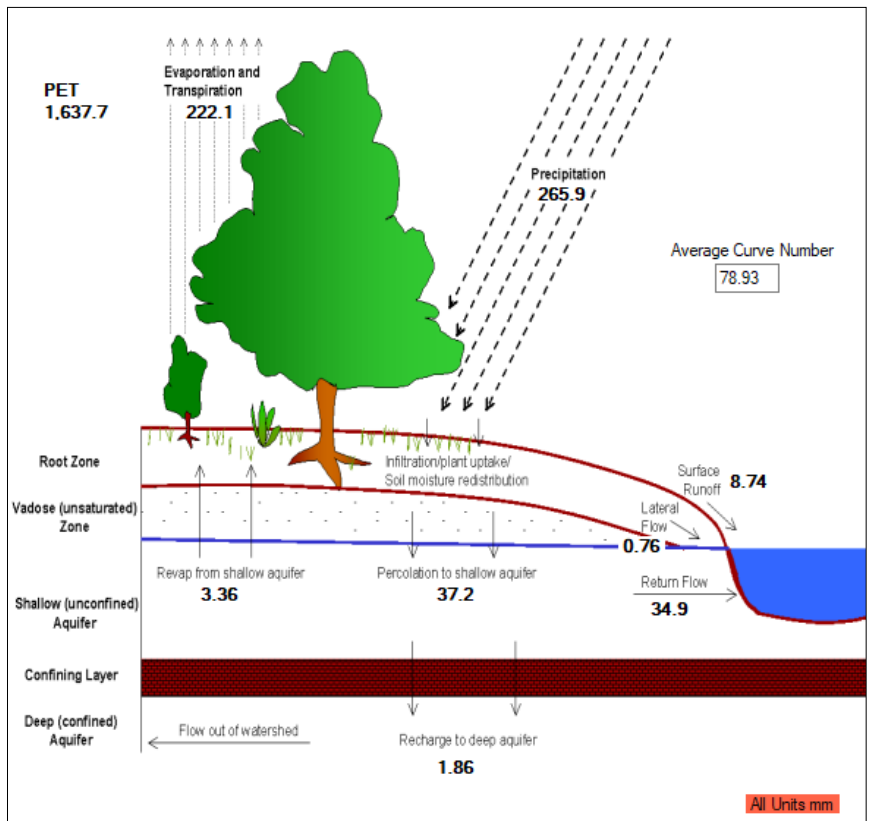


Figura 20. Balance hídrico obtenido para la simulación CRDY_CC.

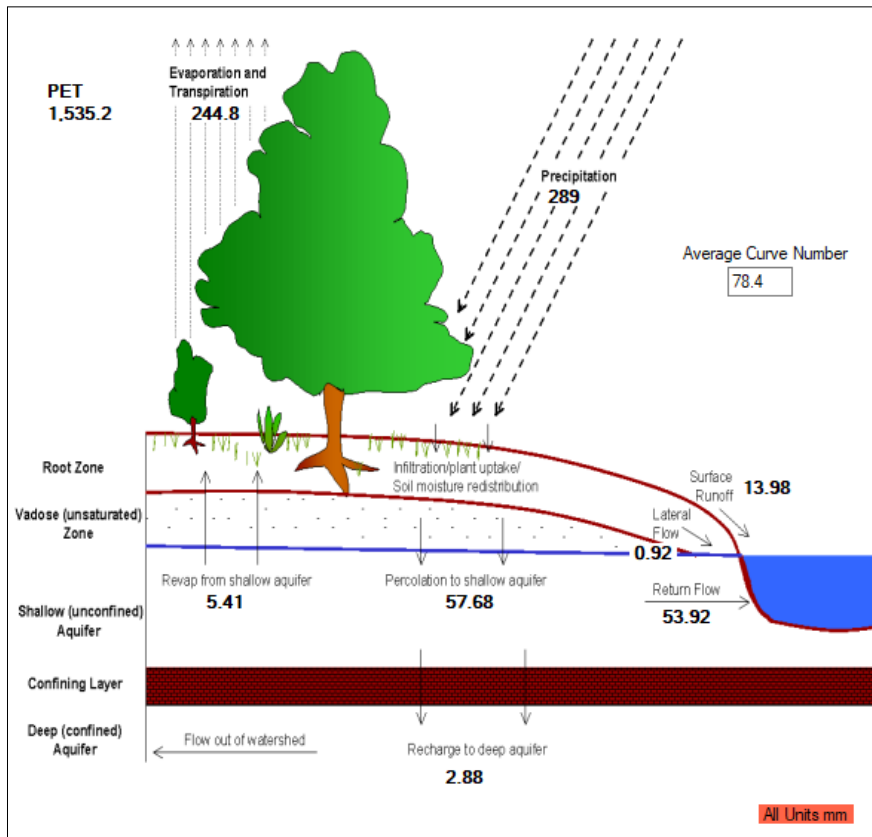


Figura 21. Balance hídrico obtenido para la simulación CRIR_SCC.

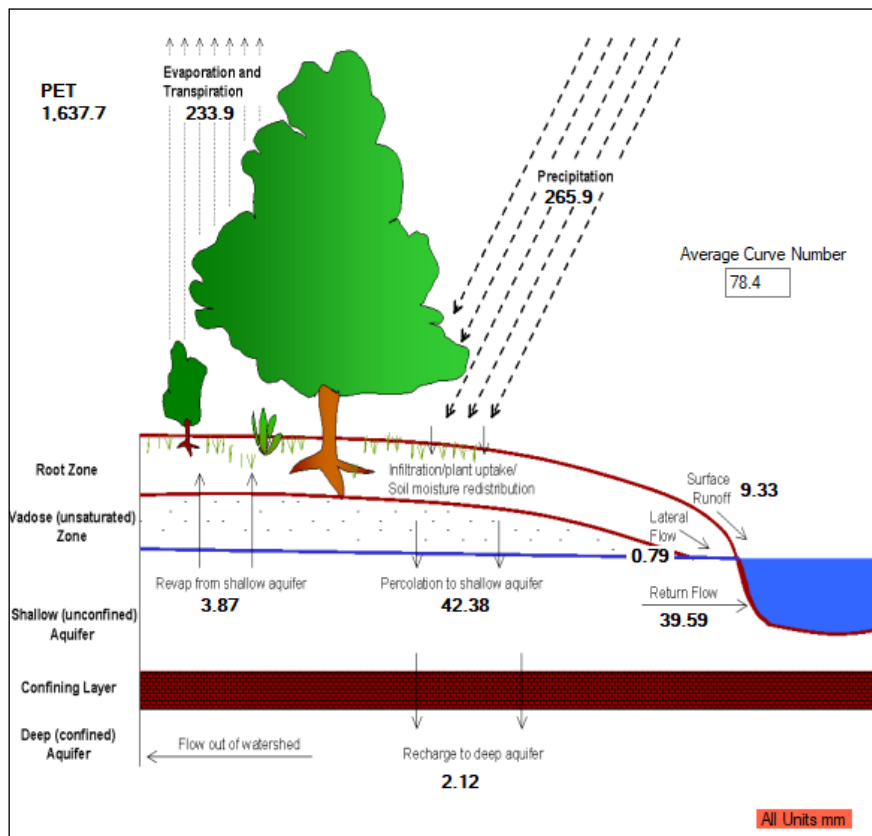


Figura 22. Balance hídrico obtenido para la simulación CRIR_CC.

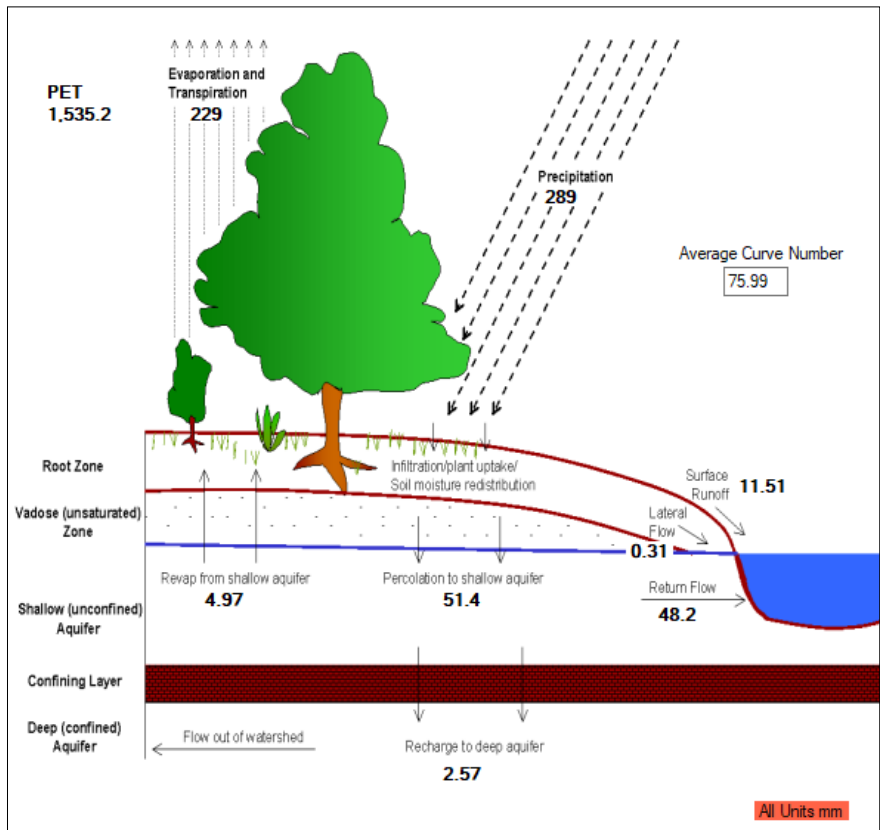


Figura 23. Balance hídrico obtenido para la simulación FRST_SCC.

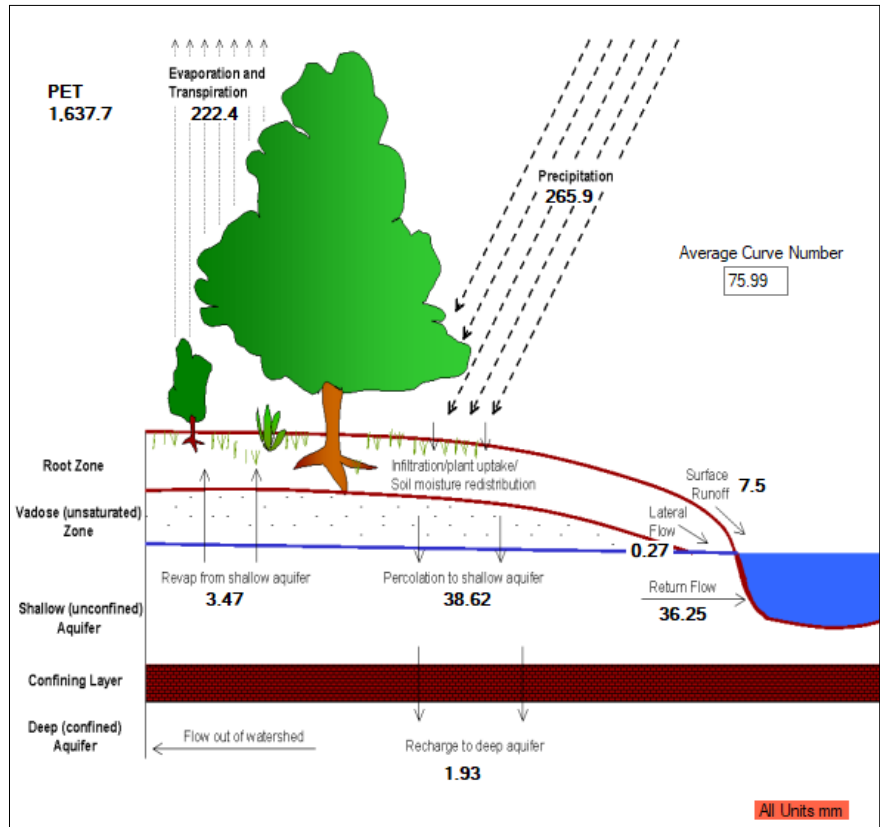


Figura 24. Balance hídrico obtenido para la simulación FRST_CC.

En vista de los resultados obtenidos, se aprecia cómo en los cinco escenarios se genera un descenso generalizado de los caudales medios simulados. Los escenarios con cambio climático (CC) presentan un descenso de los caudales más acusados, mientras que los escenarios que solo presentan cambios en los usos del suelo (SCC) presentan una mayor variedad en los resultados.

Analizando en detalle los resultados para cada uno de los escenarios se puede comentar que:

Escenario CRIR_SCC: Comparando el escenario de referencia con el escenario de aumento de los cultivos de regadío, se aprecia un descenso del 30% del caudal circulante en el Arroyo Guatén. Este descenso tan acusado es debido principalmente a la implementación del factor de irrigación durante los meses de verano (1 de abril a 1 de septiembre). La ausencia de precipitaciones durante dichos meses provoca un déficit de agua para los cultivos, el cual se suple mediante tomas de agua del propio cauce del río provocando un descenso de los caudales. En momentos puntuales en los que hay episodios de precipitación suficientes para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, las captaciones de agua para el regadío cesan permitiendo la aparición de caudal en la cuenca de nuevo. Sin embargo, estas precipitaciones durante los meses de verano son puntuales y muy escasas.

A la hora de definir este parámetro de irrigación, se determinó que el contenido de agua en el suelo sería el desencadenante de este operador, activándose cuando los contenidos de agua en el suelo fuesen inferiores al 95% de su capacidad máxima, con unas captaciones máximas de hasta 25,4 mm al día. Debido a los caudales presentes en la zona, cuando este operador se activa prácticamente se toma todo el agua presente en el río, provocando que los caudales sean nulos para la sección de la que se extraiga el agua.

Debido a que la zona designada para la captación de las aguas para el regadío es la subcuenca 5, donde se encuentra la desembocadura del arroyo y se midieron los caudales generados en la cuenca, la captación total del agua para regadío supone que los caudales registrados cuando el factor de regadío se active sean nulos.

Así pues, se ha podido observar cómo los caudales en dichos meses son nulos en prácticamente en todos los años de la simulación exceptuando estos días puntuales en los que hay registros de lluvias que no requieran un aporte de agua adicional. En la figura 25 se puede apreciar cómo a modo de ejemplo, para los primero dos años de simulación los caudales simulados en verano son nulos a excepción de días puntuales en los que la precipitación permite la parada de las captaciones de agua del río.

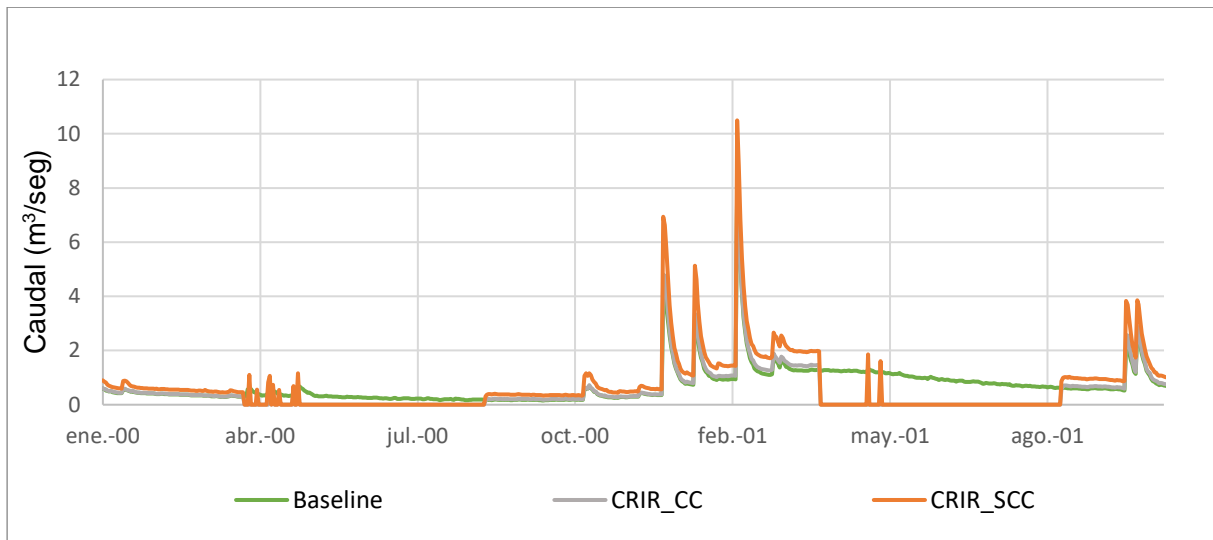


Figura 25. Caudales esperados para las simulaciones CRIR_SCC y CRIR_CC comparados con los datos de partida. Se puede apreciar la falta de caudal en los meses de verano debido a la captación de agua para el regadío

Por otro lado, el número de curva asignado para los cultivos de regadío es menor al calibrado para los cultivos de secano, por lo que cabría esperar una escorrentía superficial menor a la registrada en la *Baseline*, tal como se aprecia en los trabajos de Pulido Velázquez *et al.* (2015) y Saadi *et al.* (2015). Sin embargo, los resultados obtenidos muestran un aumento de dicha escorrentía. El estudio llevado a cabo por Chen *et al.* (2017) sobre el operador de riego comenta cómo este factor no tiene en cuenta el periodo de madurez ni las demandas exactas de los cultivos, pudiendo consumir más agua del esperado en la irrigación y provocar excedentes de agua. Este exceso de agua puede explicar el aumento de esta escorrentía superficial.

Por otro lado, la asignación de un 95% de contenido de agua en el suelo como desencadenante de la irrigación provoca que los niveles de agua en el suelo sean muy elevados, traduciéndose en un aumento de los niveles de infiltración y escorrentía subsuperficial simulados, observando un aumento del 92% de escorrentía subsuperficial y un 15% de la infiltración respecto de la *Baseline*.

Escenario FRST_SCC: Comparando el escenario de referencia con el escenario de aumento del área forestal se aprecia una ligera disminución en el caudal medio. Mongil Manso *et al.* (2021), Clark y Zipper (2016) y Wangpimool *et al.* (2013) describen cómo el aumento de la cubierta forestal conlleva un descenso de la escorrentía superficial, así como un aumento de la evapotranspiración y la infiltración. La comparación de los resultados obtenidos con el escenario de referencia *Baseline* confirma este comportamiento observando por esos autores, ya que el flujo de agua superficial se ve reducido en un 14%, mientras que la infiltración y la ET real se ven aumentadas, pero en menor medida (3% y 1% respectivamente). Este

descenso de la escorrentía superficial puede explicarse debido al número de curva asignado para los bosques mixtos, pues un menor número de curva se traduce en un descenso de la escorrentía generada.

Por otro lado, la presencia de árboles provoca la aparición de una compleja red de raíces en las primeras capas de suelo, fomentando la captación de agua por los árboles aumentando la evapotranspiración y disminuyendo la escorrentía subsuperficial registrada (Gao Q. y Yu M., 2017). En este caso, se ha podido ver un pequeño aumento de la ET, pero los efectos sobre la escorrentía subsuperficial son más notorios, pudiendo ver cómo esta desciende hasta un 35% respecto de la *Baseline*.

Escenarios de cambio climático (CC): Para los escenarios de cambio climático, se ha podido comprobar cómo el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación se traduce en un descenso aproximado de 0,2 m³/seg de los caudales. Esta disminución supone aproximadamente un descenso del 30% en los caudales generados, cerca de 7hm³/año.

Los escenarios de cambio climático no solo disminuyen los caudales medios, sino que afectan a todo el comportamiento hidrológico de la cuenca pudiendo apreciar un descenso de los valores de ET, escorrentía superficial, subsuperficial, flujo de base e infiltración.

Múltiples estudios aplicando SWAT utilizan las mismas predicciones de cambio climático que las utilizadas para el desarrollo de este modelo, todas coincidiendo en el descenso de los caudales registrados y de la evapotranspiración real. Estudios como el realizado por Pérez-Sánchez *et al.* (2020) plantean la misma predicción de cambio climático (RCP 8.5 con predicción para el periodo 2040-2070) para una sección del norte de España, obteniendo resultados similares, con unos descensos de los caudales de entre el 15% y el 47% en los diferentes escenarios que plantean. Martínez-Salvador *et al.* (2021) plantean estos escenarios de cambio climático para otras localizaciones del sur de España, pudiendo observar cómo para el mismo escenario los caudales medios anuales presentan un descenso del 42,8% y 51,2% para las dos zonas analizadas.

En cuanto a la ET, el aumento de la temperatura se traduce como un aumento de la evapotranspiración potencial en los escenarios de simulación, pero el descenso de las precipitaciones y por ende la falta de agua suponen un descenso de la ET real simulada. Martínez-Salvador *et al.* (2021) presentan también este comportamiento en sus resultados, con unos descensos de la ET real entre el 8,6% y 14,1%, resultados más elevados que el 3% de descenso de la ET real obtenidos en este estudio. El trabajo realizado por Martínez-Salvador *et al.* (2021) supone unos descensos de precipitación mayores a los tomados para la realización de este estudio (entre 21,8% y 40,1% frente al 8% tomado para este estudio), lo cual explica por qué sus resultados suponen un descenso más marcado que los resultados

obtenidos en este trabajo. Otros escenarios de simulación realizados en el mismo trabajo con variación en datos de precipitación similares, como el descenso de un 14.3% para su escenario RCP 8.5 para el periodo 2019-2040 muestra unos descensos de caudales medios anuales del 26,2% y de la ET real del 6,2%, siendo valores más acordes a los obtenidos en este estudio.

Comparativa de los diferentes escenarios: Tras comentar los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de simulación, se procede a determinar el impacto que cada escenario tendría sobre la gestión de la cuenca estudiada de cara a futuro.

Comparando los cambios en los usos del suelo, el cambio del cultivo a secano a cultivo de regadío muestra tener un impacto mucho mayor en los caudales simulados que el cambio a zonas forestales mixtas (descenso del 30% en el caso de regadío, mientras que apenas un 1% en el caso del bosque mixto).

Los escenarios de cambio climático intensifican este descenso de los caudales, pudiendo ver cómo en el caso de la ampliación del regadío el descenso del caudal es ahora del 50%, mientras que en el bosque equipara la situación sin cambio climático de la expansión del regadío con un descenso del 30%.

Así pues, se puede confirmar que la situación que afectaría en mayor medida a la hidrología de la cuenca sería la expansión del regadío en un caso de cambio climático, pues el descenso del 50% en los caudales viene acompañado de la desaparición de un flujo de agua de tres meses durante los meses de verano debido a las captaciones de agua para el regadío de las nuevas zonas de cultivo.

Por otro lado, el establecimiento de más zonas de forestales mixtas no parece afectar a los caudales registrados, con un descenso del 1% tan solo.

6. CONCLUSIÓN

La variación de los usos del suelo en una cuenca provoca una respuesta en la hidrología de esta, pudiendo apreciar cómo uno de los principales parámetros que se ven afectados es el caudal generado en la misma.

El análisis realizado en este TFM permite observar cómo la variación de los usos del suelo, así como la variación en las condiciones climáticas obtenida simulando un escenario de cambio climático, provocan un cambio en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Las simulaciones centradas en los cambios en los usos del suelo han permitido observar cómo no solo afecta el nuevo tipo de uso que se le dé al suelo, sino que también influye la extensión y localización del cambio dentro de la cuenca. La implementación de nuevas áreas de cultivo de regadío en detrimento de las de secano supone el descenso de los caudales en un 30%, mientras que la implementación de nuevas zonas forestales mixtas apenas supone una disminución del 1% en los caudales medios anuales.

Por otro lado, los escenarios de cambio climático, centrados en un aumento de las temperaturas y un descenso en las precipitaciones, tal como cabría esperar han demostrado en todas las simulaciones dar como resultado una disminución en los volúmenes de agua presentes en la cuenca, no solo en forma de caudal (30% de descenso), sino también en volúmenes evapotranspirados por la vegetación y flujos subterráneos (escorrentía subsuperficial, flujo de base e infiltración). Conforme se disminuye la precipitación y aumenta la temperatura, los caudales simulados se ven más afectados, reduciéndose aún más.

Así pues, para la correcta gestión de una cuenca es de vital importancia tener en cuenta estos cambios en los usos del suelo, así como tener en cuenta una visión a futuro para poder estar preparados ante un escenario de cambio climático. El desarrollo de modelos hidrológicos, como es el caso de SWAT, es de vital importancia para poder llevar a cabo este tipo de previsiones, pues la toma de decisiones y acciones de gestión dependen de las previsiones y resultados que estos nos aporten.

7. BIBLIOGRAFÍA

AEMET. Valores climatológicos normales. Consultado el 24 de Julio de 2021. <http://www.aemet.es/en/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?k=>

Alejandro J. Resciaa, Bárbara A. Willaarts, María F. Schmitz, Pedro A. Aguilera. (2010). Changes in land uses and management in two Nature Reserves in Spain: Evaluating the social–ecological resilience of cultural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 98, 26-35.

Barranco, L.M., Dimas, M., Jiménez, A. and Estrada, F. (2018). Nueva evaluación del impacto futuro del cambio climático en los recursos hídricos en España. *Ingeniería Civil*, 191, 34-55.

CEDEX. (2018). ESTACIONES DE AFORO: Datos de estación foronómica ANUARIO DE AFOROS 2017 – 2018. <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-codigo.asp>

Clark, E.V. y Zipper, C.E. (2016). Vegetation influences near-surface hydrological characteristics on a surface coal mine in eastern USA. *Catena*. 139, 241-249

Chen, Y., Marek, G., Marek, T., Brauer, D. and Srinivasan, R. (2017). Assessing the Efficacy of the SWAT Auto-Irrigation Function to Simulate Irrigation, Evapotranspiration, and Crop Response to Management Strategies of the Texas High Plains. *Water*, 9, 509-525

Cousino, L. K., Becker, R.H., Zmijewski, K. A. (2015). Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 762–775.

Fernández Nogueira, D., Corbelle Rico, E. (2017). Cambios en los usos de suelo en la Península Ibérica: un meta-análisis para el periodo 1985-2015. *Biblio3W Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 22.

Gao Q. y Yu M. (2017). Reforestation-induced changes of landscape composition and configuration modulate freshwater supply and flooding risk of tropical watersheds. *PLOS ONE* 12(7)

Gayathri K.D., Ganasri B.P., Dwarakish, G.S. (2015) A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia* ,4, 1001-1007

Ghaffari. G., Keesstra, S., Ghodousi, J., Ahmadi, H. (2009) SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjnrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes*, 24 (7), 892-903.

Guaita, N., López, I., Prieto, F. (2008). Cambios de ocupación del suelo en España: implicaciones para la sostenibilidad. *CIUDAD Y TERRITORIO Estudios Territoriales*, 156, 235-260.

Hewitt, R., Escobar, F. (2017). The territorial dynamics of fast-growing regions: Unsustainable land use change and future policy challenges in Madrid, Spain. *Applied Geography*, 31, 650-667.

IGME. Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Villaluenga de la Sagra. (0604). Instituto Geográfico Nacional.

IGME. Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Aranjuez. (0605). Instituto Geográfico Nacional.

IGME. Mapa Hidrogeológico de España (1997). Escala 1:200.000. Madrid. (045). Segunda edición. Instituto Geográfico Nacional

IGN. CORINE Land Cover versión de 2018. Escala 1:100.000. Intituto Geográfico Nacional.

- Jodar-Abellan, A., Valdes-Abellan, J., Pla, C., Gomariz-Castillo, F. (2019) Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 657, 1578–1591.
- Kiprotich, P., Wei, X., Zhang, Z., Ngigi, T., Qiu, F. and Wang, L. (2021). Assessing the Impact of Land Use and Climate Change on Surface Runoff Response Using Gridded Observations and SWAT+. *Hydrology*, 8, 48.
- Marie Mireille, N., M. Mwangi, H., K. Mwangi, J., Mwangi Gathenya, J. (2019) Analysis of Land Use Change and Its Impact on the Hydrology of Kakia and Esamburmbur Sub-Watersheds of Narok County, Kenya. *Hydrology*, 6, 86.
- Martínez-Salvador, A. y Conesa-García, C. (2020) Suitability of the SWAT Model for Simulating Water Discharge and Sediment Load in a Karst Watershed of the Semiarid Mediterranean Basin. *Water Resources Management*, 34, 785-802.
- Martínez-Salvador, A., Millares, A., Eekhout, J.P.C. y Conesa-García, C. (2021). Assessment of Streamflow from EURO-CORDEX Regional Climate Simulations in Semi-Arid Catchments Using the SWAT Model. *Sustainability*. 13, 7120.
- Martínez Vega, J., Echavarría Daspert, P., González Cascón, V. (2007). Detección de cambios en los usos del suelo de la Alcarria Conquense: análisis de su sostenibilidad. Serie Geográfica, 14, 147-161.
- MITECO. (2015). Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo 2015-2021.
- MITECO. (2021). Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo 2021-2027.
- Mongil-Manso, J., Navarro-Hevia, J. y San Martín, R. (2021) Does forest restoration influence soil infiltrability? A case study in the restored woodland of Sierra de Ávila (Central Spain). *Journal of Mountain Science*, 18, 1778–1793.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Observatorio de la Sostenibilidad de España (OSE). (2006). Cambios de ocupación del suelo en España.
- Peraza-Castro, M., Ruiz-Romera, E., Meaurio, M., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M. (2018) Modelling the impact of climate and land cover change on hydrology and water quality in a forest watershed in the Basque Country (Northern Spain). *Ecological Engineering*, 122, 315-326.
- Pérez-Sánchez. J., Senent-Aparicio, J., Martínez Santa-María, C. y López-Ballesteros, A. (2020). Assessment of Ecological and Hydro-Geomorphological Alterations under Climate Change Using SWAT and IAHRIS in the Eo River in Northern Spain. *Water*. 12, 1745.
- Pulido Velazquez, M., Peña Haro, S., García Prats, A., Mocholi Almudever, A. F., Henriquez Dole, L., Macian Sorribes, H., and Lopez Nicolas, A. (2015). Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 19, 1677–1693.
- Romanowicz, A.A., Vanclooster, M., Rounsevell, M., La Junesse, I. (2005). Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*, 187, 27–39

- Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Martínez Santa-María, C. y López-Ballesteros, A. (2020) Assessment of Ecological and Hydro-Geomorphological Alterations under Climate Change Using SWAT and IAHRIS in the Eo River in Northern Spain. *Water*. 12(6), 1745.
- Saadi, S., Todorovic, M, Tanasijevic, L., Pereira, L.S., Pizzigalli, P. y Lionello, P. (2015). Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winterwheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*. 147, 103-115.
- Senent-Aparicio, J., Liu, S., Pérez-Sánchez, J., López-Ballesteros, A., y Jimeno-Sáez, P. (2018) Assessing Impacts of Climate Variability and Reforestation Activities on Water Resources in the Headwaters of the Segura River Basin (SE Spain). *Sustainability*, 10, 3277
- Wangpimool, W., Pongput., K., Sukvibool, C., Sombatpanit, S. and Gassman, P.W. (2013). The effect of reforestation on stream flow in Upper Nan River basin using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *International Soil and Water Conservation Research*. 1(2), 53-63.
- Yang, L.; Feng, Q.; Yin, Z.; Wen, X.; Si, J.; Li, C.; Deo, R.C. (2017) Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in Upper Stream of Heihe River, northwest China. *Hydrol. Process.*, 31, 1100–1112.
- Yang, D., Herath, S., Musiaka, K. (2000) Comparison of different distributed hydrological models for characterisation of catchment spatial variability. *Journal of Hydrological Procedia*, 14 (3), 403-416
- Zhang, H., Wangb, B., Liub, D.L., Zhanga, M., M. Lied, L., Yua, Q. (2020). Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, 585, 124822.