



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DESARROLLO DE UN MODELO BÁSICO
PARA LA SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO**

MEMORIA

AUTORA: Carmen Lázaro Carrascal

DIRECTORAS: Amaya Martínez Gracia; Begoña Peña Pellicer

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

CONVOCATORIA: Junio 2013

Resumen

La motivación de estudio de las cuencas hidrográficas es conocer la problemática del agua, es decir la necesidad de lograr equilibrio hidrológico que asegure el abastecimiento suficiente de agua mediante un uso eficiente. Mediante la simulación de cuencas se pretende poder realizar previsiones de cómo pueden afectar cambios medioambientales o humanos en el funcionamiento de la cuenca.

Mediante este proyecto se pretende realizar una primera aproximación a la simulación dinámica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro a través de ecuaciones diferenciales básicas que modifican los almacenajes principales de la cuenca. Cada una de estas ecuaciones está formada por flujos entrantes y salientes los cuales han sido calibrados para un caso estacionario y con las características específicas correspondientes a la cuenca de estudio. Estas ecuaciones han sido implementadas en Simulink (herramienta de Matlab).

Se ha simulado un año natural con datos diarios de precipitación, radiación, caudal y consumos para comprobar las variaciones de los almacenajes a lo largo de un año. Estos resultados han sido verificados mediante la comparación con los datos reales para comprobar el correcto funcionamiento del simulador.

Por último se han supuesto diversos escenarios desfavorables para así realizar previsiones de futuro y comprobar como cambios en las entradas de la cuenca afectan el los almacenajes de estudio. Estos cambios podrán llegar a suponer un descenso del 90% en el volumen del río, que es el resultado que más cambia, los otros almacenajes pueden llegar a cambiar también hasta un 20%.

Índice

Resumen	1
Índice	3
1 Objeto y alcance del PFC	5
2 Introducción. Justificación del PFC	6
3 Descripción del caso de estudio	11
3.1 Características de la cuenca de estudio. Cuenca hidrográfica del Ebro	11
3.1.1 Ámbito	11
3.1.2 Hidrología y datos característicos de la Cuenca	13
3.1.3 Clima	16
3.1.4 Geología	16
4 Metodología de modelado	17
4.1 Ecuaciones generales para la formación de la cuenca	17
4.2 Implementación de ecuaciones en el Simulador. Simulink	24
4.3 Calibración del modelo	29
5 Resultados	33
5.1 Resultados obtenidos tras la simulación	33
5.1.1 Almacenamiento de agua superficial SD	36
5.1.2 Humedad del suelo USM	37
5.1.3 Volumen de agua en acuíferos SA	37
5.1.4 Volumen de agua en río CW	38
5.1.5 Biomasa BU	38
5.2 Validación de los resultados.	38
5.3 Escenarios de variación.	39
5.3.1 Año seco	40
5.3.2 Aumento de los consumos de agua	42
5.3.3 Aumento de los consumos de agua en un año seco	45
6 Conclusiones. Perspectivas de mejora	48
7 Bibliografía	49

1 Objeto y alcance del PFC

El presente estudio constituye el Proyecto Fin de Carrera realizado para optar al título de Ingeniería Técnica Industrial Especialidad Mecánica realizado en el área de máquinas y motores térmicos en el marco de estudio de la dinámica de las cuencas hidrográficas.

El objeto de este proyecto final de carrera (PFC) es la realización de una primera aproximación a la simulación dinámica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro. Para ello se han utilizado datos reales proporcionados por distintas entidades relacionadas con ello, y la herramienta Simulink del programa de cálculo MATLAB. En todo caso cabe destacar que el presente trabajo se engloba dentro de la línea de investigación de los directores de este PFC.

El estudio y modelado de una cuenca hidrográfica pretende estudiar la problemática del agua, es decir, conseguir equilibrio hidrológico asegurando las demandas de agua. También con ello se realizan predicciones de cómo se comportaría la cuenca para cambios de tipo medioambiental o de demandas de agua. Para ello ha sido necesario entender la manera en que funciona el ciclo hidrológico de la tierra, conocer las características particulares de la cuenca de estudio, planteamiento de ecuaciones básicas, modelación, búsqueda de datos reales, cálculo de la cuenca y por último estudio de resultados.

Se ha manejado una cantidad importante de datos, de precipitación, radiación solar, caudales, consumos de agua o características del propio suelo, los cuales han sido previamente procesados, organizados y analizados.

Las distintas fases de ejecución llevadas a cabo en este proyecto han sido las siguientes:

- Documentación sobre el ciclo hidrológico global distinguiendo sus diferentes fases.
- Funcionamiento de una cuenca hidrográfica. Y características particulares de la Cuenca Hidrográfica del Ebro.
- Obtención y análisis de ecuaciones básicas en la cuenca.
- Formación en el manejo del programa informático y elaboración de ejemplos.
- Modelado en Simulink.
- Búsqueda de datos reales para un periodo de un año.
- Obtención de resultado y discusión de los mismos.

2 Introducción. Justificación del PFC

El ciclo hidrológico es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra. Con mayor precisión, el ciclo hidrológico es una sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y de nuevo volver a la atmósfera, es decir, evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación en las nubes, precipitación, acumulación en el suelo, escorrentía y por último nuevamente la evaporación. (Sánchez F.J. 2004).

El ciclo hidrológico es un proceso de transporte continuo e indefinido o permanente, y es debido fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol ya que proporciona calor, es decir energía necesaria para elevar el agua (evaporación) y la segunda la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escorrentía tanto superficial como subterránea).

Se puede suponer que el ciclo hidrológico (Figuras 1 y2) se inicia con la evaporación del agua en los océanos, esta agua será transportada por masas de aire en movimiento (viento) hacia los continentes. Bajo condiciones meteorológicas adecuadas, el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales a su vez dan lugar a las precipitaciones. No toda la precipitación llega al terreno, una parte se evapora durante su caída y otra es retenida por la vegetación, edificios, carreteras, etc. Finalmente, retorna a la atmosfera en forma de vapor. Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en los huecos e irregularidades del terreno (almacenamiento en depresiones), la cual en su mayoría volverá a la atmósfera por evaporación. Otra parte del agua que llega al suelo circula sobre la superficie, y se concentra en pequeños surcos que luego integran arroyos, los cuales posteriormente desembocan en los ríos, que conducen las aguas a los lagos, embalses o mares, de donde se evapora o bien, se infiltra en el terreno. Por último, hay una tercera parte que penetra bajo la superficie del terreno (infiltración) y va rellenando los poros y las fisuras del medio poroso. Si el agua infiltrada es abundante, una parte desciende hasta recargar acuíferos o aguas subterráneas, en cambio cuando el volumen infiltrado es escaso el agua queda retenida en la zona no saturada (humedad del suelo), de donde vuelve a la atmósfera por evaporación o por la transpiración de las plantas, como en la práctica no es fácil separar ambos fenómenos, se suele englobar en el término evapotranspiración.

Finalmente debe tenerse en cuenta que el movimiento del agua en cada fase del ciclo hidrológico no es a velocidad constante, sino más bien es errático tanto temporal como espacialmente. Cabe hacer notar también que las cualidades del agua cambian durante su paso a través del ciclo hidrológico. (Chaverri E.A. 2008).



Figura 1. Imagen del ciclo hidrológico. (USGS)

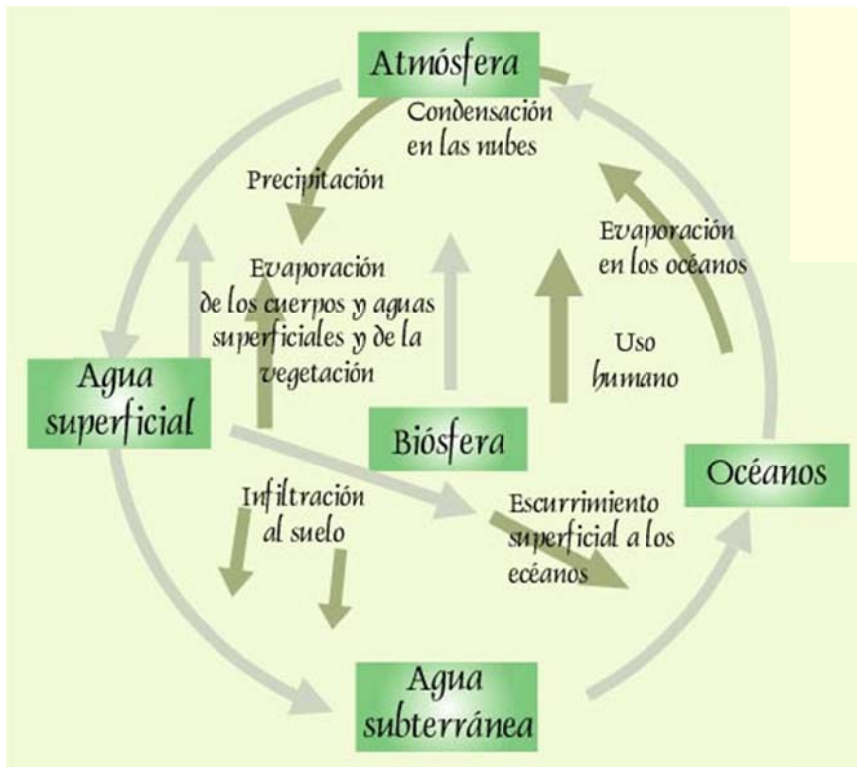


Figura 2. Esquemas ciclo hidrológico. (CENTROGEO)

Una cuenca hidrográfica es el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o bien directamente en el mar. (EUMED).

En este área viven seres humanos, animales y plantas, todos ellos relacionados. También se define como una unidad fisiográfica conformada por la reunión de un sistema de cursos de ríos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o divisoria de aguas se definen naturalmente y en forma práctica corresponden a las partes más altas del área que encierra un río.

Este concepto se confunde muchas veces porque tiende a asociarse con el cauce o con las márgenes de un río. Por lo tanto, es importante apuntar que el concepto que aquí definimos implica una cierta superficie de terreno, de manera que todo punto en un país pertenece o está dentro de una cuenca hidrográfica. Una cuenca no solamente abarca la superficie, a lo largo y ancho, sino también la profundidad, comprendida desde el extremo superior de la vegetación hasta los estratos geológicos limitantes bajo la tierra.

Dentro de una cuenca se pueden distinguir: la parte alta, la parte media y la parte baja. En las partes altas, la topografía normalmente es empinada y generalmente están cubiertas de bosque. Tanto en la parte alta como en la parte media se encuentran la gran mayoría de las nacientes y de los ríos; las partes bajas, a menudo tienen más importancia para la agricultura y los asentamientos humanos, porque ahí se encuentran las áreas más planas. Se presenta la cuenca como un verdadero sistema, ya que está formada por un conjunto de elementos que se interrelacionan. Los más importantes son: el agua, el bosque, el suelo y los estratos geológicos.

La motivación de estudio y simulación de cuencas hidrográficas es conocer la problemática del agua, es decir, la necesidad de lograr equilibrio hidrológico que asegure el abastecimiento suficiente de agua mediante un uso eficiente. Mediante el estudio de las cuencas hidrográficas se pretende también poder realizar previsiones de cómo puede afectar en la cuenca cambios medioambientales o de demanda de agua.

Para realizar el estudio de una cuenca hidrográfica es necesario conocer todos los flujos que la forman, como interactúan entre ellos y la forma en la que varían los almacenajes de agua para generar ecuaciones que la rijan. Los flujos y almacenajes más representativos de una cuenca hidrográfica son (Figura 3):

Flujos:

- Lluvia: Precipitación de agua de la atmósfera que cae de las nubes en forma de gotas.
- Capilaridad: Capacidad de una sustancia para absorber un líquido. En el caso de las cuencas hidrográficas puede darse en el suelo, vertical o lateralmente, o entre reservorios de agua.
- Escorrentía superficial: Agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en cauces.
- Infiltración: Introducción paulatina de agua a través de los poros del suelo.

- Evapotranspiración: La evapotranspiración supone la consideración conjunta de dos procesos distintos: evaporación y transpiración. La evaporación es el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor. Se produce desde la superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación, desde las superficies de agua y desde el suelo. La transpiración es el fenómeno biológico por el cual las plantas pierden agua a la atmósfera. Toman el agua desde el suelo a través de sus raíces, una parte la toman para su crecimiento y el resto lo transpiran. Como son difíciles de medir por separado y además la mayoría de los casos interesa el valor conjunto, por ello se consideran conjuntamente bajo el valor mixto de evapotranspiración.
- Percolación: Movimiento e infiltración de agua a través de la porosidad del suelo.
- Recarga de acuíferos.
- Aportaciones de los acuíferos al río.
- Caudal del río.
- Demandas de agua: Incluye demanda para abastecimiento, riego o uso industrial, las cuales pueden ser de agua subterránea o superficial.

Almacenes

- Almacenamiento superficial de agua.
- Humedad del suelo.
- Volumen de agua en acuíferos.
- Volumen de agua en el río.
- Generación de biomasa.

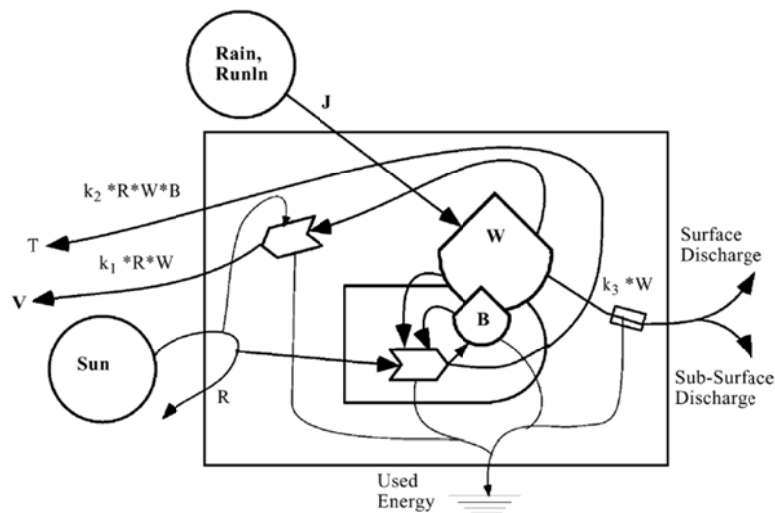


Figura 3. Diagrama genérico de una cuenca hidrográfica (Tilley, D. R. and Brown, M.T., 2006).

De manera general, la cuenca funciona gracias a las entradas de lluvia y sol. La precipitación provoca la aparición de almacenes de agua, los cuales darán lugar a la generación de biomasa en la cuenca gracias a la radiación incidente. De estos mismos almacenes de agua será de donde sale el agua que es demandada. Este ciclo se cierra cuando la radiación provoca la evaporación de parte de los almacenajes de agua, la cual dará lugar a nuevas precipitaciones.

Conocidos los flujos que forman la cuenca y los almacenes de agua se procede al desarrollo de ecuaciones diferenciales que permiten conocer la variación de masa en los almacenajes, que es lo que se pretende calcular. Sin embargo la resolución de estas ecuaciones supone una tarea muy complicada, por ello se crean programas informáticos para resolverlas, es decir simuladores de cuencas.

Existen diferentes tipos de simuladores de cuencas, en los que además de conocer los caudales que la forman se estudia también la calidad de las aguas. (Martínez Gracia A. 2009).

- WASP7. Water Quality Analysis Simulation Program. Es una modificación de del original WASP (EPA, 2009). Permite interpretar y predecir las respuestas de la calidad del agua a los fenómenos naturales y a la contaminación producida por el hombre. Permite además al usuario conocer gran variedad de tipos de agentes contaminantes. También proporciona caudales, velocidades, salinidad temperatura y flujos de sedimentos.
- EPD-RIV1: Este simulador posee dos componentes, un código hidrodinámico y otro que evalúa la calidad de las aguas.
- EFDC Hydro: Simulador hidrodinámico que puede ser usado para simular sistemas acuáticos en 1, 2 ó 3 dimensiones.
- AQUATOX: Simulador de modelos para sistemas acuáticos que predice el destino de diversos contaminantes. Este modelo es una herramienta importante para ecologistas, biólogos y cualquiera interesado en el estudio de riesgos en ecosistemas.
- WAN: Herramienta desarrollada para conocer el funcionamiento de cuencas y la calidad de las aguas basándose en el uso y tipo de los suelos, climatología y demás factores.

Para el caso de estudio de estudio de la Cuenca del Ebro no se ha utilizado un simulador comercial, sino que se ha desarrollado un programa propio. De esta forma se consigue mayor exactitud en el cálculo de la cuenca ya que en lugar de utilizar un simulador genérico se ha creado uno específico para el caso de estudio. Además estos estos programas tienen costes muy elevados. En este caso el procedimiento seguido ha sido el planteamiento ecuaciones que estudian la variación del almacenamiento de agua y caracterizadas para el caso específico de la Cuenca del Ebro. Para ello se ha utilizado la herramienta Simulink del programa Matlab.

3 Descripción del caso de estudio

3.1 Características de la cuenca de estudio. Cuenca hidrográfica del Ebro

3.1.1 Ámbito

La cuenca del Ebro está situada en el Noreste de la Península Ibérica, limitando con las cuencas hidrográficas del Norte Duero Tajo Júcar y Pirineo Oriental, además de las correspondientes a la vertiente francesa.

Tiene una forma aproximadamente triangular. El relieve de la cuenca es quebrado y desigual, con altitudes que varían desde 210 m en Zaragoza a 3.352 m en Monte Perdido.

El río Ebro es principal componente de la Cuenca, recorre ésta a modo de bisectriz recogiendo por su margen izquierda los caudalosos afluentes pirenaicos y por su margen derechas los afluentes ibéricos menos caudalosos, aunque generalmente torrenciales.

El territorio total de la Cuenca ocupa una superficie total de 85.534 km². En España, engloba territorios de 9 Comunidades Autónomas, 18 Provincias y 1.717 Términos Municipales, de ellos 77 sin población en la cuenca. En este espacio residen 3.019.176 habitantes repartidos en 5.423 localidades. La densidad de población en el territorio es de 35,30 habitantes/km², aunque más de la mitad de la población reside en los 12 municipios mayores de 20.000 habitantes en la cuenca (Datos de I.N.E. 2005).

Fuera de los límites de nuestro país se encuentran pequeñas partes de las cabeceras del Segre e Irati, concretamente en Andorra y Francia respectivamente. Estos territorios ocupan una superficie aproximada de 954 km² y una población de 82.493 habitantes en poblaciones vertientes a la cuenca del Ebro (72.320 hab. y 10.173 hab. en las 7 parroquias de Andorra y 21 comunas de Francia respectivamente).

A continuación se muestra mediante tablas la distribución superficial y población que integra la Cuenca del Ebro.

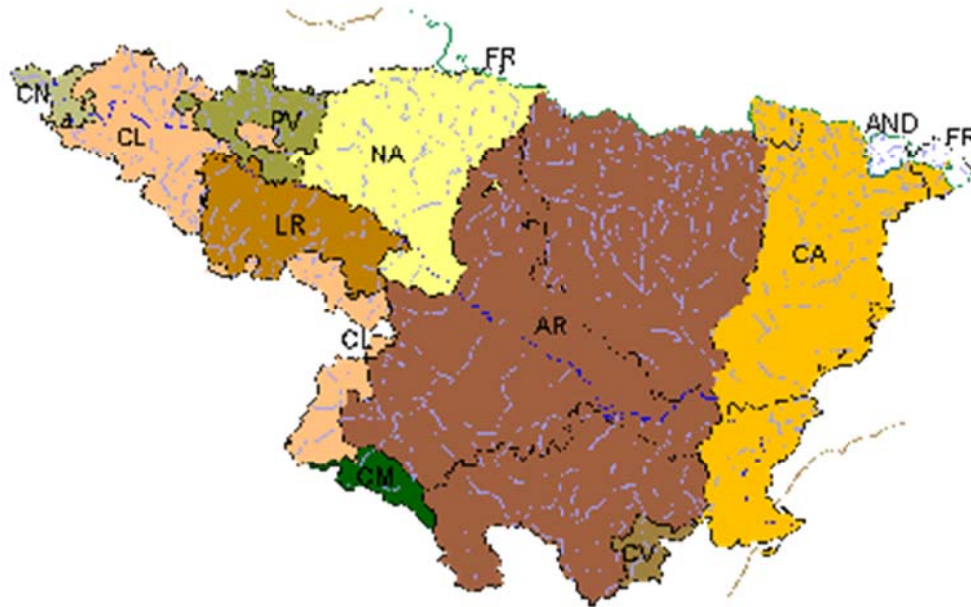


Figura 4. Distribución territorial. (CHEBRO)

Superficie y población por CCAA que integran el ámbito:

Comunidades Autónomas	Superficie [Km2]	Porcentaje[%]	Nº hab. 2005	Porcentaje[%]
Cantabria	775,4	0,91	18.925	0,63
Castilla y León	8.124,9	9,50	94.681	3,14
La Rioja	5.050,7	5,90	301.084	9,97
País Vasco	2.680,7	3,13	266.392	8,82
Navarra	9.227,4	10,79	565.766	18,74
Aragón	42.076,3	49,19	1.217.157	40,31
Castilla-La Mancha	1.117,9	1,31	1.818	0,06
Cataluña	15.634,4	18,28	548.251	18,16
Comunidad Valenciana	846,5	0,99	5.102	0,17
Total ámbito	85.534,2	100,00	3.019.176	100,00

Municipios de más de 20.000 habitantes:

Municipio	Nº hab 2005	% sobre total hab. cuenca
Zaragoza	647.373	21,44
Vitoria	226.490	7,50
Pamplona	193.328	6,40
Logroño	144.935	4,80
Lleida	124.709	4,13
Huesca	48.530	1,61
Miranda de Ebro	37.664	1,25
Tortosa	33.705	1,12
Tudela	32.345	1,07
Calahorra	23.171	0,77
Barañain	22.295	0,74
Calatayud	20.263	0,67
Total	1.554.808	51

Población ocupada por sectores económicos:

Año 2000	Pobl. Ocupada nº hab.	Porcentaje %
Agricultura, pesca, minería	92.996	7,76
Industria (incluye energía y construcción)	428.791	35,76
Servicios	677.292	56,48
Suma	1.199.079	100,00

3.1.2 Hidrología y datos característicos de la Cuenca

- Aguas Superficiales:
 - 13.049 Km de los principales ríos (342).
 - 697 masas de agua fluviales.
 - 92 lagos y lagunas según criterios de la Directiva Marco del Agua, 3 masas de transición y 1 masa costera.

- Aguas Subterráneas:
 - 8 Dominios Hidrogeológicos.
 - 105 masas de agua subterránea.
 - 16.770 km² de superficie aflorante permanente.
Redes de medida: Existen 58 estaciones en embalses, 148 estaciones de aforo en ríos, 226 estaciones de aforo en canales, 225 medidas de precipitación, 77 medidas de temperatura ambiente, 12 puntos de concentración, 100 estaciones repetidoras. SAIH

- Calidad:
 - Aguas superficiales: Existen 146 puntos de control de aguas en zonas destinadas a la producción de agua potable, 30 puntos de control en zonas de baños, 37 puntos de control de nutrientes, 80 puntos de vigilancia (estado químico) y 227 puntos de control biológico.
 - Aguas subterráneas: Existen más de 500 puntos de muestreo en la red subterránea de aguas.
 - Sustancias peligrosas: 18 puntos de muestreo.
 - Plaguicidas: 9 puntos de muestreo.
 - Alerta de calidad: 28 estaciones automáticas de muestreo.
 - Radioactividad: 12 puntos de muestreo.

- Datos hidrológicos:
 - Precipitación media (4 años): 580mm. SAIH
 - Bombeos de agua: en el caso de esta cuenca no se han tenido en cuenta ya que no se han encontrado datos concretos para este flujo y además no supone un valor relevante.
 - Caudal medio del río Ebro: 1296 m³/s. SAIH
 - Entrada media de agua subterránea: 18,7 m³/s

- Datos característicos de la cuenca.
 - Kcultivo: 1,07758. MAGRAMA
 - Porosidad media: 36%. SANDERS (1998)
 - Temperatura media: 13,18 °C. SAIH
 - Productividad media de biomasa: 14843107660 Kkg. MAGRAMA

- Consumos.
 - Consumo de agua subterránea: 348 hm³/año. CHEBRO
 - 45% Demanda para uso agrícola
 - 45% Demanda para uso industrial
 - 10% Demanda para abastecimiento

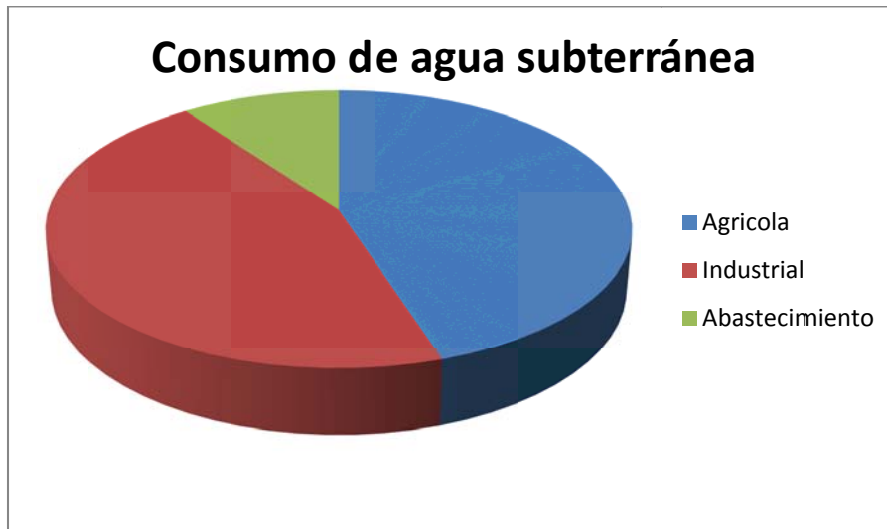


Figura 5. Gráfico de proporción de consumos de agua subterránea en la Cuenca del Ebro.

- Consumo de agua superficial: 8038 hm³/año. CHEBRO
 - 94% Demanda para uso agrícola
 - 1% Demanda para uso industrial
 - 5% Demanda para abastecimiento



Figura 6. Gráfico de proporción de consumos de agua superficial en la Cuenca del Ebro.

3.1.3 Clima

El clima en la Cuenca del Ebro presenta una gran heterogeneidad debido a su gran extensión y a la participación de las influencias tanto continental como mediterránea. A grandes rasgos se pueden diferenciar tres zonas climáticas:

- Zona Cantábrica, con precipitaciones abundantes y uniformes a lo largo del año y temperaturas suaves.
- Depresión Central, ocupa el 80 % de la superficie de la Cuenca, influyendo decisivamente por su clima semiárido y precipitaciones estacionales en la climatología de toda la cuenca.
- Zona Mediterránea, con escasas precipitaciones y suaves temperaturas.

Las temperaturas alcanzan sus máximos en los meses de Julio y Agosto y sus mínimos de en los meses invernales. Las precipitaciones máximas se producen en los sistemas montañosos que delimitan el valle.

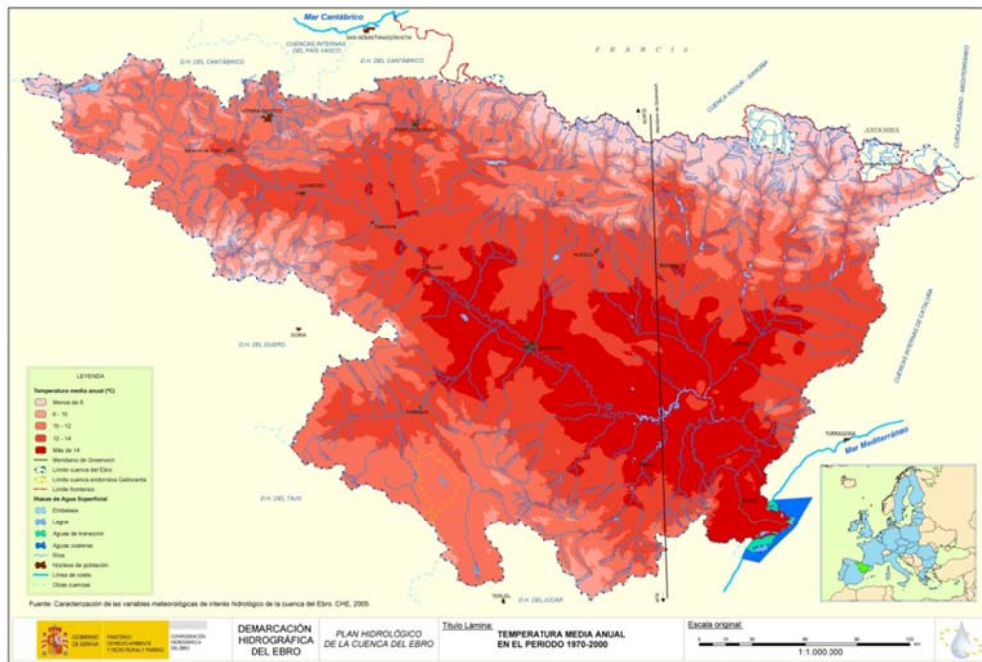


Figura 7. Distribución de temperaturas. (CHEBRO)

3.1.4 Geología

La geología de la Cuenca es muy variada, y una estructura tectónica compleja, da lugar a numerosos acuíferos, muchas veces relacionados entre si. Predominan los materiales calizo-dolomíticos. Los principales componentes del suelo de la cuenca son gravas, arenas, limos calizas y arcillas. (CHEBRO).

4 Metodología de modelado

El caso de estudio para la cuenca del Ebro se basa en el modelo ecológico desarrollado por David r. Tilley y Mark T. Brown (2006) en el que se realiza una simulación para una cuenca hidrográfica en Florida. Así, partiendo de los almacenajes de agua dentro de la cuenca, se describen todos los flujos de agua entrante y saliente que la forman. Para el caso particular del Ebro lo que se pretende es conocer como varían estos almacenamientos de agua a lo largo de un año tomando datos reales. Se han buscado ecuaciones genéricas de variación de agua en cada uno de estos almacenajes y han adaptado para la cuenca estudiada. Una vez formadas estas ecuaciones se implementan en Simulink y se resuelven. De esta forma, y tomando como base el río Ebro, se conocerán tanto el caudal en puntos determinados de la cuenca como el valor de todos los flujos entrantes y salientes de los almacenajes para así comprobar como varían estos para casos particulares como pudiera ser un consumo excesivo de agua, precipitaciones bajas o calor extremo.

4.1 Ecuaciones generales para la formación de la cuenca

El modelado de la cuenca consiste en construir un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, acopladas entre sí, cuyo comportamiento dinámico es similar al de la cuenca real.

En este caso se han planteado 5 ecuaciones básicas para modelar la cuenca. Cada una de ellas recoge la dinámica de los distintos almacenamientos: agua superficial, humedad del suelo, volumen de acuífero, volumen del agua del río y por último productividad de biomasa en la cuenca.

La forma de obtener estas ecuaciones no es sencilla, ya que es necesario comprender la dinámica de cada elemento de la cuenca y su relación con los demás para traducir todos estos flujos en términos matemáticos, investigar en distintas fuentes para estimar los parámetros asociados a cada término, simular el modelo resultante y finalmente realizar una validación con datos reales.

A continuación se muestra un listado con las abreviaturas utilizadas en las ecuaciones para una mayor comprensión.

- SD: Almacenamiento de agua superficial [m^3].
- USM: Humedad del suelo [m^3].
- SA: Volumen del agua en acuíferos [m^3].
- CW: Volumen del agua del río [m^3].
- BU: Biomasa [Kg].

Cada uno de los flujos que actúan en las distintas ecuaciones va multiplicado por una constante k_i , cuyo valor depende de las características de la cuenca de estudio y a su vez consigue la coherencia dimensional. A continuación se explica la obtención de cada ecuación.

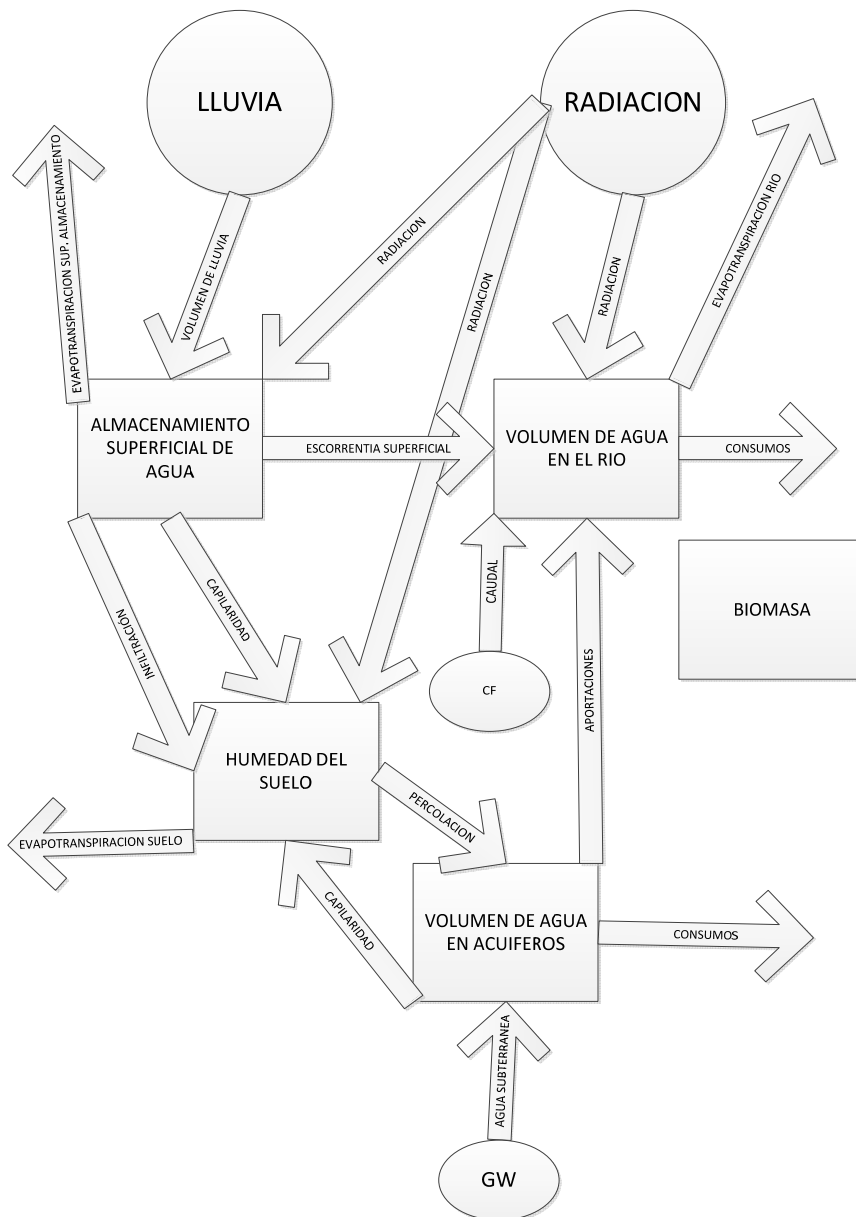


Figura 8. Diagrama con ecuaciones de una cuenca hidrográfica.

$$dSD = K1 \times LLxAU - K2 \times (USM - SD) - K3 \times Coef_esc \times LLxAU - K4 \times Coef_infxLLxAU - K5 \times Kcultivo \times ETP \times SD$$

$$dUSM = K4 \times Coef_infxLLxAU + K6 \times (SA - USM) + K2 \times (USM - SD) - K7 \times K4 \times Coef_infxLLxAU \times Porosidad - K8 \times Kcultivo \times ETP \times USM$$

$$dSA = K7 \times K4 \times Coef_infxLLxAU \times Porosidad + GW - K9 \times SA - K6 \times (SA - USM) - C_aguaSub$$

$$dCW = CF + K3 \times Coef \times LLxAU + K9 \times SA - K10 \times Kcultivo \times ETP \times CW - C_aguaSup$$

$$dBU = 0$$

Almacenamiento de agua superficial SD.

La ecuación general para el almacenamiento superficial de agua es la siguiente: (Aparicio et al, 2006)

$dSD = \text{Volumen de lluvia o precipitación de la cuenca} + \text{Aportaciones de agua (bombeo, retorno)} - \text{Capilaridad vertical} - \text{Escorrentía} - \text{Infiltración} - \text{Evapotranspiración} - \text{Posibles pérdidas}$

A continuación se pasa a describir cada uno de los flujos anteriormente citados:

- Volumen de lluvia o precipitación de la cuenca: Para calcular este flujo, basta con realizar el producto del volumen de lluvia con el área total de la cuenca.

$$J1 = K1 * LL * AU$$

- LL: Volumen de lluvia [m/día].
 - AU: Área total de la cuenca [m²].
 - K1 [n.a].
- Aportaciones de agua: Estas aportaciones vienen dadas por estaciones de retorno o bombeo. No se han considerado para el caso de estudio.
- Capilaridad vertical: La capilaridad del suelo representa la capacidad del suelo para absorber agua vertical o lateralmente.

$$J2 = K2 * (SD - USM)$$

- USM: Humedad del suelo [m³].
 - SD: Almacenamiento superficial de agua [m³].
 - K2 [1/día].
- Escorrentía: Depende del tipo de terreno de la zona de estudio. En este caso la escorrentía es un flujo de salida en el almacenamiento superficial de agua.

$$J3 = K3 * Coef_esc * LL * AU$$

- R: volumen de lluvia [m/día].
 - AU: Área total de la cuenca [m²].
 - K3 [n.a].
 - Coef_esc: Coeficiente de escorrentía [n.a].

- Infiltración: Una parte de la precipitación en la cuenca se infiltra en el terreno.

$$J4 = K4 * Coef_inf * LL * AU$$

- R: volumen de lluvia [m/día].
 - AU: Área total de la cuenca [m²].
 - K4 [n.a].
 - Coef_inf: Coeficiente de infiltración [n.a].
- Evapotranspiración de la zona de retención: Para este almacenamiento solo se tiene en cuenta la evapotranspiración de la zona de retención de agua.

$$J5 = K5 * Kcultivo * ETP * SD$$

- SD: Almacenamiento superficial de agua. [m³]
- Kcultivo: Coeficiente de cultivo [n.a]. Para poder convertir la evapotranspiración potencial en real es necesario multiplicarla por este coeficiente, el cuál depende de las características de la cuenca de estudio.
- K5 [1/m].
- ETP: Evapotranspiración potencial [m/día]. La evapotranspiración potencial es aquella que se produce bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo y vegetación. (Thornthwaite, 1948).

$$ETP = 0,0023 * (tmedia + 17,78) * R * (td\ max - td\ min)^{0,5}$$

- ETP: Evapotranspiración potencial [mm/día].
- tmedia: Temperatura media diaria [°C].
- R: Radiación solar [mm/día].
- tdmx: Temperatura diaria máxima [°C].
- tdmín: Temperatura diaria mínima [°C]

Humedad del suelo USM.

La ecuación general para la variación en la humedad del suelo de la cuenca es la siguiente (UPM, 2010):

dUSM: Infiltración debida a la precipitación + Capilaridad con el acuífero + Capilaridad vertical – Percolación – Evapotranspiración.

A continuación se pasa a describir cada uno de los flujos anteriormente citados:

- Infiltración debida a la precipitación: Supone un flujo entrante de agua debido al almacenamiento superficial de agua por precipitación.

$$J4 = K4 * Coef_inf * LL * AU$$

- R: volumen de lluvia [m/día].
- AU: Área total de la cuenca [m²].
- K4 [n.a].
- Coef_inf: Coeficiente de infiltración [n.a].

- Capilaridad con acuífero: En este caso se produce un intercambio de agua entre al acuífero de la cuenca y el suelo, provocando un aumento en su humedad.

$$J6 = K6 * (SA - USM)$$

- SA: Volumen del acuífero [m³].
- USM: Humedad del suelo [m³].
- K6 [1/día].

- Acción de la capilaridad vertical: Es el mismo flujo que en la ecuación anterior.

$$J2 = K2 * (SD - USM)$$

- USM: Humedad del suelo [m³].
- SD: Almacenamiento superficial de agua [m³].
- K2 [1/día].

- Percolación: Es el flujo del agua a través de materiales porosos, en este caso el suelo de la cuenca, disminuyendo su humedad.

$$J7 = K7 * Infiltración * Porosidad$$

- Infiltración [m³/día].
- Porosidad [n.a].
- K7 [n.a].

- Evapotranspiración de la zona húmeda: Al igual que en el caso anterior, la evapotranspiración es un flujo saliente del almacenaje, pero en este caso sólo se tiene en cuenca la que se prodce a traves de la humedad del suelo.

$$J8 = K8 * Kcultivo * ETP * USM$$

- ETR: Evapotranspiración potencial [m/día].
- Kcultivo: Coeficiente de cultivo [n.a].
- USM: Humedad en el suelo [m³].
- K8 [1/m].

Volumen de agua en el acuífero SA.

La siguiente ecuación describe el funcionamiento del acuífero en la cuenca (CEAG 2000):

dSA: Infiltración debida a precipitación y aguas superficiales + Entrada por los límites u otros acuíferos – Aportaciones al Canal – Capilaridad con el suelo– Consumos de agua subterránea.

- Percolación: Es el flujo del agua a través de materiales porosos, en este caso el suelo de la cuenca, disminuyendo su humedad.

$$J7 = K7 * Infiltración * Porosidad$$

- Infiltración [m³/día].
 - Porosidad [n.a].
 - K7 [n.a].
- Entrada de agua por los límites u otros acuíferos.

$$GW$$

- GW: Entrada de agua subterránea [m³/día].
- Aportaciones al canal.

$$J9 = K9 * SA$$

- SA: Volumen del acuífero [m³].
 - K9 [1/día].
- Capilaridad con el suelo: Es el mismo flujo que en la ecuación anterior pero en este caso implica una pérdida de caudal ya que el agua absorbida por el suelo aumentando su humedad es obtenida de los acuíferos de la cuenca.

$$J6 = K6 * (SA - USM)$$

- SA: Volumen del acuífero [m³].
 - USM: Humedad del suelo [m³].
 - K6 [1/día].
- Consumos de agua subterránea:

$$C_AguaSub$$

- C_AguaSub: Consumo de agua subterránea diario [m³/día].

Volumen de agua en el canal de agua CW.

El balance de masa en el canal es el siguiente (Canales A., 1989):

dCW : Caudal en el canal + Escorrentía debida a la precipitación + Aportaciones al Canal – Evapotranspiración – Consumos de agua superficial.

- Caudal en el canal:

$$CF$$

- CF: Caudal medio del río [m³/día].

- Escorrentía: Depende del tipo de terreno de la zona de estudio. En este caso la escorrentía es un flujo de salida en el almacenamiento superficial de agua.

$$J3 = K3 * Coef_esc * LL * AU$$

- R: volumen de lluvia [m/día].
- AU: Área total de la cuenca [m²].
- K3 [n.a].
- Coef_esc: Coeficiente de escorrentía [n.a].

- Aportaciones al canal.

$$J9 = K9 * SA$$

- SA: Volumen del acuífero [m³].
- K9 [1/día].

- Evapotranspiración: De la misma forma que en los casos anteriores implica dos procesos, evaporación y transpiración pero en este caso solo se tiene en cuenta la que se produce a través de canal.

$$J10 = K10 * Kcultivo * ETP * CW$$

- ETR: Evapotranspiración potencial [m/día].
- Kcultivo: Coeficiente de cultivo [n.a].
- CW: Volumen del agua en el canal [m³].
- K10: [1/m].

- Consumos: Engloba todos los tipos de demanda que se pueden dar desde particular, agrícola o industrial.

$$C_AguaSuper$$

- C_AguaSuper: Consumo de agua superficial diario [m³/día].

Generación de biomasa en la cuenca BU.

Dado que no se ha encontrado una ecuación genérica para la productividad de biomasa de toda una cuenca se ha optado por tomar un valor constante.

4.2 Implementación de ecuaciones en el Simulador. Simulink

Para poder llevar a cabo la simulación de la cuenca ha sido utilizada la herramienta de Matlab Simulink. La creación de modelos en Simulink es sencilla e intuitiva, ya que se forman mediante la interconexión gráfica de distintos bloques. Dentro del editor de modelos de Simulink se insertan bloques, se conectan y se parametrizan para su posterior simulación.

En este caso la metodología seguida ha sido en primer lugar, para el caso estacionario, generar cada ecuación por separado, introduciendo las entradas como constantes y el valor de las k_i como ganancias. Una vez comprobado que todas las ecuaciones funcionan correctamente, se crearán subsistemas con el fin de agruparlas y que la interpretación del programa sea más sencilla. Para poder ver las gráficas que genera el programa se han colocado en las salidas de los subsistemas visores que reproducen los cálculos realizados.

Almacenamiento de agua superficial SD.

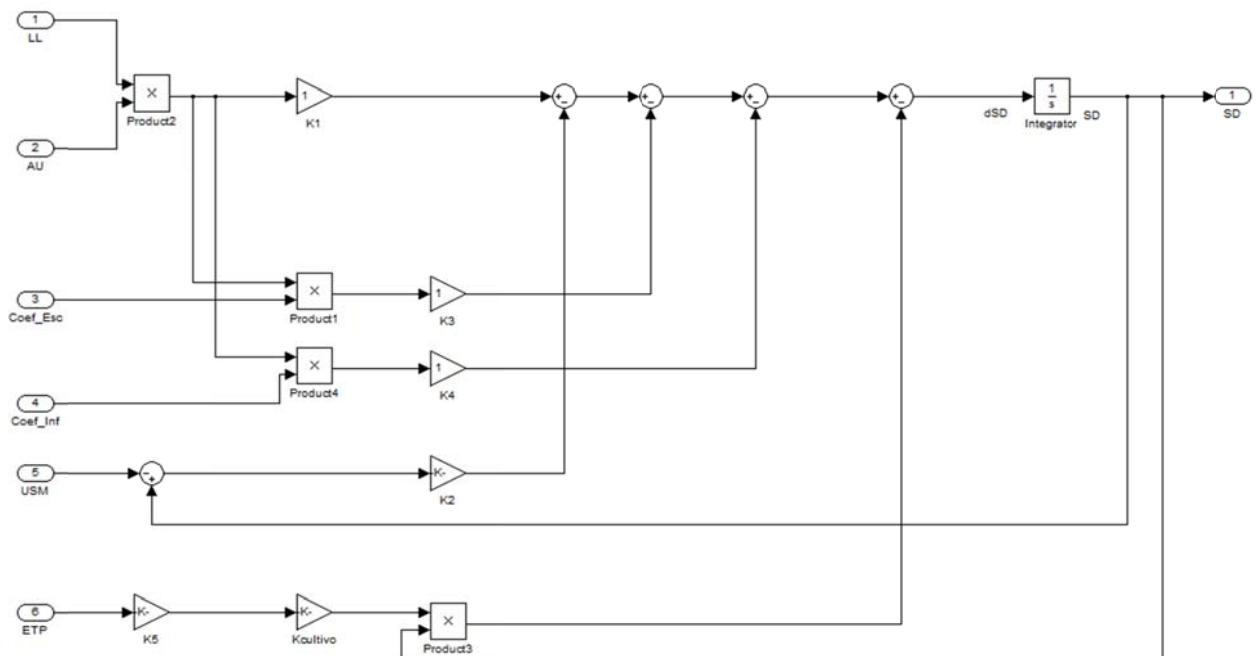


Figura 9 Ecuación de variación de almacenamiento superficial de agua.

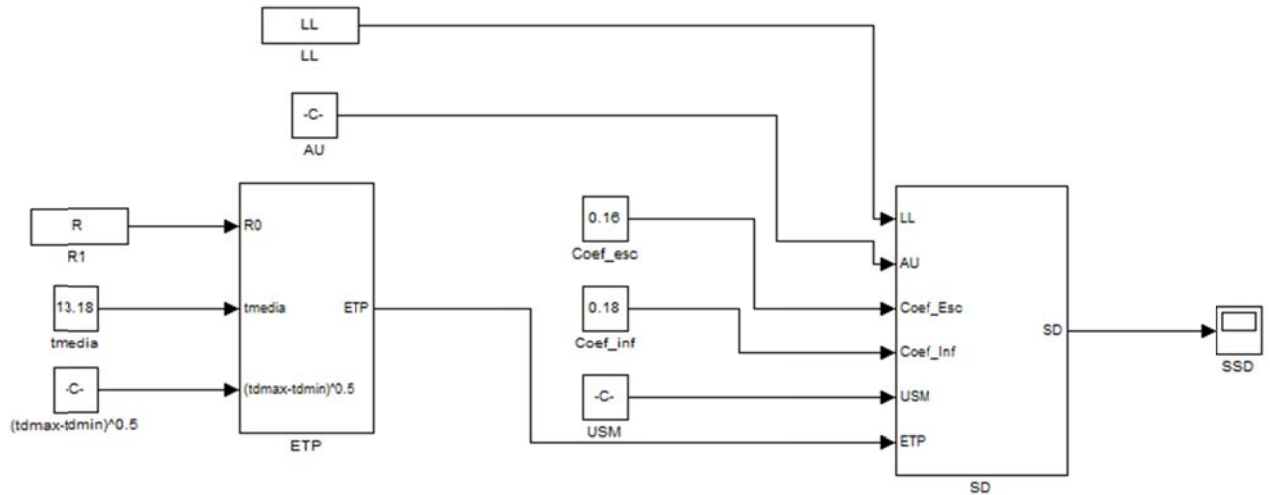


Figura10. Ecuación de variación de almacenamiento superficial de agua en bloques.

Humedad del suelo USM.

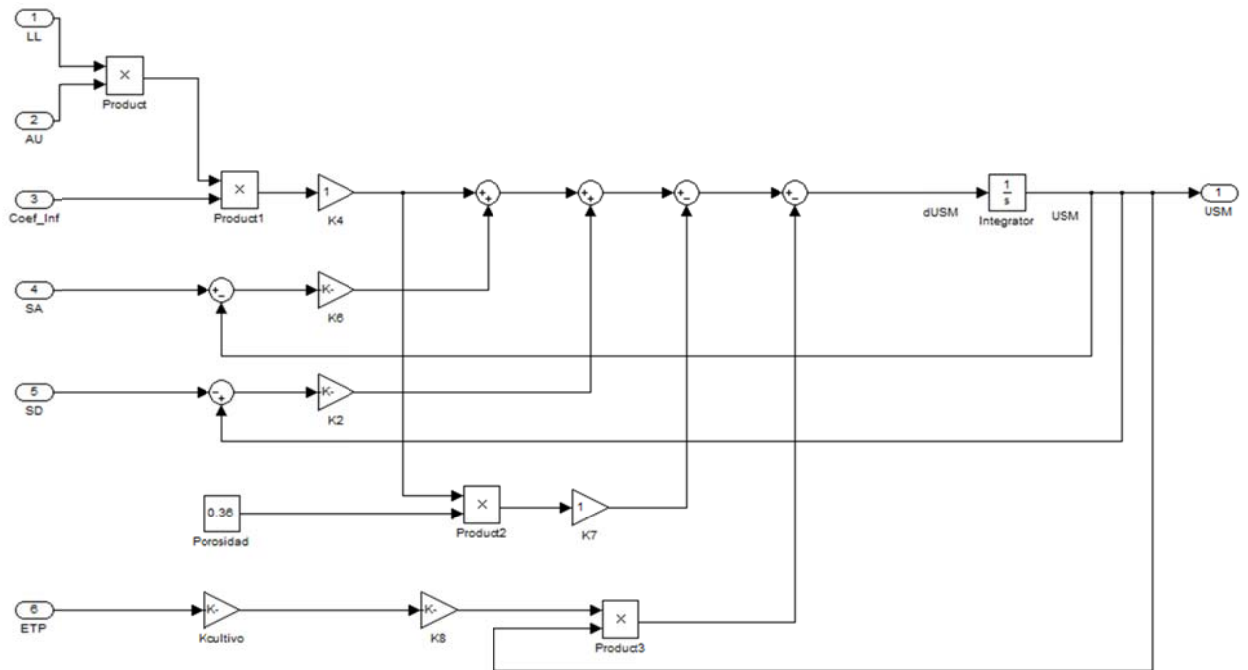


Figura 11. Ecuación de variación de humedad de agua en el suelo.

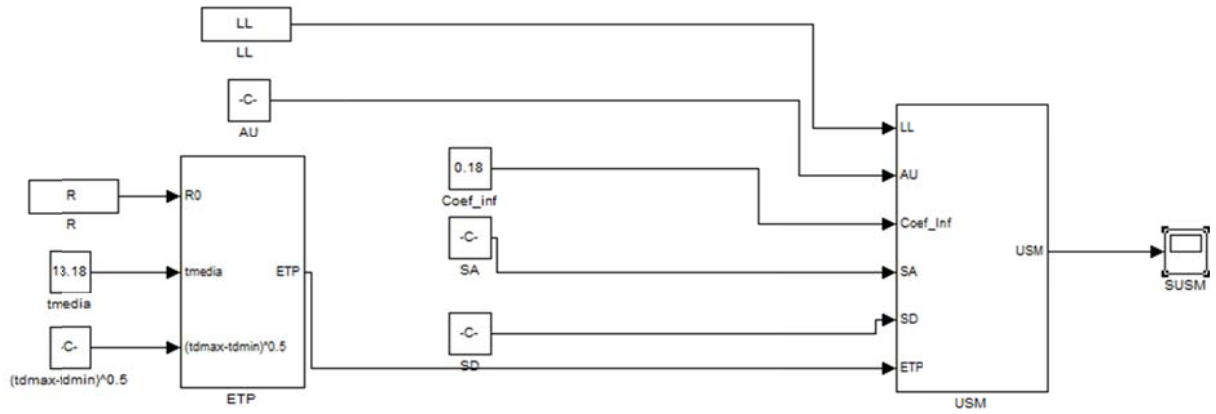


Figura 12. Ecuación de variación de humedad de agua en el suelo en bloques.

Volumen de agua en acuíferos SA.

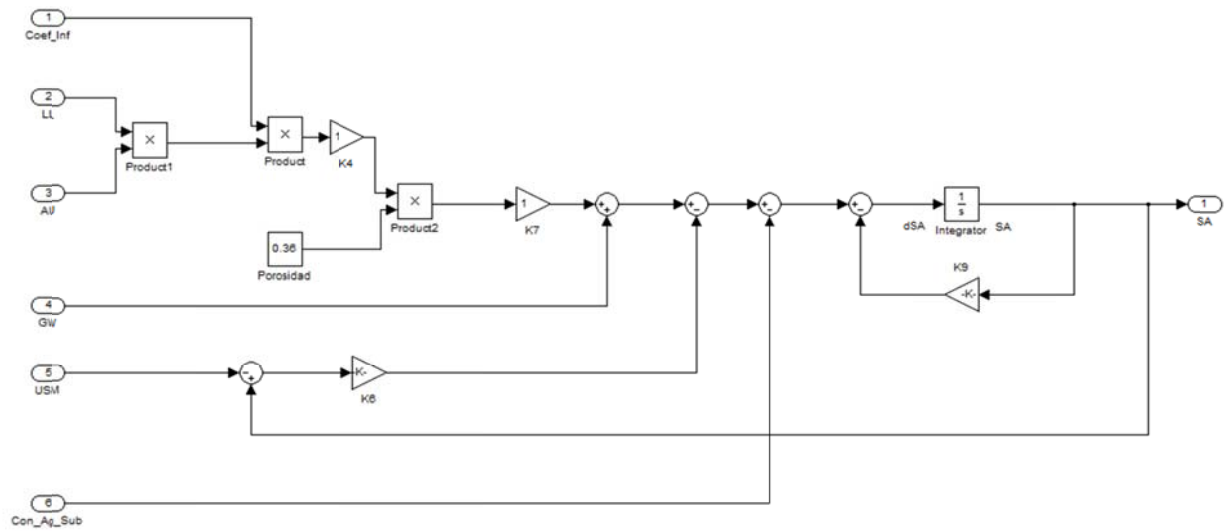


Figura 13. Ecuación de variación de agua en acuíferos

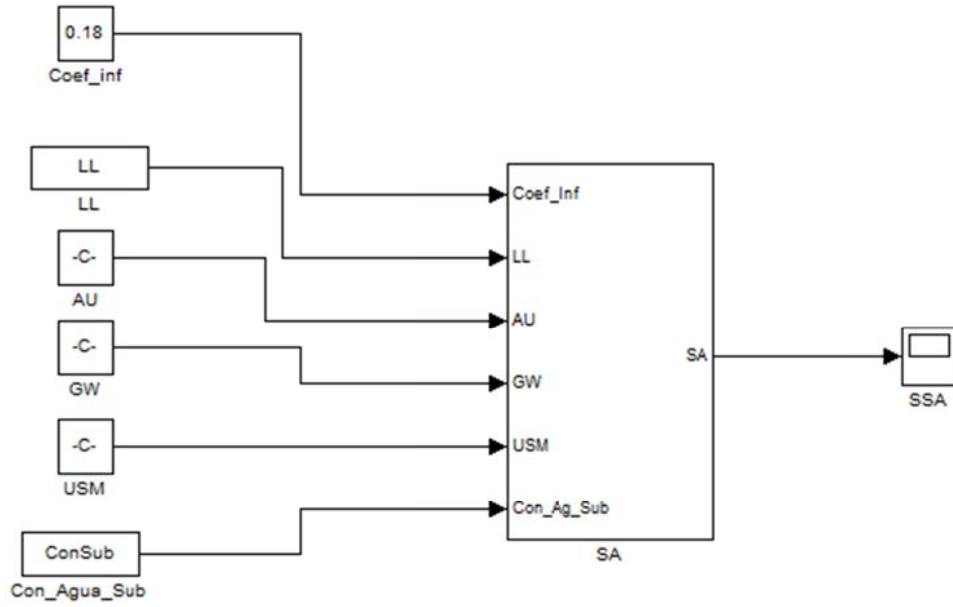


Figura 14. Ecuación de variación de agua en acuíferos en bloques.

Volumen de agua en río CW.

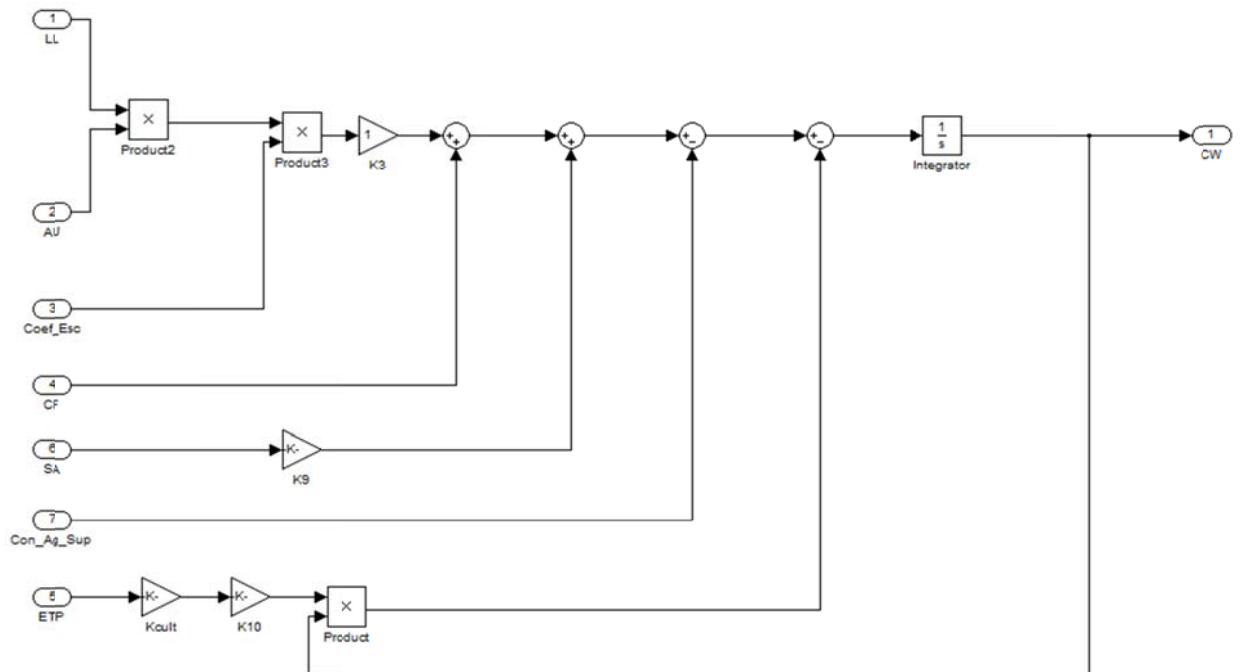


Figura 15. Ecuación de variación del canal de agua.

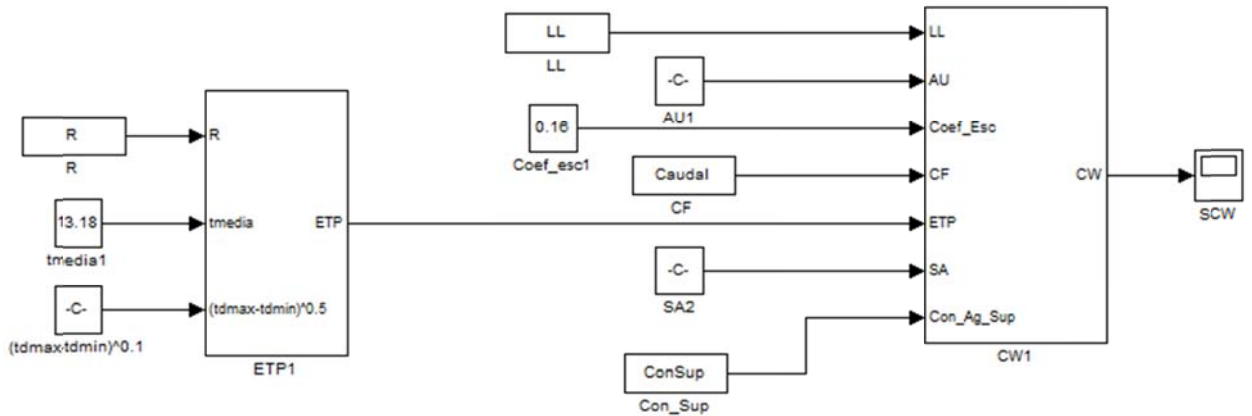


Figura 16. Ecuación de variación del canal de agua en bloques.

Conjunto Cuenca del Ebro.

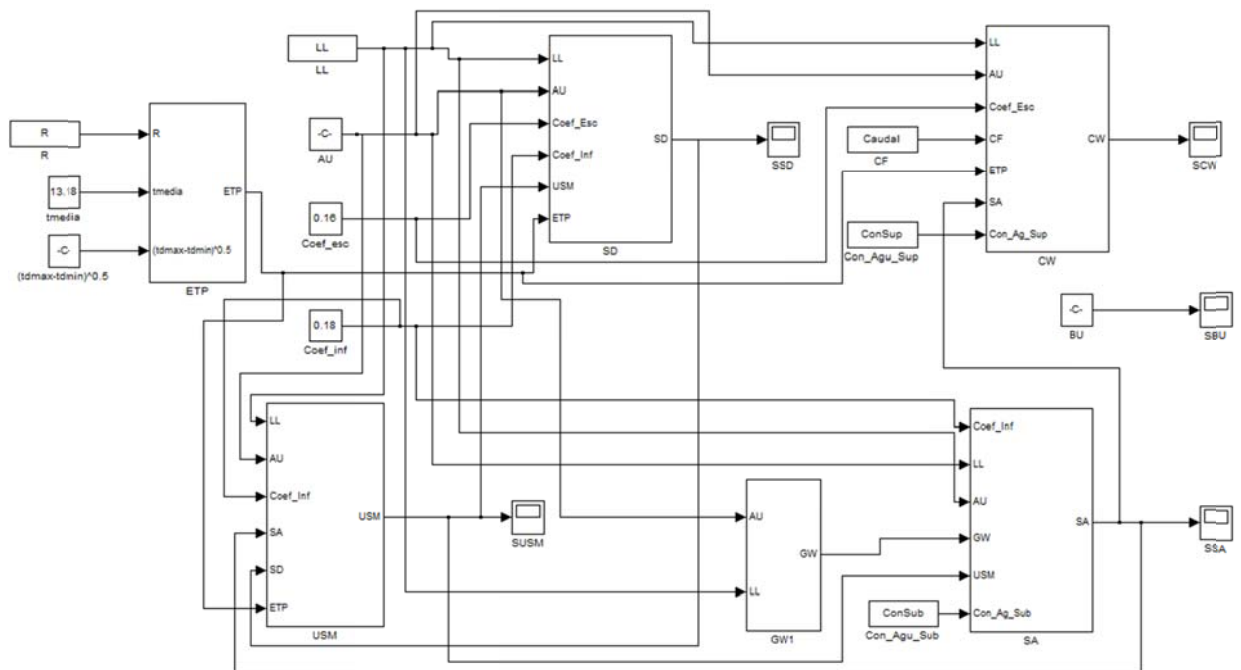


Figura 17. Conjunto de ecuaciones que forman el simulador

El siguiente paso es introducir los valores diarios a lo largo de un año para conocer la variación de la cuenca. Estos valores se introducen mediante el bloque llamado "From Workspace". Para ello ha sido necesario generar vectores para radiación, lluvia, caudal y consumos de agua superficial y subterránea y cargarlos en el Workspace de Matlab. Con los vectores ya en el espacio de Matlab se introducen en el modelo dinámico y se comprueba el funcionamiento de la cuenca cuando los datos de entrada cambian.

4.3 Calibración del modelo

Para poder llevar a cabo la simulación de la cuenca es necesario realizar una primera calibración para determinar el valor de las constantes k_i . De este modo una vez que estas se han encontrado se puede conocer el comportamiento de los almacenajes a lo largo del tiempo.

Estas constantes se calculan para el caso estacionario, es decir, que no se produce variación en los almacenes de estudio. Para ello se han buscado datos reales de lluvia, radiación, temperatura ambiente, caudal del río, biomasa y consumos de agua tanto superficial como subterránea. Todos estos datos son valores medios a lo largo de cuatro años, ya que si sólo se tomara un año podría darse el caso que ese año fuese atípico y la calibración de la cuenca no sería correcta.

También ha sido necesario encontrar valores característicos de la Cuenca del Ebro, como son, el tipo de suelo o tipo de cultivo ya que son factores de los cuales dependerán varios flujos que intervienen en la cuenca. (Apartado 3.1.2)

Para la calibración de la cuenca se ha realizado los siguientes pasos:

- Ecuaciones diferenciales de los almacenamientos de agua en la Cuenca hidrográfica del Ebro igualadas a cero para el caso estacionario. Conociendo la ecuación general y en algunos casos los flujos que la forma, como en el caso del volumen de lluvia, escorrentía superficial, infiltración, caudal de agua en el río, aportaciones al canal y consumos de agua, se obtienen los flujos restantes de la ecuación.
- Obtención de los coeficientes de escorrentía e infiltración.
- Ecuación característica para la percolación, ya que su valor será una parte del agua infiltrada, y esta cantidad de agua depende directamente de la porosidad del suelo de la cuenca.
- La dirección de la capilaridad es entre el almacenamiento de mayor volumen frente al de menor. El valor de la capilaridad es igual entre almacenajes.
- Para calcular el caso estacionario se han utilizado valores medios de todos los flujos, así los consumos serán iguales todos los días del año para calibrar la cuenca.
- Balance de masa en el acuífero para determinar el valor de la entrada de agua subterránea. Dado que este flujo es directamente proporcional a la lluvia se ha generado una ecuación que rijan este flujo en función a la precipitación diaria. Es de la siguiente forma:

$$GW = C1 + C2 * LL * AU$$

Dado que se conoce el valor para el caso estacionario y teniendo en cuenta que la entrada de agua subterránea aumenta al hacerlo la lluvia, por aproximación se calcula el valor máximo de GW y se obtienen los coeficientes de la ecuación.

$$GW = 1,487 E6 + 0,000945 * LL * AU$$

VALORES MEDIOS.

Nº	DESCRIPCIÓN	VARIABLE	ECUACIÓN	CALIBRACIÓN			REFERENCIA
				VALOR	UNIDADES	K-VALOR	
<u>Entradas</u>							
1.	Lluvia	LL		1,59E-3	m/d		SAIH
2.	Radiación	R		166,63	W/m ²		CMSAF
3.	Canal de entrada	CF		11943151	m ³ /d		SAIH
4.	Entrada de agua subterránea.	GW		1616000	m ³ /d		
<u>Flujos</u>							
5.	Volumen de lluvia o precipitación		$J1 = K1 * R * AU$	135992700	m ³ /d	1	
6.	Capilaridad vertical		$J2 = K2 * (USM - SD)$	419932	m ³ /d	0,0002164	
7.	Escorrentía superficial		$J3 = K3 * Cof_esc * LL * AU$	21758832	m ³ /d	1 Cof_esc=0,16	GEA (2000) MITYC
8.	Infiltración		$J4 = K4 * Cof_inf * LL * AU$	24478686	m ³ /d	1 Cof_inf=0,18	GEA (2000)
9.	Evapotranspiración superficie retención		$J5 = K5 * Kcult * ETP * SD$	89338790	m ³ /d	13,5 Kcult=1,07758	MAGRAMA

10. Capilaridad con el acuífero	$J6 = K6*(SA-USM)$	419932	m ³ /d	0,0001631	
11. Percolación	$J7 = K7*Inf*Poros.$	8812326	m ³ /d	1	
12. Evapotranspiración zona húmeda	$J8 = K8*Kcult*ETP*USM$	16508472	m ³ /d	4,591 Kcult=1,07758	
13. Aportaciones al río	$J9 = K9*SA$	9054794	m ³ /d	0,001854	Aguas Igme
14. Evapotranspiración en el río	$J10 = K10*Kcult*ETP*CW$	20736735	m ³ /d	3,055 Kcult=1,07758	MAGRAMA
15. Consumos de agua subterránea	C_AguaSub	953424	m ³ /d		CHEBRO
16. Consumo de agua superficial	C_AguaSup	22021917	m ³ /d		CHEBRO
<u>Almacenes</u>					
16. Almacenamiento superficial de agua SD		4250	hm ³		www.embalses.net
17. Volumen de humedad en el suelo	$USM AU*prof media*Po*%Hum$	2309,31	hm ³		
Profundidad media (humedad)		0,25	m		A.CERDÁ
Porosidad		36%			SANDERS (1998)
% Humedad en el suelo		30%			AEMET
18. Volumen de agua en acuíferos	SA	4884	hm ³		CHEBRO

19. Volumen de agua en el río	CW	4359,250185	hm ³	CHEBRO
20. Biomasa potencial	BU	14843107660	Kg/año	MAGRAMA

Área de la cuenca		AU = 8,553E10 m ²		CHEBRO
Evapotranspiración potencial		ETP = 0,001445 m/día.		
Temperatura media		tmedia= 13,18°C.		SAIH
Temperatura máxima media		tmax = 19,63°C.		SAIH
Temperatura mínima media		tmin = 7,68°C.		SAIH

5 Resultados

5.1 Resultados obtenidos tras la simulación

Una vez creadas e implementadas las ecuaciones que rigen la cuenca calibrado el modelo y comprobado como explica en el capítulo anterior, se ha corrido el caso para los 365 días de un año. Los datos entrantes para la variación de la cuenca son:

- Precipitación. Los datos de precipitación se han obtenido de la base de datos SAIH de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Para intentar que el resultado sea el más coherente posible los valores se han medido en distintas estaciones meteorológicas colocadas en distintos puntos de la cuenca. Las estaciones meteorológicas seleccionadas son las siguientes: Embalse del Ebro, Monteagudo, Maidevera, Mansilla, González Lacasa, Torcas, Cueva foradada, Santolea, La Estanca, Gallipuéñ, Peña, Calanda, Eugi, Yesa, Alloz, Bubal Ardisa, Sotонера, Lanuza, Vadiello, Guiamets, Mediano, El Grado, Barasona, Santa Ana, Oliana, Val, Itoiz, Montearagón, Guara, Valdabra, Torrollón.
- Radiación solar. Los valores medidos de radiación se han tomado para Zaragoza, ya que la variabilidad es mucho menor que la precipitación. En el caso de la irradiación se considera constante en un mismo mes.
- Caudal en el río. Este caudal se ha obtenido a través de la herramienta SIAH en distintas estaciones de mediada para conseguir la mayor homogeneidad. Se tomaron datos en Castejón, Zaragoza, Arroyo, Tortosa, Mendavia, Ascó, Reinosa y Logroño.
- Consumos de agua superficial y subterránea que varían a lo largo del año. Los valores de consumo de agría para uso industrial y abastecimiento se mantienen constantes todos los días del año, pero para el caso de demanda de agua para uso agrícola varía en función de la época del año en la que se encuentra ya que el riego es distinto durante las diferentes estaciones del año. Se ha considerado que el 40% de la demanda se produce en primavera, otro 40% en verano, un 20% en otoño y ningún tipo de demanda agrícola durante los meses de invierno.

A continuación se muestran los vectores de entrada al simulador.

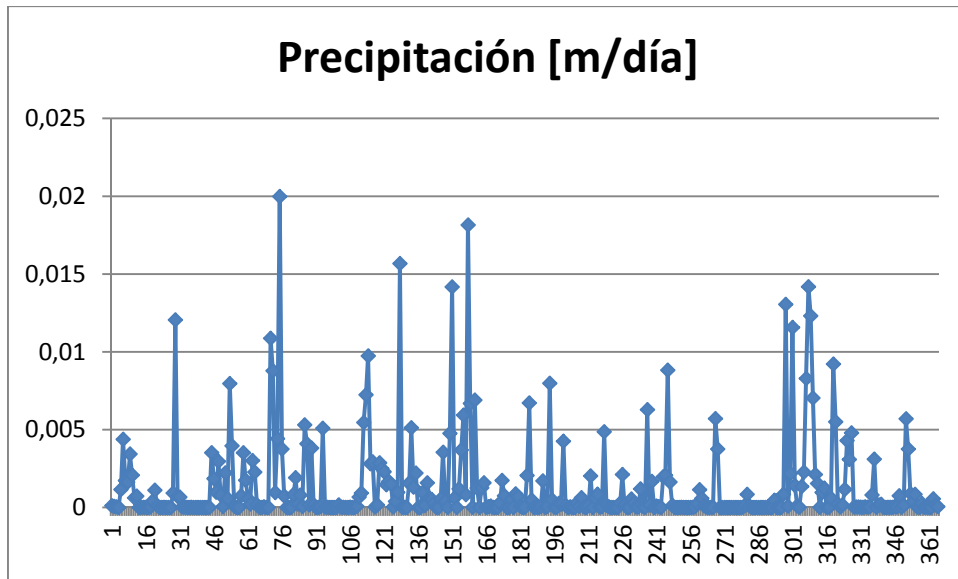


Figura 18. Precipitación diaria a lo largo de un año.

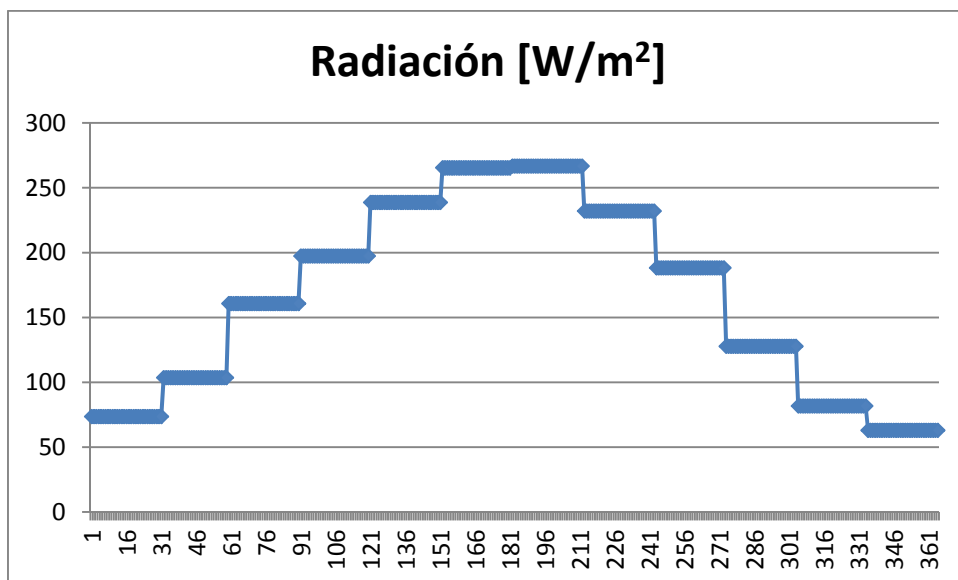


Figura 19. Radiación diaria a lo largo de un año.

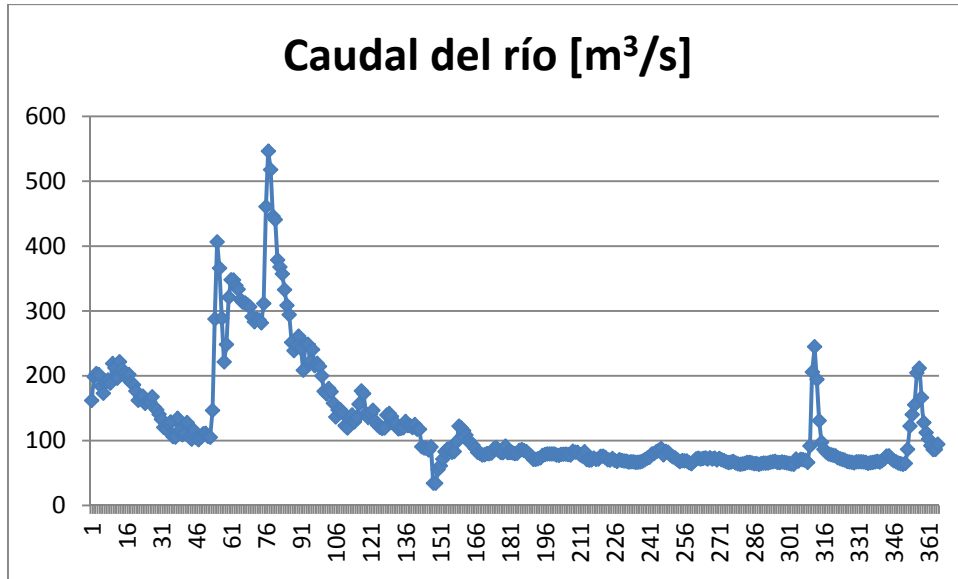


Figura 20. Caudal medio del río Ebro a lo largo de un año.

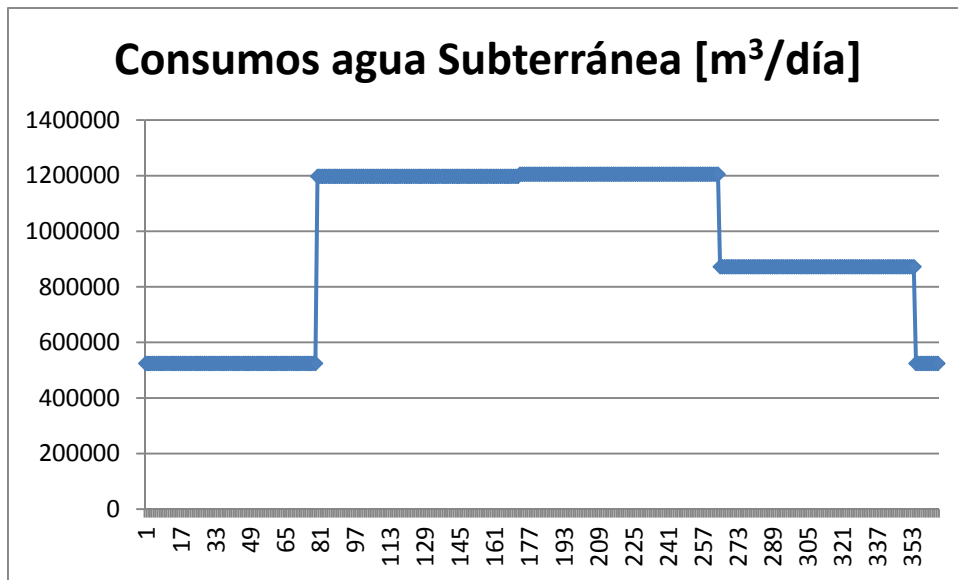


Figura 21. Consumos de agua subterránea a lo largo de un año.

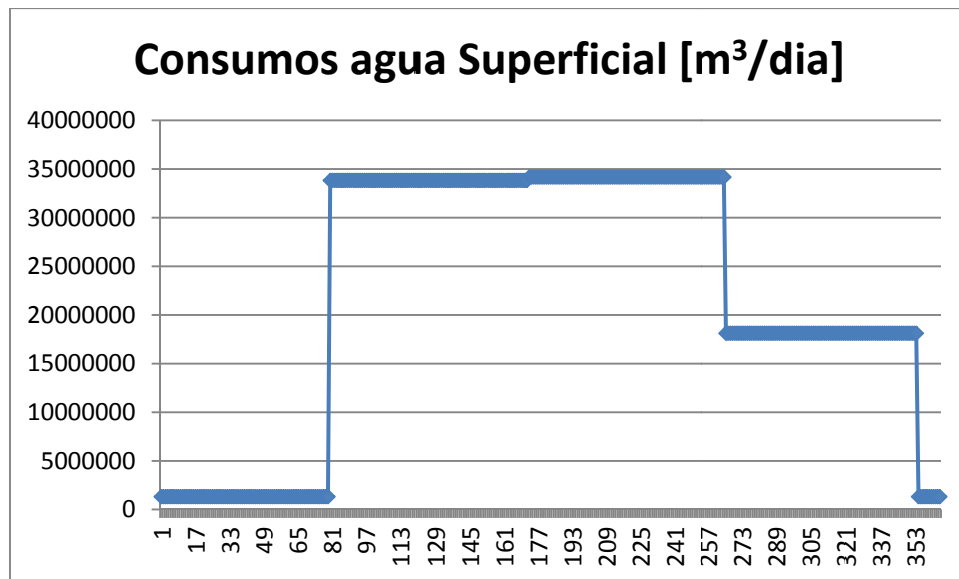


Figura 22. Consumos de agua superficial a lo largo de un año.

De esta forma, y una vez introducidos los vectores con valores anuales se comprueba la variabilidad de los almacenajes de agua. Los resultados se muestran a continuación.

5.1.1 Almacenamiento de agua superficial SD

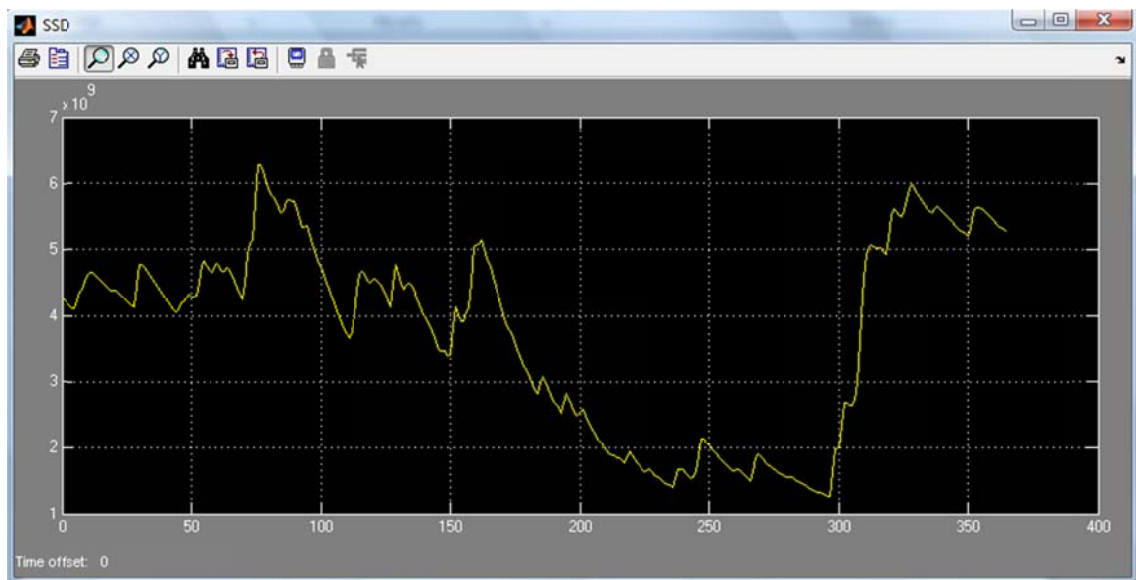


Figura 23. Variación en el almacenamiento de agua superficial a lo largo de un año.

Como se observa en la imagen, la variación en el almacenaje superficial de agua es similar a la forma que toma la precipitación en la cuenca, los distintos puntos máximos de agua almacenada coinciden con los valores máximos de precipitación. Esto ocurre en los meses de primavera y los últimos días del año. Los valores obtenidos oscilan entre el máximo de $6,27E9 \text{ m}^3$ y el mínimo de $1,4E9 \text{ m}^3$ de agua almacenada.

5.1.2 Humedad del suelo USM

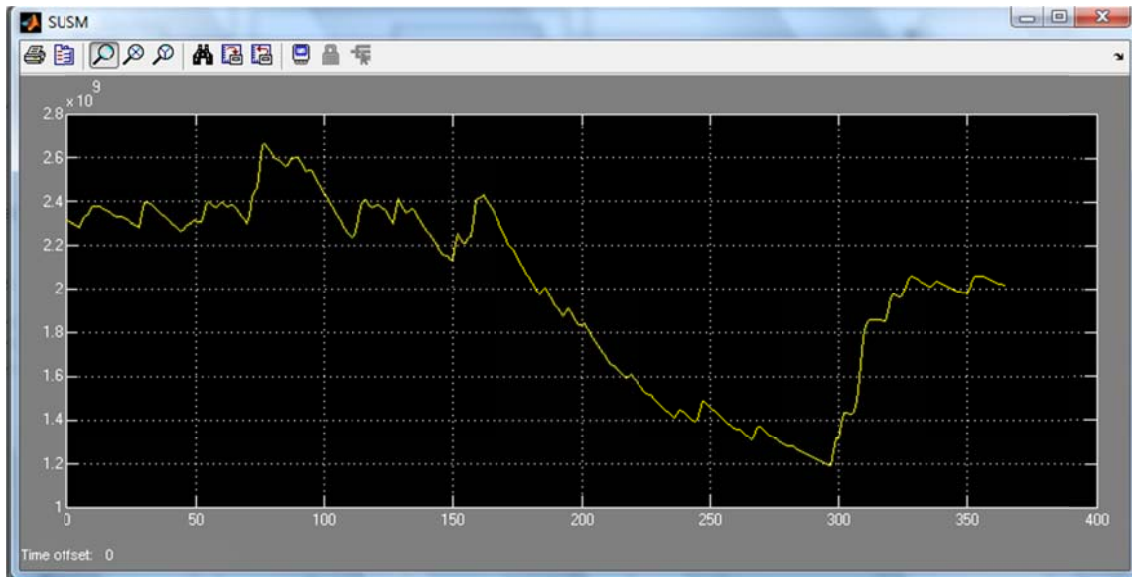


Figura 24. Variación en el volumen de humedad en el suelo a lo largo de un año.

Mediante la observación de los datos de humedad a lo largo de un año se comprueba su dependencia con la precipitación e irradiación de la cuenca ya que los picos de humedad se producen durante los días de mayor precipitación y los valores mínimos cuando la precipitación y la radiación solar mayor. Los valores máximos y mínimos son $2,66E9 \text{ m}^3$ y $1,19 E9 \text{ m}^3$. El valor de la humedad en el suelo posee cierta estabilidad a lo largo del año ya que estos valores son cercanos a los del caso estacionario.

5.1.3 Volumen de agua en acuíferos SA

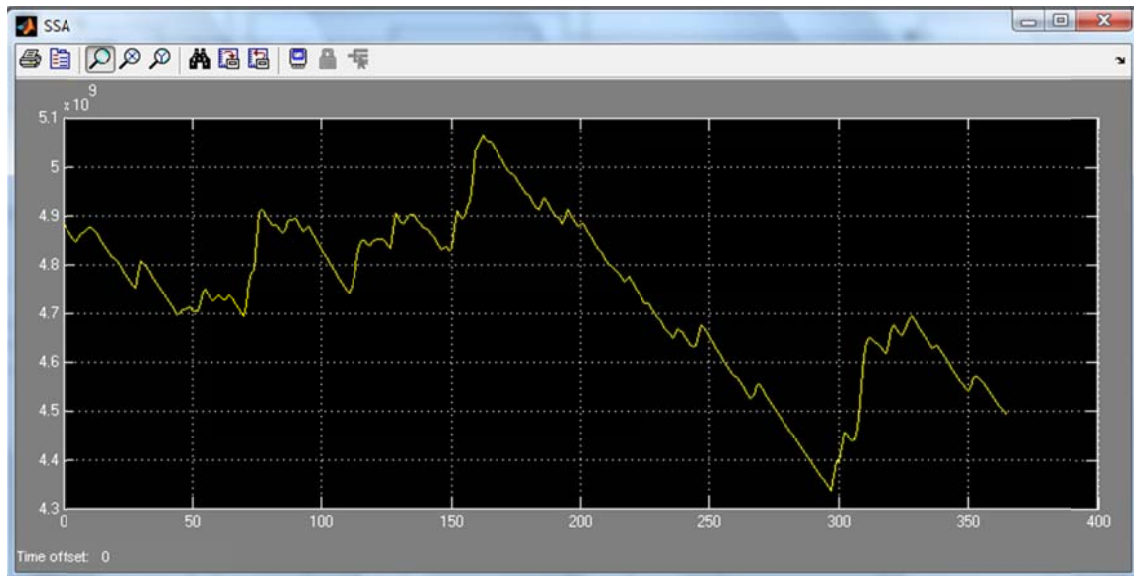


Figura 25. Variación en el volumen de agua en acuíferos a lo largo de un año.

Al igual que en el caso anterior, la dependencia de este almacenaje con los valores de entrada es más difícil de encontrar. Sin embargo existe dependencia con la entrada de

precipitación y la variación de los consumos de agua a lo largo del año. Los valores máximos y mínimos de agua en los acuíferos son $5,065E9 \text{ m}^3$ y $4,335E9 \text{ m}^3$. Es el reservorio de agua con menor variabilidad de la cuenca.

5.1.4 Volumen de agua en río CW

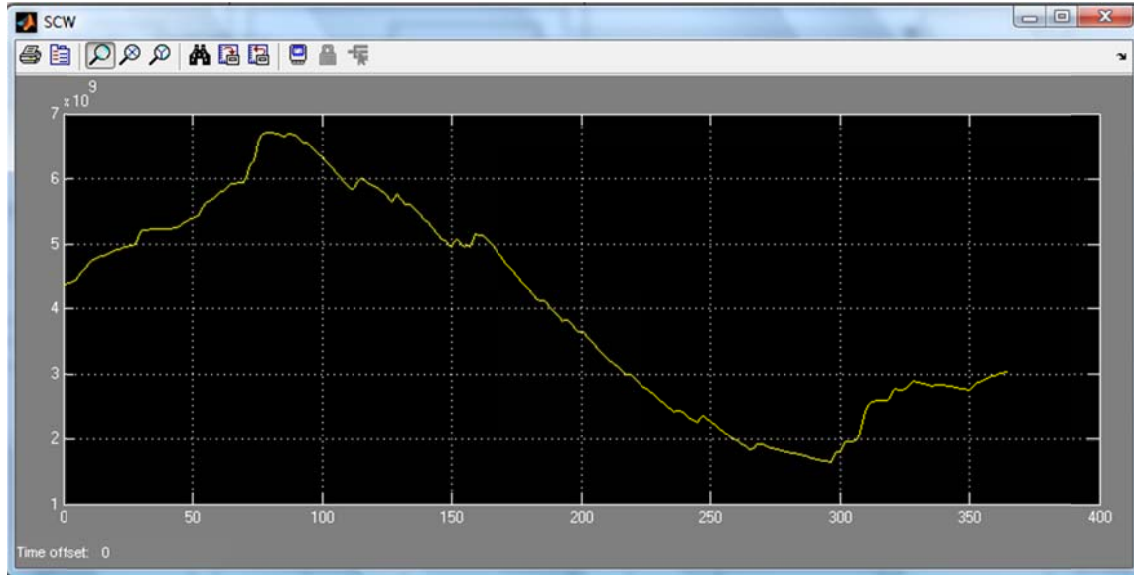


Figura 26. Variación en el volumen de agua en el río a lo largo de un año.

El volumen de agua en el río mantiene una fuerte dependencia con la entrada del caudal de río ya que ambas gráficas son muy semejante. Sin embargo se comprueba la dependencia a su vez con los consumos de agua, los cuales son mayores en primavera verano y otoño. Los valores oscilan entre $6,75E9 \text{ m}^3$ y $1,65E9 \text{ m}^3$.

5.1.5 Biomasa BU

El valor de la biomasa se mantiene constante no se han realizado variaciones para este almacenamiento.

5.2 Validación de los resultados.

Para realizarla validación, se comparan los resultados obtenidos tras la simulación con datos reales. Para el caso de estudio se estudia el almacenamiento superficial de aguas, comprobando los resultados obtenidos en la gráfica 4.2.1e con datos reales, en este caso el volumen de agua embalsada en la cuenca. Los valores de agua embalsada se muestran en la siguiente gráfica:

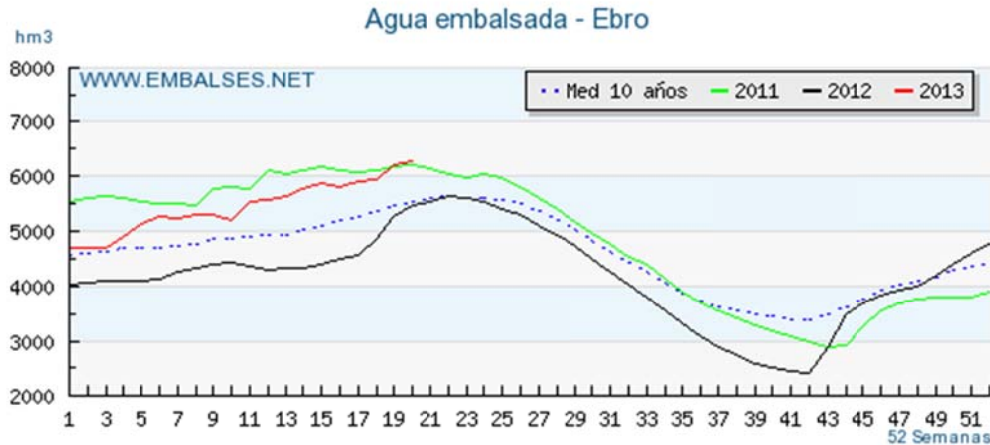


Figura 27. Agua embalsada en la Cuenca del Ebro.

La línea verde representa el volumen de agua embalsada en el año simulado. La forma de la curva coincide con la obtenida. Como se ve, los valores máximos se dan en los meses de primavera y hacia mitad de año se produce un descenso continuado en el almacenamiento de agua, llegando a los mínimos anuales. Por último de nuevo vuelve a subir el volumen de agua en los dos últimos meses. Sin embargo, aunque la curva de gráfica coincide, los valores obtenidos son diferentes. Esto es debido que los resultados obtenidos para la simulación no representan exactamente la cantidad de agua embalsada. Se han tenido en cuenta valores de escorrentía e infiltración, flujos salientes del almacenaje y que no se dan en un embalse. Los valores máximos y mínimos obtenidos tras la simulación son de $6,27E9 \text{ m}^3$ y $1,25E9 \text{ m}^3$ respectivamente mientras que en los embalses son $6,1E9 \text{ m}^3$ y $2,8E9 \text{ m}^3$. Aunque los máximos son muy semejantes los mínimos difieren casi un 50%. Esta diferencia viene dada por lo anteriormente citado y aunque en otros meses no es tan significativa en esos puntos lo es porque es la época con menores precipitaciones con una radiación incidente no demasiado baja, provocando que los flujos salientes sean mayores para el caso simulado que para el agua embalsada.

5.3 Escenarios de variación.

Una de las ventajas de realizar un simulador de cuencas es realizar previsiones de futuro para poder comprobar el funcionamiento de la cuenca en situaciones adversas. En este caso de estudio se han planteado tres posibles escenarios:

- Año seco: Descenso de las precipitaciones de la cuenca que da lugar a una reducción del caudal en el río. Se ha comprobado que un año seco en la Cuenca del Ebro como fue 2001-2002 supone un 20% de descenso en la precipitación respecto al del caso estacionario. Para poder comprobar los resultados se ha multiplicado los vectores de lluvia y caudal del río por un coeficiente de 0,8 para recalcular los almacenajes de agua.

- Aumento de los consumos de agua: Este aumento de los consumos de agua se da al aumentar la población de la cuenca. Los censos de población indican que el aumento de población anual es de un 1,2 % en España. Para comprobar cómo funcionaría la cuenca en el caso de que la población aumente lo correspondiente a un año se han multiplicado los vectores de consumos de agua superficial y subterránea por un coeficiente de 1,2 para comprobar los almacenamientos de agua.
- Ambos casos a la vez: Es el caso más desfavorable en el que ha aumentado la población y se da la característica de un año seco.

El único valor de entrada que no se ha modificado para los nuevos escenarios es el de la radiación solar incidente, ya que para los diferentes casos este valor apenas se modificaría.

5.3.1 Año seco

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras realizar una disminución de un 20% en la precipitación de la cuenca:

Almacenamiento de agua superficial SD

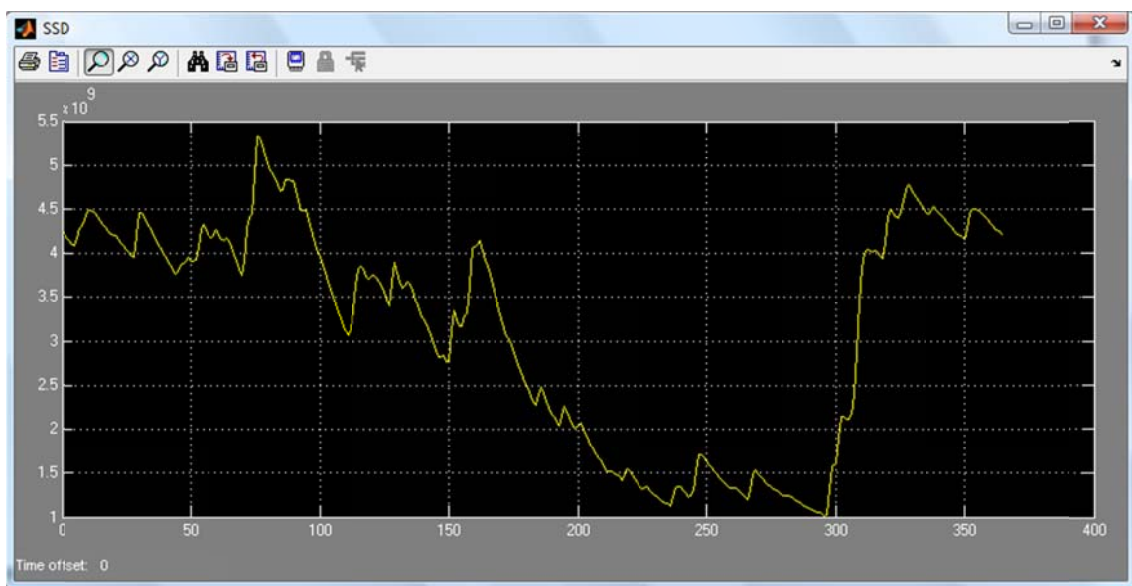


Figura 28. Variación en el almacenamiento de agua superficial durante un año seco.

El resultado obtenido para el almacenamiento de agua superficial durante un año seco es muy similar al año simulado, con la diferencia de que los máximos y mínimos son menores debido al descenso de las precipitaciones en la cuenca. El valor máximo de agua superficial ha descendido un 17% y el mínimo 16%. El descenso no llega a ser igual que el de la precipitación ya que uno de los flujos que rigen este almacenamiento es la evapotranspiración la cual depende de la radiación y como este valor no se ha modificado el descenso no llega al 20%.

Humedad del suelo USM

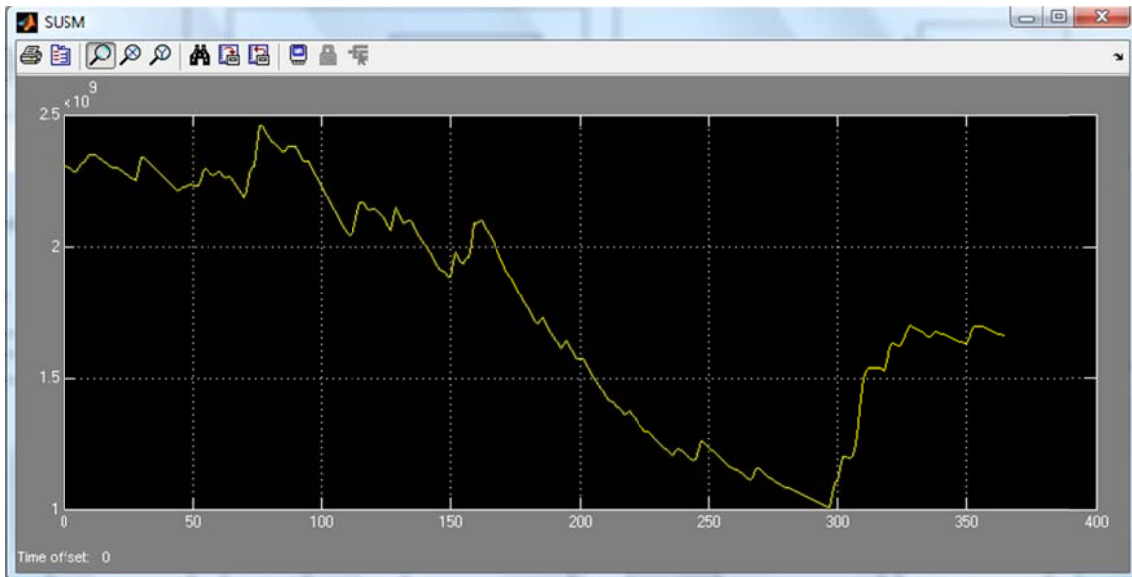


Figura 29. Variación en el volumen de humedad en el suelo durante un año seco.

La variación de este almacenaje de nuevo es muy similar al caso simulado. Los valores máximos y mínimos se han reducido, en este caso un 8% y 15% respectivamente. Con ello se comprueba que la dependencia de la humedad del suelo con la lluvia es significativa especialmente para épocas de mayor radiación y menores precipitaciones ya que los valores mínimos de humedad han disminuido de manera considerable.

Volumen de agua en acuíferos SA

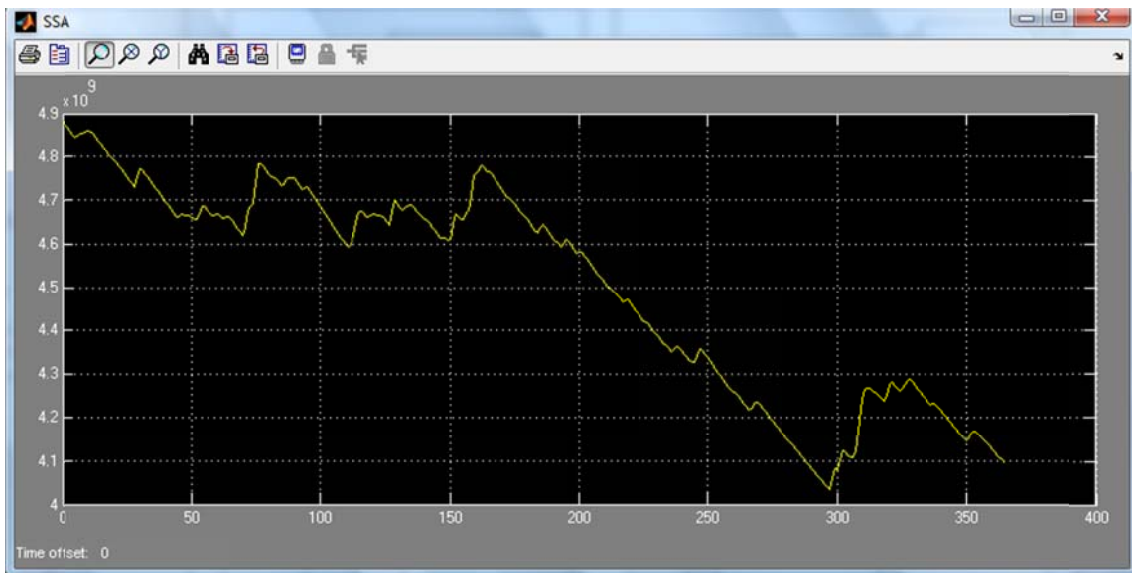


Figura 30. Variación en el volumen de agua en acuíferos durante un año seco.

El volumen de agua en los acuíferos cambia de manera considerable al reducir el valor de la precipitación, ya que todos los flujos entrantes en este almacenamiento, es decir la entrada de agua subterránea y la percolación depende directamente de la lluvia, por ello al descender

la precipitación el volumen de los acuíferos desciende de la misma manera. Afecta en mayor medida a los valores mínimos que descienden un 15% mientras que los máximos solo un 4%.

Volumen de agua en río CW

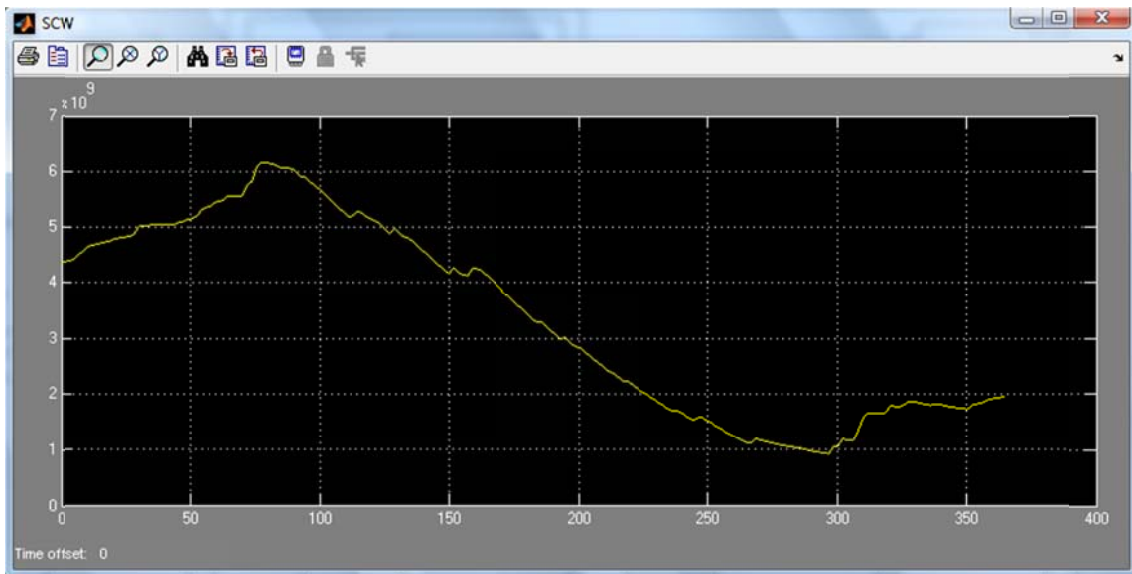


Figura 31. Variación en el volumen de agua en el río durante un año seco.

El volumen de agua en el río para el caso de año seco mantiene la misma forma que el año simulado con las mismas disminuciones en los valores máximos y mínimos que los demás almacenajes, esto se debe a que los flujos que suponen una entrada para este almacenaje, escorrentía superficial y caudal en el río dependen directamente de la precipitación. El valor máximo ha disminuido aproximadamente un 10% sin embargo el valor mínimo de volumen de agua en el río ha disminuido un 44% que es un valor muy alto para una diferencia de precipitación no tan grande, es decir que la disminución de precipitaciones influye de una manera muy importante en este almacenaje.

5.3.2 Aumento de los consumos de agua

El aumento de población en la cuenca implica un aumento en el consumo de agua tanto superficial como subterránea. Dado que de media la población aumenta un 1,2% cada año los valores de los consumos se han multiplicado por este mismo valor.

Almacenamiento de agua superficial SD

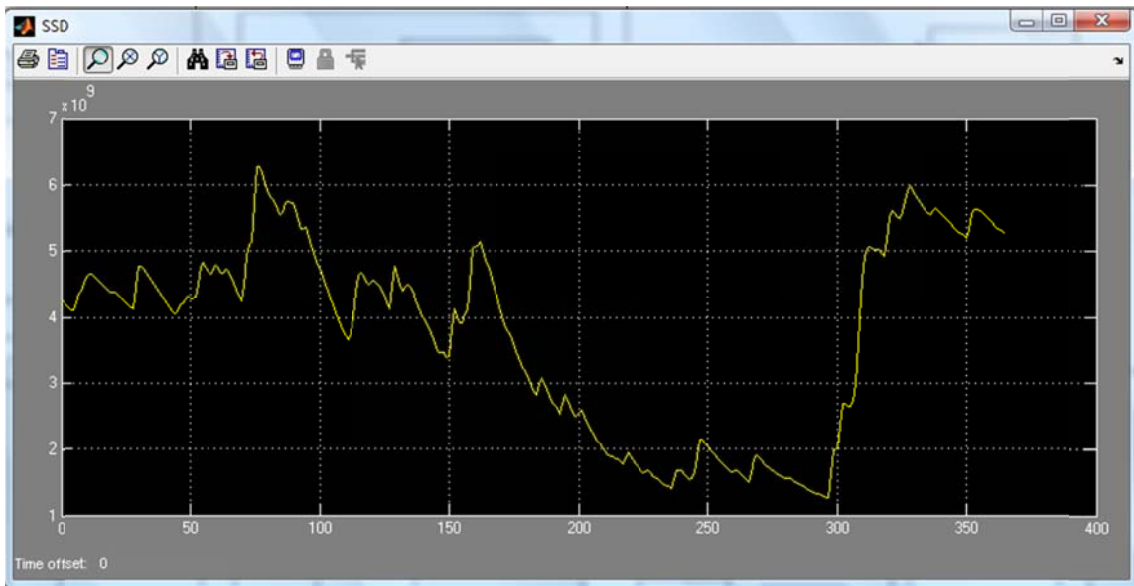


Figura 32. Variación en el almacenamiento de agua superficial al aumentar consumos de agua en la cuenca.

El almacenamiento de agua superficial apenas sufre cambios respecto al caso simulado ya que los consumos de agua no afectan directamente sobre este almacenamiento. Sin embargo sufre unas ligeras modificaciones ya que uno de los flujos del almacenamiento es la capilaridad con el suelo, y el valor de la humedad cambia aunque esta variación apenas produce cambios significativos en el almacenaje.

Humedad del suelo USM

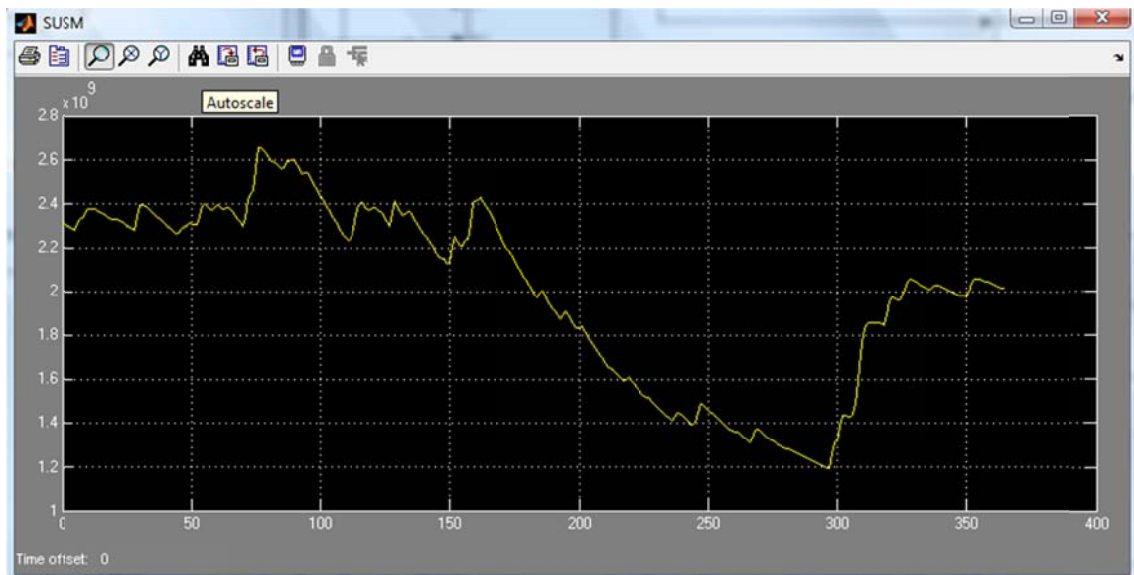


Figura 33. Variación en el volumen de humedad en el suelo al aumentar consumos de agua en la cuenca.

Al igual que en caso anterior, no se producen apenas variaciones con el caso simulado ya que los consumos no afectan de manera directa a la humedad en el suelo. Esta pequeña

variación viene dada por el cambio en la capilaridad con el acuífero. Dado que el aumento de consumos produce que las reservas de acuíferos disminuya la capilaridad entre el suelo y el acuífero disminuirá también, aunque esta diferencia es demasiado pequeña para poder apreciar cambios en el almacenaje.

Volumen de agua en acuíferos SA

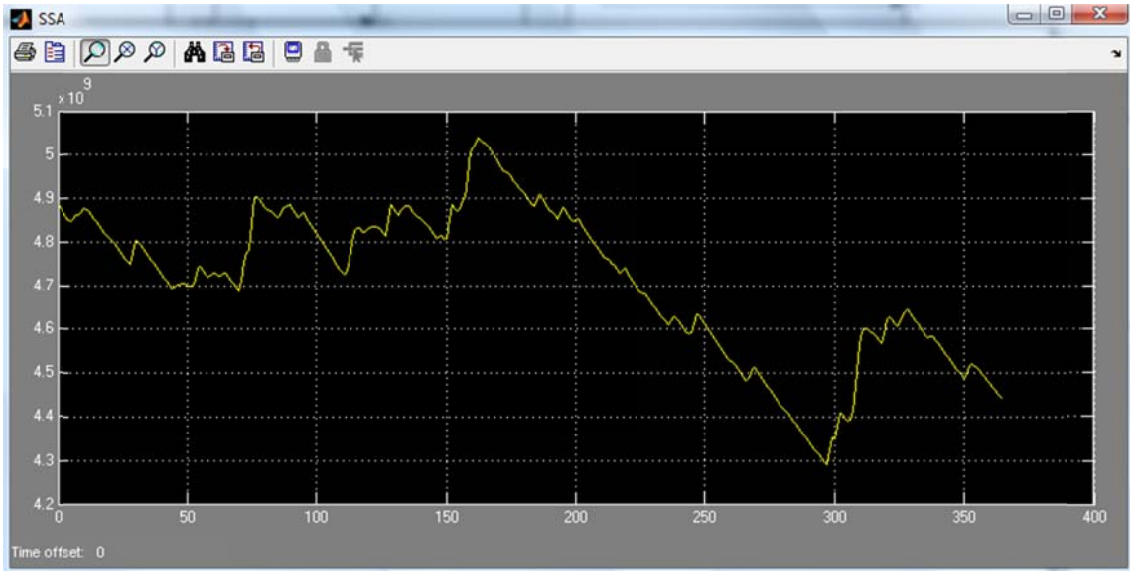


Figura 34. Variación en el volumen de agua en acuíferos al aumentar consumos de agua en la cuenca.

El volumen de agua en los acuíferos al aumentar los consumos de la cuenca se comporta de manera similar que en el caso estacionario pero los valores máximos y mínimos se reducen ligeramente. Estos valores no cambian en exceso ya que el consumo de agua superficial no es un valor excesivamente elevado. El máximo valor desciende solo un 0,5% respecto al caso simulado y el mínimo un 1%.

Volumen de agua en río CW

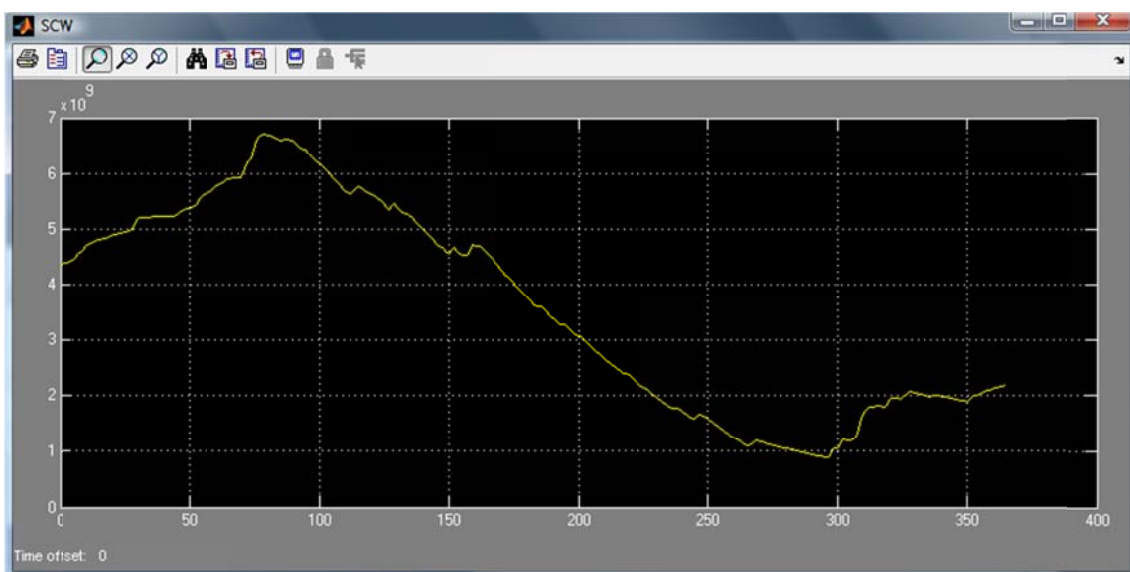


Figura 35. Variación en el volumen de agua en el río al aumentar consumos de agua en la cuenca.

El volumen de agua en el río es el almacenaje que más se modifica de todos ya que los consumos de agua superficial son los más grandes y afectan de manera directa a este almacenaje. Aunque la forma de la curva se mantiene cte, los valores máximos y mínimos a los que llegan cambia de forma importante, así como el máximo se reduce solamente un 0,2% el volumen mínimo disminuye respecto al caso simulado un 46%. Esto quiere decir que el aumento de consumos afecta en mayor medida a la disminución del volumen de agua en el canal que en el caso de que la cuenca sufra un año seco.

5.3.3 Aumento de los consumos de agua en un año seco

El último escenario que se ha calculado es en el que se dan las dos características anteriores en un solo año. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Almacenamiento de agua superficial SD

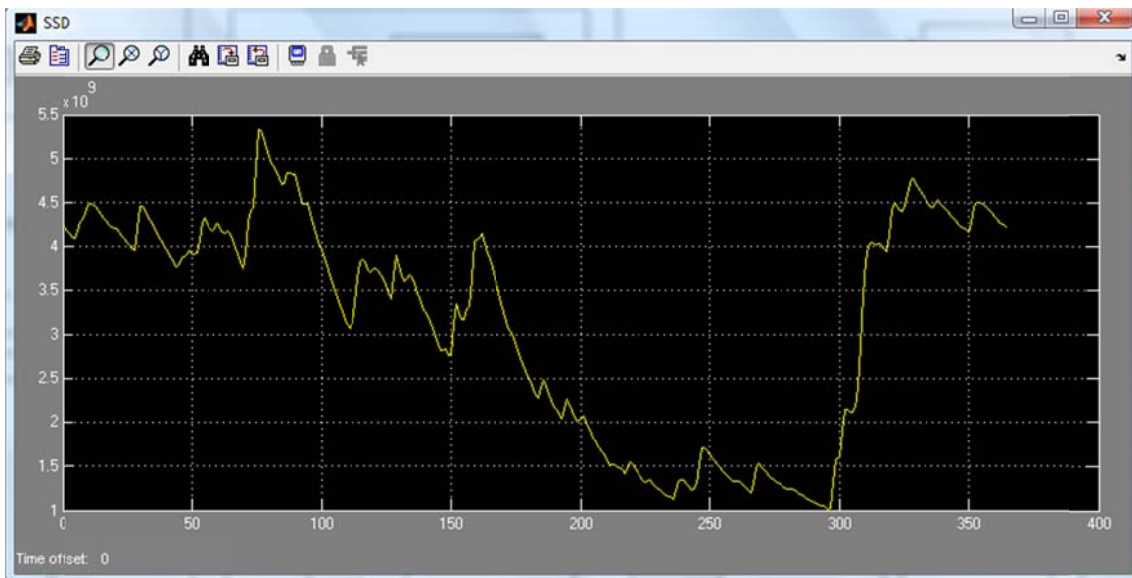


Figura 36. Variación en el almacenamiento de agua superficial al aumentar consumos de agua en la cuenca durante un año seco.

El almacenamiento de agua superficial para este escenario es prácticamente el mismo que para el caso del año seco ya que como se ha dicho anteriormente los consumos de agua no afectan de manera significativa en este almacenaje.

Humedad del suelo USM

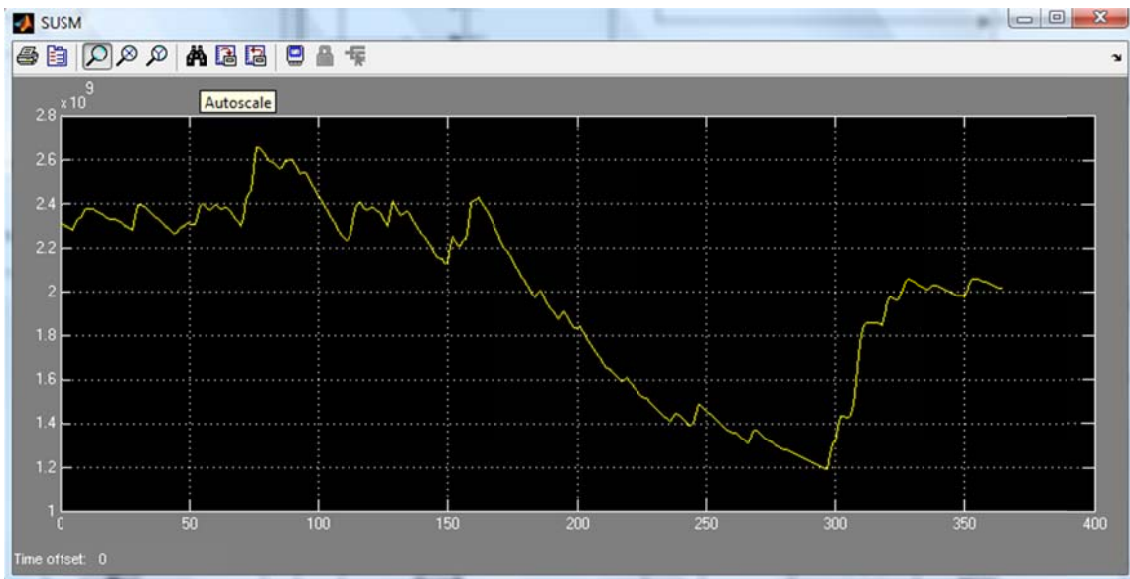


Figura 37. Variación en el volumen de humedad en el suelo al aumentar consumos de agua en la cuenca durante un año seco.

En este caso ocurre igual que en el anterior es decir que los resultados son muy similares a los del caso del año seco debido a la mínima importancia que representan los consumos en este almacenaje

Volumen de agua en acuíferos SA

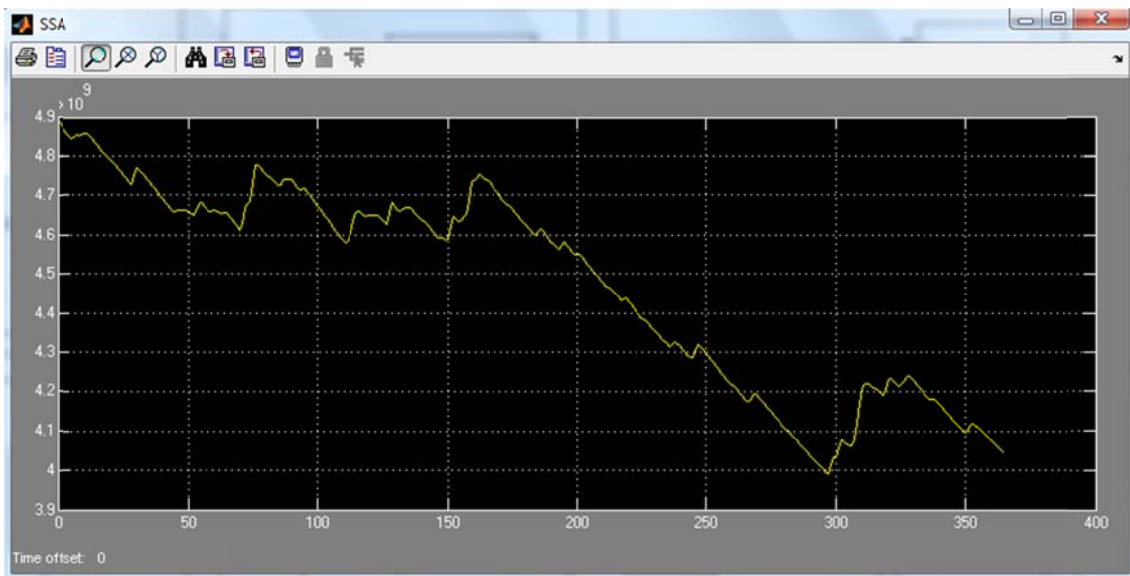


Figura 38. Variación en el volumen de agua en acuíferos al aumentar consumos de agua en la cuenca durante un año seco.

La variación del volumen de agua en los acuíferos sufre una modificación muy grande frente a los otros dos casos, ya que se parte de que el valor estacionario sería el máximo valor al que llega el almacenamiento y los valores mínimos se han reducido considerablemente. Se ha producido un descenso de un 17%, mientras que si solo se aumentase el consumo el

descenso sólo es del 5% es decir que la dependencia del volumen de agua en los acuíferos es en su mayor parte con la precipitación de la cuenca.

Volumen de agua en río CW

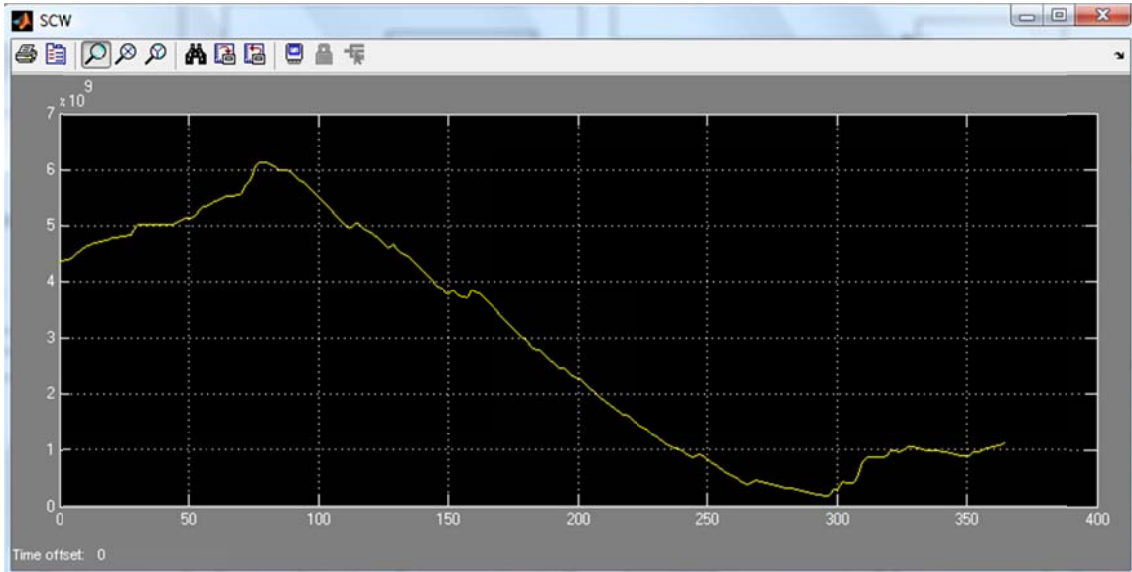


Figura 39. Variación en el volumen de agua en el río al aumentar consumos de agua en la cuenca durante un año seco.

El volumen de agua en el río es el almacenaje que más cambia de todos ya que los cambios introducidos afecta en mayor medida que en cualquier otro, la disminución de la precipitación reduce las dos entradas del almacenamiento y el aumento de los consumos hace que las salidas aumenten. La diferencia entre el caso simulado y este escenario es la reducción de un 9% respecto al máximo obtenido y de un 90% respecto al mínimo lo que es una diferencia realmente considerable

6 Conclusiones. Perspectivas de mejora

Como ya se ha dicho en apartados anteriores, la simulación de cuencas pretende realizar predicciones para cambios en la cuenca y asegurar siempre el equilibrio hidrológico asegurando las demandas de agua. Con la primera aproximación que se ha realizado se ha conseguido lo anteriormente citado y se ha comprobado la manera de funcionar de la cuenca bajo condiciones algo más extremas. Una vez seguida la metodología se han obtenidos los resultados de la simulación y se ha comprobado que el simulación funciona de manera correcta, quedando la metodología validada

Según los resultados obtenidos, la cuenca tiene una gran dependencia con la precipitación, ya que todos los almacenajes se reducen de manera significativa al disminuir esta. El aumento de la demanda de agua solamente afecta al volumen de agua en el río, ya que los consumos de agua superficial, que son los mayores, se toman todos del río. Este es el almacenaje que más cambios sufre y según los resultados, el descenso de este volumen es el más peligroso.

Algunas de las líneas de mejora que se proponen para conseguir mayor exactitud en el simulador de cuenca son:

- El estudio y simulación de la cuenca se ha realizado sólo a nivel temporal y todos los datos que han sido necesarios para la calibración y simulación de la cuenca son valores medios. Para que el funcionamiento sea más correcto se debería realizar un estudio espacial de la cuenca, ya que los datos característicos de la cuenca varían según el lugar de la cuenca que se estudie.
- Diversificar los consumos de agua superficial, es decir, que no solo la demanda de agua superficial salga del río, sino también que una parte se tome del almacenamiento de agua superficial. De esta forma el descenso de volumen de agua en el río no sería tan importante
- Realización del estudio de la biomasa, para así poder comprobar su variabilidad en función de la precipitación y de la radiación.

7 Bibliografía

- AEMET. Agencia Estatal de meteorología [http:// www.aemet.es/](http://www.aemet.es/) Abril 2013.
- Aparicio et al, 2006. Conceptos básicos de Hidrología. Gestión Integral de Cuencas. CATIE.
- Canales, A 1989. Balance Hídrico. <http://www.geologia.uson.mx>. Junio 2012.
- CEAG, 2010. Balance de Aguas Subterráneas. Capítulo 7.
- Cerdá, A. Régimen hídrico de los suelos en cuencas experimentales. Departamento de Geología. Universidad de Valencia.
- Chaverri E.A. 2008. El Ciclo Hidrológico e Introducción a Modelos Hidrológicos.
- Climatología aplicada a la Ingeniería y Medioambiente, 2010. Ecuación del balance de humedad. Tema 9. Universidad Politécnica de Madrid.
- Confederación Hidrográfica del Ebro. <http://www.chebro.es/>. Marzo 2013.
- Demarcación Hidrográfica del Ebro. <http://hispagua.cedex.es/>. Marzo 2013.
- Douglas A. George, Paul S. Hill, 2008. Wave climate, sediment suppl and the depth of the sand-mud transition: A global survey.
- Embalses. Net. [http:// www.embalses.net/](http://www.embalses.net/). Mayo 2013.
- EPA, 2009. WASP7. <http://www.epa.gov>.
- EUMED. Enciclopedia y Biblioteca Virtual de las Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas. <http://www.eumed.net/>. Septiembre 2012.
- Evapotranspiración, contenidos asignatura Hidrología, 2010. Universidad de Salamanca.
- GEA, 2000. Gran Enciclopedia Aragonesa. <http://www.encyclopedia-aragonesa.com>. Enero 2013.
- Hidrología y aguas subterráneas. <http://aguas.igme.es>. Septiembre 2012.
- Instituto nacional de estadística. Net. [http:// www.ine.es/](http://www.ine.es/). Mayo 2013
- Martínez Gracia A. 2009. Exergy cost assessment of water resources. Physical hidronomics.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <http://www.magrama.gob.es>. Enero 2013.
- Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. <http://re.jrc.ec.europa.eu>. Junio 2012.
- Propuesta de proyecto de plan hidrológico de la Cuenca del Ebro.
- SAIH, Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica de Ebro. <http://w.saihebro.com>. Septiembre 2012.
- Sanders 1998, Valores estimados de la porosidad.
- SIATL. Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#. Instituto nacional de de estadística y geografía. Mexico. Enero 2013.
- Simulación de sistemas de Simulink, 2006-2007. Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial. Universidad Politécnica de Madrid.

- Tilley, D. R. and Brown, M.T., 2006. Dynamic energy accounting for assessing the environmental benefits of subtropical wetland stormwater management systems. Elsevier.