



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**Máster Universitario en  
Técnicas Avanzadas en Investigación y  
Desarrollo Agrario y Alimentario**

# **MODELIZACIÓN DISTRIBUIDA DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO A ESCALA MENSUAL**

**Autora:** Patricia Olmos Giménez

**Director:** Alain Baille

**Co-Directora:** Sandra G. García Galiano

Cartagena, Septiembre de 2012

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi co-directora, Sandra García Galiano, su dirección para poder llevar a cabo este trabajo fin de máster.

Agradezco a Alain Baille su dirección en este trabajo.

También tengo un especial agradecimiento a mi compañero José Ángel, por su ayuda en algunos momentos.

Se agradece la cesión de información, que ha permitido llevar a cabo este trabajo, a:

Grupo de I+D Gestión de Recursos Hídricos de la UPCT

Proyecto Europeo ENSEMBLES

Agencia Estatal de Meteorología

Confederación Hidrográfica del Segura

## INDICE

1. Resumen.....	5
2. Abstract.....	7
3. Introducción.....	9
3.1. Motivación y Objetivos .....	9
3.2. Antecedentes .....	10
3.2.1. Escenarios de emisiones de efecto invernadero (o GEI) .....	10
3.2.2. Modelos climáticos regionales (RCM) .....	11
3.2.3. Reseña de estudios de impactos del cambio climático en los recursos hídricos.....	12
4. Materiales y métodos .....	14
4.1. Cuenca de estudio: caracterización.....	14
4.2. Modelos hidrológicos en estudios de impactos del cambio climático .....	16
4.3. Modelo Hidrológico Témez.....	18
4.4. Recopilación de datos y tratamiento de la información meteorológica.....	21
4.5. Estimación de Evapotranspiración Potencial .....	24
4.6. Análisis crítico de series temporales: Balance Hídrico .....	24
4.7. Parametrización y calibración del modelo.....	25
5. Análisis de resultados y discusión.....	30
5.1 Fase calibración y validación.....	30
5.2 Fase generación de escenarios hidrológicos futuros .....	32
6. Conclusiones y líneas futuras de investigación.....	41
7. Bibliografía.....	43

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Mapa de la cuenca de estudio.....	14
Figura 2. Mapa de elevación (m) de la cuenca de estudio.....	15
Figura 3. Esquema del modelo Témez .....	18
Figura 4. Ley de excedentes (izq.) y ley de infiltración (derecha).....	20
Figura 5. Interfaz del modelo Toolbox EXTREMES .....	23
Figura 6. Contraste de datos de distinta naturaleza. Balance hídrico.....	25
Figura 7. Mapa de Infiltración del suelo (mm) para la cuenca de estudio. ....	27
Figura 8. Mapa de capacidad máxima de humedad del suelo (mm) para la cuenca de estudio.....	28
Figura 9. Mapa de coeficiente de agotamiento del acuífero ( $\text{día}^{-1}$ ) para la cuenca de estudio.....	29
Figura 10. Resultados de la calibración del modelo de Témez para el periodo 2000-2005. ....	30
Figura 11. Resultados de la aportación simulada ( $\text{hm}^3$ ) con el modelo de Témez para el periodo 1960-1999.....	31
Figura 12. Resultados de la simulación con KNMI/RACMO2 para el periodo 2021-2050 .....	33
Figura 13. Resultados de la simulación con MPI-M/REMO para el periodo 2021-2050 33	
Figura 14. Mapas de variación de la precipitación (mm) del modelo KNMI y MPMI respecto a la observada. ....	35
Figura 15. Mapas de precipitación media anual (mm) y variación de la precipitación (%) del modelo KNMI/RACMO2 y MPIM/REMO: (a) Precipitación media para el periodo 2021-50; (b) Precipitación media para el periodo 1961-1990 de datos observados; y (c) Porcentaje de variación de la precipitación.....	37
Figura 16. Mapas de ETP media anual (mm) y variación de la ETP (%) del modelo KNMI/RACMO2 y MPIM/REMO: (a) Precipitación media para el periodo 2021-50; (b) Precipitación media para el periodo 1961-1990 de datos observados; y (c) Porcentaje de variación de la precipitación .....	38
Figura 17. Mapas de aportación media anual (mm) y variación de la aportación (%) del modelo KNMI y MPIM: (a) Precipitación media para el periodo 2021-50; (b) Precipitación media para el periodo 1961-1990 de datos observados; y (c) Porcentaje de variación de la precipitación. ....	39
Tabla 1. Familias de escenarios de GEI del SRES. Se presenta el rango proyectado de aumento de las temperaturas para el año 2100. ....	11
Tabla 2. Información de RCMs del Proyecto EUROPEO ENSEMBLES. ....	21
Tabla 3. Regionalización de la capacidad máxima de infiltración a partir de la litología. (Estrela <i>et al.</i> , 1999) .....	26
Tabla 4. Regionalización de la capacidad máxima de humedad del suelo en mm a partir de los usos del suelo (Estrela <i>et al.</i> , 1999).....	27
Tabla 5. Criterio para la evaluación de la bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe (Van Dijk <i>et al.</i> , 2008).....	32
Tabla 6. Datos de aportaciones en la cuenca de aporte al embalse de Fuensanta .....	34
Tabla 7. Variación de la precipitación (mm) de los modelos KNMI y MPMI con respecto a la observada para el periodo 1961-1990, según el porcentaje de la cuenca .....	36

## 1. Resumen

La situación geográfica y características socioeconómicas de la España Peninsular, la hacen vulnerable al cambio y variabilidad climática.

El aumento de la población y los usos consuntivos intensos, generan presiones sobre los recursos hídricos en cuencas del Sureste español. Tal es el caso de la cuenca del río Segura, donde se prevé un escenario futuro de escasez hídrica, en el que la generación de recursos desde fuentes no tradicionales (como la desalación), y la optimización en su uso en los sectores más demandantes (como la agricultura de regadío), serán opciones vitales para el sostenimiento de la economía regional y el bienestar de la comunidad.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el impacto futuro del cambio climático en las escorrentías en una cuenca de cabecera de la cuenca del río Segura. Se suele utilizar para ello modelos de simulación hidrológica continua, y distribuida para permitir el procesamiento de distribuciones espacio-temporales de entradas, procesos, parámetros y resultados. En base a una revisión bibliográfica realizada, se seleccionó en el presente trabajo el modelo hidrológico de Témez (Témez, 1977). El mismo se incorporó a una plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permitió simular los flujos medios mensuales, en cualquier punto de una red hidrográfica.

Se trabajó para ello, tanto con bases de datos meteorológicas observadas, como simuladas por Modelos Climáticos Regionales (RCMs por sus siglas en inglés) provistos por el Proyecto Europeo ENSEMBLES. Los RCMs constituyen una valiosa herramienta para analizar, comprender y predecir las tendencias a medio y largo plazo de variables meteorológicas que influyen significativamente en el ciclo hidrológico. Las metodologías de combinación de múltiples RCMs, aumentan la confiabilidad de las proyecciones.

En el presente trabajo se construyeron los escenarios de entrada al modelo hidrológico seleccionado a escala mensual, para la cuenca hidrográfica de aporte al embalse de Fuensanta (localizada en la cabecera del río Segura). Se parametrizó el modelo en base a distribuciones espaciales de características de la cuenca.

Desde los resultados obtenidos, contrastando el período 2021-2050 con el período de control 1961-1990, se identificaron tendencias divergentes entre los RCMs considerados. Se concluye por tanto que deben generarse combinaciones multimodelo climáticas regionales, como entrada a los modelos hidrológicos, en orden a aumentar la

confiabilidad de las predicciones.

Finalmente, se debe destacar que aumentar el conocimiento sobre los impactos plausibles en las componentes del ciclo hidrológico a escala de cuenca, haciendo uso del estado del arte en modelización climática es un paso en el objetivo de construir capacidad adaptativa a los impactos. Los gestores y responsables de la toma de decisión en planificación y gestión del uso del agua, requieren de mensajes claros de la comunidad científica para lograr un uso sostenible de los recursos.

**Palabras clave:** modelización; ciclo hidrológico; cambio climático; impactos.

## 2. Abstract

The geographic situation and socioeconomic characteristics of Spain, making it vulnerable to change and climatic variability.

The growth population and intense consumptive uses, generate pressures on water resources of river basins of the Spanish Southeastern. This is the case of the Segura River Basin, where a future scenario of water shortage is projected, therefore the generation of resources from non-traditional sources (such as desalination), and optimization in use in the sectors with the higher demands (as irrigated agriculture), are vital options for the support of the regional economy and the well-being of the community.

The aim of this study is to assess the future impact of climate change on runoff, at basin scale in the headwater of the Segura River. Distributed hydrologic models of continuous simulation allow to capture the spatiotemporal distributions of inputs, processes, parameters and results. Based on the state-of-the-art, the Témez hydrological model (Témez, 1977), at monthly level, was selected. The incorporation of algorithms of Témez Model below a Geographic Information System (GIS) platform, allowed the simulation of monthly average flows at any point in a river network.

Observed meteorological data as well as simulated by Regional Climate Models (RCMs for its acronym in English) provided by the European project ENSEMBLES, were considered. The RCMs are a valuable tool to analyze, understand and predict trends in the medium and long term of environmental variables that significantly influence the hydrological cycle. The building of RCMs ensembles, increases the reliability of the projections.

In this work, a historical climate-land use scenario was built as input to hydrological, for Fuensanta Reservoir's basin (located in the headwaters of the River Segura). The model was parameterized based on spatial distributions of basin characteristics, and some parameters were defined on calibration phase. From the results, comparing the period 2021-2050 with the control period 1961-1990, divergent trends among the RCMs considered were identified.

Finally, it is remarked that increasing knowledge about plausible impacts on components of the hydrological cycle at basin scale, using state of the art in climate

modeling is a step in the objective of building adaptive capacity to the impacts. Managers and decision making responsible in planning and management of water use, require clear messages from the scientific community to achieve a sustainable use of resources.

## 3. Introducción

### 3.1. Motivación y Objetivos

El calentamiento global ha causado cambios en los patrones espaciales de precipitaciones, consecuentemente, cambios en la frecuencia y magnitud de eventos extremos (Labat *et al.*, 2004; Huntington, 2006; Kundzewicz *et al.*, 2007).

Huntington (2006) destaca que existe evidencia robusta sobre la intensificación actual y futura del ciclo hidrológico, y puntualiza la necesidad de mejorar la habilidad para la monitorización y predicción de impactos asociados con el cambio de los regímenes hidrológicos.

Desde informes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) se prevén impactos del cambio climático importantes generando disminución de recursos hídricos, regresión de líneas de costa, pérdidas de diversidad biológica y alteraciones en los ecosistemas naturales. Así como, aumentos en los procesos de erosión del suelo, y pérdidas de vidas y bienes, derivadas de la intensificación de eventos climáticos extremos (tales como incendios forestales, olas de calor y eventuales inundaciones). La “*mediterraneización*” del Norte Peninsular Español y la “*aridización*” del Sur son algunas de las tendencias más significativas.

Según el informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático SREX (IPCC, 2012), hay evidencia de que algunos fenómenos climáticos extremos han cambiado como resultado de la influencia antropogénica.

Los recursos hídricos se ven afectados por distintas presiones tales como el aumento de la demanda urbana, agrícola e hidroeléctrica, la intensificación de ciertos procesos de deterioro de la calidad de agua y el incremento de la intervención humana, además del cambio climático. Por ello, en España es prioritario disponer de los mejores escenarios regionalizados posibles de cambio climático futuro, con objeto de poder realizar análisis de riesgos e impactos, para determinar las posibles medidas de adaptación.

Además, para realizar proyecciones de cambio climático es preciso disponer de escenarios de emisiones (estimaciones plausibles de cómo podrían evolucionar las emisiones de gases de efecto invernadero o GEI) por las actividades humanas en las próximas décadas. La evaluación de las incertidumbres asociadas a los escenarios de

GEI en los resultados hidrológicos, aumentará la información relacionada con la confiabilidad de los modelos.

Los escenarios regionalizados para España, considerados en el presente trabajo, se han obtenido del conjunto de modelos climáticos europeos que fueron construidos por el experimento RT2B del Proyecto Europeo ENSEMBLE (Christensen et al., 2009), considerando los escenarios de emisiones que se describen en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del IPCC.

Por todo ello, con este trabajo se pretende evaluar, como objetivo principal, los impactos del cambio climático en los recursos hídricos a escala de cuenca hidrográfica.

Para ello, se plantean las siguientes tareas:

- Revisión bibliográfica de modelos hidrológicos a utilizar en estudios de impactos del cambio climático.
- Procesamiento de largas series temporales de variables meteorológicas a escala mensual, como temperaturas medias, máximas y mínimas, y precipitación, tanto observadas como simuladas por Modelos Climáticos Regionales (RCMs) seleccionados.
- Estimación de series temporales de evapotranspiración potencial, desde bases de datos observados y simulados por RCMs, a escala de cuenca.
- Generación de escenarios históricos y futuros de entrada a un modelo hidrológico distribuido escala mensual bajo un SIG, y parametrización del mismo en una cuenca de cabecera del río Segura.
- Generación de proyecciones hidrológicas en base a RCMs, y evaluación de impactos del cambio climático en componentes del ciclo hidrológico.

## **3.2. Antecedentes**

### **3.2.1. Escenarios de emisiones de efecto invernadero (o GEI)**

Los modelos climáticos permiten realizar proyecciones del cambio climático relacionado con la creciente acumulación en la atmósfera de GEI, y son la única herramienta de que se dispone para derivar objetivamente las futuras alteraciones del clima que podrían causar las emisiones antropogénicas de estos.

El rango y la probabilidad asociada con las tendencias climáticas es mejor entendido si

se ejecutan múltiples experimentos, con diferentes modelos climáticos, considerando distintos escenarios GEI.

Los GEI fueron definidos por el Informe Especial sobre Escenarios de Emisión (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) del IPCC (IPCC SRES, 2000), establecidos por forzamientos tales como el desarrollo demográfico, socioeconómico y tecnológico (Tabla 1). La evolución futura es altamente incierta, y ninguno de ellos es considerado, por ahora, más probable de ocurrir.

Desde la Tabla 1, la familia A1 supone integración global, caracterizada por un rápido crecimiento económico. Dentro de la familia A1, se presenta el escenario A1B considerado en el presente trabajo. La familia A2, se corresponde con incremento constante de la población y desarrollos económicos y tecnológicos enfocados regionalmente. La familia B1 se caracteriza por un rápido crecimiento económico, pero con énfasis en sostenibilidad ambiental global. Finalmente, en la familia B2 de escenarios se imponen las soluciones locales para garantizar la sostenibilidad económica, social y ambiental.

Tabla 1. Familias de escenarios de GEI del SRES. Se presenta el rango proyectado de aumento de las temperaturas para el año 2100.

	<i>Enfoque económico</i>	<i>Enfoque ambiental</i>
<b>Globalización</b> (homogeneidad global)	<b>A1</b> Rápido crecimiento económico (A1T, A1B, A1FI) [1,4; 6,4]°C	<b>B1</b> Sostenibilidad ambiental global [1,1; 2,9] °C
<b>Regionalización</b> (heterogeneidad global)	<b>A2</b> Desarrollo económico regional [2,0; 5,4] °C	<b>B2</b> Sostenibilidad ambiental a nivel local [1,4; 3,8] °C

### 3.2.2. Modelos climáticos regionales (RCM)

Los Modelos Climáticos Globales (GCM) tienen capacidades para simular la distribución sinóptica de las principales variables climáticas y aspectos del cambio climático observado. Pero presentan deficiencias a escalas regionales debido a su gruesa resolución espacial (generalmente del orden de cientos de kilómetros). A pesar de que la

capacidad computacional se ha incrementado, los GCM no simulan adecuadamente características climáticas de mesoescala. Además, algunas veces estos modelos simplifican o parametrizan inadecuadamente procesos climáticos no lineales complejos. Estas desventajas, que se atribuyen principalmente a la baja resolución espacial, se han intentado superar mediante la construcción de Modelos Climáticos Regionales (RCM por sus siglas en inglés) con resoluciones más finas, anidados en los GCMs. De esta manera, los GCMs imponen las condiciones de frontera (o contorno) a los RCMs.

Los RCMs son herramientas muy útiles para entender la dinámica del clima y realizar estudios de impactos a escala de cuenca. Los RCMs corresponden a una reducción de escala (“downscaling”) de GCMs, práctica común para obtener información de alta resolución acerca de los escenarios de cambio climático proyectado. Las técnicas de downscaling pueden considerarse estadísticas o dinámicas. En el presente trabajo, se trabajará con downscaling dinámico.

Las proyecciones de los RCMs exhiben una gran variabilidad, incluso los resultados obtenidos son divergentes o contradictorios en algunos casos. García Galiano *et al.* (2011), trabajando con seis RCMs en la cuenca del río Segura, provistos por el Proyecto Europeo ENSEMBLES (Christensen *et al.*, 2009), demuestran que no es posible concluir sobre el modelo ideal para todas las zonas o variables de estudio.

### **3.2.3. Reseña de estudios de impactos del cambio climático en los recursos hídricos**

El impacto del cambio climático en los sistemas hidrológicos, puede variar en las diferentes regiones de la tierra. Por ejemplo, el sistema de agua de California es especialmente vulnerable al calentamiento global debido a su dependencia de la acumulación de nieve de las montañas y el proceso de derretimiento nival (Vicuna and Dracup, 2007). En el Pacífico Noroccidental (PNW) la hidrología es particularmente sensible a cambios en el clima debido a que el derretimiento nival domina la escorrentía estacional, y el impacto del cambio de temperatura influencia el balance lluvia/nieve (Elsner *et al.*, 2010).

Aunque a nivel español es difícil detectar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos con las observaciones disponibles, a nivel regional europeo existen evidencias de alteraciones del régimen hidrológico, con incrementos de escorrentía en altas latitudes y disminuciones acusadas en el Sur de Europa. También se ha contrastado

una intensificación de los fenómenos extremos (inundaciones y sequías). Según Gonzalez-Zeas *et al.* (2012) un aspecto importante al evaluar la disponibilidad de agua frente al impacto del cambio climático es considerar series de tiempo mensuales representativas de la situación actual. El uso de RCMs representa una importante herramienta para evaluar la gestión del agua bajo futuros escenarios de cambio climático (Varis *et al.*, 2004),

Los recursos hídricos en España son de una considerable preocupación y controversia debido al estrés hídrico histórico y a la afirmación reconocida de que el país está experimentando una disminución en precipitaciones y escorrentías (Houghton *et al.*, 2001). En España se ha demostrado una considerable variabilidad en la lluvia interanual (Serrano *et al.*, 1999). Escenarios de precipitación construidos para el futuro (2041-90) revelan un aumento de las precipitaciones en invierno y una pequeña disminución en la mayoría de la Península Ibérica para la primavera y el otoño (Trigo and Palutikof, 2001).

## 4. Materiales y métodos

### 4.1. Cuenca de estudio: caracterización

El presente estudio se ha llevado a cabo en la cuenca de aporte al Embalse de Fuensanta, localizada en la cabecera del río Segura, en el Sureste de España (Fig. 1).

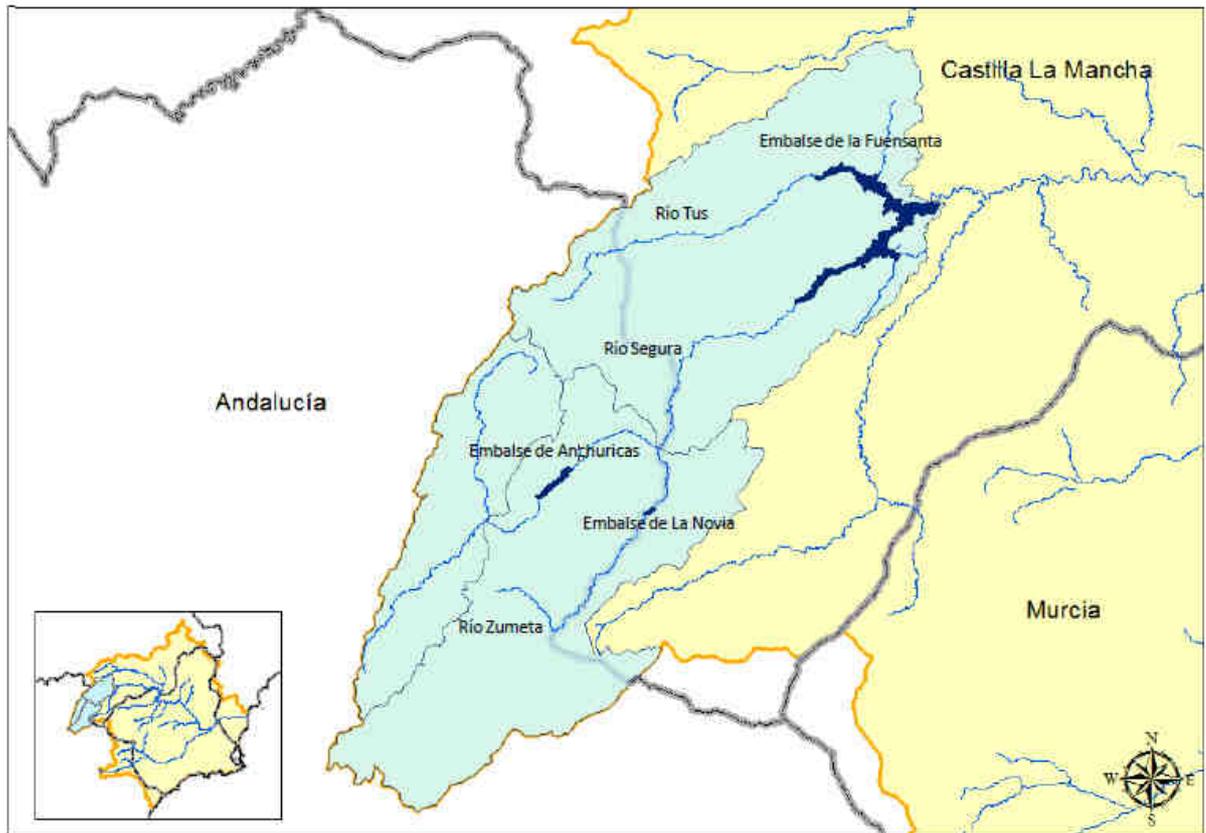


Figura 1. Mapa de la cuenca de estudio

La cuenca vertiente al Embalse de Fuensanta ocupa una extensión de 1.220,6 km<sup>2</sup>, tiene una altitud media de 1.263 m (Fig. 2) y se extiende por las provincias de Albacete, Jaén y Granada. Los principales afluentes del río Segura en la cuenca corresponden al río Zumeta, que une sus aguas al Segura antes de abandonar Jaén, y al río Tus, que confluye con el Segura en el Embalse de la Fuensanta.

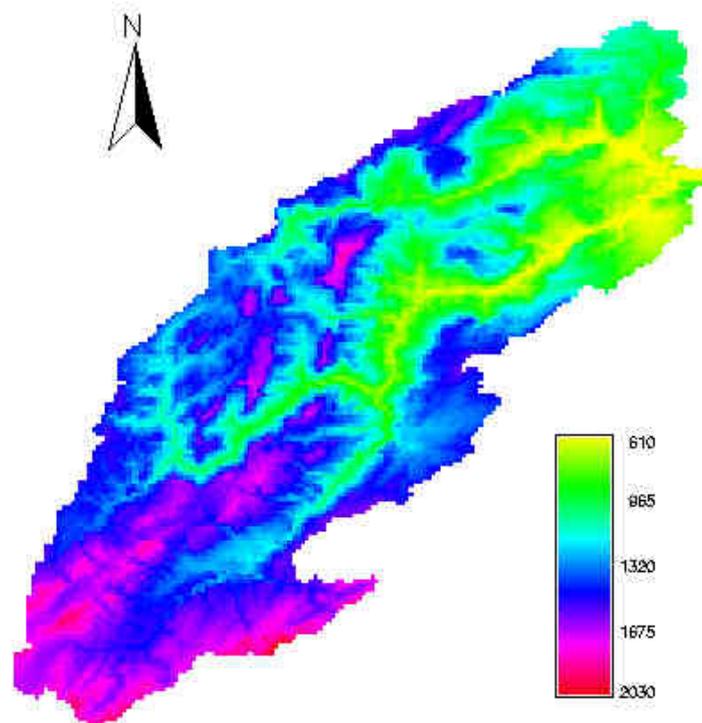


Figura 2. Mapa de elevación (m) de la cuenca de estudio.

La cuenca de estudio presenta tres embalses. El embalse de La Novia y Anchuricas en la provincia de Jaén y el Embalse de Fuensanta en la provincia de Albacete, siendo este último el más importante. La presa de Anchuricas se encuentra en el cauce del río Segura y posee un volumen de agua embalsada de  $6 \text{ hm}^3$ . La presa de La Novia, también conocida como La Vieja, es una pequeña presa que embalsa las aguas del río Zumeta. Su capacidad es de  $0,6 \text{ hm}^3$ . El agua desembalsada se une a la que procede del embalse de Anchuricas para su aprovechamiento hidroeléctrico en la Central Hidroeléctrica de Miller.

El embalse de la Fuensanta se ubica en la confluencia de los ríos Segura y Tus, en el denominado estrecho de la Carrizosa. Tanto la presa como la totalidad del embalse por ella creado se encuentran en el término municipal de Yeste, provincia de Albacete. La capacidad de embalse es de  $224,7 \text{ hm}^3$ .

La presa y el embalse de la Fuensanta están incluidos en el Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) de “Sierra de Alcaraz y Segura y cañones del Segura y del Mundo”. El LIC en cuestión ocupa una superficie de unos  $1.750 \text{ km}^2$  de la provincia de Albacete e integra un conjunto de alineaciones montañosas intercaladas con angostos valles

fluviales que conforman un paisaje de singular belleza.

Por otro lado, han sido numerosas las actuaciones de repoblación forestal de los márgenes del embalse promovidas por la Confederación Hidrográfica del Segura a lo largo de una larga serie de años. Estas se llevaron a cabo en zonas como Paraje de Toril, Arroyo Morote, Paraje Umbría, etc. Evidentemente, se ha producido un cambio importante de los usos del suelo en la zona de estudio.

En cuanto a condicionantes de tipo medioambiental en la explotación de la presa, debe mencionarse que el Plan hidrológico de la cuenca del Segura establece un caudal mínimo para el tramo de cauce del río Segura comprendido entre los embalses de la Fuensanta y del Cenajo de 2,3 hm<sup>3</sup>/mes (0,90 m<sup>3</sup>/s).

El clima en la zona es Mediterráneo, suave y templado lo que conlleva a un régimen moderado de las temperaturas y una alternancia climática estacional muy contrastada. El régimen anual de temperaturas, presenta un mínimo invernal en los meses de diciembre y enero, siendo más frecuente que los valores más bajos sean en este último. Los máximos anuales corresponden a los meses de julio y agosto, aunque por término general, el primero es algo más caluroso.

La variabilidad de las precipitaciones puede llegar en el Sureste Español a una irregularidad extrema. Las lluvias son más frecuentes en otoño, es decir, entre los meses de octubre y diciembre. La precipitación media anual es de unos 600 mm. En las montañas situadas en el suroeste de la cuenca de estudio, y sometidas a la acción de los vientos húmedos de las borrascas atlánticas del frente polar, los registros pluviométricos alcanzan sus máximos valores, llegando a los 1000 mm/año como media.

A esto se suma una evapotranspiración potencial media del orden de 600 mm/año, y un marco geológico muy atormentado, con numerosas formaciones acuíferas de tipo kárstico y con notable complejidad estructural y tectónica.

#### **4.2. Modelos hidrológicos en estudios de impactos del cambio climático**

Se encuentran en la bibliografía distintos enfoques a la hora de estudiar el impacto del cambio climático en los sistemas hídricos. En el caso del uso de modelos hidrológicos, cabe citar el trabajo de Kilsby *et al.* (2007) que utilizan un único RCM (HadRM3H) como entrada a un modelo hidrológico distribuido para evaluar impactos a escala mensual, en dos cuencas de España (cuenca del río Tajo y cuenca del río Guadiana).

Estos autores corrigen el sesgo, que consideran presenta el modelo climático, a escala mensual. El modelo hidrológico considerado, corresponde al modelo conceptual precipitación-aportación UP2 que es una simplificación del modelo UP (Ewen *et al.*, 1999).

Más recientemente, el U.S. Bureau of Reclamation (2011a, 2011b) mediante una colaboración con otras instituciones generó mallas de proyecciones hidrológicas para el Oeste de Estados Unidos, usando el modelo hidrológico de macroscale VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang *et al.*, 1994), y proyecciones climáticas procedentes del Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3). El modelo VIC simula el balance hídrico para cada celda de la malla, a escala diaria.

Otro modelo ampliamente utilizado en España, para estudios de impactos del cambio climático es el modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación, Estrela y Quintas, 1996). Se trata de un modelo distribuido a escala mensual. Si bien, las proyecciones hidrológicas que se han realizado hasta el momento en España, no han hecho uso del estado del arte en RCMs, como los provistos por el Proyecto Europeo ENSEMBLES.

Hoy en día también se están empleando Land Surface Models (LSMs), en los cuales cada tipo de superficie se simula con modelos específicos y el flujo total se obtiene como suma de los flujos individuales ponderados por su fracción respectiva. Entre ellos, por ejemplo el modelo SURFEX (SURFace EXternalisé) desarrollado por MétéoFrance (LeMoigne, 2009a, b) que define una cuenca con cuatro tipos de superficie: mar u océano, cuerpos de agua (lagos por ej.), zonas urbanas y naturaleza (suelo y vegetación). El modelo empleado para "*naturaleza*" es ISBA (Interacción Suelo-Biosfera-Atmósfera, Noilhan *et al.*, 1989, Noilhan and Mahfouf, 1996). Incluye varios módulos que simulan las transferencias de calor, agua y carbono en el suelo, la vegetación y la nieve. El modelo empleado para "*ciudad*" es el TEB (Balance de Energía en Ciudad; Masson 2000). Los flujos superficiales "*mar y el océano*" pueden ser tratados de una manera muy simple o mediante el uso de modelos más basados en la física. En lagos se puede emplear el modelo Flake (Kirillin *et al.*, 2011).

Otro modelo clasificado como LSM es ORCHIDEE (Verant *et al.*, 2004; Krinner *et al.*, 2005). Este modelo es el resultado del acoplamiento del LSM SECHIBA (Ducoudré *et al.*, 1993), que está dedicado a la energía superficial y balances de agua y carbono y el modelo de vegetación STOMATE. ORCHIDEE puede ser acoplado a un GCM o forzado por datos climáticos.

### 4.3. Modelo Hidrológico Témez

El modelo Témez (Témez, 1977; Estrela y Quintas, 1996; Ruiz, 1999; Cabezas *et al.*, 1999; Álvarez *et al.*, 2005), es un modelo hidrológico de simulación continua, conceptual, que simula los flujos medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica.

El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos que tienen lugar en un sistema hidrológico desde el instante en que comienza a llover hasta el momento en que se genera escorrentía y la posterior descarga de los acuíferos a los ríos (Figura 3).

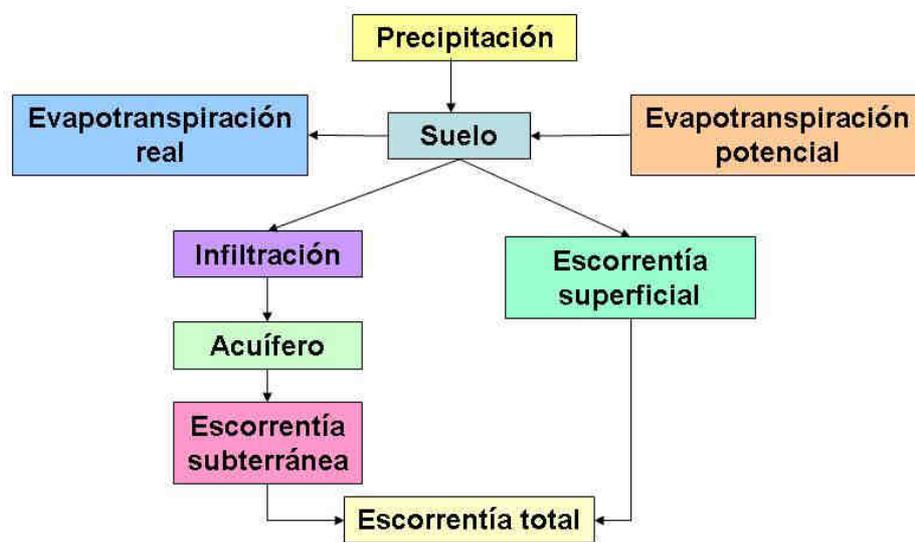


Figura 3. Esquema del modelo Témez

Para ello reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico, plantea el principio de continuidad y establece, a escala mensual, leyes de reparto y transferencias de agua entre los distintos almacenamientos.

Las entradas al modelo corresponden a datos de precipitación y evapotranspiración potencial. Otra información que precisa el modelo son datos sobre topología y clasificación de las subcuencas consideradas (Quintas, 1996) y los mapas de unidades hidrogeológicas.

En el modelo de Témez, el agua que procede de la precipitación ( $P_i$ ) se fracciona en dos componentes. Una es la evapotranspiración ( $EP_i$ ) y la otra, que se denomina excedente total ( $T_i$ ) es la suma de la escorrentía superficial ( $E_i$ ) y de la infiltración ( $I_i$ ), que tiene

lugar a través del suelo y de la zona no saturada de los acuíferos. Para el instante de tiempo “*i*” se verifica que:

$$T_i = E_i + I_i \quad (1)$$

El excedente total ( $T_i$ ) se calcula según las siguientes expresiones:

$$T_i = 0 \quad \text{si } P_i \leq P_0 \quad (2)$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_0)^2}{P_i + \delta - 2P_0} \quad \text{si } P_i > P_0 \quad (3)$$

donde:

$$\delta = H_{MAX} - H_{i-1} + EP_i \quad (4)$$

$$P_0 = C(H_{MAX} - H_{i-1}) \quad (5)$$

siendo en cada celda:

$P_i$  precipitación en el mes  $i$  (mm)

$T_i$  excedente de agua en el mes  $i$  (mm)

$H_{max}$  capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm), que depende de la textura, la pendiente del terreno y el espesor de la franja de suelo donde tienen lugar la evapotranspiración.

$H_{i-1}$  almacenamiento de agua en el suelo en el mes  $i-1$  (mm)

$EP_i$  evapotranspiración potencial en el mes  $i$  (mm)

$C$  parámetro de excedente, con valores del orden de 0,3

Otras variables necesarias para la resolución del modelo en su fase superficial son el almacenamiento de agua en el suelo ( $H_i$ ) y la evapotranspiración real ( $E_i$ ) en cada celda en el mes  $i$ , y que se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$H_i = \max[0, (H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)] \quad (6)$$

$$E_i = \min[(H_{i-1} + P_i - T_i), EP_i] \quad (7)$$

La infiltración  $I_i$  es función del excedente de agua ( $T_i$ ) y del parámetro denominado infiltración máxima ( $I_{máx}$ ) a través de la expresión empírica:

$$I_i = I_{\max} \frac{T_i}{T_i + I_{\max}} \quad (8)$$

Las relaciones más importantes entre las variables del modelo se grafican en la Figura 4:

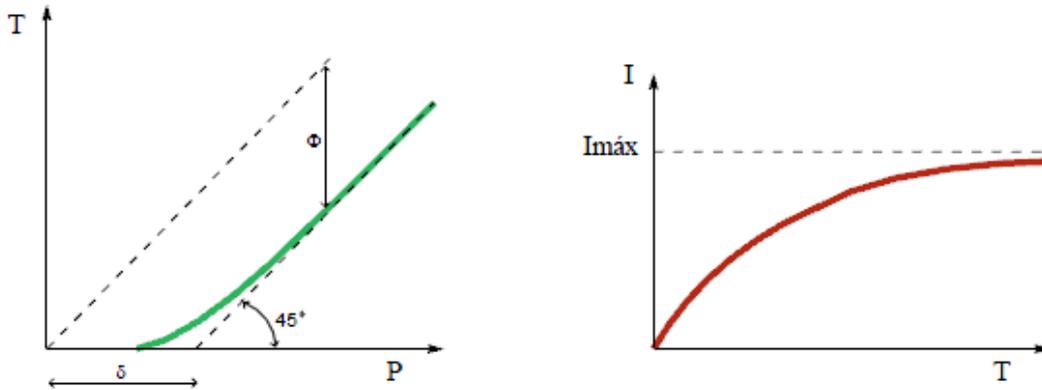


Figura 4. Ley de excedentes (izq.) y ley de infiltración (derecha)

Según Témez (1977) el modelo asume que la recarga al acuífero en cada celda coincide con la infiltración. Una vez calculada la recarga en cada una de las celdas pertenecientes a los distintos acuíferos, el modelo realiza su integración en los recintos que los definen y aplica el modelo unicelular de forma agregada.

La evolución del volumen almacenado en el acuífero y su descarga a la red de drenaje superficial o al mar se define como:

$$V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta t} + \frac{R_i}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot \Delta t}) \quad (9)$$

$$A_{subi} = V_{i-1} - V_i + R_i \quad (10)$$

siendo:

$\alpha$  coeficiente de agotamiento del acuífero (meses-1)

$\Delta t$  intervalo temporal (mes)

$R_i$  recarga al acuífero en el mes  $i$  (mm/mes)

$V_i$  volumen almacenado en el acuífero en el mes  $i$  (mm)

$A_{subi}$  aportación subterránea correspondiente al mes  $i$  (mm/mes)

La aportación total es igual a la parte de excedente ( $T_i$ ) no infiltrada ( $I_i$ ) más la aportación subterránea ( $A_{subi}$ ):

$$A_{Toti} = (T_i - I_i) + A_{subi} = A_{supi} + A_{subi} \quad (11)$$

siendo:

$A_{supi}$  aportación superficial del mes  $i$  (mm/mes)

$A_{Toti}$  aportación total durante el mes  $i$  (mm/mes).

Las ecuaciones del Modelo Témez se han integrado de forma distribuida en el Sistema de Información Geográfica (SIG) GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). Se ha seguido para ello la guía propuesta por Potenciano de las Heras y Villaverde Valero (2010). El SIG GRASS se encuentra bajo la licencia pública general (GNU).

#### 4.4. Recopilación de datos y tratamiento de la información meteorológica

Se ha realizado una recopilación de datos mensuales meteorológicos observados y simulados provistos por el Proyecto Europeo ENSEMBLES (Christensen *et al.*, 2009). Los datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima mensual corresponden a los proporcionados por el experimento RT2B del Proyecto Europeo ENSEMBLES para Europa (Tabla 2).

Tabla 2. Información de RCMs del Proyecto EUROPEO ENSEMBLES.

Nombre	Instituto	GCM	Escenario	RCM	Resolución
C4IRCA3	C4I <sup>a</sup>	ECHAM5	A2	RCA3	25km
CNRM/RM4.5	CNRM <sup>b</sup>	ARPEGE	A1B	Aladin	25km
CNRM/RM5.1	CNRM	ARPEGE_RM5.1	A1B	Aladin	25km
		New ens.mb. to 2100			
KNMI/RACMO2	KNMI <sup>c</sup>	ECHAM5-r3	A1B	RACMO	25km
KNMI/RACMO2	KNMI	ECHAM5-r1	A1B	RACMO	50km
KNMI/RACMO2	KNMI	ECHAM5-r2	A1B	RACMO	50km
KNMI/RACMO2	KNMI	ECHAM5-r3	A1B	RACMO	50km
KNMI/RACMO2	KNMI	MIROC	A1B	RACMO	50km
OURANOSMRCC4.2.1	OURANOS <sup>d</sup>	CGCM3	A1B	CRCM	25km
SMHIRCA	SMHI <sup>e</sup>	ECHAM5-r3	A1B	RCA	50km
SMHIRCA	SMHI	BCM	A1B	RCA	25km
SMHIRCA	SMHI	ECHAM5-r3	A1B	RCA	25km
SMHIRCA	SMHI	HadCM3Q3	A1B	RCA	25km
MPI-M/REMO	MPI <sup>f</sup>	ECHAM5-r3	A1B	REMO	25km
METNOHIRHAM	METNO <sup>g</sup>	BCM	A1B	HIRHAM	25km
METNOHIRHAM	METNO	HadCM3Q0	A1B	HIRHAM	25km
C4IRCA3	C4I	HadCM3Q16	A1B	RCA3	25km
UCLM/PROMES	UCLM <sup>h</sup>	HadCM3Q0	A1B	PROMES	25km
ETHZ/CLM	ETHZ <sup>i</sup>	HadCM3Q0	A1B	CLM	25km
METO_HC/HadRM3Q0	HC <sup>j</sup>	HadCM3Q0	A1B	HadRM3Q0	25km
METO_HC/HadRM3Q3	HC	HadCM3Q3	A1B	HadRM3Q3	25km
METO_HC/HadRM3Q16	HC	HadCM3Q16	A1B	(low sensitivity) HadRM3Q16 (high sensitivity)	25km

METO_HC/HadCM3Q0	HC		A1B	HadCM3Q0 (normal sensitivity)	3.75x2.5 deg.
METO_HC/HadCM3Q3	HC		A1B	HadCM3Q3 (low sensitivity)	3.75x2.5 deg.
METO_HC/HadCM3Q16	HC		A1B	HadCM3Q16 (high sensitivity)	3.75x2.5 deg.
DMI/HIRHAM5	DMI <sup>k</sup>	ARPEGE	A1B	HIRHAM	25km
DMI/HIRHAM5	DMI	ECHAM5-r3	A1B	DMI-HIRHAM5	25km
DMI/HIRHAM5	DMI	BCM	A1B	DMI-HIRHAM5	25km
ICTP/REGCM3	ICTP <sup>l</sup>	ECHAM5-r3	A1B	RegCM	25km
VMGO/RRCM	VMGO <sup>m</sup>	HadCM3Q0	A1B	RRCM	25km
GKSS/CCLM4.8	GKSS <sup>n</sup>	IPSL	A1B	CLM	25km

a Community Climate Change Consortium for Ireland

b Météo-France, Centre National de Recherche Météorologiques

c Royal Netherlands Meteorological Institute

d Canada

e Swedish Meteorological and Hydrological Institute

f Max-Planck-Institut für Meteorologie, Germany

g Norwegian Meteorological Institute

h Universidad de Castilla La Mancha, Spain

i Swiss Federal Institute of Technology Zurich

j Hadley Centre, UK

k Danish Meteorological Institute

l International Centre for Theoretical Physics, Italy

m Voeikov Main Geophysical Observatory, Russia

n GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Germany

De entre todos los modelos disponibles, Giraldo Osorio and García Galiano (2012), seleccionaron diecisiete para realizar estudios en España. Esta selección se basó en la resolución espacial (sólo aquellos con tamaño de celda 25\*25 km), periodo temporal (con datos en el periodo de control 1961-1990), y evitar sesgar los ensembles. Asimismo, estos autores trabajaron con simulaciones de RCM anidados en distintos GCMs, para el escenario A1B.

En el presente trabajo, se han seleccionados dos RCMs: 1- KNMI-RACMO2 del Royal Netherlands Meteorological Institute y 2- MPI-M-REMO del Max-Planck-Institut für Meteorologie, ambos forzados por el mismo GCM (ECHAM5-r3), y escenario A1B. Se tienen datos del periodo 1950-2100 para el primero y 1951-2100 para el segundo.

Con la selección de estos modelos, se pretende analizar el grado de divergencia de los resultados, dado que se trata de RCMs con muy distinto peso en los ensembles de precipitaciones mensuales para España (Comunicación Personal S.G. García). De hecho el modelo MPI-M-REMO presenta el mayor coeficiente de ponderación en el ensemble, mientras en el caso de KNMI-RACMO2 su peso es muy inferior. Los coeficientes de ponderación del ensemble, se definen básicamente mediante análisis de similaridad de las funciones de distribución de las variables simuladas y observadas (Comunicación

Personal S.G. García). Se debe destacar que es la estrategia seleccionada, para realizar una primera aproximación al efecto de la propagación de las incertidumbres en los modelos climáticos a la modelización hidrológica.

Los datos mensuales históricos hidrológicos (aportaciones al Embalse de Fuensanta), para el período 1958-2006, fueron provistos por la Confederación Hidrográfica del Segura.

Se trabajó con la base de datos meteorológicos observados Spain02 (período 1950-2007) de la Península Ibérica, que provee datos de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas diarias con una resolución espacial de 0,2° (~20\*20 km) (Herrera *et al.*,2010).

Debe destacarse que tanto los datos de RCMs como los procedentes de Spain02, han sido integrados en el SIG GRASS en trabajos previos del Grupo de I+D Gestión de Recursos Hídricos (García Galiano et al., 2011; Giraldo Osorio and García Galiano, 2012). El procesamiento de la información meteorológica observada, en cuanto determinación de distribuciones espacio-temporales de  $T_{max}$ ,  $T_{mín}$ ,  $T_{media}$  mensuales, se ha realizado con el Toolbox EXTREMES (García Galiano, 2011) bajo el SIG GRASS (Fig.5).

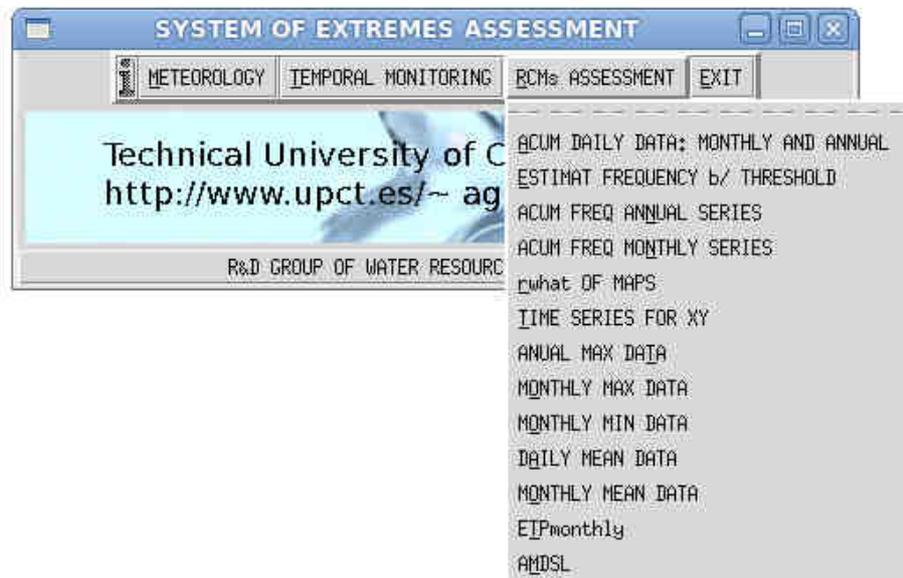


Figura 5. Interfaz de la herramienta Toolbox EXTREMES (García Galiano, 2011), bajo el SIG GRASS.

#### 4.5. Estimación de Evapotranspiración Potencial

El cálculo de las series temporales de evapotranspiración potencial a escala de cuenca, se realizó tanto desde los datos históricos observados (Spain02), como simulados por los RCMs seleccionados, aplicando el método de Hargreaves modificado integrado en Toolbox EXTREMES bajo el SIG GRASS. La ecuación empleada (ecuación 13) está basada en la de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985; Samani, 2000), ajustada por Martínez *et al.* (2009):

$$ET_0 = 0,0023 \cdot R_{ex} \cdot (T_m + 17,78) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \quad (12)$$

$ET_0$  = Evapotranspiración (mm día<sup>-1</sup>).

$T_m$  = Temperatura media (°C).

$T_{max}$  = Temperatura máxima (°C).

$T_{min}$  = Temperatura mínima (°C).

$R_{ex}$  = Radiación extraterrestre (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

En la ecuación se corrige el exponente del término ( $T_{max,MENSUAL} - T_{min,MENSUAL}$ ) y se incorpora la altitud:

$$ET_0 = 0,408 \cdot 0,00761 \cdot (T_{m,MENS} + 17,8) \cdot (T_{max,MENS} - T_{min,MENS})^{0,048} \cdot R_{ex,MENS} \cdot Z^{0,029} \quad (13)$$

$ET_0$  = Evapotranspiración mensual (mm día<sup>-1</sup>).

$T_{m, MENSUAL}$  = Temperatura media mensual (°C).

$T_{max, MENSUAL}$  = Temperatura máxima mensual (°C).

$T_{min, MENSUAL}$  = Temperatura mínima mensual (°C).

$R_{ex, MENSUAL}$  = Radiación extraterrestre (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

$Z$  = Altitud (m). En el presente trabajo se utilizó un DEM.

#### 4.6. Análisis crítico de series temporales: Balance Hídrico

Con el objetivo de realizar un análisis crítico de las series temporales con las que se trabajará en la modelización hidrológica, se llevó a cabo un balance hídrico interanual para la cuenca de estudio. Ello permitió contrastar la precipitación frente a la aportación específica, trabajando con datos observados (Figura 6).

Desde el análisis de la Fig. 6, se comprueba que las series temporales de evapotranspiración potencial presentan cierto grado de sobreestimación para la cuenca de estudio. Debe destacarse que la ecuación utilizada para la estimación de la

ETpotencial, realmente se ha ajustado con estaciones que no se localizan en la zona de estudio (ver Martínez Álvarez, et al., 2009). La curva teórica (ecuación 14) de Budyko (1948), no se ajusta adecuadamente a los datos de precipitación-aportación específica observados.

$$Q = P \cdot e^{-ETP/P} \quad (14)$$

$Q$ = Aportación específica teórica

$P$ =Precipitación anual

$ETP$ =Evapotranspiración potencial

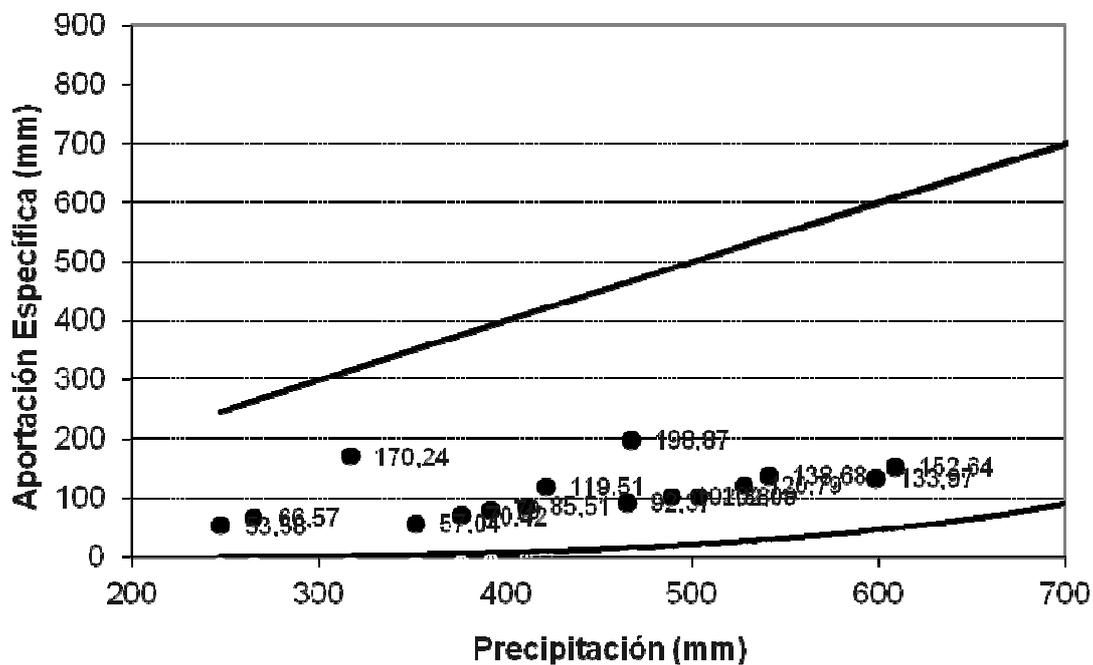


Figura 6. Contraste de datos de distinta naturaleza. Balance hídrico.

Dados los resultados previos (Fig. 6), se consideró aplicar un coeficiente de reducción del 30 % a los valores de ETP a la hora de alimentar al modelo hidrológico.

#### 4.7. Parametrización y calibración del modelo

El modelo de Témez contempla el ajuste de al menos 4 parámetros:  $H_{m\acute{a}x}$ ,  $C$ ,  $I_{m\acute{a}x}$  y  $\alpha$ . La capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo ( $H_{m\acute{a}x}$ ) y el coeficiente de excedente ( $C$ ) regulan el almacenamiento en el suelo, la capacidad máxima de infiltración ( $I_{m\acute{a}x}$ ) separa la escorrentía superficial de la subterránea y el coeficiente de recesión de los acuíferos ( $\alpha$ ) regula el drenaje subterráneo. También se precisa que se

definan las condiciones iniciales de la simulación, correspondientes a humedad inicial en el suelo ( $(H_0)$  mm) y almacenamiento inicial en el acuífero ( $(V_0 = Q_0/\alpha)$  hm<sup>3</sup>).

Tratándose de un modelo distribuido sus parámetros no son escalares, sino matrices representativas de los distintos atributos territoriales considerados. Los mapas de capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, capacidad máxima de infiltración y coeficientes de agotamiento de los acuíferos, se han obtenido de forma distribuida para todo el territorio a partir de características físicas de las cuencas y de los acuíferos, tales como usos de suelo, litología, etc.

Considerada como cuenca de estudio la cuenca de aporte al embalse de Fuensanta, los valores iniciales de los parámetros de ajuste del modelo de Témez se han establecido de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) Infiltración máxima ( $I_{max}$ ). Los valores iniciales de calibración del mapa de infiltración máxima en la cuenca se han establecido en función de la litología, según las equivalencias reflejadas en la Tabla 3 (Estrela *et al.*, 1999). Para ello se ha reclasificado bajo el SIG GRASS el mapa geológico Nacional del IGME (1:1.000.000) obtenido previamente para la zona.

Tabla 3. Regionalización de la capacidad máxima de infiltración a partir de la litología. (Estrela *et al.*, 1999)

Litología	Infiltración máxima (mm)
Mat. Aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

Los valores de infiltración máxima que se han empleado en el modelo Témez tras la calibración, se pueden observar en la Figura 7 siguiente.

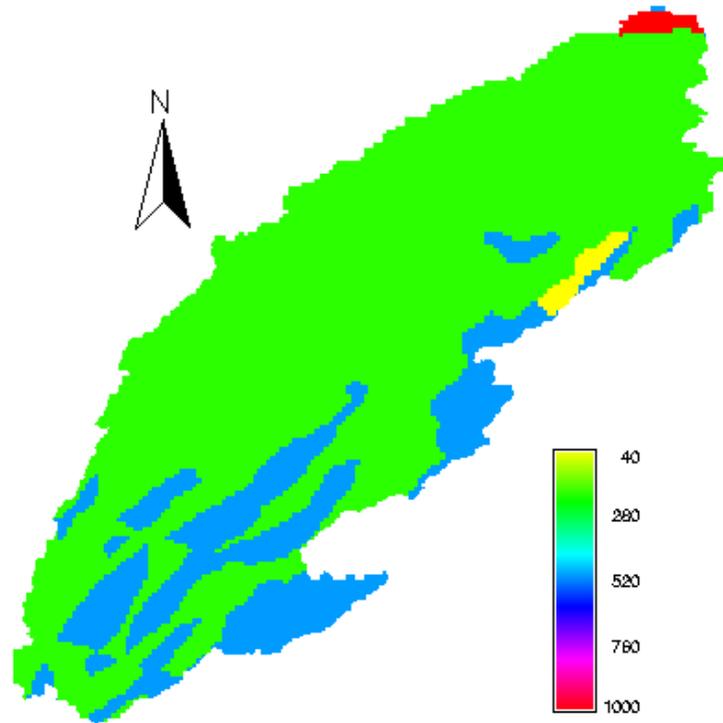


Figura 7. Mapa de Infiltración del suelo (mm) para la cuenca de estudio.

- b) Capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo ( $H_{max}$ ). Los valores iniciales de este parámetro se han establecido en función de los usos del suelo según las equivalencias reflejadas en la Tabla 4 (Estrela *et al.*, 1999). Para ello se ha reclasificado bajo el SIG GRASS el mapa de usos del suelo obtenido para la zona de estudio desde el proyecto CORINE Land Cover (IGN, 2010).

Tabla 4. Regionalización de la capacidad máxima de humedad del suelo en mm a partir de los usos del suelo (Estrela *et al.*, 1999)

Usos del suelo	Capacidad máxima de humedad del suelo (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosque de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

El mapa con los valores de capacidad máxima de humedad del suelo que finalmente se ha empleado en el modelo Témez tras la calibración, se observa en la Figura 8 siguiente.

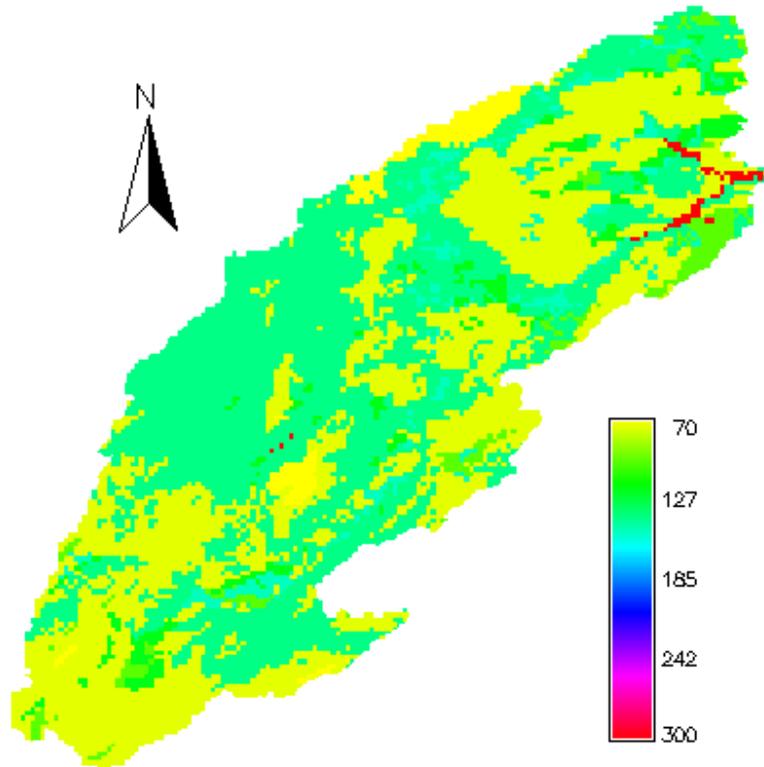


Figura 8. Mapa de capacidad máxima de humedad del suelo (mm) para la cuenca de estudio

c) Coeficiente de agotamiento del acuífero ( $\alpha$ ). Los valores iniciales de este parámetro se han establecido en función de los empleados por CHG (2010). Se obtienen a partir del conocimiento cualitativo del funcionamiento de los acuíferos, de sus propiedades hidrodinámicas (si son conocidas), y fundamentalmente, de las curvas de agotamiento de los acuíferos observadas en las estaciones de aforo de los ríos. Para la obtención del mapa del coeficiente de recesión del acuífero de la zona se ha reclasificado bajo el SIG GRASS, el mapa de acuíferos de la Confederación Hidrográfica del Segura.

Los valores de  $\alpha$  que se han empleado en el modelo Témez se han definido en fase de calibración (Figura 9).

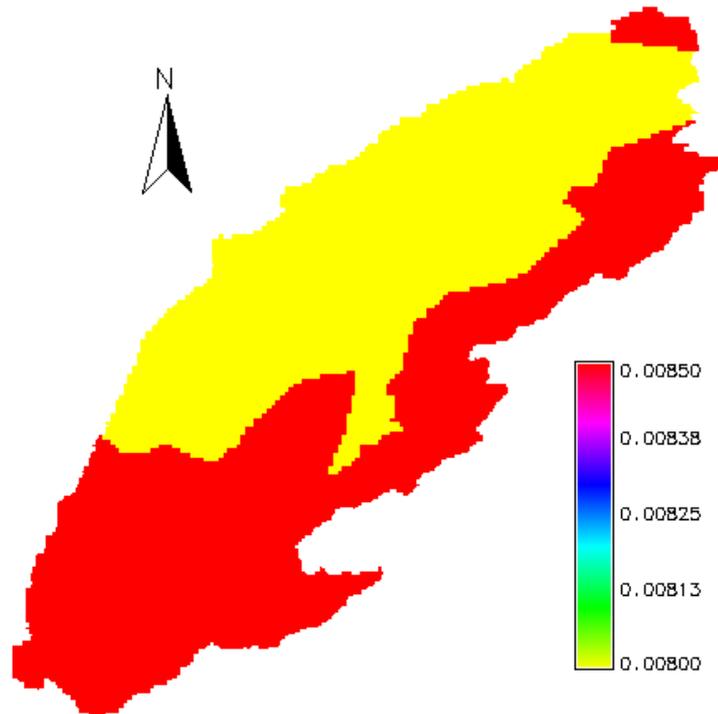


Figura 9. Mapa de coeficiente de agotamiento del acuífero ( $\text{día}^{-1}$ ) para la cuenca de estudio.

- d) Coeficiente de excedente (C). Los valores iniciales de este parámetro se han definido de acuerdo a los considerados por Murillo *et al.* (2011): 0,30 para las cuencas altas con acuíferos carbonatados, suelos poco desarrollados, pendientes elevadas, escasa vegetación e importante red de drenaje; 0,35 para cuencas con pendientes y desarrollo de la red de drenaje, vegetación y suelo de tipo medio; y 0,50 para las cuencas bajas ligadas a acuíferos detríticos, escasa pendiente, suelos muy desarrollados y numerosos campos de cultivo. Finalmente, se consideró un valor de 0,3 para toda la cuenca en el presente trabajo.
- e) El parámetro humedad inicial en el suelo ( $H_0$ ) se ha considerado nulo dado que las simulaciones se realizan para al menos un año hidrológico completo y se inician y finalizan con el estiaje. El almacenamiento inicial en el acuífero ( $Q_0$ ) también se ha considerado nulo, pues el efecto de los valores iniciales se reduce a medida que transcurre el tiempo, por lo que estos resultan poco significativos.

## 5. Análisis de resultados y discusión

### 5.1 Fase calibración y validación

En la Figura 10 se representa el contraste entre el hidrograma observado y el simulado por el Modelo Témez para el período 2000-2005, a la salida de la cuenca. Se ha efectuado la calibración en este periodo debido a que consideran los usos del suelo provistos por CORINE 2006.

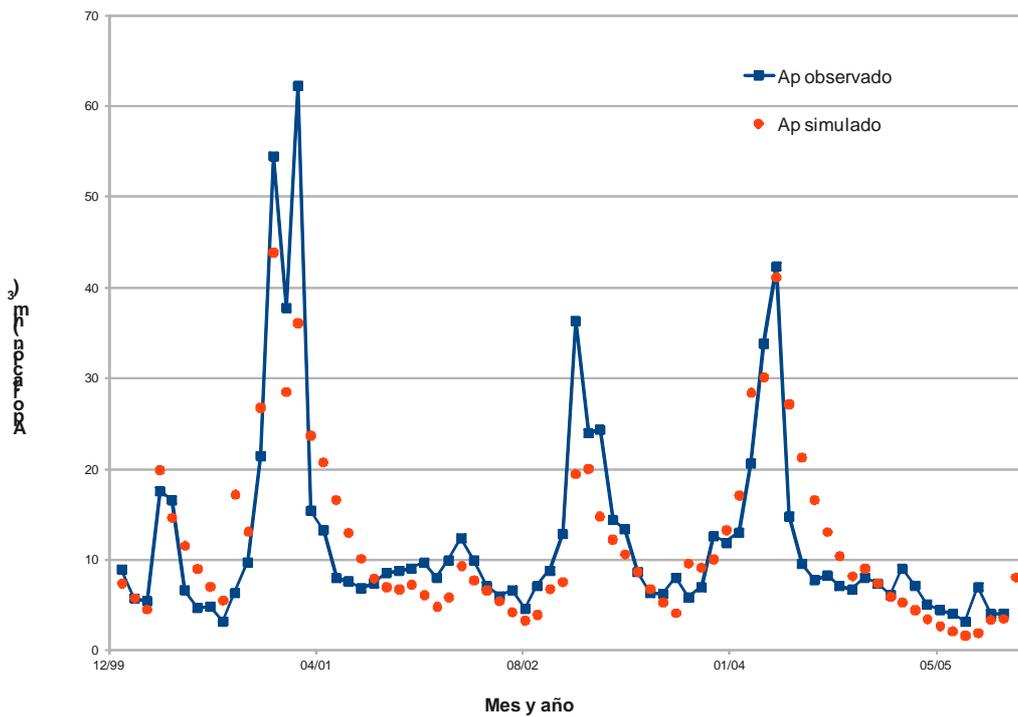


Figura 10. Resultados de la calibración del modelo de Témez para el periodo 2000-2005.

A continuación, se realizó la validación del modelo en el periodo 1960-1999 (Figura 11) antes de la utilización del mismo para generar proyecciones hidrológicas.

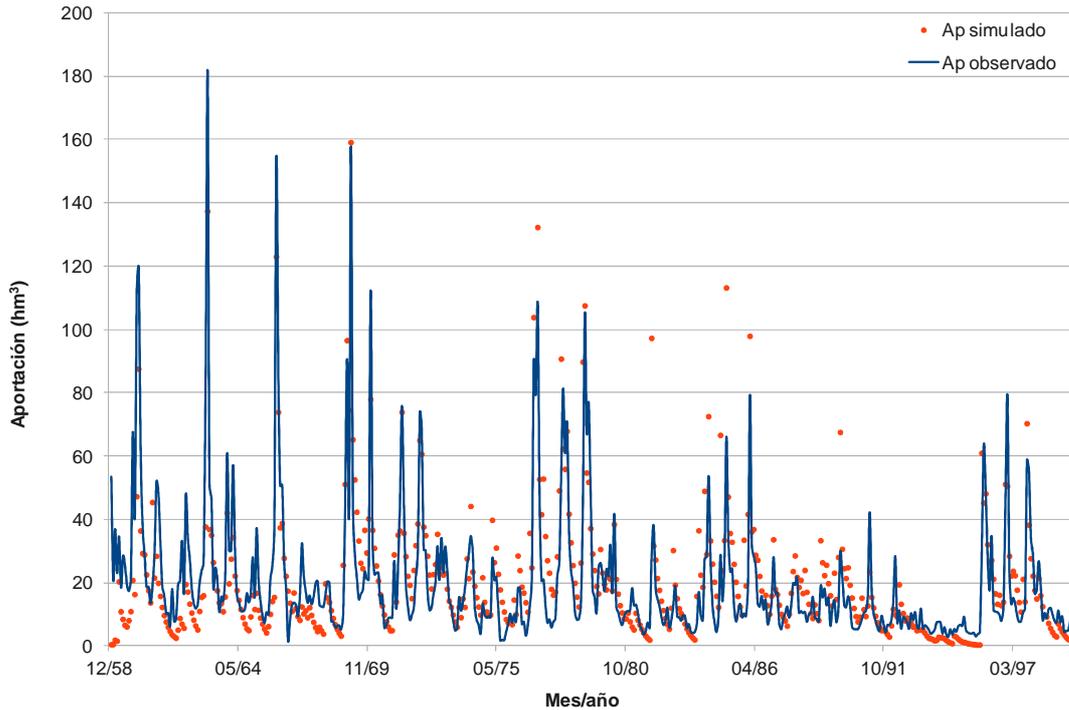


Figura 11. Resultados de la aportación simulada ( $\text{hm}^3$ ) con el modelo de Témez para el periodo 1960-1999.

Desde la Figura 11 anterior, correspondiente al período 1960-1999, se observan ciertas sobreestimaciones de las aportaciones mensuales en algunos períodos. Por ejemplo, desde finales de los '70 hasta finales de los '80, los caudales picos se sobreestiman. Para justificar este hecho, se debe tener en cuenta que en el proceso de calibración realizado se ha hecho la hipótesis de estacionariedad o invarianza de los parámetros en el periodo de simulación. Esto supone admitir, consecuentemente, la invarianza en los usos de suelo, lo que en la práctica no es así. Por ello, se considera que es importante estudiar el impacto del cambio del uso del suelo junto al impacto del cambio climático. Si bien, no es el objetivo del presente trabajo.

La comparación de la serie de datos observados y la estimada por el modelo Témez se realizó mediante el Coeficiente de Eficiencia de modelos de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970). Este coeficiente es una herramienta para evaluar la capacidad predictiva de un modelo hidrológico, y se expresa como:

$$RN_2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (15)$$

donde:

$RN_2$  : Coeficiente de Nash-Sutcliffe

$Q_0$  : Valores observados

$Q_m$  : Valores simulados

$\bar{Q}_0$ : Promedio de los valores observados

Según el valor obtenido del coeficiente de Nash-Sutcliffe para el periodo de calibración (0,73) y para el periodo de validación (0,68), las series mensuales presentan una bondad de ajuste aceptables (según Tabla 5).

Tabla 5. Criterio para la evaluación de la bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe (Van Dijk *et al.*, 2008)

Indicador	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre	Muy pobre
$RN_2$	>0,95	0,8-0,95	0,75-0,8	0,5-0,75	0,3-0,5	<0,3

## 5.2 Fase generación de escenarios hidrológicos futuros

La generación de escenarios hidrológicos se ha llevado a cabo con el modelo Témez distribuido espacialmente, una vez validado, para estudiar el comportamiento de la cuenca de aporte al embalse de Fuensanta. Esta modelización a escala mensual se realizó considerando la información derivada desde los RCMs seleccionados, y la parametrización realizada previamente.

La aplicación del modelo Témez proporciona la esorrentía total en régimen natural que se registra en la cuenca hidrológica. Las figuras 12 y 13 representan los hidrogramas simulados para el periodo 2021-2050 considerando los dos RCMs seleccionados KNMI/RACMO y MPIM/REMO, respectivamente.

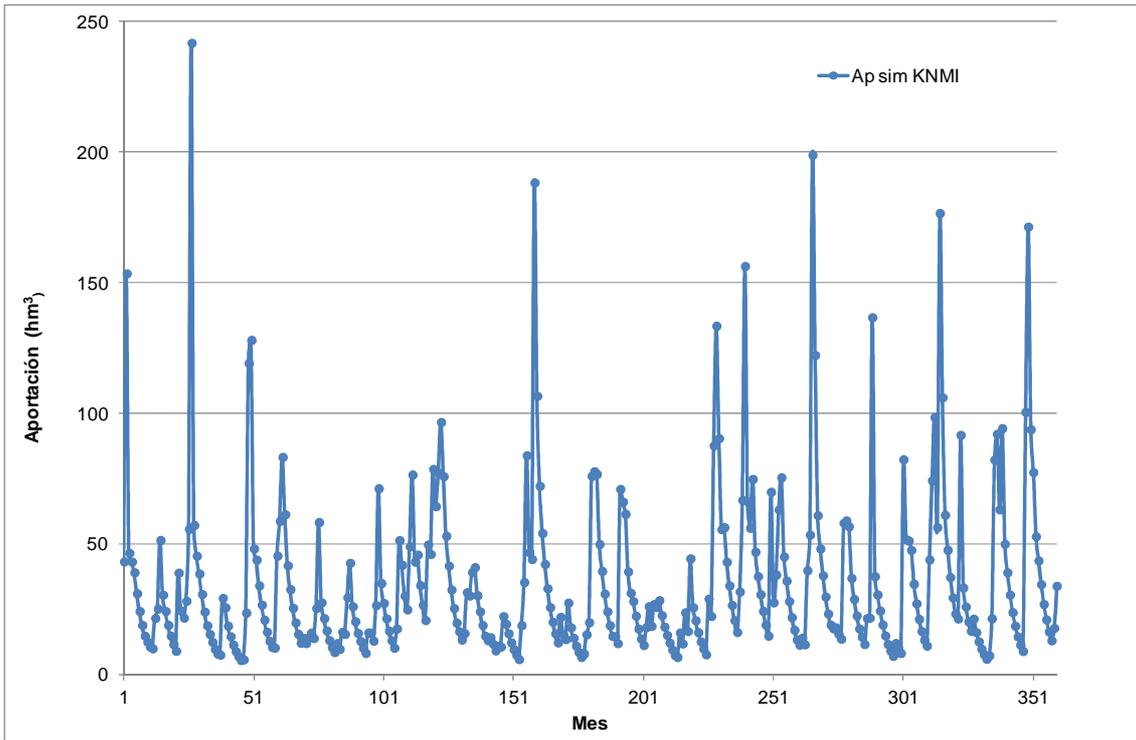


Figura 12. Resultados de la simulación con KNMI/RACMO2 para el periodo 2021-2050

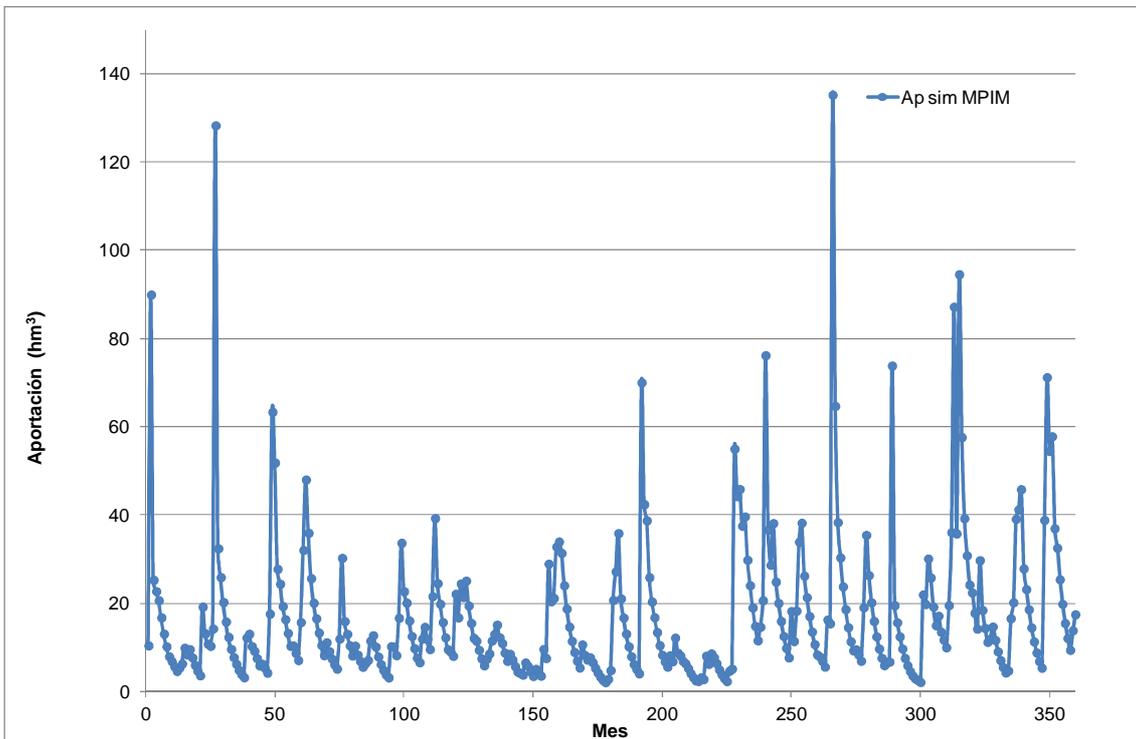


Figura 13. Resultados de la simulación con MPI-M/REMO para el periodo 2021-2050

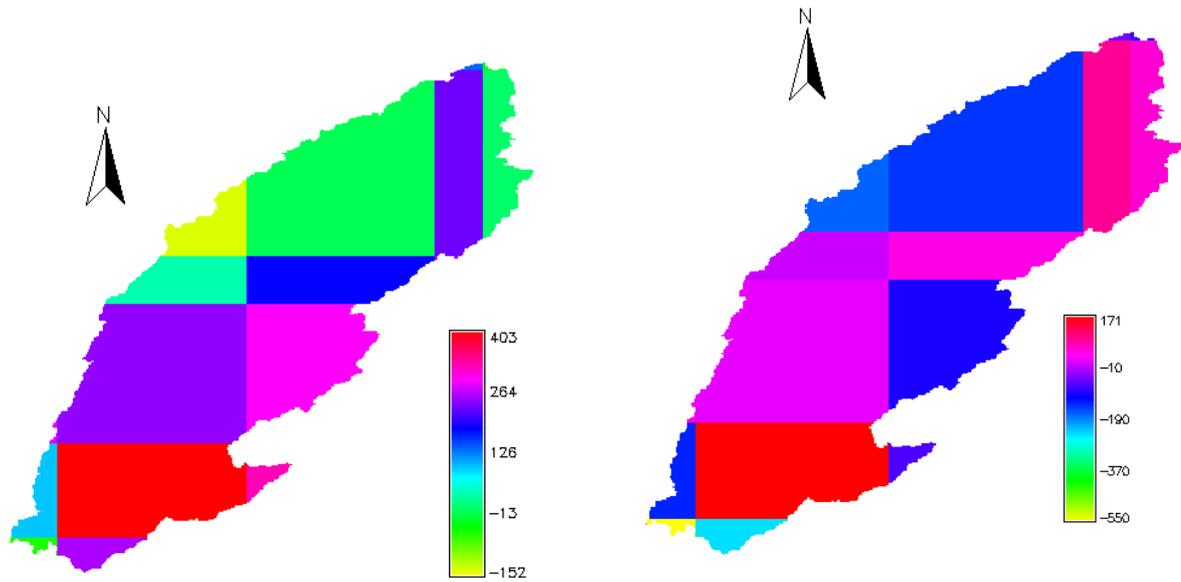
Se realizó un contraste de los resultados de aportaciones totales simuladas desde las proyecciones con los RCMs seleccionados para el periodo 2021-2050, y las obtenidas con datos históricos para el periodo control de 1961-1990 (Tabla 6).

Tabla 6. Datos de aportaciones en la cuenca de aporte al embalse de Fuensanta

Datos	Periodo	Aportación (hm <sup>3</sup> )	Cambio %
Observados (C.H.S.)	1961-1990	7.757	
KNMI/RACMO2	2021-2060	12.618	62
MPIM/REMO	2021-2060	6.194	-20

Desde la Tabla 6, se puede observar que con la proyección del modelo KNMI/RACMO2 se prevé que las aportaciones totales en la cuenca aumenten un 62% con respecto a las aportaciones observadas del periodo 1961-1990. De forma contraria, el modelo MPIM/REMO predice una disminución de la escorrentía del orden del 20%. Concluyendo, se identifican resultados completamente divergentes entre ambos modelos, siendo mayores incluso las desviaciones con el modelo KNMI/RACMO2.

A continuación, se procedió a analizar el grado de ajuste de los modelos a las precipitaciones observadas. Para ello se obtuvo la distribución espacial de los escenarios climáticos futuros (1961-1990) con respecto a la precipitación del escenario histórico (período de control 1961-1990), desde ambos modelos (Figura 14).



Variación de la precipitación en mm del modelo KNMI      Variación de la precipitación en mm del modelo MPIM

Figura 14. Mapas de variación de la precipitación (mm) del modelo KNMI y MPIM respecto a la observada.

Comparando los mapas de la Figura 14, se identifican los mayores desfases de precipitación con el modelo KNMI, principalmente en la zona media y sur de la cuenca. Para el modelo MPIM las variaciones de precipitación con respecto a las históricas en toda la cuenca son en general menores, produciéndose los mayores desfases en la zona sur de la cuenca, pero en baja proporción.

Además, se obtuvo la variación de la precipitación de los modelos KNMI y MPIM con respecto a la observada para el periodo 1961-1990 en función del porcentaje de cuenca (Tabla 7).

Tabla 7. Variación de la precipitación (mm) de los modelos KNMI y MPMI con respecto a la observada para el periodo 1961-1990, según el porcentaje de la cuenca

Variación de la precipitación para el modelo KNMI	% cuenca	Variación de la precipitación para el modelo MPMI	% cuenca
-151,628442--149,453955	0	-550.34505—547.517511	0,36
-136,40703--134,232542	3,51	-244.970809—242.14327	1,71
-51,602016--49,427528	0,36	-174.282327—171.454788	3,51
-40,729578--38,555091	0,05	-148.834474—146.006934	22,23
-5,937778--3,76329	22,23	-137.524317—134.696777	2,02
2,760172-4,934660	4,3	-103.593845—100.766306	10,71
33.202998-35.377485	4,73	-80.973531—78.145992	0,05
94.088649-96.263136	2,02	-75.318452—72.490913	0,82
135.403912-137.578399	0,08	-49.870599—47.04306	0,08
181.06815-183.242638	6,82	-21.595206—18.767667	0
226.732388-228.906876	7,61	-4.629971—1.802431	4,73
244.128289-246.302776	20,92	12.335265-15.162804	20,92
248.477264-250.6517	0,01	40.610658-43.438197	6,82
255.000726-257.175214	1,71	46.265736-49.093276	0,06
278.920089-281.094577	0,06	51.920815-54.748354	4,3
294.141502-296.315989	10,71	85.851286-88.678825	7,61
322.40984-324.584327	0,82	105.644061-108.4716	0,01
400.691391-402.865878	14,05	167.849925-170.677464	14,05

Observando la Tabla 7, se aprecia en la variación de precipitaciones respecto al modelo KNMI/RACMO2, que un 66% aproximadamente de la cuenca presenta variaciones de más de 100mm. Mientras que estos desfases ocurren en un 50% aproximadamente de la cuenca, para el modelo MPIM/REMO. Con estos datos se corrobora que el modelo MPIM presenta un mejor ajuste a los datos históricos en la zona de estudio.

En las Figuras 15, 16 y 17 se presentan los mapas de las proyecciones climáticas de precipitación, evapotranspiración y aportaciones medias anuales 2021-2050 frente al escenario histórico 1961-1990, respectivamente.

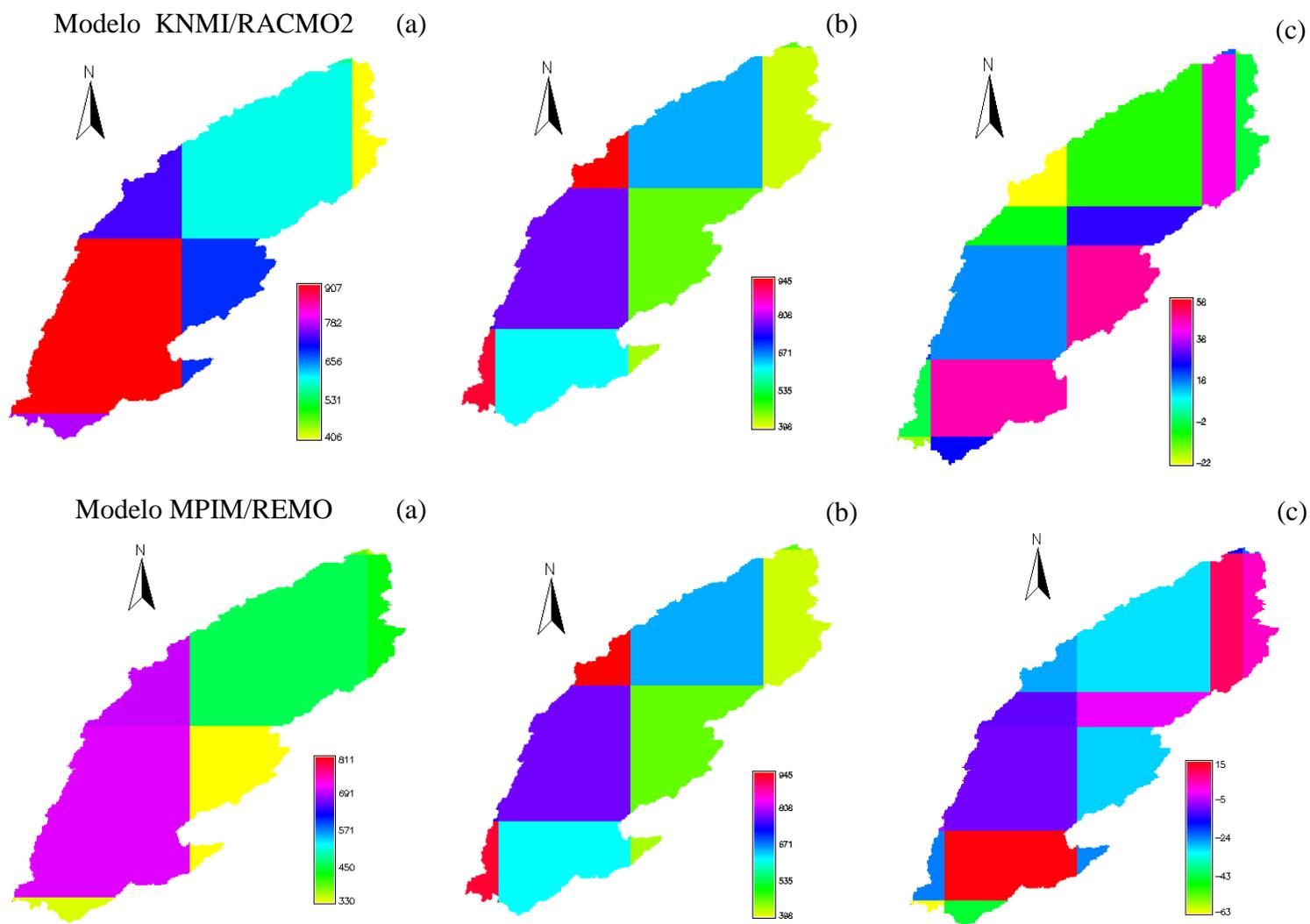


Figura 15. Mapas de precipitación media anual (mm) y variación de la precipitación (%) del modelo KNMI/RACMO2 y MPIM/REMO: (a) Precipitación media para el periodo 2021-50; (b) Precipitación media para el periodo 1961-1990 de datos observados; y (c) Porcentaje de variación de la precipitación

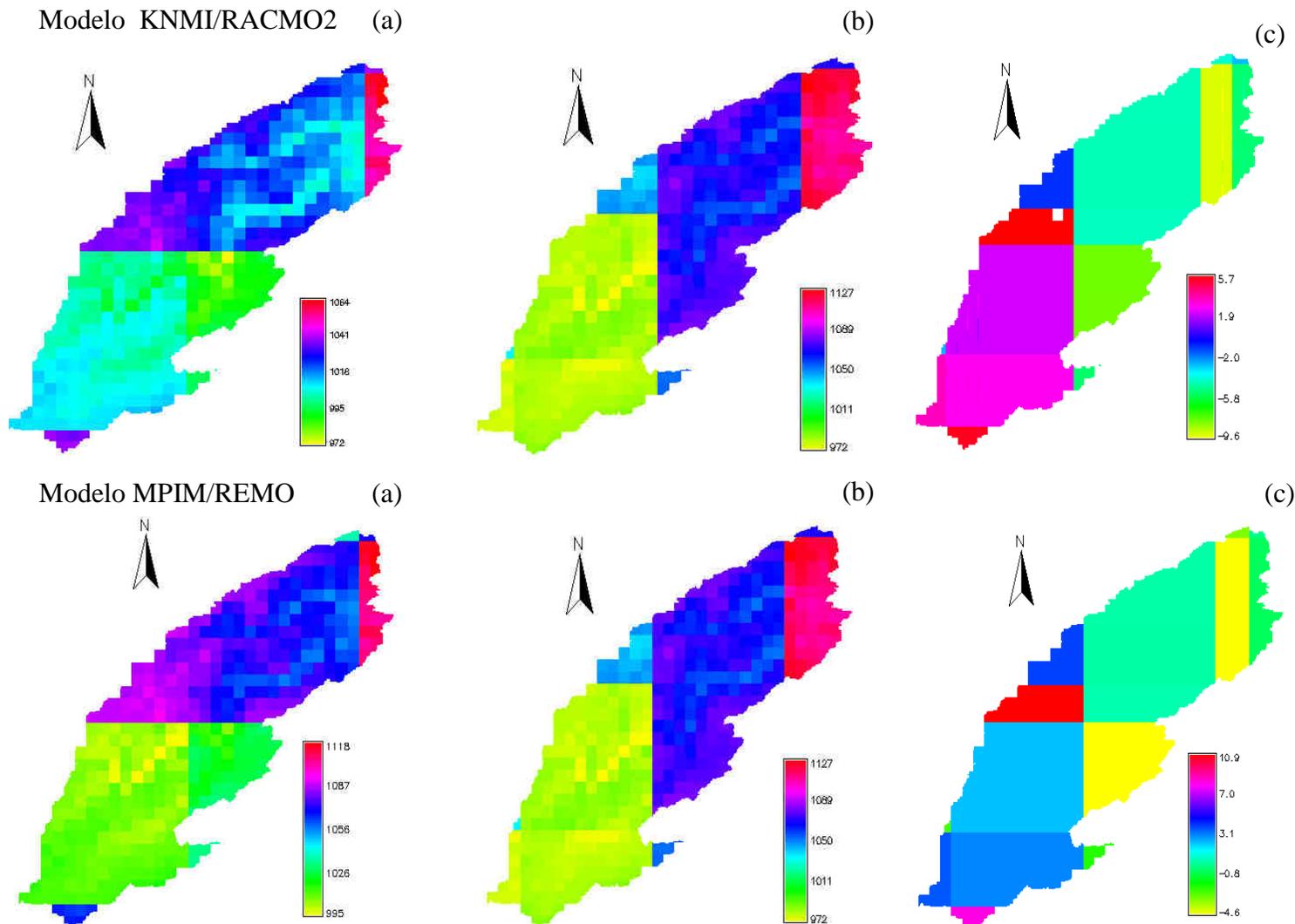


Figura 16. Mapas de ETP media anual (mm) y variación de la ETP (%) del modelo KNMI/RACMO2 y MPIM/REMO: (a) Precipitación media para el periodo 2021-50; (b) Precipitación media para el periodo 1961-1990 de datos observados; y (c) Porcentaje de variación de la precipitación

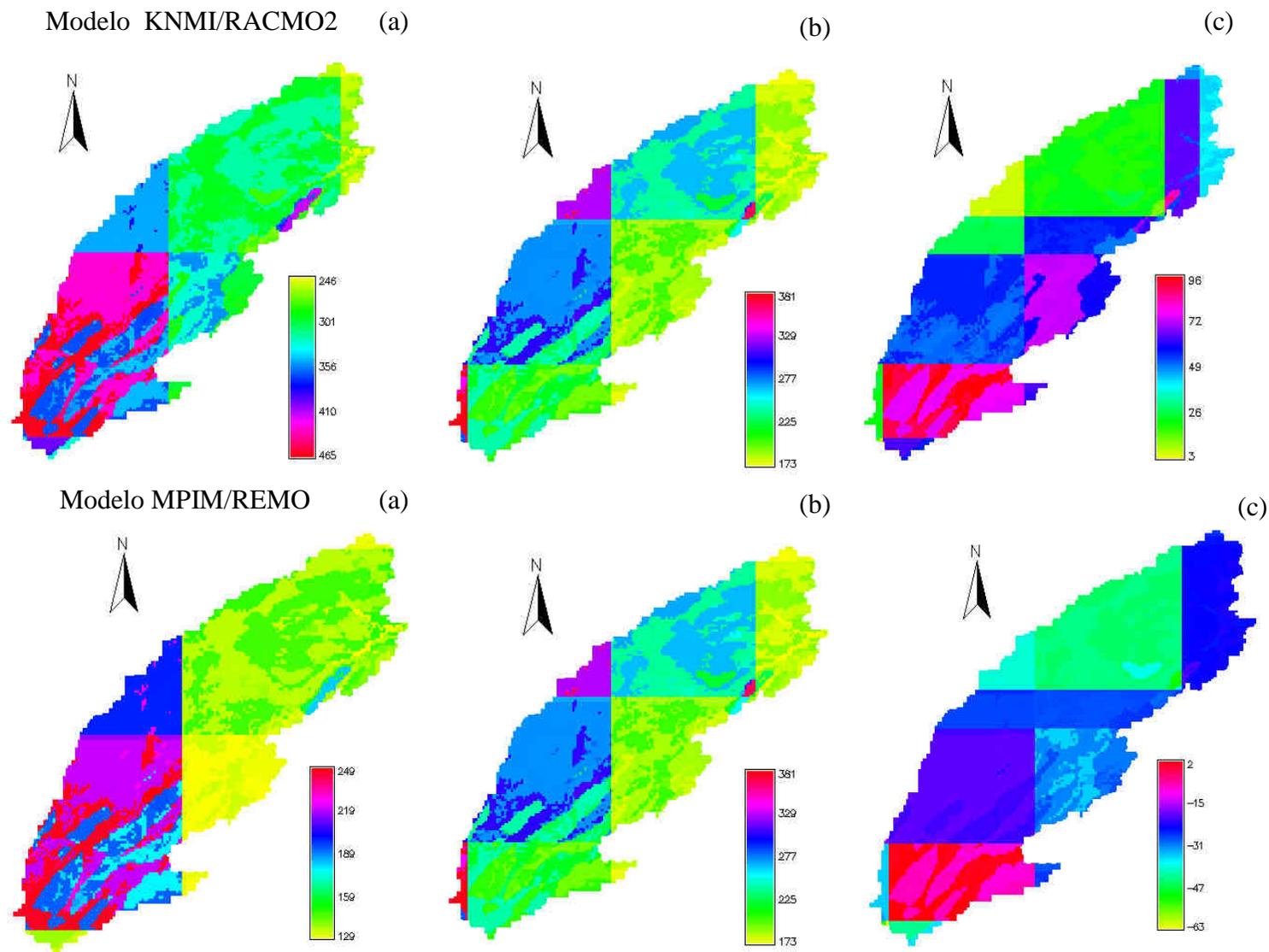


Figura 17. Mapas de aportación media anual (mm) y variación de la aportación (%) del modelo KNMI y MPIM: (a) Precipitación media para el periodo 2021-50; (b) Precipitación media para el periodo 1961-1990 de datos observados; y (c) Porcentaje de variación de la precipitación.

Haciendo un análisis de las precipitaciones desde la Figura 15a, se puede observar que según el modelo KNMI/RACMO las precipitaciones aumentarán en el periodo 2021-2050 en la mayor parte del área de la cuenca, llegando incluso a aumentar en un 40% en algunas zonas. Sin embargo, según el modelo MPMI (Figura 15b) las precipitaciones disminuirán en ese periodo en casi toda la superficie, siendo la reducción en alguna pequeña zona de hasta un 60%.

Al contrario de lo que se ha visto en la figura precedente, en la Figura 16, correspondiente a ET potencial, los resultados de ambos modelos son similares. Si se observan las Figuras 16a y 16b, la evapotranspiración potencial disminuirá en la zona Este de la cuenca en un pequeño porcentaje (9% para KNMI y 4% para MPIM) y aumentará en la zona Oeste hasta un 5% según el modelo KNMI y un 10% según MPIM.

Por último, si se analizan las aportaciones obtenidas en la cuenca con el modelo KNMI (Figura 17a) se observa un aumento en toda la cuenca, lo cual era esperable debido a la proyección del aumento de las precipitaciones. En el caso de las aportaciones proyectadas con el modelo MPIM ocurre al contrario (Figura 17b), éstas disminuyen en la mayor parte de la cuenca hasta en un 40%.

Luego de manera general y a la vista de los resultados, se puede concluir que se han obtenido proyecciones climáticas divergentes a partir de diferentes RCMs.

## 6. Conclusiones y líneas futuras de investigación

El objetivo principal del presente Trabajo Práctico es evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos a escala de cuenca hidrográfica.

Se ha realizado una revisión bibliográfica de las técnicas y modelos hidrológicos para estudios de impactos del cambio climático a nivel de mesoescala y macroescala, que permite evaluar las ventajas y limitaciones de cada aproximación. Entre los modelos a nivel de macroescala más ampliamente utilizados en estudios de impactos del cambio climático, destaca el modelo VIC (Liang *et al.*, 1994). Luego, a nivel de España el modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación, Estrela y Quintas, 1996), ha sido el más ampliamente considerado a escala mensual. Se han considerado también los Land Surface Models (LSMs), presentando una breve revisión bibliográfica.

El modelo Témez ha sido el finalmente considerado para proceder a la simulación. La aplicación del modelo de Témez ha permitido determinar con una escala de tiempo mensual la serie de aportación en régimen natural de la escorrentía total.

El Sistema de Información Geográfica (SIG) GRASS ha sido utilizado intensivamente para el procesamiento de información de entrada al modelo.

Se ha seleccionado la cuenca de aporte al embalse de Fuensanta como cuenca de estudio. Se ha llevado a cabo una caracterización de la cuenca desde distintos puntos de vista (usos del suelo, geología, etc.), así como recolección de información meteorológica e hidrometeorológica de interés.

El desarrollo del Trabajo, se ha basado en gran medida en la base de datos proporcionados por el experimento RT2B del Proyecto Europeo ENSEMBLE. Se han considerado tres bases de datos diferentes, una histórica y dos procedentes del Proyecto Europeo, para realizar la modelización hidrológica.

Se han contrastado los resultados obtenidos con datos observados para un periodo de control de 1961-1990 con los generados de las proyecciones para 2021-2050. Asimismo, se han contrastado las precipitaciones generadas con los datos observados y los dos RCMs considerados.

Así, se concluye que los resultados que proporciona el modelo hidrológico se encuentran condicionados tanto por los parámetros utilizados durante la etapa de calibración, que pueden ser mejorables, como por datos hidro-meteorológicos de entrada, por lo que se encuentran afectados de un cierto grado de incertidumbre. Como fuentes de incertidumbre, caben mencionar la estimación de la aportación al embalse, así como condicionantes relacionados

con algunos procesos (por ej. infiltración). En lo referente a las medidas de las aportaciones al embalse, cabe indicar que aunque se le supone en régimen no influenciado, se encuentra afectada por dos pequeñas represas que pueden desvirtuar el funcionamiento natural que se le atribuye (si bien con muy escaso volumen). Si bien, se debe enfatizar que la simulación se realiza a escala mensual por lo que los efectos de propagación en el cauce no son importantes. Como inconveniente cabe añadir que el modelo en su versión actual, no tiene en cuenta la intensidad de la precipitación, que es un dato determinante en el cálculo de la infiltración. Se considera por razones operativas, que la precipitación se distribuye uniformemente a lo largo del periodo de tiempo con el que trabaja (un mes), aun cuando ésta se haya producido en pocas horas, por lo que no tiene sentido establecer límites para el parámetro infiltración máxima, que contemple un periodo de tiempo inferior al mes, ni otros aspectos tales como distribución y variabilidad de la intensidad con la que tienen lugar la precipitación a lo largo del mes. Esta forma de proceder puede originar sobreestimaciones de la infiltración, por lo que en sucesivas versiones del modelo se estudiará la introducción de un parámetro que permita considerar el grado de uniformidad (o concentración) de la precipitación en el mes.

Finalmente se concluye que proyecciones obtenidas a partir de diferentes RCMs pueden ser muy divergentes, lo cual implica que los resultados tienen muchas incertidumbres asociadas.

Como futuras líneas de investigación, se plantean:

- el empleo de metodologías de combinación de múltiples RCMs (o ensemble en inglés) para la generación de escenarios climáticos de entrada a los modelos hidrológicos, que permitan aumentar la confiabilidad de las proyecciones;
- El uso de escenarios cambiantes de usos del suelo en combinación con escenarios de cambio climático; y
- el empleo de modelos hidrológicos a otras escalas temporales (por ejemplo diaria).

## 7. Bibliografía

- Álvarez, J.; Sánchez, A. y Quintas, L., 2005. SIMPA, a GRASS Based Tool for Hydrological Studies. *International Journal of Geoinformatics*, Vol.1, No. 1, March 2005. pp. 13-20
- Budyko, M.I., 1948. Evaporation under natural conditions, Gidrometeorizdat, Leningrad, English translation by IPST, Jerusalem.
- Bureau of Reclamation, 2011a. West-wide climate risk assessments: Bias-corrected and spatially downscaled surface water projections. *Tech. Memo.*, 86-68210-2011-01, 138 pp., Tech. Serv. Cent. U.S. Dep. of the Inter., Denver Colo., March.
- Bureau of Reclamation, 2011b. SECURE Water Act Section 9503(c) - Reclamation Climate Change and Water 2011, 226 pp., U.S. Dep. of the Inter., Denver, Colo. April.
- Cabezas Calvo-Rubio, F.; Estrada Lorenzo, F. y Estrela Montreal, T., 1999. Algunas contribuciones técnicas del Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería Civil*, nº 115, pp. 79-96.
- C.H.G., 2010. Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. *Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*.
- C.H.S., 2012. <http://www.chsegura.es/chs/index.html>
- Christensen, J. H., Rummukainen, M., and Lenderink, G., 2009. Formulation of veryhigh - resolution regional climate model ensembles for Europe. In *ENSEMBLES: Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*, edited by: van der Linden, P. and Mitchell, J. F. B., Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 47–58.
- Ducoudré N., Laval K., Perrier, A., 1993. SECHIBA, a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD AGCM. *J. Clim.*, 6, 248-273.
- Elsner, M. M., Cuo, L., Voisin, N., Deems, J. S., Hamlet, A. F., Vano, J. A., Mickelson, K. E., Lee, S., and Lettenmaier, D. P., 2010. Implications of 21st century climate change for the hydrology of Washington State. *Clim. Change*, 102, 225–260.
- Estrela, T., Cabezas F. y Estrada, F., 1999. La evaluación de los recursos hídricos en el *Libro Blanco del Agua* en España. *Ingeniería del Agua*. Vol.6 Num.2, páginas 125-138.
- Estrela, T. y Quintas, L., 1996a. A distributed hydrological model for water resources assessment in large basins. *Proceedings of 1st International Conference on Rivertech 96*. IWRA. Vol 2, pp 861-868. Chicago, USA.

- Estrela, T. y Quintas, L., 1996b. El sistema integrado de modelización precipitación - aportación SIMPA. *Revista de Ingeniería Civil*, n° 104, páginas 43-52. CEDEX - Ministerio de Fomento.
- Ewen, J., Sloan, W.T., Kilsby, C.G., and O'Connell, P.E., 1999. UP Modelling System for large scale hydrology deriving large-scale physically-based parameters for the Arkansas-Red River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3: 125-136
- García Galiano, S.G., 2011. *Toolbox EXTREMES*. Registro de Propiedad Intelectual n° 08/2011/174.
- García Galiano, S. G., Giraldo Osorio, J. D., 2011. Non stationary analysis of spatial patterns of extreme rainfall events in West Africa, In: *Hydro-climatology: variability and change* (Eds. S.W. Franks, E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, K.K. Yilmaz). IAHS-AISH Publication, 344, 75-81. IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom.
- García Galiano, S. G., Giraldo Osorio, J. D., 2012. Assessing uncertainties in the building of ensemble RCMs over Spain based on dry spell lengths probability density functions. *Clim Dyn*. DOI 10.1007/s00382-012-1381-5
- González -Zeas, Garrote, L., Iglesias, A., Sordo-Ward, A., 2012. Improving runoff estimates from regional climate models: a performance analysis in Spain. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 175–214.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- Herrera S, Gutierrez JM, Ancell R, Pons MR, Frias MD, Fernandez J., 2010. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *Int J Climatol*. doi:10.1002/joc.2256.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer H., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K. And Johnson C.A. (Eds.), 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Huntington, T. G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *J. Hydrol.*, 319, 83–95.
- IPCC SRES, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Nakićenović, N., and Swart, R., Ed. Cambridge University Press, ISBN 0-521-80081-1, 978-052180081-5.
- IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley

- (eds.). *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 1-19.
- IGN, 2010. Metodología de producción de la base de datos CLC-CHANGE 2000-2006. *Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*.
- Kilsby, C. G., Tellier, S. S., Fowler, H. J. And Howels, T.R.,2007. Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1175–1189.
- Kirillin, G., et al. 2011. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Env. Modell. Soft.*, in press, doi:10.1016/j.envsoft.2010.12.004
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, I. C ;2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemical Cycles*, 19, Artn Gb1015, Doi 10.1029/2003gb002199.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., D'oll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K. A., Oki, T., Sen, Z., and Shiklomanov, I. A., 2007. Freshwater resources and their management. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., and Hanson, C. E., 173–210, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Labat, D., Godderis, Y., Probst, J. L., and Guyot, J. L., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Adv. Water Resour.*, 27, 631–642.
- LeMoigne, P., 2009a. SURFEX off-line user's guide. MétéoFrance, surfex version v5 edition.
- LeMoigne, P., 2009b. SURFEX Scientific documentation. MétéoFrance, 1 edition.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges, 1994. A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs. *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14,415-14,428.
- Martínez, V., González, M.M., Tanguy, M., Baille, A., 2009. Estimación de series de evapotranspiración potencial a largo plazo a partir de distintos niveles de información. Aplicación en la cuenca del Segura. *Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua*.
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary Layer Meteorology*, vol 94, pp 357-397.
- Murillo, J. M., Navarro, J. A., 2011. Aplicación del modelo de Témez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para

- su implementación en un modelo de uso conjunto *Boletín Geológico y Minero*, 122 (3): 363-388. ISSN: 0366-0176
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- Noilhan, J., and S. Planton, 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.
- Noilhan J. and Mahfouf J.-F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme Global and Planetary Change, 13, 145-159.
- Potenciano A. y Villaverde J.J., 2010. Implementación del modelo hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos con GRASS GIS. Fase superficial y subterránea. *III Jornadas de SIG libre*. Servei de Sistemes D'Informació Geogràfica i Teledetecció. Universitat Girona. <http://www.sigte.udg.es>.
- Quintas, L., 1996. La base de datos hidrológicos "HIDRO" del CEDEX. *Ingeniería Civil*, 104. pp. 117-126.
- Ruiz García, J. M., 1999. Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos. *Monografías Cedex M67*.
- Samani, Z., 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 265-267
- Sánchez, E., Romera, R., Gaertner, M. A., Gallardo, C. and Castro, M., 2009. A weighting proposal for an ensemble of regional climate models over Europe driven by 1961–2000 ERA40 based on monthly precipitation probability density functions. *Atmos. Sci. Lett.*, 10, 241–248.
- Serrano A., García A.J., Mateos V.L., Cancillo M.L. and Garrido J., 1999. Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian Peninsula. *J. Climate*, 12, 2894-2919.
- Témez, J. R., 1977. *Modelo Matemático de transformación "precipitación- escorrentía"*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid. 39 pp.
- Trigo, R. M. and Palutikof, J. P., 2001. Precipitation Scenarios over Iberia: A Comparison between Direct GCM Output and Different Downscaling Techniques. *J. Climate*, 14, 4422-4446.
- Van Dijk, A., Kirby, J., Paydar, Z., Podger, G., Mainuddin, M., Marvanek, S., and Penarancibia, J., 2008. Uncertainty in river modeling across the Murray-Darling Basin. *Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship*

<http://www.clw.csiro.au/publications/waterforahealthycountry/mdbsy/technical/OSurfaceWaterModelUncertainty.pdf>

- Varis, O., Kajander, T., and Lemmela, R., 2004. Climate and water: from climate models to water resources management and viceversa. *Clim. Change*, 66, 321–344.
- Verant, S., Laval, K., Polcher, J., and Castro, M., 2004. Sensitivity of the continental hydrological cycle to the spatial resolution over the Iberian Peninsula. *J. Hydrometeorol.*, 5, 265– 283.
- Vicuna, S. and Dracup, J. A., 2007. The evolution of climate change impact studies on hydrology and water resources in California. *Clim. Change*, 82, 327–350.