



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Camino, Canales y Puertos
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**MODELO HIDROECONÓMICO PARA EL ANÁLISIS DEL
IMPACTO DE CAMBIO CLIMÁTICO. APLICACIÓN A LA
CUENCA DEL RÍO SERPIS**

Presentado por:

Xiomara Lozano Gómez

Dirigida por:

Dr. Manuel Pulido Velázquez

Dr. David Pulido Velázquez

Diciembre de 2010

RESUMEN

La toma de decisiones entorno a la planificación de los recursos hídricos, depende en gran medida de las condiciones climáticas en el área de influencia del sistema y del adecuado manejo en la operación del sistema hidráulico.

Erróneamente hasta el momento se ha asumido que las condiciones climáticas futuras tendrían las mismas características y variabilidad de la condiciones del pasado; por lo tanto, el reto ahora es incorporar en la planificación de los recursos hídricos la incertidumbre del cambio en las condiciones climáticas futuras.

Los escenarios climáticos definidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) de la Organización de las Naciones Unidas, indican que para España la tendencia es una disminución de las precipitaciones anuales y el aumento de las temperaturas en gran parte de la península; ante este panorama se prevé para el futuro una disminución cuantitativa de los recursos hídricos.

En esta tesina se ha desarrollado una metodología sistemática para hacer uso de los resultados de los escenarios de cambio climático generados para Europa en el Proyecto PRUDENCE, con el fin de analizar el cambio en la hidrología de un sistema específico de recursos hídricos y sus repercusiones económicas mediante el empleo de un modelo hidroeconómico. La metodología propuesta requiere del empleo de modelos de simulación de forma secuencial, con el fin de analizar el efecto del cambio climático en un sistema, llevando a cabo la corrección, de la "serie hidrológica original " del sistema, con la variación en las principales estadísticas (media y desviación estándar) estimada a partir de las series del Proyecto PRUDENCE. La aplicación de la metodología desarrollada se ha realizado en la cuenca del Serpis.

Es importante para la evaluación económica de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos, la adecuada selección de escenarios climáticos regionales. Seleccionados los datos de los modelos regionales (en este caso para los Modelos MPI y GKSS) se aplica la metodología de corrección de las distintas variables climáticas en escenario futuro buscando adaptarlas a la zona de estudio, datos que posteriormente son necesarios para calcular las demandas agrícolas futuras de los diversos cultivos y el cambio en las aportaciones.

A continuación, se procede mediante el modelo de gestión de recursos hídricos AQUATOOL a reproducir la gestión del sistema en escenario futuro y evaluar las garantías

y fallos que se producen en las demandas agrícolas establecidas. De esta manera pueden conocerse las repercusiones futuras que tendría la disminución de los recursos hídricos en el sistema de explotación.

Analizados los datos obtenidos se evalúa el coste de escasez en situación de cambio climático en base a las nuevas condiciones que se puedan presentar. Para ello se modifican las funciones económicas para cada una de las Demandas Agrícolas (UDA's) asumiendo los mismos precios de los cultivos que en la situación actual.

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta, han permitido estimar el coste de escasez del recurso en las unidades de demanda agrícolas a consecuencia de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos futuros de la cuenca del Serpis, así como el incremento en los costes de explotación, debido a los bombeos adicionales requeridos para mantener los déficit en las demandas dentro de niveles históricamente razonables.

RESUM

La presa de decisions entorn de la planificació dels recursos hídrics, depén en gran manera de les condicions climàtiques en l'àrea d'influència del sistema i de l'adequat maneig en l'operació del sistema hidràulic.

Erròniament fins el moment s'ha assumit que les condicions climàtiques futures tindrien les mateixes característiques i variabilitat de la condicions del passat; per tant, el repte ara és incorporar en la planificació dels recursos hídrics la incertesa del canvi en les condicions climàtiques futures.

Els escenaris climàtics definits pel Panell Intergovernamental de Canvi Climàtic (IPCC) de l'Organització de les Nacions Unides, indiquen que per a Espanya la tendència és una disminució de les precipitacions anuals i l'augment de les temperatures en gran part de la península; davant d'este panorama es preveu per al futur una disminució quantitativa dels recursos hídrics.

En esta tesina s'ha desenrotllat una metodologia sistemàtica per a fer ús dels resultats dels escenaris de canvi climàtic generats per a Europa en el Projecte PRUDENCE, a fi d'analitzar el canvi en la hidrologia d'un sistema específic de recursos hídrics i les seues repercussions econòmiques per mitjà de l'ocupació d'un model hidroeconómico. La metodologia proposada requerix de l'ocupació de models de simulació de forma seqüencial, a fi d'analitzar l'efecte del canvi climàtic en un sistema, duent a terme la correcció, de la 'serie hidrològica original ' del sistema, amb l'increment en les principals estadístiques (media i desviació estándar) deduïdes para les sèries del Projecte PRUDENCE. L'aplicació de la metodologia desenrotllada s'ha realitzat en la conca del Serpis.

És important per a l'avaluació econòmica dels impactes del canvi climàtic en els sistemes de recursos hídrics, l'adequada selecció d'escenaris climàtics regionals. Seleccionats les dades dels models regionals (en este cas per als Models MPI i GKSS) s'aplica la metodologia de correcció de les distintes variables climàtiques en escenari futur buscant adaptar-les a la zona d'estudi, dades que posteriorment són necessaris per a calcular les demandes agrícoles futures dels diversos cultius i el canvi en les aportacions.

A continuació, es procedix per mitjà del model de gestió de recursos hídrics AQUATOOL a reproduir la gestió del sistema en escenari futur i avaluar les garanties i fallades que es produïxen en les demandes agrícoles establides. D'esta manera poden conèixer-se les

repercussions futures que tindria la disminució dels recursos hídrics en el sistema d'exploració.

Analizados los datos obtenidos se evalúa el coste de escasez en situación de cambio climático en base a las nuevas condiciones que se puedan presentar. Para ello se modifican las funciones económicas para cada una de las Demandas Agrícolas (UDA's) asumiendo los mismos precios de los cultivos que en la situación actual.

Els resultats obtinguts a l'aplicar la metodologia proposada, han permés estimar el cost d'escassetat del recurs en les unitats de demanda agrícoles a conseqüència dels efectes del canvi climàtic en els recursos hídrics futurs de la conca del Serpis.

SUMMARY

Decision-making about water resources depends heavily on the climatic conditions in the basin and a proper management of the hydraulic system.

Wrongly so far it has been assumed that future climatic conditions have the same characteristics and variability of the conditions of the past. Therefore, the challenge now is to incorporate uncertainty in water resources planning for future climate conditions.

The climate scenarios defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) of the United Nations indicate that for Spain the trend is a decrease in annual rainfall and increasing temperatures for most of the Peninsula. According to this scenario, we can expect a quantitative reduction of future water resources.

In this dissertation, a systematic methodology has been developed, making use of the results generated climate change scenarios for Europe in the PRUDENCE project in order to analyze the change in the hydrology of a specific water resource system and the associated economic impacts through the use of a hydro-economic model. The proposed methodology requires the use of simulation models in sequence to analyze the effect of climate change in a system carrying out the correction of the "historical hydrological time series" with the increase in the major statistics (mean and standard deviation) deduced for the PRUDENCE Project future series. The methodology was applied to the basin of Serpis.

The economic assessment of the impacts of climate change on water resource systems requires a proper selection of regional climate scenarios. Selected data from the regional models (in this case for the models MPI and GKSS) applies the methodology of correction of different climatic variables of future scenarios to the study area, data that are then needed to calculate the future agricultural demands of the various crops and the change in hydrological inflows.

Then, the management model AQUATOOL is used to simulate future scenarios and assess the reliability of supply of the future agricultural demands in order to estimate the future impact that the reduction of available water resources would have in the performance of the system.

The resulting outputs are used to assess the scarcity cost for climate change on the new conditions that may arise. For that purpose, the economic functions for each of the

agricultural demand (UDA's) are modifying while assuming the same crop prices that in the current situation.

The results of applying the proposed methodology were used to estimate the scarcity cost in agricultural demand units due to the effects of climate change on future water resources and irrigation demands in the Serpis Basin, as well as the increase in the operation costs, due to the additional pumpings required to maintain the deficits in the demands within historically reasonable levels.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I	1
INTRODUCCIÓN	1
I.1. OBJETIVOS	2
I.2. METODOLOGÍA	3
I.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	3
Capítulo II	5
GESTION DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	5
II.1. SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS.	5
II.2. MODELACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	6
II.2.1 Modelos de simulación (o de causa – efecto).....	8
II.2.2 Modelos de optimización (o prescriptivos).....	9
II.2.3 Herramientas para la modelación de los SRH	9
II.3. OBJETIVOS DE GESTIÓN	11
II.4. SISTEMA SOPORTE A LA DECISIÓN AQUATOOL	12
II.4.1 Descripción de AQUATOOL.....	13
II.5. MODELOS HIDROECONÓMICOS	14
II.5.1 Utilidad del agua	16
II.5.2 El valor del agua.....	17
II.5.3 El coste del agua.....	18
II.5.4 Coste de oportunidad	19
II.5.5 Precio del agua.....	19
II.5.6 Funciones económicas de demanda	20
Capítulo III	24
CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS HÍDRICOS	24
III.1. ESCENARIOS PARA LA PREVISIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	24
III.1.1 Tipos de escenarios para estudios de cambio climático	24
III.2. MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL	28
III.3. MODELOS REGIONALES	29
III.4. SIMULACIONES CLIMÁTICAS REALIZADAS EN EL PROYECTO PRUDENCE	31
III.4.1 Modelos climáticos regionales y globales utilizados en el Proyecto PRUDENCE.....	35
III.5. TÉCNICAS DE REESCALADO (<i>DOWNSCALING</i>)	37
III.5.1 Efectos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos	38
III.6. ESCENARIOS HIDROLÓGICOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA Y EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR	41
Capítulo IV	45
METODOLOGIA PROPUESTA	45
IV.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGIA.....	45
IV.2. SELECCIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS	48
IV.3. TÉCNICA <i>DE REESCALADO</i>	49
IV.4. CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE LOS CULTIVOS	51

IV.5 SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DEL SISTEMA DE RECURSO HÍDRICOS SAD AQUATOOL	55
IV.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	56
Capítulo V.....	59
CASO DE ESTUDIO CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SERPIS.....	59
V.1 AMBITO DE ESTUDIO	59
V.1.1 Hidrografía	61
V.1.2 Recursos y Demandas del Sistema.....	62
V.2 Topología del modelo de simulación de la gestión del río Serpis	67
V.2.1 Río Serpis aguas arriba del embalse de Beniarrés.....	68
V.2.2 Río Serpis Agua Abajo del Embalse de Beniarrés.....	71
Capítulo VI.....	76
APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO.....	76
VI.1 Escenarios Climáticos a escala 50km x 50km en la zona de estudio	77
VI.1.1 Proyecciones futuras en la esorrentía en la celda del área de estudio.	77
VI.1.2 Proyecciones futuras en la temperatura en la celda del área de estudio.....	80
VI.1.3 Proyecciones de Precipitación en la celda del área de estudio.	83
VI.2 Hidrología y climatología en escenario de cambio climático para la Cuenca del río Serpis en el periodo 2071-2100.....	84
VI.3 Cálculo del requerimiento de los cultivos.....	89
VI.4 Simulaciones de gestión del sistema con el SAD AQUATOOL.	95
VI.5 Modelo Hidroeconómico.....	102
VI.5 Coste de escasez: escenario actual vs. Escenarios de cambio climático	103
Capítulo VII	112
CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	112
Capítulo IX.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Desarrollo económico, tecnológico y demográfico de diferentes escenarios que figuran en el informe Especial sobre Escenarios de Emisiones SRES.....	28
Tabla 2. Concentraciones globales medias de CO ₂ (en ppm de C) y de aerosol sulfato SO ₄ (en Tg de S).....	33
Tabla 3. Relación de centros y modelos regionales en el proyecto PRUDENCE, con las configuraciones de la celda y las condiciones de contorno laterales usadas por cada modelo.	34
Tabla 4. Proyecciones regionalizadas basadas en modelos regionales del clima procedentes del proyecto PRUDENCE.	37
Tabla 5. Coste de extracción de agua subterránea cuenca del Serpis.....	57
Tabla 6. Datos Climáticos del Año medio (1940-2005). Estación de Játiva	60
Tabla 7. Datos Climáticos del año medio (1940-2005). Estación Alcoy.....	60
Tabla 8. Principales índices físicos de los cauces más importantes del sistema	62
Tabla 9. Distribución de recursos superficiales y subterráneos.	63
Tabla 10. Infraestructuras en el sistema Serpis.....	64
Tabla 11. Descripción de las masas de agua superficiales categoría río en la cuenca del Serpis.....	65
Tabla 12. Proyecciones de Precipitación mm/mes para el periodo 2071-2100 en base al factor de corrección obtenido para el modelo GKSS para el año medio de las estaciones Alcoy y Játiva.	89
Tabla 13. Proyecciones de Precipitación mm/mes para el periodo 2071-2100 en base al factor de corrección obtenido para el modelo MPI para el año medio de las estaciones Alcoy y Játiva...	89
Tabla 14. Comparación de los valores de la evapotranspiración anual para los diferentes escenarios y los cambios porcentuales con respecto a la situación actual.....	91
Tabla 15. Especificaciones para obtener los requerimientos de agua de los cultivos por medio de Cropwat	91
Tabla 16. Demandas agrícolas netas y brutas para el escenario control (situación actual), para su modelación en el esquema de gestión de la cuenca del río Serpis.	93
Tabla 17. Resultado de las simulaciones realizadas con CROPWAT para los cultivos de alfalfa y cítricos de las Unidades de Demanda Agrícola de la Cuenca del Serpis	94
Tabla 18. Déficits y garantías de las UDAs para la situación actual y escenario futuro GKSS y MPI ..	98
Tabla 19. Bombeo medio (Hm ³) adicional a cada UDA en el periodo de análisis (2071-2100), en escenario futuro GKSS.....	107
Tabla 20. Bombeo medio (Hm ³) adicional a cada UDA en el periodo de análisis (2071-2100), en escenario futuro MPI.	107

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico natural	6
Figura 2. Componentes del Sistema de Soporte de Decisión AQUATOOL	13
Figura 3. Curva de demanda	20
Figura 4. Funciones económicas de demanda, déficit y coste de escasez.....	21
Figura 5. Curva de demanda económica en el regadío.....	21
Figura 6. Ilustración esquemática de los de los escenarios de emisión IPCC.	26
Figura 7. Ejemplo del dominio de aplicación de un MRC sobre Europa con una celda de 50 km.....	30
Figura 8. Proceso secuencial para la determinación de escenarios climáticos de modelos regionales a partir de los escenarios de emisión SER y del MCGA_ HadCM3.	31
Figura 9. Esquema de las simulaciones realizadas en el proyecto PRUDENCE.	34
Figura 10. Variación para España de temperatura máxima, de temperatura mínima y de precipitación para el escenario A2 entre finales del siglo XXI y el período de referencia 1961-1990.	39
Figura 11. Escenarios climáticos HadCM3-PROMES A2 para la temperatura (°C) y la precipitación (mm/año) para el periodo 2071-2100.....	43
Figura 12. Metodología Propuesta.	47
Figura 13. Celda que cubre la cuenca del Serpis para la extracción de datos del Proyecto PRUDENCE. La celdilla tiene un tamaño de 0.5°x0.5° (lat-lon.).....	49
Figura 14. Localización de caso de estudio	59
Figura 15. Masas de Aguas Subterráneas que se adscriben al Sistema de Explotación Serpis	67
Figura 16. Esquema del modelo del río Serpis (Fuente. Mellado Ros,et. al, 2007).....	68
Figura 17. Detalle del modelo del río Serpis aguas arriba del embalse de Beniarrés.	69
Figura 18. Detalle del modelo del río Serpis aguas abajo del embalse de Beniarrés.....	72
Figura 19. Secuencia temporal de escorrentía mm de los Modelos GKSS y MPI en escenario CTL y escenario futuro.....	78
Figura 20. Comparación de la escorrentía media anual de acuerdo a las proyecciones de los modelos GKSS y MPI dentro del marco del Proyecto PRUDENCE para los Escenarios de Control y Escenario futuro.	79
Figura 21. Proyecciones de cambio de la escorrentía (en mm/mes) promediadas para cada año. Los valores (Desviación estándar (tanto por 1)) corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990) de los modelos GKSS y MPI en Escenario de Control y Escenario futuro A2.....	79
Figura 22. Incremento de la Temperatura media en °C de acuerdo las proyecciones dentro del marco del Proyecto PRUDENCE.	80

Figura 23. Proyecciones de cambio de temperatura media diaria en porcentaje, promediadas para cada estación del año, correspondientes a los modelos MPI y GKSS corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990).....	81
Figura 24. Incremento de la Temperatura mínima en °C de acuerdo las proyecciones dentro del marco del Proyecto PRUDENCE.	82
Figura 25. Incremento de la Temperatura máxima en °C de acuerdo las proyecciones dentro del marco del Proyecto PRUDENCE.	82
Figura 26. Variación de la precipitación con el modelo GKSS y MPI respecto a la situación actual en la celda de análisis.....	83
Figura 27. Proyecciones de cambio de temperatura media diaria en porcentaje, promediadas para cada estación del año, correspondientes a los modelos MPI y GKSS corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990).....	84
Figura 28. Comparativo escorrentía secuencial en Hm ³ , para modelos GKSS y MPI del Proyecto PRUDENCE, series modificadas de acuerdo a la metodología planteada.	86
Figura 29. Cambios en porcentaje en las aportaciones en escenario futuro con los dos modelos GKSS y MPI respecto a la serie Histórica.	87
Figura 30. Aportaciones anuales (Hm ³ /año) en escenario histórico y Escenario de cambio climático a partir del modelo GKSS y el modelo MPI.	87
Figura 31. Comparativo de la serie Aportaciones de flujo medio mensual de 30 años de simulación para los modelos GKSS y MPI del Proyecto PRUDENCE	88
Figura 32. Ubicación estaciones climatológicas utilizadas en el caso de estudio.	90
Figura 33. Unidades de Demandas Agrícola del Caso de estudio en la Cuenca del Serpis	92
Figura 34. Volúmenes (Hm ³) anuales embalsado del Embalse Beniarres para los escenarios climáticos considerados.....	96
Figura 35. Reducción mensual en Hm ³ del volumen embalsado en las simulaciones de los modelos GKSS y MPI.....	97
Figura 36. Suministro máximo a la demanda vs. Déficit. En situación actual y escenario futuro de los modelos GKSS y MPI.	99
Figura 37. Curvas de Demanda anuales para los cultivos de cítricos y alfalfa y cítricos en función de su demanda volumétrica Hm ³ /año	103
Figura 38. Curvas de demanda económica UDAs sistema de explotación de la cuenca del Serpis.	104
Figura 39. Curvas de demanda económica UDAs sistema de explotación de la cuenca del Serpis.	105
Figura 40. Coste Escasez anual en situación actual. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.....	106
Figura 41. Coste Escasez anual incluido el coste de los bombeos adicionales en el escenario futuro (2071-2100) del modelo GKSS. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.	108
Figura 42. Coste Escasez anual incluido el coste de los bombeos adicionales en el escenario futuro (2071-2100) del modelo MPI. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.....	109

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es hoy una realidad y uno de los retos más importantes a los que ha de enfrentarse la humanidad en este siglo, por la amenaza que supone, entre otros, para la economía, la salud, los alimentos y la seguridad. Cada vez hay más evidencias científicas de que nos encontramos en un momento crítico, y debemos hacer frente a estas consecuencias negativas del cambio climático. Uno de los elementos esenciales requeridos para poder hacer frente a este desafío es disponer de un conocimiento lo más detallado posible sobre cómo está cambiando el clima, cómo será en los próximos cien años y cómo nos van a afectar estos cambios. Es aquí donde la comunidad científica juega un papel fundamental ya que cualquier formulación de políticas de lucha contra el cambio climático pasa por el conocimiento previo de éstas cuestiones.

En este sentido, el informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IEEE) presentado por el IPCC (2001) reconoce que el calentamiento del sistema climático global es inequívoco y que es “muy probable” que este calentamiento sea debido en su mayor parte a causas antropogénicas. También concluye que los datos disponibles disipan cualquier duda acerca de que el clima está cambiando. Las observaciones muestran un aumento de temperatura en el aire y en el océano, del ritmo de deshielo de los glaciares y capas de hielo y una elevación del nivel del mar.

En el marco de diversos proyectos europeos (PRUDENCE, 2004; ENSEMBLES, 2009) se obtuvieron escenarios climáticos mediante diversos modelos regionales (con resolución espacial de decenas de kms, siendo la más comúnmente utilizada 50×50 km) considerando los escenarios de emisiones que se describen en el IEEE del IPCC. Las estimaciones realizadas con los citados modelos han sido recopilados en bases de datos de libre acceso incluidas en las páginas web de los citados proyectos.

Entre tanto, se ha podido observar que durante los últimos 100 años, la superficie de la Tierra se ha calentado en un promedio de 0,74 °C, y el ritmo de calentamiento se ha acelerado desde la década de 1970. De hecho, los 15 años más cálidos registrados a escala global han tenido lugar durante los pasados 20 años y 11 ocurrieron desde 1995.

Europa se ha calentado en promedio aproximadamente 1 °C en el último siglo, a un ritmo mayor que el promedio global, y España se ha calentado en promedio más que el promedio europeo (entre 1.2 °C y 1.5 °C). Desde 1850 hasta 2003, los promedios anuales de las

temperaturas máximas y mínimas diarias han aumentado, respectivamente, a un ritmo de 0,10°C/década.

A nivel global, los modelos de clima predicen una disminución drástica de escorrentía en la cuenca Mediterránea, siendo éste uno de los lugares del mundo donde se proyectan los impactos más intensos. 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). En España se han realizado múltiples simulaciones, empleando distintas tipologías de modelos hidrológicos acoplados con varios escenarios climáticos, para estimar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en España a lo largo del siglo XXI. Aunque existen diferencias en los resultados, todos coinciden cualitativamente en pronosticar una disminución muy significativa de las aportaciones, siendo el efecto especialmente acusado en las cuencas de la mitad sur peninsular.

Finalmente la adopción de medidas de adaptación al cambio climático en el sector de los recursos hídricos es necesaria y urgente, aplicando el principio de precaución y preparando un proceso de planificación, organización, esfuerzo y eficiencia que resultará muy rentable a largo plazo.

I.1. OBJETIVOS

Esta tesina se plantea con dos objetivos fundamentales:

- Desarrollar una metodología para estudiar los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos, y aplicarla a la cuenca hidrográfica del río Serpis. Se contemplarán los diversos efectos del cambio climático en los recursos hídricos: cambios en las aportaciones hidrológicas, en las dotaciones de riego de los principales cultivos, en la disponibilidad del recurso, y en las demandas netas y brutas que intervengan en la gestión del sistema de explotación de la cuenca.
- Evaluar el impacto económico de la variación en la satisfacción de las demandas debido al cambio climático y el incremento en los costes de explotación requerido para mantener los máximos déficit en las demandas en un nivel admisible para evitar daños irreparables en cultivos que no se siembran nuevamente en cada cosecha (cítricos, etc)

I.2 METODOLOGÍA

La evaluación de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos requiere disponer de datos climáticos base (hidrología actual) y escenarios climáticos futuros. En este caso se parte de las series temporales obtenidas en el Proyecto PRUDENCE para Europa utilizando diversos modelos regionales. Se analizan las demandas agrícolas actuales y en las condiciones estimadas en escenarios de cambio climático para los principales cultivos de la zona de estudio. Mediante el modelo de simulación agronomica CROPWAT de la FAO se valoran los cambios en la necesidad de riego ante condiciones de cambio climático correspondientes a variaciones de Evapotranspiración (ET) y Precipitación. Mediante una técnica de reescalado se calculan los nuevos datos de temperatura, precipitación y aportaciones incorporando el cambio en media y varianza estimado en situación de cambio climático con los modelos regionales seleccionados. A partir de los nuevos requerimientos de agua de los cultivos se calculan las demandas netas y brutas en condiciones de cambio climático.

Analizadas las repercusiones sobre las aportaciones y las demandas del sistema, se procede mediante el modelo SIMGES (de simulación de la gestión de cuencas) del Sistema Soporte a la Decisión AQUATOOL (Andreu et al., 1996) a simular la gestión del sistema y evaluar las garantías y fallos que se producen en las demandas agrícolas. Mediante curvas económicas de demanda podemos evaluar el impacto económico que tendrá la disminución de los recursos hídricos y el aumento en la demanda de riego. También podremos evaluar el incremento en costes de explotación requerido para mantener los déficits máximos en un nivel aceptable. La metodología desarrollada se aplicará a la cuenca del río Serpis.

I.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En el presente trabajo se propone una metodología para estimar de forma sistemática el coste de escasez del recurso esperado para el sistema de explotación de la cuenca del Serpis debido al impacto del cambio climático en el, así como el cambio en los costes de operación necesarios para mantener los déficits máximos en un nivel razonable.

En el capítulo 2 se describen los métodos de simulación y optimización más utilizados para la evaluación de los Sistemas de Recursos Hídricos (SRH), los principales objetivos de gestión, la descripción de sistema de soporte de Decisión AQUATOOL y el uso de los modelos Hidroeconómicos como instrumento para analizar la gestión integrada de los

recursos hídricos. En el capítulo 3 se describen los escenarios de cambio climático planteados por el IPCC y algunos modelos de circulación globales y regionales utilizados en el análisis de impacto del cambio climático, haciendo énfasis en las simulaciones realizadas en el Proyecto PRUDENCE y de los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos.

En el capítulo 4 se describe la metodología que se aplica en esta tesina para la evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos futuros de la cuenca del Serpis, partiendo de la obtención de la información climatológica e hidrológicas, la selección de los escenarios climáticos, el cálculo de las aportaciones futuras, el cálculo de los requerimientos de riego, la utilización del modelo de gestión y la evaluación del coste económico del impacto de cambio climático sobre el sistema de explotación Serpis.

El capítulo 5 está dedicado a la descripción del ámbito territorial de la cuenca hidrográfica donde se aplica la metodología desarrollada y propuesta en esta tesina. En el capítulo 6 se realiza la aplicación de la metodología propuesta al caso de estudio y se muestran los resultados de las estimaciones futuras en los recursos hídricos que corresponden a los cambios en las demandas de riego, las aportaciones anuales y mensuales, los resultados de la gestión del sistema de explotación de la cuenca del Serpis y la evaluación económica del impacto de cambio climático (coste de escasez y costes de explotación). Y, en el capítulo 7 se describen las conclusiones obtenidas y las líneas futuras de investigación.

Capítulo II

GESTION DE LOS RECURSOS HIDRICOS

En tiempos actuales, factores como el aumento de la demanda consuntiva por el crecimiento poblacional y las necesidades de agua cada vez más grande para abastecer el suministro agrícola, así como el desarrollo económico, la mayor preocupación medioambiental, la creciente contaminación de las aguas, las incertidumbres por el impacto del cambio climático sobre los recursos, y la consideración de aspectos como equidad o desarrollo sostenible complican sustancialmente la política del agua y abocan necesariamente a una gestión integral de los recursos hídricos.

II.1 SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS.

El agua es uno de los elementos más comunes de la Tierra; sin embargo, solo una pequeña proporción de esta agua es agua dulce, aprovechable por los seres vivos. Si descontamos el hielo polar, el agua dulce continental es de menos del 1% del total del agua de la Tierra. El agua se mueve en la Tierra siguiendo el ciclo hidrológico (Figura 1). Este ciclo es simple conceptualmente, pero resulta muy complejo cuantificar detalladamente cada uno de los fenómenos que en él se producen (Chow *et al.*, 1988).

Puede definirse un sistema como un conjunto de elementos que interactúan de forma regular. El sistema ha de tener definidos sus límites. También deben definirse las entradas y salidas a través de dicho límite.

Un *Sistema de Recursos Hídricos (SRH)* se define como la parte continental del ciclo hidrológico de una determinada zona, es decir como el conjunto de elementos responsables de transportar el agua desde el lugar de precipitación hasta el mar o la atmósfera. El sistema hídrico geográficamente se compone de las aguas superficiales, subterráneas, lechos de ríos y arroyos, riberas e infraestructura técnica, junto con todas las características y procesos físicos, químicos y biológicos asociados, y el correcto análisis del sistema está condicionado a la comprensión del sistema tanto en su nivel de complejidad como la interdependencia entre los elementos que lo componen. Los límites de estos sistemas hídricos se determinan en base a la coherencia funcional entre los aspectos hidrológicos, morfológicos y ecológicos.

Los vínculos entre la red de aguas superficiales y subterráneas, el transporte, la infraestructura de tratamiento y las áreas de demanda, son representados en un sistema

con unas condiciones ambientales e hidrológicas específicas, restricción institucional y los diferentes niveles de consumo de agua, además, cada representación del sistema es enriquecido con la adición de los beneficios y los costes económicos. El análisis en SRH a menudo puede ser complejo, consumir mucho tiempo en el proceso de análisis y pueden producir resultados ambiguos.

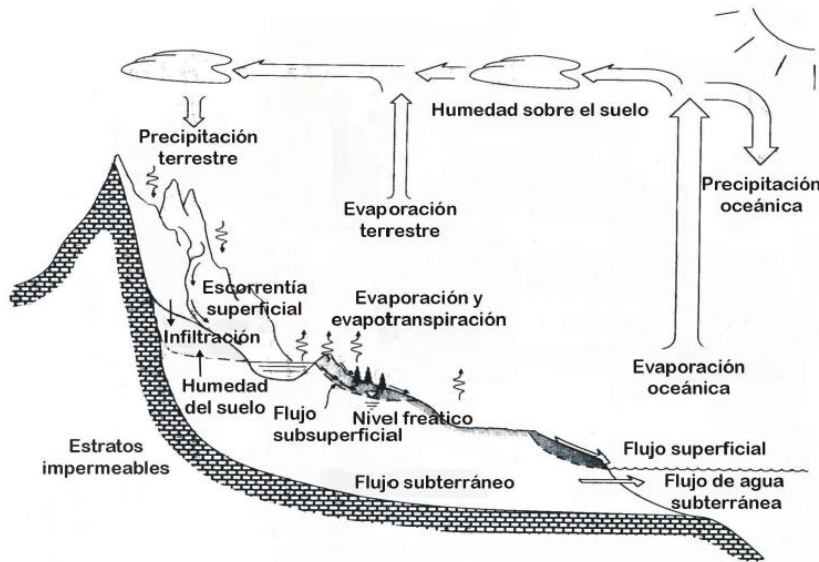


Figura 1. Ciclo hidrológico natural (Chow et al., 1988).

Cuando los SRH son grandes o complejos es difícil comprender su funcionamiento y predecir las consecuencias que producirían un cambio en su gestión, debido a la interdependencia entre numerosos componentes. Para cuantificar la respuesta del sistema la experiencia y la intuición no son suficientes, y entonces se recurre a los modelos, como herramientas que ayudan a responder preguntas relacionadas con la gestión de los SRH.

II.2 MODELACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Un modelo de SRH es una representación conceptual y simplificada de un SRH real, que preserva solo las características esenciales del mismo, y desecha otras que no son tan importantes. De esta definición se desprenden dos cosas fundamentales: que todo modelo tiene simplificaciones respecto de la realidad a representar (o sea que hay aspectos de la realidad que no va a poder reproducir satisfactoriamente) (Buras, 2001), y que un modelo será adecuado siempre que pueda quedarse con la parte medular o fundamental del aspecto a estudiar del sistema. La elección del modelo ha de hacerse teniendo presentes los objetivos de la modelación, y elegir siempre un modelo lo más sencillo posible.

El uso de modelos de SRH es de utilidad cuando:

- Los objetivos del sistema están razonablemente bien definidos, y hay individuos u organizaciones con capacidad de implementar las decisiones.
- Hay muchas decisiones alternativas que satisfacen los objetivos planteados y la solución no es obvia.
- Las soluciones alternativas y los objetivos pueden ser representados matemáticamente.
- Los parámetros del modelo pueden estimarse con razonable precisión a partir de datos y estudios.

La efectiva gestión de las cuencas hidrográficas requiere no sólo de modelado de sistema natural del río, sino también la evaluación del marco legal-administrativo, aspectos institucionales y socio-económicos.

La simulación es quizás el método más utilizado para evaluar los sistemas de recursos hídricos y su uso alternativo. Los métodos de simulación constituyen un medio rápido para evaluar el rendimiento esperado del sistema para cualquier conjunto de diseño y de políticas operacionales.

Los modelos también se pueden clasificar según alguna de sus características (Loucks and van Beek, 2005):

De acuerdo a los casos que pueden resolver:

- A medida: para resolver un único caso particular (consigue una mayor adaptación a las particularidades del mismo).
- Genéricos: para resolver cualquier caso que se configure, cumpliendo ciertas condiciones.

De acuerdo a que permitan discriminación o no entre las partes del sistema:

- Agregados: si las variables y parámetros son homogéneos en todo el sistema.
- Distribuidos: si pueden considerar la variabilidad espacial en el sistema.

De acuerdo a la forma de la función objetivo:

- Lineal: si la función objetivo y las restricciones son lineales.
- No lineal: si las restricciones y/o la función objetivo son no-lineales.

De acuerdo a los valores posibles de las variables:

- Continuos: si pueden tomar cualquier valor dentro del rango permitido.
- Discretos: si pueden tomar valores enteros solamente (programación entera).

De acuerdo a la técnica de optimización utilizada:

- Programación dinámica.
- Programación lineal.
- Programación entera.
- De redes de flujo.
- multiplicadores de Lagrange.
- Programación cuadrática.
- Programación no lineal.

De acuerdo al tratamiento de la incertidumbre:

- Deterministas: si a los parámetros se les asigna un valor fijo.
- Estocásticos o probabilísticos: si los parámetros son considerados como variables aleatorias.

De acuerdo a la representación del tiempo:

- De estado Estacionario o Estático: si no se considera explícitamente el tiempo como una variable.
- Dinámico: sí se considera explícitamente la variable tiempo.

II.2.1 Modelos de simulación (o de causa – efecto)

También llamados de causa-efecto, en los que las reglas de operación se establecen *a priori* y las variables describen un estado del sistema como respuesta a unos datos de entrada del mismo. Su utilidad reside en la posibilidad de efectuar una representación, lo más detallada posible, de la realidad del sistema. Los modelos de simulación permiten efectuar previsiones sobre la respuesta del sistema frente a eventos extremos, como las sequías, o evaluar y comparar la eficiencia de distintas alternativas de gestión del sistema. La búsqueda de una solución óptima de gestión (en términos de infraestructuras o de reglas de operación) se realiza mediante ensayos de prueba y error al modificar los datos de entrada o los parámetros del modelo.

II.2.2 Modelos de optimización (o prescriptivos)

Los modelos de optimización suelen basarse en concepciones más simplificadas del sistema, que los modelos de simulación, debido a la complejidad que representaría tomar en cuenta todas las variables que intervienen en un problema de optimización de un sistema de recursos hídricos, puesto que el coste computacional de los algoritmos de solución de dichos modelos es muy alto, a causa de que el número de variables aumenta exponencialmente al incrementar el periodo de análisis. Algunas simplificaciones habituales, por ejemplo, consiste en no modelar el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Por otra parte, generalmente los modelos de optimización genéricos no permiten hacer modificaciones a la función objetivo o a sus funciones de restricción, por lo que hay que enmarcar el problema a analizar en alguno de los modelos existentes

El enfoque de optimización se diferencia por lo tanto de la simulación en cuanto que el ensayo de prueba y error, que en la simulación permite alcanzar soluciones de gestión más eficientes, se realiza internamente en el proceso de cálculo mediante un algoritmo matemático que utiliza el valor de la función objetivo como indicador de la bondad de la solución (Loucks and Van Beek, 2005).

II.2.3 Herramientas para la modelación de los SRH

El *Hydrological Engineering Center* del U.S Army Corps of Engineers ha desarrollado el modulo HEC-5 y recientemente la versión HEC ResSim para la simulación de sistemas de embalses; asigna el agua a las demandas mediante el balance hídrico de la cuenca, teniendo en cuenta las reglas de operación dadas por el usuario, además, admite la consideración de múltiples propósitos como el abastecimiento de agua, generación hidroeléctrica, la calidad del agua y el impacto económico de los daños por avenidas. Se han desarrollado otros modelos matemáticos de gestión de cuenca, MODSIM (Labadie 1995) es un programa desarrollado en la Universidad Estatal de Colorado, que se basa en un algoritmo de solución de grafos basado en programación lineal (outof-kilter). Las reglas de operación se introducen en forma de curvas, pudiendo definir hasta tres diferentes períodos (seco, medio y húmedo) en función de los volúmenes almacenados y de las aportaciones. Incorpora un procedimiento de entrada interactiva de datos y produce gráficos (USBR, 2000, García, 2007). RIBASIM (*River BASin SIMulation*, Delft Hydarulics 1991) permite evaluar aspectos relacionados con la operación de la infraestructura y manejo de la demanda. Puede también generar patrones de flujo, los cuales proporcionan las bases para análisis detallados de calidad del agua y sedimentación en tramos de ríos y

presas. Forma parte del Sistema Soporte de Decisión Delft, el cual integra una serie de herramientas hidrológicas <http://www.wldelft.nl/soft/ribasim/int/index.html> (citado por García, 2007).

El modelo CALSIM – Water Resources Simulation Model (DWRC, 2000) desarrollado por el California Department of Water Resources con el objetivo de facilitar el desarrollo fácil y rápido de los modelos de simulación para las cuencas del Federal Central Valley Project y el California State Water Project. Se caracteriza por su gran flexibilidad de funcionamiento, permitiendo la introducción de diferentes reglas de operación como restricciones, requisitos de salinidad, etc. Su principal novedad es que implementa un sistema de programación para la ejecución de comandos propios WRESL – Water Resources Simulation Language – que facilita la definición de problemas de programación lineal acordes con las particularidades de cada SRH.

Mike BASIN (DHI, 2006), es una herramienta que integra los recursos superficiales y subterráneos, así como la modelación de la calidad del agua. El concepto matemático de *Mike Basin* es encontrar una solución estacionaria para cada paso de tiempo, puede ser utilizado para encontrar valores “típicos” para la cantidad y la calidad del agua con cambios lentos (ciclos estacionales) de un sistema de recursos hídricos. Para resolver el problema de distribución del agua utiliza dos tipos de reglas de prioridad, local y global. Las reglas de prioridad locales implican que el problema de asignación siempre será resuelto para los nodos vecinos que estén conectados directamente. La prioridad global es implementada por una serie de reglas, se pueden definir diferentes tipos de reglas. Éstas afectan como mínimo al nodo en cuestión y de ser posible un segundo nodo, el punto de extracción del primero. Múltiples reglas pueden ser asociadas con un solo usuario, no necesariamente con un rango consecutivo de prioridades. Las reglas de operación son curvas de reserva introducidas por el usuario. (Villalobos, 2003; García, 2007).

SimWin es un módulo de simulación detallado de la gestión de un sistema de recursos hídricos (cuena o subcuena), con paso de tiempo mensual, integrado en el Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) AQUATOOL (Andreu, J *et al.*, 1996). El usuario define los elementos que componen el sistema a representar, la vinculación de los elementos, las características de cada elemento y sus reglas de operación. Los elementos que admite el módulo son: nudos con o sin almacenamiento, conducciones de distinto tipo, centrales hidroeléctricas, demandas, acuíferos, aportaciones, indicadores de alarma, etc. El sistema

optimiza mes a mes las decisiones, representando la relación entre el agua superficial y el agua subterránea (uso conjunto).

RiverWare (Zagona, 2001), es un entorno desarrollado de SSD para la simulación y optimización de la gestión de sistemas de embalses para múltiples objetivos, básicamente objetivos económicos y de producción de energía hidroeléctrica. Incluye la definición interactiva de la red de distribución y que puede ser usado para la gestión a corto y medio plazo. Permite la simulación a escala temporal horaria y está pensado para su uso en tiempo real. Permite la definición de reglas de operación de muy diversos tipos aunque están han de ser introducidas mediante parámetros para su linearización (lo que en si ya es una limitación importante). Fue desarrollado por la universidad de Colorado para el Tennessee Valley Authority y el Electric Power and Research Institute. Este modelo es utilizado en combinación con modelos de simulación de procesos de precipitación-escorrentía, de gestión de bases de datos hidrológicas y GIS.

II.3 OBJETIVOS DE GESTIÓN

Como la mayoría de los países reconocen la propiedad pública del agua (al menos de la superficial); se plantean unos objetivos primarios a conseguir que deben ser definidos por la sociedad mediante sus representantes. Definir los objetivos planificación hídrica es previo a la modelación de un SRH, y requiere hacerse algunas preguntas como: ¿a quién pertenece el agua?, ¿quién y cómo tienen derecho de usarla?, ¿cómo conciliar desarrollo económico y protección ambiental?, entre otras, que conlleven a una planificación integral y sostenible del recurso.

Se debe tener en cuenta que la sociedad no es monolítica, sino que se compone de personas con visiones distintas, por tanto como lo expone Loucks et al. (1981), "La planificación de recursos hídricos debe tener en cuenta a múltiples usuarios, múltiples propósitos y múltiples objetivos. Diferentes personas tienen diferentes metas, perspectivas y valores. Los problemas de equidad, riesgo, distribución de la riqueza nacional, calidad ambiental, y bienestar social son tan importantes como la eficiencia económica. Es claramente imposible desarrollar un único objetivo que satisfaga todos los intereses, a todas las personas con intereses contrapuestos, y a todos los puntos de vista sociales y políticos."

A pesar de la imposibilidad de satisfacer a todos, la sociedad ha de establecer unos pocos objetivos que contemplen los intereses de las distintas partes involucradas en la gestión

del agua. También es pertinente tener en cuenta que los objetivos (de las personas, y por tanto del conjunto social) cambian con el tiempo; situaciones que fueron aceptables en el pasado puede que sean hoy inaceptables.

Tradicionalmente se buscaba satisfacer un único objetivo: minimizar los fallos en el suministro, atender las demandas a mínimo costo, o maximizar el beneficio económico. Estos indicadores son relativamente objetivos y fácilmente comparables.

En los últimas décadas, los deseos de la sociedad por gestionar el agua de forma más integral y humana ha llevado a incorporar a objetivos no económicos de la gestión, otros como la sostenibilidad, como la preservación de especies, el principio de precaución en aspectos de contaminación, la integración social, etc.

Ante la existencia de objetivos múltiples en la gestión del agua, se han propuesto dos alternativas básicas de trabajo:

- a. Si se desarrollan modelos multiobjetivo para la toma de decisiones, el indicador de eficiencia económica para las distintas alternativas combinado con indicadores ambientales y sociales permitirá seleccionar la alternativa más conveniente (Loucks and van Beek, 2005).
- b. La incorporación de los objetivos sociales y ambientales dentro de un modelo económico, valorando convenientemente los usos de agua que contribuyen a la consecución de estos otros objetivos o introduciendo restricciones para salvaguardar ciertos valores mínimos de éstos, establecidos a priori. Los objetivos de calidad ambiental y de sostenibilidad del recurso mejoraran automáticamente si se incorporaran las externalidades que provocan los distintos usos sobre el resto de los usuarios de la cuenca (Collazos, 2004)

II.4 SISTEMA SOPORTE A LA DECISIÓN AQUATOOL

El desarrollo del entorno AQUATOOL se remonta a 1982, en que el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, desarrollo el modulo USOCON de simulación de la gestión de una cuenca (Andreu y Marco, 1983; Solera, 2003). Este modulo permitía la definición de demandas urbanas, industriales, agrícolas o hidroeléctricas, embalses, acuíferos y tramos de rio con filtraciones o con conexión hidráulica a acuíferos.

AQUATOOL (Andreu et al., 1996) es un entorno de desarrollo de SSD que incluye herramientas de simulación y optimización de la gestión de cuencas, de análisis de la gestión de aguas subterráneas, e interfaces graficas de usuario para la definición y edición de datos y el análisis de resultados.

II.4.1 Descripción de AQUATOOL.

El entorno de desarrollo o Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL, es un sistema para la modelación de la gestión y planificación de sistemas de recursos hídricos. El paquete, denominado AQUATOOL, incluye básicamente un modulo de optimización de cuencas, un modulo de simulación de cuencas, un modulo de simulación de acuíferos y un modulo de utilidades (figura 2). El sistema no es específico para una cuenca determinada sino que está previsto para un uso general puesto que permite la representación de diferentes configuraciones de sistemas de recursos hidráulicos mediante el diseño grafico y al entrada grafica de datos. En los últimos años se han desarrollado prost-procesadores de los módulos principales entre los que se encuentran: un módulo de evaluación y optimización económicas y un módulo que permite la simulación de la calidad en todo el sistema (Paredes, 2004).

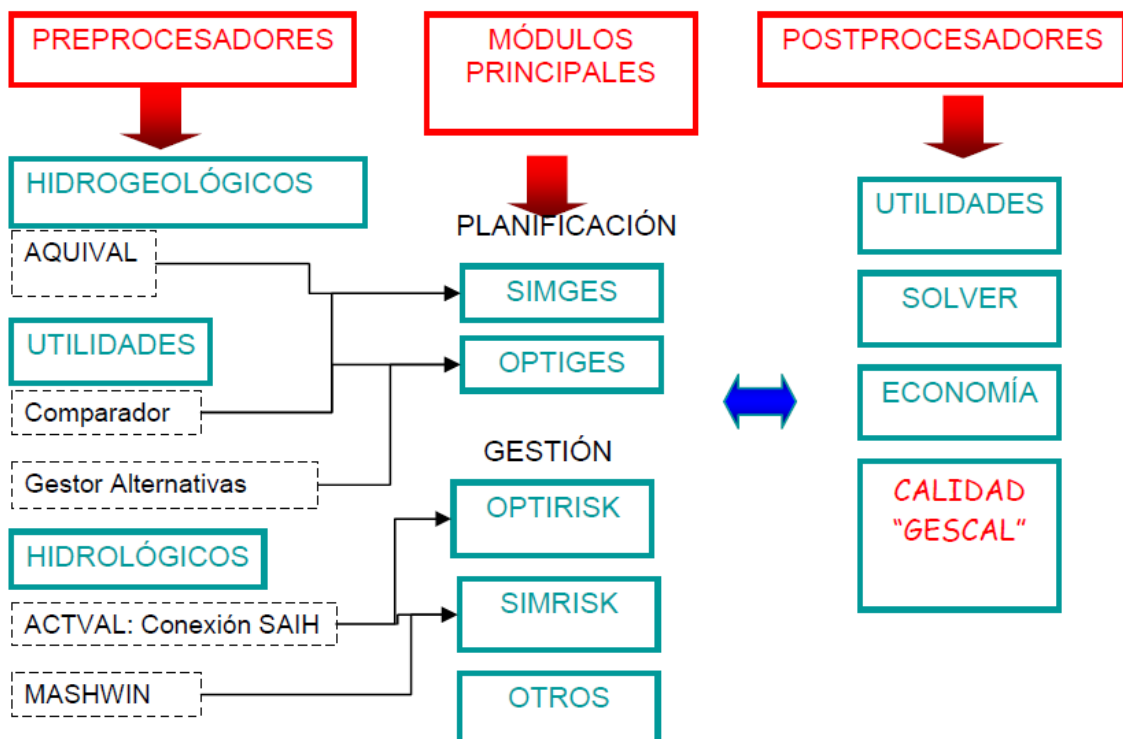


Figura 2. Componentes del Sistema de Soporte de Decisión AQUATOOL (Paredes, 2004)

Los principales módulos son OPTIGES Y SIMGES. El módulo OPTIGES permite la resolución generalizada del problema de la asignación del agua en sistemas mediante la generación de una red de flujo y el uso de algoritmos de programación lineal para el cálculo de la asignación óptima de recursos. Es módulo realiza la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo. Esto, junto con el análisis de los resultados, permite la deducción de reglas de operación óptimas para sistemas complejos de recursos hídricos. OPTIGES ha sido aplicado en diferentes casos como el río Ebro, los ríos Eugui, Estella y Guindano en Navarra. El módulo SIMGES de simulación incluye la optimización de una red de flujo conservativa que, a diferencia del modelo de optimización, se formula para resolver la gestión en un solo mes. Otra diferencia fundamental entre el módulo de simulación y el de optimización es que el módulo de simulación requiere la definición de las reglas de operación del sistema. El módulo SIMGES se incluye también la formulación del modelo de simulación de acuíferos por el método de autovalores. Las reglas incluidas son de los siguientes tipos:

- Curvas objetivo de volumen y zonas de embalses.
- Relación interembalses.
- Caudales mínimos objetivos por canales.
- Suministros objetivos
- Caudales objetivo de turbinado para aprovechamiento hidroeléctricos.
- Relaciones entre demandas
- Relaciones entre canales
- Relaciones entre elementos: bombeos, recargas artificiales.

II.5 MODELOS HIDROECONÓMICOS

La Directiva Marco europea del Agua (DMA) establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, requiriendo identificación, valoración y análisis coste-eficacia de las medidas para lograr el buen estado ecológico de las aguas de la manera más eficiente. Una de las principales novedades que introduce la DMA reside en que para lograr los objetivos de calidad se propone la aplicación de principios (ej. quien contamina, paga) metodologías, herramientas (ej. análisis costes-eficiencia) e instrumentos económicos (ej. poner precio al agua). La Directiva exige a los países miembros un Análisis Económico del Uso del Agua para cada Demarcación Hidrográfica (art. 5 y Anexo III, DMA), con información a partir de la cual se puede aplicar “*principio de recuperación*

de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los relativos a los recursos” (art. 9, DMA).

Los conceptos de economía y las herramientas ingeniería han sido ampliamente utilizados para analizar problemas e identificar prometedoras estrategias para la gestión de los recursos hídricos en una amplia gama de dominios, incluyendo asignación del recurso entre los usuarios, expansión de la capacidad de la infraestructura, calidad del agua, mitigación de los efectos de la sequía, control de inundaciones y la conservación de los ecosistemas acuáticos (Pulido-Velázquez, *et al*, 2008)

Desde las primeras aplicaciones para el análisis de sistemas de gestión de los recursos hídricos, han sido utilizados los objetivos económicos y las restricciones en modelos de sistemas reales. Desde 1962 (Maass et al, 1962) los sistemas de recursos hídricos han sido modelados como una red de nodos de almacenamiento de información y el empalme de nodos unidos por medio de conexiones que representan la extensión del río, canales, tuberías, etc. El uso del agua y la ubicación del análisis del coste también son representados como conexiones. Se hace necesario realizar una integración de las variables hidrológicas y económicas a nivel de cuenca, mediante una discretización espacial y temporal del flujo de agua que incluya las demandas de agua, los usos no consuntivos y medioambientales, costes y beneficios de los servicios, reglas institucionales y los incentivos económicos por parte de la administración (Deidda, 2009).

Los modelos hidroeconómicos han surgido como un instrumento para llevar a cabo la gestión del agua integrada de los recursos hídricos, la idea es llevar a la práctica conceptos económicos mediante su inclusión en los modelos de gestión de recursos hídricos. Los modelos hidroeconómicos representan aspectos de los SRH a escala regional como la hidrología, la infraestructura y aspectos económicos dentro un marco de coherencia.

Tradicionalmente en ingeniería, se han evaluado los costos de la infraestructura, operación y mantenimiento del suministro del agua, transporte, almacenamiento, alcantarillado, drenaje y los requerimientos en el tratamiento del agua. En los modelos no económicos se han representado comúnmente los requerimientos del flujo de agua o el reparto del mismo como objetivos básicos. La ingeniería se ha basado en una visión estática de las demandas de agua que conducen a excesos en el diseño de infraestructura, generación de residuos y una lenta adaptación a nuevas condiciones. La economía ayuda a los gerentes de agua a cambiar la visión estática de la gestión de las demanda de agua,

definida a través de derechos de agua, prioridades, proyecciones del crecimiento demográfico y agrícola e industrial del agua por una gestión de la demanda relacionada con el concepto económico de *valor* (Harou, *et al*, 2009).

En los modelos hidroeconómicos la asignación del agua es evaluada o impulsada por los valores económicos generados. Los modelos hidroeconómicos representan una mayor distribución espacial del sistema y la infraestructura del sistema. Esta representación incluye balances de agua como: flujos superficiales, evaporación desde las superficies de los cuerpos de agua, recarga y descarga natural de los acuíferos y los retornos al sistema. Con relación a la modelación de la infraestructura y operación del suministro de agua incluye, los canales, embalses, plantas desaladoras, plantas de tratamiento de agua, sistemas de bombeo de aguas subterráneas, en conclusión todo los componente del sistema.

Desde el punto de vista económico los usos de agua pueden analizarse atendiendo a los parámetros de utilidad, valor, coste y precio del agua.

II.5.1 Utilidad del agua

El agua es vital para la vida en la tierra, por ello es que sus usos están directamente relacionadas con todo aquello que enriquezca y beneficie el desarrollo del ser humano y el medio ambiente que le rodea.

La primera utilidad que el hombre le dio al agua fue la del abastecimiento para satisfacer su necesidad primaria: la sed. De ahí que, al formarse las grandes comunidades, siempre ha surgido la necesidad de abastecer de agua a los pobladores de dichas sociedades. Fue entonces que el hombre empezó a desarrollar sistemas físicos que le permitiesen conducir el agua y, de esa manera, satisfacer las demandas del recursos de manera más eficaz (Álvarez, *et al* 2007).

Una segunda utilidad del agua que se ha dado en el devenir del desarrollo del hombre: la agricultura. Constituye un elemento biológico prioritario para el desarrollo y crecimiento de la flora y de la fauna.

Han surgido nuevos usos del agua, conforme que se han desarrollado las sociedades. Por tanto, al aprovechar las propiedades químicas y físicas del agua, el hombre ha podido utilizarla en procesos del tipo industrial, los cuales proporcionan al hombre bienestar y seguridad.

Cuando el hombre ha sido capaz de producir bienes para su propia satisfacción, los pone a disposición de la sociedad y los empieza a comercializar. Surge el uso comercial del agua.

II.5.2 El valor del agua

El agua para el consumo ha tenido siempre las características económicas de utilidad y valor, conceptos ambos sutiles y difíciles de cuantificar en términos monetarios.

Desde el punto de vista de que el agua es un recurso indispensable para la vida y el desarrollo de la actividad humana en la Tierra, el agua tiene un valor intrínseco que es difícil de calcular en términos monetarios, dado que se asume que es un bien de utilidad pública.

Existen dos vertientes principales de valoración del recurso hídrico tomando en cuenta su origen; por un lado, la valoración intrínseca, y por otro, una valoración antropocéntrica. El agua posee valor por el hecho de existir y por lo tanto su valor se puede ver desde un tipo de ética ambiental antropocéntrica o ética ambiental extendida que incluya los valores de uso, de opción y de existencia (Triana, 2004).

Un factor importante en la valoración del recurso hídrico tiene que ver con la escasez relativa del recurso. Un grupo social en donde la disponibilidad y el acceso de agua fuesen ilimitadas, el concepto de *valor de agua* carecería de sentido; sin embargo, si ese mismo grupo social tuviera dificultades de diferentes índole en cuanto a disponibilidad y acceso el recurso hídrico, el concepto de valor del recurso si tendría mucho más sentido (Álvarez, 2007).

La valoración económica del agua tiene en cuenta cuatro aspectos en su integración: el valor que los usuarios otorgan al agua (disponibilidad de pago), los beneficios por retornos del recurso (recargas y disponibilidad aguas abajo) los beneficios indirectos de los usos del agua; y los ajustes necesarios para beneficios sociales. Por tanto para que el agua tenga un valor económico tiene que ser considerada como un *bien económico*. A pesar del que el agua es un bien económico, tiene características que lo hace diferente a otros bienes económicos. Características que indican que el agua es: esencial, escasa y finita, forma sistemas, voluminosa, no sustituible, comercializable, compleja. En forma individual o combinada, esas características implican que en la asignación y uso del agua se tendrán que tomar en cuenta una serie compleja de intereses económicos.

A diferencia de los usos para consumo humano, el uso agrario del agua se emplea como bien intermedio o factor de producción, por lo que el valor del agua de riego, y por tanto, la demanda que de ella hagan los agricultores, deriva de su contribución para la obtención del valor de la producción agrícola.

Calcular el valor del agua en un uso determinado supone obtener el valor del beneficio marginal del agua en dicho uso. El beneficio marginal equivale a la cantidad máxima que el usuario estaría dispuesto a pagar por el agua (su disposición al pago), lo que da una medida de su demanda (Garrido, *et al* 2004).

Se distinguen diferentes métodos de valoración del agua de riego como son (Young, 2005):

- Método residual y sus variantes.
- Métodos basados en funciones de producción.
- Uso de modelación econométrica.
- Modelación de la producción mediante programación matemática
- Métodos de valoración contingente
- Método de precios hedónicos
- Método del costo alternativo

II.5.3 El coste del agua

El coste del recurso generalmente se asocia con el *coste de oportunidad* o beneficio neto al que se renuncia cuando un recurso escaso es asignado a un uso en lugar a otros posibles. Es coste del recurso surge de una asignación económicamente ineficiente del mismo (en cantidad y/o calidad) en el tiempo y entre diferentes usuarios: se produce cuando usos del agua alternativos generan un valor económico mayor que el uso presente o previsto para el futuro (Pulido-Velázquez, 2003). El suministro de agua para riego supone el uso de un gran volumen y, por general, de bajo valor añadido. El uso de agua para riego asume un coste con frecuencia modesto, pero al competir con el abastecimiento de agua urbana el coste de oportunidad es alto. Aunque los requerimientos de agua son grandes, el coste de oportunidad es con frecuencia sobreestimado, debido a las fluctuaciones temporales del agua de riego (en ocasiones importantes) y a que la garantía de suministro requerida para el riego es mucho más baja que para el suministro urbano (Briscoe, 1996).

II.5.4 Coste de oportunidad

Consiste en valorar el agua en función de los usos alternativos de la misma. Por ejemplo valorar los bienes sin mercado, como la preservación del medio ambiente, mediante los beneficios perdidos al no usar ese recurso en otros usos consuntivos. Así se obtiene al menos una cota inferior del valor del recurso (Pulido-Velázquez, 2003; Collazos, 2004).

II.5.5 Precio del agua

El concepto de **precio del agua** ha de entenderse, en un contexto de mercados, formales o informales, como la compensación monetaria asociada a un intercambio de agua (valor de intercambio del agua) (Garrido, et al 2004).

En general, no deben confundirse tarifas con precios. Un precio es el derivado de un intercambio entre un comprador y un vendedor. Sin embargo, una tarifa es un precio público y es establecido por una institución, pública o privada, que presta un servicio. En sentido estricto, no debe emplearse la palabra 'precio' para referir lo que paga el regante por emplear el agua. En todo caso, la literatura habla de 'precios administrados' refiriéndose más bien a las tasas, tarifas, cánones o exacciones que han de sufragarse para poder ejercer el derecho de uso del agua.

Por lo tanto, para un agricultor existirán dos costos financieros derivados del uso del agua: el costo de aplicación del agua y la tarifa o precio institucional o administrado del agua.

Cuando se dice que el precio del agua es de una cierta cantidad, en general se está considerando el costo del servicio de entregar el agua desde una fuente de abastecimiento hasta donde se utilizará. Esto implica, en la mayoría de los casos, que debería haber una infraestructura para la captación y conducción del agua. El costo de la infraestructura generalmente tiene que amortizarse, pero además se requiere mantener en buen estado la infraestructura y pagar al personal que la operará, lo cual desde luego implica un costo.

Del análisis mediante programación matemática del efecto de distintos sistemas tarifarios (variable, fijo por hectárea, binomio, variable por tramos y con bonificaciones) sobre la demanda, las rentas de los agricultores de varias zonas de regables realizado por Sumpsi, *et al* (1998), se derivan una serie de curvas de demanda para una cada comunidad de regantes. En su mayoría presentan un primer tramo inelástico, y por tanto solo se produciría ahorro de agua para tarifas más elevadas (10-30 pst/m³, o 0.06-0.18 €/m³), donde haya cierta elasticidad, lo que podría conllevar pérdidas significativas de renta

agraria (15-50%), dificultades en la aplicación de los requerimientos de la reforma de la Política Agrícola Común, y problemas sociales por extensión o desafección del regadío. Obtienen que la respuesta de los agricultores va a venir fuertemente condicionada por otros factores independientes del precio del agua y el sistema tarifario, como factores estructurales de la explotación agrícola (tamaño de la explotación, diversidad de cultivos, etc.), condiciones agronómicas y climáticas, y restricciones financieras. Desde el punto de vista de recuperación de costes señalan que el mejor sistema tarifario es el fijo por hectárea según cultivo, pues tienes las ventajas del fijo (sencillo, bajo coste de aplicación, alto poder recaudatorio), pero las correcciones según cultivo suponen un cierto incentivo al ahorro en el consumo.

II.5.6 Funciones económicas de demanda

Curva de demanda es la relación entre el agua suministrada y su valor marginal a nivel mensual o anual. Esta curva (Figura 3) describe el comportamiento de los consumidores (reales y potenciales) ante variaciones en el precio del bien en cuestión. Esta curva es descendente puesto que si el precio baja, se demanda una cantidad mayor.

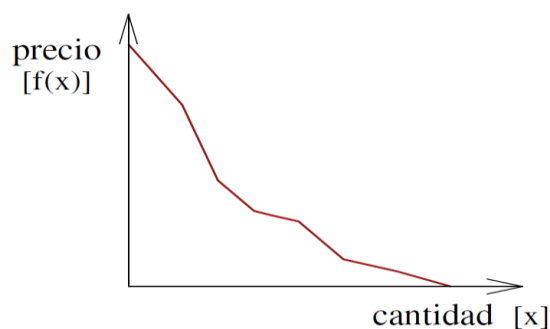


Figura 3. Curva de demanda

Es importante distinguir entre cantidad demandada y cantidad consumida realmente. La cantidad demandada depende únicamente de los consumidores (de sus gustos, ideas, intereses, etc.) mientras que la cantidad consumida depende de la interrelación de la demanda y la oferta.

Los factores que influyen en la cantidad demandada de un bien (el agua) son: el precio, el cual es el factor más importante, el precio de los bienes relacionados (sustitutos o complementarios); por ejemplo el precio de la tierra apta para regadío, la renta de los consumidores (especialmente en el uso doméstico puertas afuera), los gustos de los consumidores y los precios (o la escasez) esperados para el futuro.

Como el factor que más influencia tiene es el precio, la curva de demanda suele trazarse en función del precio, suponiendo que los restantes factores listados (o factores subyacentes) no se modifican. Esto es una simplificación práctica, pero hay que tener en mente que cambios en estos factores hacen cambiar también la curva de demanda.

La función que proporciona el beneficio para un volumen de agua disponible es igual al área bajo la curva de demanda hasta el nivel de suministro, y equivale a la disposición total a pagar por esa cantidad de agua. Integrando desde un nivel genérico de agua disponible hasta el nivel de suministro máximo se obtiene la expresión del coste económico de escasez versus nivel de suministro (figura 4).

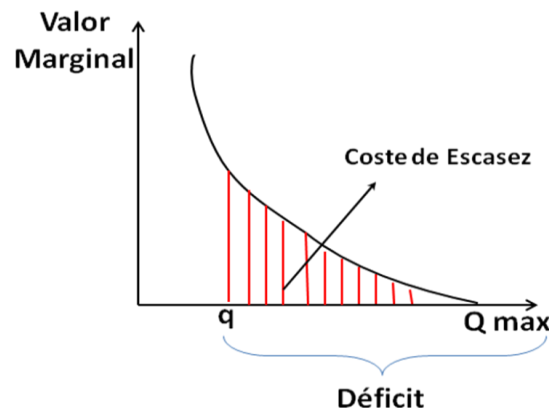


Figura 4. Funciones económicas de demanda, déficit y coste de escasez

Los cálculos de la demanda de agua para riego se basan en la evaluación de valor del agua para regantes bajo condiciones de escasez. El valor marginal del agua se define como la máxima cantidad de dinero que el regante está dispuesto a pagar por el uso de una unidad adicional de recurso.

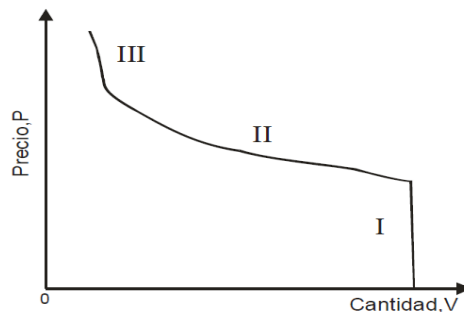


Figura 5. Curva de demanda económica en el regadío (Álvarez, 2007)

La curva de demanda de riego tiene tres tramos (figura 5): un tramo inelástico inicial (I), en el que el regante responde al cambio de precio, manteniendo cultivos y niveles de riego a costa de su renta, un tramo elástico intermedio (II), en el que el regante reduce los consumos, cambiando a cultivos de menor consumo o incluso de secano, y un último tramo final inelástico (III), en el que el nivel de precios obliga a la reducción de cultivos y al abandono hace secano, hasta el extremo de dejar de regar si el coste marginal del riego supera al valor marginal de agua aplicada.

El agua necesaria para riego es determinada por la demanda, teniendo en cuenta que el agua como aporte al proceso productivo. La información sobre la productividad de los cultivos puede ser usada para determinar las funciones de producción con relación a la cantidad de agua aplicada, de la que la producto marginal (primera derivada parcial de la función de producción con respecto a la entrada de agua) puede ser determinada para diferentes suministros de agua. Finalmente el valor marginal (curva de demanda) se puede obtener multiplicando la productividad marginal por el precio de la cosecha (Harou; *et al*, 2009).

Mientras que el precio de coste del agua (natural y regenerada), puede ser considerado como un valor mínimo en el sentido de que debería ser el precio fijado para el agricultor en un entorno de neutralidad (sin subvenciones) y sin ningún beneficio empresarial, se pueden asignar otros valores al agua cuyo sentido es el de valor máximo. Efectivamente, este es el caso del valor obtenido como coste marginal, que puede ser considerado como un valor máximo dado que representa el desembolso máximo que puede realizar la empresa agraria sin que le genere pérdidas (Caballer *et al* 1998).

La mayoría de los modelos hidroeconómicos comparten componentes básicos, como los flujos hidrológicos, la gestión de infraestructura, funciones económicas, demandas de agua, gastos de explotación y normas de funcionamiento. Desde Maass *et al.* (1962), los sistemas de recursos hídricos han sido modeladas como redes de almacenamiento y nodos unidos por medio de vínculos de conducción, que representa el flujo de ríos, canales, tuberías, etc., demandas de agua y el consumo, entre otras características. El formato de la red es sencillo, eficiente y parsimonioso tanto para la simulación como para los modelos de optimización. Los flujos de entrada o salidas pueden ocurrir en cualquier punto de la red.

El uso de modelos Hidroeconómicos de simulación y optimización permiten obtener dos variantes complementarias de la estimación de los costes de oportunidad definidor. Si se considera como función objetivo el beneficio económico de los costes de oportunidad definidos. Si se considera como función objetivo el beneficio económico neto agregado en la asignación del agua en el sistema, el modelo de optimización permite valorar el Coste Marginal de Oportunidad del Recurso (CMOR, en adelante) mediante el análisis de los precios sombra o valores duales. Estos valores corresponden a una asignación económica óptima del agua en una situación de mercado perfecto (Pulido-Velázquez, 2003).

Un modelo de simulación asume que el sistema es gestionado de acuerdo con unas reglas a priori. El CMOR puede ser estimado como la variación de beneficios que ocurriría si hubiera una unidad menos de recurso en un punto e instante determinados. Mientras que el modelo de optimización proporciona una valoración normativa que constituye un techo ideal o valor máximo para el coste de oportunidad, el de simulación permite una valoración positiva correspondiente a la gestión del sistema mediante reglas predefinidas, por ejemplo prioridades legales en la asignación del recurso, permitiendo reproducir el modus operandi del sistema (Pulido-Velazquez, 2003; Pulido-Velazquez *et al.*, 2007).

El enfoque de simulación es conceptualmente sencillo, computacionalmente más simple, y consigue resultados aproximados a los que se obtienen mediante optimización. La metodología parte de la puesta a punto de un modelo de simulación de la gestión de la cuenca en el que estén caracterizadas todas las componentes relevantes (recursos superficiales y subterráneos, infraestructura, demandas, etc.) y que permita una representación razonable de distintas políticas de gestión.

Se asocian funciones económicas a los distintos elementos modelados, que representa el coste/beneficio unitario para el sistema de los distintos niveles de flujo o suministro a cada elemento. Se comparan los resultados económicos para el caso base, que representa la asignación actual, y el escenario considerado.

Capítulo III

CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS HÍDRICOS

La gestión de sistemas de recursos hídricos en Europa está condicionada por el contexto legal introducido por la Directiva Marco Europea del Agua (DMA, 2000). El objetivo de la DMA es lograr un buen estado de las masas de agua, racionalizando la gestión a **escala de cuenca**. En el actual contexto de creciente escasez y competencia de usos, examinar las políticas de distribución de los recursos hídricos a escala de cuenca, incluyendo el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, permite una mejor definición de las estrategias de **gestión integral** de los recursos promovidas por la DMA (Foster, 2005). En este proyecto se pretende desarrollar metodologías y herramientas para analizar la gestión integral de sistemas de recursos hídricos frente a situaciones futuras esperables de acuerdo con las predicciones de cambio climático y en consonancia con la filosofía de gestión integral impulsada por la DMA, usando resultados de modelos hidroeconómicos que permitan aproximar diferentes alternativas de gestión conjunta. El conocer el posible impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos tiene una alta importancia estratégica tanto para la propia planificación hidrológica como por su papel director en muchos otros sectores y sistemas (PNACC, 2006).

III.1 ESCENARIOS PARA LA PREVISIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Un escenario se define como una representación plausible de una variable o conjunto de variables en el futuro (población mundial, actividad industrial, emisión de CO₂, nivel medio del mar, temperatura, precipitación, etc.), que puede ser construida sobre la base de diferentes supuestos o de evoluciones históricas en el pasado.

Debido a que existen numerosas incertidumbres relacionadas con múltiples factores que regulan el comportamiento del sistema climático, no es recomendable utilizar un escenario climático como si fuera una predicción meteorológica a corto plazo. Ante esta situación, es aconsejable representar el clima futuro utilizando una gama de proyecciones que cubran el amplio espectro de incertidumbres.

III.1.1 Tipos de escenarios para estudios de cambio climático

Se han desarrollado diferentes tipos de escenarios que se utilizan para estudios de cambio climático según sea el área de interés en la aplicabilidad de los mismos. Estos escenarios

describen los futuros cambios **socioeconómicos, de uso de la tierra y ambientales** para caracterizar la sensibilidad de los sistemas al cambio climático. A continuación se da una descripción detallada de cada uno de estos escenarios (IPCC 2001a).

- **Escenarios socio-económicos.**

En la mayoría de los escenarios socioeconómicos se identifican varios temas o campos diferentes, como la población o la actividad económica, así como factores de fondo, como la estructura de gobierno, los valores sociales, y las pautas del cambio tecnológico. Los escenarios permiten establecer la vulnerabilidad socioeconómica de referencia (anterior a un posible cambio climático). Los escenarios socioeconómicos han sido utilizados principalmente para proyectar las emisiones de gases efecto invernadero (con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad y la capacidad de los sistemas socioeconómicos) más que para evaluar los efectos del clima futuro sobre estos sistemas.

- **Escenarios de cambio en el uso de la tierra.**

El cambio en el uso de la tierra y la cobertura vegetal comprende varios procesos que son fundamentales para la estimación del cambio climático y sus impactos. Estos escenarios influyen en los flujos de carbono y las emisiones de gases invernadero, que alteran directamente la composición atmosférica. Estos escenarios toman en cuenta las características de la superficie terrestre debida a una posible conversión de la cobertura vegetal que pudieran alterar las propiedades de los ecosistemas y su vulnerabilidad al cambio climático. Se han construido una gran diversidad de este tipo de escenarios, la mayoría, sin embargo, no tratan explícitamente cuestiones de cambio climático, sino que centran su atención en otras cuestiones, por ejemplo, la seguridad alimentaria y el ciclo del carbono.

- **Escenarios ambientales.**

Los escenarios ambientales se refieren a los cambios en los factores ambientales distintos del clima que se producirán en el futuro independientemente del cambio climático. Los escenarios deben mostrar las posibles condiciones ambientales futuras, por ejemplo: la composición atmosférica del dióxido de carbono (CO₂) y la disponibilidad de agua (en su uso y calidad).

Los escenarios (figura 6) de emisión del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) proporcionan el contexto socioeconómico y ambiental para los próximos 100 años y permite conocer la evolución futura de diversas variables (entre ellas las emisiones de

CO₂), lo que constituye la información de partida de los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGAO-A), que a su vez proporcionan los escenarios de cambio climáticos, que indican, entre otras cosas, los incrementos futuros de las temperaturas y de las precipitaciones. El IPCC han elaborado dos grupos de escenarios de emisiones: los escenarios IS92 desarrollados en 1992 (IPCC 1994) y los escenarios de emisiones SRES/ IE-EE publicados en el 2001 (IPCC 2002).

Escenarios SRES/IE-EE del IPCC.

En 1996, el IPCC inició el desarrollo un nuevo conjunto de escenarios de emisiones que tendrían una mayor utilidad que los escenarios IS92. Estos nuevos escenarios servirían de base para evaluar las consecuencias climáticas y medioambientales de las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero y para evaluar las estrategias de mitigación y adaptación. Estos escenarios contienen valores de referencia mejorados con respecto a las emisiones anteriores, así como información reciente sobre la reestructuración económica en todo el mundo, las tendencias del cambio tecnológico y amplían las diferentes trayectorias de desarrollo económico y en particular las tendientes a reducir las desigualdades de ingresos entre países desarrollados y en desarrollo.

Finalmente, en el 2001 el IPCC finalizó su *Informe especial sobre escenarios de emisión* (SRES) (IPCC 2002) que sustituyeron a los anteriores seis “escenarios IS92” del IPCC. Estos nuevos escenarios denominados también SRES (Special Report on Emisión Scenarios), examinan el período de 1990 a 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos (por ejemplo: la población mundial y el producto interno bruto). (Ver Anexo 1).

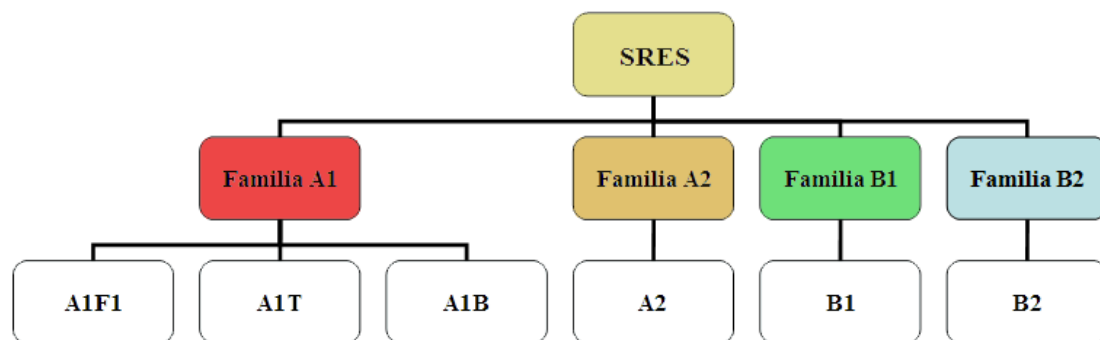


Figura 6. Ilustración esquemática de los de los escenarios de emisión IPCC (IPCC, 2000).

Cuatro líneas evolutivas cualitativas agrupan los escenarios en las denominadas “familias”: A1, A2, B1 y B2. En total se han desarrollado 40 escenarios SRES, todos ellos igualmente

válidos sin haberles asignado probabilidades de hacerse realidad. Según el IPCC (2002), las principales características de las cuatro grandes familias son:

- La familia de escenarios A1 (globalización tecnológica-energética). Describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y que disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).
- La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 (autosuficiencia tecnológica). Describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la auto-suficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 (globalización-sostenible). Describe un mundo convergente con la misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientadas a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

- La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 (autosuficiencia-sostenible). Describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedio, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Tabla 1. Desarrollo económico, tecnológico y demográfico de diferentes escenarios que figuran en el informe Especial sobre Escenarios de Emisiones SRES. [Nakicenovic, 2000]

Perfil	SRES A1	SRES A2	SRES B2
Crecimiento de la población	Bajo	Alto	Bajo
Crecimiento del PIB	Muy Alto	Medio	Alto
Consumo de Energía	Muy Alto	Alto	Bajo
Recursos Disponibles	Medio	Bajo	Bajo
Avance Tecnológico	Rápido	Lento	Medio

III.2 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

La herramienta básica para realizar proyecciones de cambio climático son los modelos de circulación general (MCG) acoplados de atmósfera y océano que resuelven numéricamente las ecuaciones matemáticas fundamentales y describen la física y dinámica de los movimientos y procesos que tienen lugar en la atmósfera, el océano, el hielo y la superficie terrestre. Al contrario que los modelos utilizados en otras ramas de la ciencia, si bien incluyen relaciones empíricas, no descansan fundamentalmente en el uso de las mismas, sino en el planteamiento de las leyes físicas del sistema. (AEMET, 2009).

Los MCG resuelven las ecuaciones del movimiento de los fluidos (Navier-Stokes), de continuidad (conservación de masa), de la termodinámica (conservación de energía) y de estado. Las variables (p. ej., presión, temperatura, velocidad, humedad atmosférica, salinidad oceánica) necesarias para describir el estado de los subsistemas que integran el

sistema climático se proporcionan en una red de puntos que cubre el globo, habitualmente con una resolución horizontal para la atmósfera entre 100 y 300 km, y aproximadamente el doble (la mitad del tamaño de la celda) para el océano, con el fin de poder resolver la dinámica de corrientes oceánicas. En ambos casos la resolución vertical suele ser de unos 20 niveles. Esta separación de puntos de red está limitada con frecuencia por la disponibilidad de recursos computacionales. Las pocas decenas de MCG existentes (véase IPCC-TAR, 2001 y IPCC-AR4, 2007) proporcionan proyecciones de la evolución del clima con poca resolución espacial —consecuencia de las limitaciones computacionales— y, por tanto, solamente permiten hacer estimaciones de la evolución sobre grandes regiones de la Tierra, p. ej., norte de Europa, área mediterránea.

Los MCG constituyen la principal herramienta con capacidad predictiva de las que se dispone para estimar la evolución del sistema climático. Además, esta evolución está condicionada por el comportamiento humano, es decir, por las emisiones de gases de efecto invernadero, las emisiones de aerosoles, los cambios de uso de suelo, el modelo energético, la demografía, etc. Como la evolución socioeconómica no está regida por las leyes físicas se recurre a una colección de escenarios alternativos de emisiones que tienen en cuenta todos los efectos anteriores en la confianza de que la evolución futura de la sociedad siga alguno de los patrones considerados en dicha colección. Los MCG se integran con los diferentes escenarios de emisiones (Nakicenovic *et al.*, 2000) y proporcionan proyecciones de la evolución del clima en los supuestos de los diferentes escenarios de emisiones contemplados (Tabla 1). Para simulaciones realizadas para la Península Ibérica (AEMET, 2009) los modelos globales utilizados son: HadAM3H (modelo atmosférico del Centro Hadley (CRU), versión 3), ECHAM4-OPYC (modelo acoplado atmósfera-océano del Instituto Max Planck de Meteorología (Alemania), versión 4), CGCM2 (modelo acoplado atmósfera-océano del Centro Canadiense del Clima, versión 2), HadCM3 (modelo acoplado atmósfera-océano del Centro Hadley (CRU), versión 3), HadCM2SUL (modelo acoplado atmósfera-océano del Centro Hadley (CRU), versión 2). Para el caso particular del archipiélago canario se han utilizado los modelos HadCM3 y CGCM1 con el método SDSM.

III.3 MODELOS REGIONALES

Los modelos regionales de clima (**MRC**) son considerados como la técnica más prometedoras para realizar proyecciones realistas de cambio climático a escala regional (IPCC, 2001). Los MRC son esencialmente similares al módulo atmosférico de cualquier MCG, pero se aplican a un área limitada del globo con más resolución, es decir

discretizando espacialmente con celdillas de menor tamaño. Se utilizan anidándolos en la celda del modelo global (Figura 7), esto significa que en los MRC los valores iniciales de las variables simuladas y su evolución temporal en los contornos del dominio se derivan de resultados obtenidos por un MCG. En definitiva, los MRC están forzados por los contornos con valores simulados por los MCG. Por tanto, el procedimiento que actualmente se sigue consiste en utilizar las salidas de un MCG para simular la respuesta de la circulación global a forzamientos de macroescala y los MRC para tener en cuenta los forzamientos a escala más pequeña que el tamaño de la celdilla en el MCG, de una forma acorde con principios físicos, y para resaltar la simulación de circulaciones atmosféricas y variables climáticas a escalas espaciales más finas (IPCC. 2001).

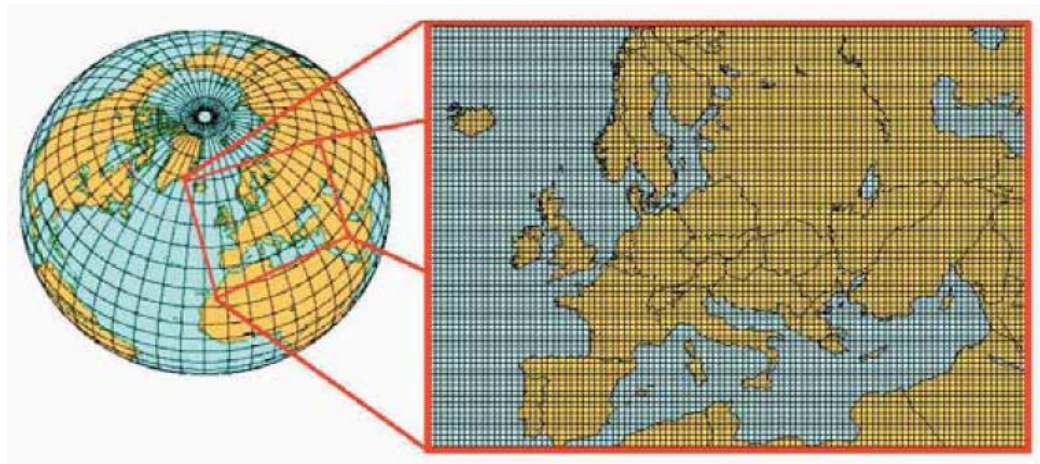


Figura 7. Ejemplo del dominio de aplicación de un MRC sobre Europa con una celda de 50 km. La técnica de anidamiento (“nesting”) consiste en proporcionar al MRC información de la evolución de las variables atmosféricas en los puntos del contorno del dominio. Dicha información se obtiene previamente de la simulación con un MCG que utiliza una celda con resolución más baja (celdillas con mayor tamaño). (Fuente: Castro, Martín-Vide y Alonso, 2005)

Las técnicas de regionalización basadas en modelos regionales tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y por lo tanto proporcionar una descripción de la atmósfera basada en todas las variables del modelo y la clara desventaja de necesitar un gran volumen de cálculo. Además el hecho de que las condiciones de contorno no sean un problema matemático bien planteado (Staniforth, 1997) plantea el problema adicional de que el modelo anidado cambia las escalas grandes suministradas por el modelo global, mostrando una dependencia de los resultados con la posición y orientación del dominio de integración. Este hecho podría limitar la credibilidad de los resultados.

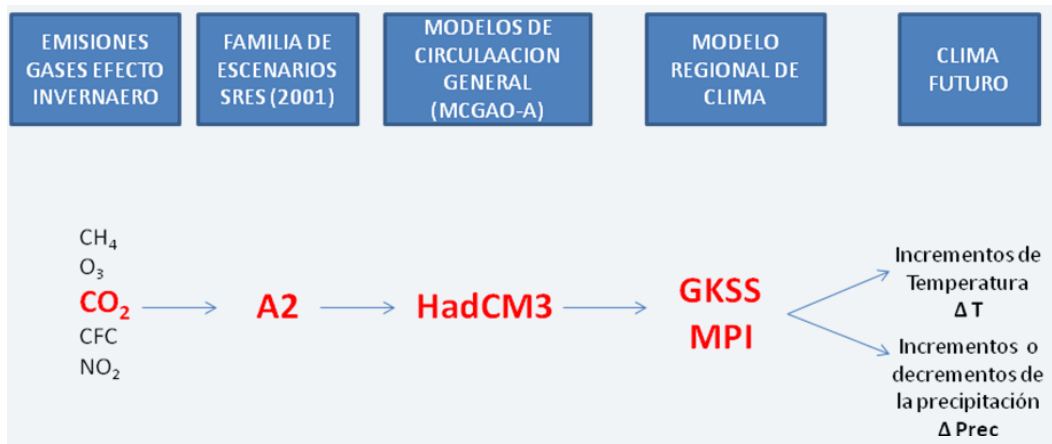


Figura 8. Proceso secuencial para la determinación de escenarios climáticos de modelos regionales a partir de los escenarios de emisión SER y del MCGA_ HadCM3. (Fuente: Hernández, 2007)

Los MRCs capturan mejor la variación en Europa tanto de temperatura como de precipitación que los MCGs. La mayoría, pero no todos los MRCs, también tienden a sobreestimar la variabilidad interanual de las temperaturas en Europa central y meridional. La excesiva variabilidad de la temperatura coincide con la excesiva variabilidad interanual en radiación de onda corta o evaporación, o en ambas simultáneamente. De ello se concluye que se precisa de una mejora en la descripción de los procesos de suelo, capa límite y nubes. Uno de los parámetros de los modelos que puede ser clave es la profundidad del suelo en los mismos, que parece ser demasiado pequeña en muchos MRCs (Van Den Hurk *et al.*, 2005).

III.4 SIMULACIONES CLIMÁTICAS REALIZADAS EN EL PROYECTO PRUDENCE

PRUDENCE (*Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects¹*) es un proyecto que fue parte del 5º Programa Marco en el tema de “*Energy, environment, and sustainable development*”, que involucro, entre los años 2002 y 2005, a más de 20 grupos de investigación europeos con el objetivo principal de proporcionar escenarios climáticos de alta resolución para Europa para finales del siglo XXI, mediante metodologías de regionalización dinámica, así como de explorar las incertidumbres de estas proyecciones (www.prudence.dmi.dk). La Unión Europea financio

¹ :Es decir predicción de escenarios regionales e incertidumbres para definir riesgos y efectos asociados al cambio climático en Europa

este proyecto (y otros dos estrechamente vinculados a éste: los proyectos Stardex y Mice), que ha servido de ejemplo para otros proyectos similares en todo el mundo, además de suponer un paso fundamental en la investigación climática en Europa con el fin de plantear políticas de adaptabilidad y mitigación del cambio climático.

Los experimentos llevados a cabo en el marco de PRUDENCE consistían en una simulación de «control» para representar el periodo 1961-1990 (que servía para evaluar la capacidad de los modelos para reproducir el clima; es decir: para validarlos) y en otra simulación de un escenario futuro correspondiente al periodo 2071-2100, ambas efectuadas con diversos modelos climáticos regionales. La mayoría de las simulaciones se realizaron para el escenario A2 con la salida del modelo HadAM3H (solo atmosférico, resolución de 150 km) para establecer las condiciones de contorno, cosa que posibilitó evaluar detalladamente las diferencias entre los modelos regionales utilizados. El modelo HadAM3H, por su parte, se inicializó con todas las salidas del modelo global (acoplado atmósfera-océano) HadCM3. También se efectuaron otras simulaciones con el escenario B2 y empleando otros modelos globales (ECHAM4/OPYC3) o diversas ejecuciones del mismo modelo global (Deque *et al.*, 2005).

PRUDENCE ha creado una base de datos muy valiosa que todavía está por explorar y analizar en detalle sobre la Península Ibérica e Islas Baleares. La base de datos incorpora datos de regionalización de 10 modelos regionales forzados con un único modelo global (HadAM3), además de resultados de otros modelos regionales forzados con salidas de otros modelos globales (ECHAM4/OPYC, ECHAM5, ARPEGE/OPA) distintos del HadAM3.

Estos datos conjuntamente con los de los modelos globales permiten proporcionar proyecciones a más resolución (en el entorno de los 50 km) y explorar la incertidumbre asociada a los diferentes modelos regionales. La base de datos PRUDENCE contiene datos diarios de las proyecciones climáticas para el período 2071-2100, siendo especialmente interesantes todos los campos relacionados con el ciclo del agua (precipitación, evapotranspiración, escorrentía, humedad del suelo) que permiten estimar la contribución a los distintos términos del balance proporcionada por los diferentes modelos regionales (AEMET, 2009).

Dentro del proyecto PRUDENCE se realizaron simulaciones con MRCs correspondientes a dos períodos de 30 años. El llamado *experimento de control* o de *clima actual* abarca el período de 1961 a 1990 y los *experimentos de escenario* o de *clima futuro* comprenden el

período de 2071 a 2100. El primero (1961-1990) considerando la evolución observada del contenido global de CO₂ y de aerosoles sulfato (SUL), y el segundo (2071-2100) con las evoluciones correspondientes a los escenarios de emisiones antropogénicas SRES-A2 y SRES-B2 del IPCC como se muestra en la Tabla 2 (IPCC, 2001).

Tabla 2. Concentraciones globales medias de CO₂ (en ppm de C) y de aerosol sulfato SO₄ (en Tg de S). Fuente: IPCC (2001).

Escenario	Sustancia	Años			
		2070	2080	2090	2100
SRES-A2					
CO2	(ppm)	635	698	771	856
SUL	(TgS)	0,56	0,49	0,47	0,45
SRES-B2					
CO2	(ppm)	531	559	589	621
SUL	(TgS)	0,38	0,38	0,37	0,36

Para todos los MRCs se dispone de de clima actual (1961-90) y de clima futuro (2071-2100) con el escenario de emisiones A2 utilizando las condiciones iniciales y de contorno proporcionadas por el modelo global atmosférico HadAM3 (figura 9). Además, con 5 de los modelos MRC se han realizado simulaciones de clima futuro con el escenario de emisiones B2 utilizando también las condiciones iniciales y de contorno del modelo HadAM3. Finalmente, con dos MRC se han llevado a cabo, además, los tres experimentos (control y escenarios A2 y B2) utilizando valores iniciales y de contorno proporcionados por el modelo global acoplado ECHAM4/OPYC.

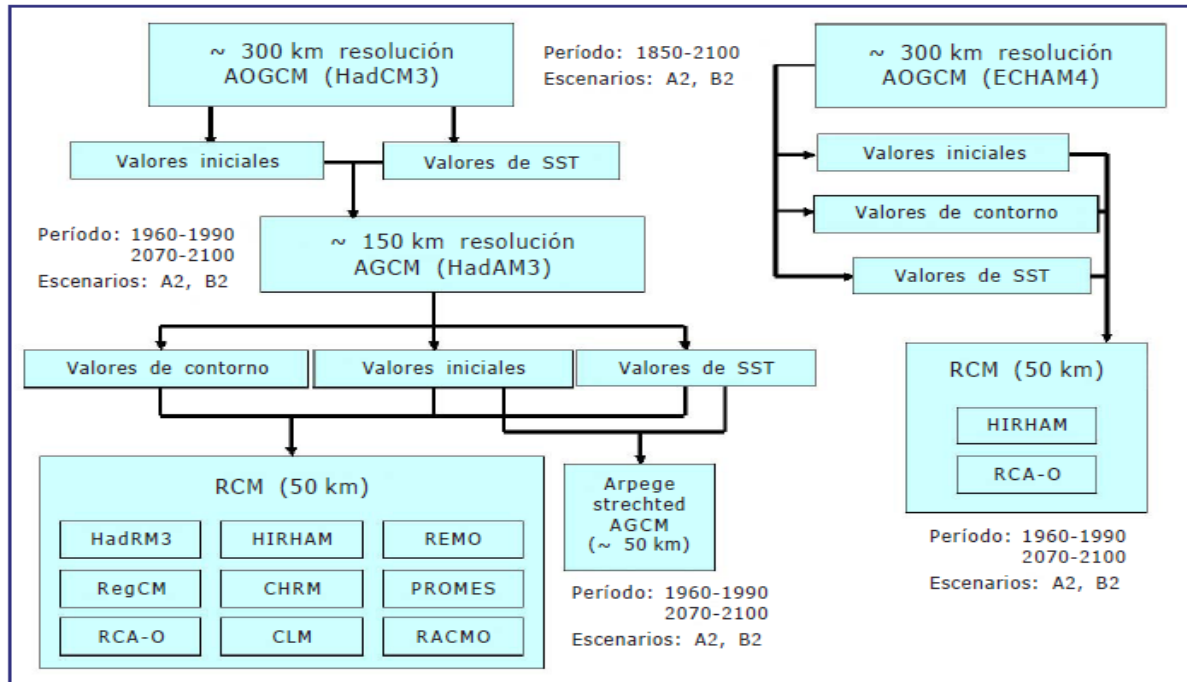


Figura 9. Esquema de las simulaciones realizadas en el proyecto PRUDENCE.

Tabla 3. Relación de centros y modelos regionales en el proyecto PRUDENCE, con las configuraciones de la celda y las condiciones de contorno laterales usadas por cada modelo.

Centro	Modelo	Resolución horizontal y n.º de celdillas (nx × n y)	Puntos y esquema de relajación	Niveles verticales
CNRM	ARPEGE	50-70 km (sobre Europa)	—	31
ETH	CHRM	0,5° (55 km) 81 × 91	8 Davies 1976	20
HC	HadRM	0,44° (50 km) 106 × 111	—	19
DMI	HIRHAM	0,44° (50 km) 110 × 104	10 Davies 1976	19
MPI	REMO	0,5° (55 km) 97 × 109	8 Davies 1976	19
ICTP	RegCM	50 km Lambert 119 × 98	11 Giorgi et al., 1993a,b	16
UCM	PROMES	50 km Lambert 112 × 96	10 Davies 1976	28
GKSS	CLM	0,5° (55 km) 101 × 107	8 Davies 1976	20
SMHI	RCAO	0,44° (50 km) 90 × 86	8 Davies 1976	24

KNMI	RACMO	0,44° (50 km) 94 × 80	8 (16 u,v) Davies 1976	31
-------------	-------	-----------------------	---------------------------	----

III.4.1 Modelos climáticos regionales y globales utilizados en el Proyecto PRUDENCE.

Los modelos regionales del clima utilizados en el proyecto PRUDENCE se describen brevemente a continuación:

- El Instituto Meteorológico de Dinamarca (DMI) utilizó el modelo regional HIRHAM. Este modelo fue desarrollado originalmente por Christensen y Van Meijgaard (1992) y después reformado por Christensen *et al.* (1996). Posteriormente, se introdujeron mejoras usando nuevos datos fisiográficos de la topografía y de los usos de suelo con alta resolución (Hagemann *et al.*, 1999; Christensen *et al.*, 2001). La habilidad de las diversas versiones de este MRC para simular el clima actual y futuro se describe en Christensen *et al.* (1998) y en Christensen (2003; 2004).
- El Centro Hadley de Meteorología del Reino Unido (HC) utilizó el modelo regional HadRM3H (Hudson y Jones, 2002b). La configuración de esta versión del modelo es muy similar a la del HadRM3P que fue desarrollado por Buonono *et al.* (2006). Los principales cambios de la nueva versión se relacionan con la parametrización de la nubosidad a gran escala y los efectos radiativos de las nubes convectivas. Tales actualizaciones han proporcionado una mejora sensible en los perfiles verticales de las nubes y en los campos de radiación.
- La Escuela Superior Politécnica de Zurich (ETHZ) utilizó el modelo CHRM. La versión más actualizada de este modelo se describe en VIDALE *et al.* (2003). Se ha analizado la habilidad de este modelo para representar el ciclo hidrológico a escala continental y a escala regional en el área de los Alpes (Frei *et al.*, 2003), y se ha utilizado para simular una gran variedad de procesos meteorológicos de mesoescala (Schär *et al.*, 1999; Heck *et al.*, 2001) y en estudios de cambio climático (Schär *et al.*, 2004).
- El Instituto de Investigaciones Costeras (GKSS) de Alemania utilizó el modelo CLM. Es la versión climática del modelo no hidrostático LM. Tiene la misma dinámica y similares parametrizaciones físicas que el modelo de predicción meteorológica LM

del Servicio Meteorológico de Alemania (DWD). En Steppeler *et al.* (2003) se describe de forma detallada este modelo.

- El Instituto Max Planck (MPI) de Alemania utilizó el modelo REMO (Jacob 2001). Se basa en el modelo EM/DM del Servicio Meteorológico de Alemania con algunas modificaciones en las parametrizaciones físicas, tomadas del modelo global ECHAM4. Ha sido analizado en diversas simulaciones climáticas (Semmler *et al.*, 2004; y Aldrian *et al.*, 2004) y en simulaciones del ciclo hidrológico (Frei *et al.*, 2003; Hennemuth *et al.*, 2003; y Lehmann *et al.*, 2004).
- El Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (SMHI) utilizó el modelo RCO del Rossby Centre. Este modelo consta de una parte atmosférica RCA2 (JONES *et al.*, 2004) y de otra oceánica (MEIER *et al.*, 2003). El acoplamiento entre ambas se describe en Döscher *et al.* (2002) y los resultados de las simulaciones se analizan en Räisänen *et al.* (2004).
- La Universidad Complutense de Madrid (UCM) utilizó el modelo PROMES. Este modelo fue desarrollado originalmente por Castro *et al.* (1993) y la versión climática actual se ha utilizado en diversos experimentos (por ejemplo, Gallardo *et al.*, 2001; Gaertner *et al.*, 2001; Arribas *et al.*, 2003). Algunos resultados parciales de las simulaciones realizadas con este modelo en el marco del proyecto PRUDENCE se presentan en Sánchez *et al.* (2004).
- El Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) de Italia utilizó el modelo RegCM. Fue desarrollado originalmente por Giorgi *et al.* (1993a, b) y sus sucesivas actualizaciones y mejoras se describen en Giorgi *et al.* (1999) y PAL *et al.* (2000). Algunos resultados de simulaciones de clima actual y de escenarios de cambio climático con este modelo se presentan en GIORGI *et al.* (2004a, b).
- El Real Instituto Meteorológico de Holanda (KNMI) utilizó el modelo RACMO2 (Lenderink *et al.*, 2003), que combina la dinámica y la parametrización de procesos superficiales del modelo de predicción meteorológica HIRLAM con las demás parametrizaciones físicas de la versión del modelo ECMWF usado en el reanálisis ERA40 del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio. Además se han reformado algunos aspectos del esquema superficial para incrementar la reserva de agua en el suelo e incrementar la sensibilidad de la evapotranspiración en condiciones de sequía.

El Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas de Francia (CNRM) no utilizó un modelo de área limitada como en los anteriores 9 MRC, sino el modelo global ARPEGE/IFS con resolución horizontal variable, siendo ésta máxima sobre la región del Mediterráneo (Gibelin y Déqué, 2003). No obstante, como su resolución es similar a la de los demás MRC, se ha incluido entre los modelos regionales pues puede considerarse como un modelo de área limitada con anidamiento bidireccional en el modelo global ARPEGE/IFS.

Tabla 4. Proyecciones regionalizadas basadas en modelos regionales del clima procedentes del proyecto PRUDENCE. Las simulaciones realizadas por cada modelo regional se identifican por el centro o instituto donde se ha desarrollado

Modelos regionales	Anidamiento en HadAM3H			Anidamiento en ECHAM4		
	Control	A2	B2	Control	A2	B2
CNRM	×	×	×			
DMI	×	×	×	×	×	×
ETH	×	×				
GKSS	×	×				
HC	×	×				
ICTP	×	×	×			
KNMI	×	×				
MPI	×	×				
SMHI	×	×	×	×	×	×
UCM	×	×	×			

III.5 TÉCNICAS DE REESCALADO (*DOWNSCALING*)

La metodología, generalmente aceptada, para hacer estimaciones de proyecciones regionalizadas de cambio climático utiliza la idea del descenso de las escalas grandes a las escalas pequeñas. Las escalas grandes se estiman con los modelos globales acoplados océano-atmósfera y a continuación se desciende a las escalas más pequeñas con diferentes técnicas de regionalización.

En este enfoque la tarea predictiva la realizan los modelos globales y las técnicas de reescalado o *downscaling*, bien basadas en algoritmos empíricos o en modelos regionales, se limitan a introducir detalle local. La información solamente fluye desde las escalas grandes (modelos globales) a las escalas regionales (modelos regionales). En otras escalas temporales (por ejemplo, la predicción del tiempo) y, sobre todo, cuando se realiza experimentación con modelos se utilizan modelos regionales anidados en modelos globales en los que la información puede fluir en los dos sentidos (*two-way nesting*, en

inglés). Esta misma es la filosofía de los modelos globales que utilizan una celda no uniforme con mayor densidad de puntos sobre la zona de interés. El procedimiento basado en el anidado en dos sentidos requiere que las integraciones de ambos modelos, global y regional, se realicen simultáneamente. Esta limitación es muy restrictiva desde el punto de vista operativo, y muy poco habitual incluso para predicciones a corto plazo. En modelización climática apenas se ha utilizado este concepto y la aproximación estándar a las proyecciones regionalizadas consta normalmente de dos pasos. Primero, *la integración del modelo global, y después la adaptación regional*.

Al proceso predictivo basado en el descenso de escalas, hay que añadir cierto tipo de incertidumbres, se consideran cuatro principales: a) las incertidumbres ligadas a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI); b) las incertidumbres ligadas a los diferentes modelos globales; c) las incertidumbres ligadas a la variabilidad interna del modelo; y, finalmente, d) las incertidumbres ligadas a las técnicas de regionalización. Con estas incertidumbres, se intenta acotar el rango de variación de las proyecciones climáticas.

Existen dos enfoques para los métodos de *reescalado (downscaling)*,

- El *enfoque dinámico* se basan en el uso de modelos regionales (RCMs) donde dichos modelos de mayor resolución del modelo climático se ensambla con un modelo de circulación general.
- El segundo enfoque consiste en utilizar métodos estadísticos para establecer relaciones empíricas entre la resolución de los GCM, las variables climáticas y el clima local. Se basa en series de registros históricos, en ocasiones estas observaciones se trasladan a celdas regulares donde se interpolan y homogenizan los datos. Se utilizan técnicas de series temporales para tratar de predecir el estado futuro de estos índices en base a los registros pasados.

III.5.1 Efectos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos

Se espera que el cambio climático intensifique el estrés actualmente padecido por los recursos hídricos, debido al crecimiento de la población y al cambio económico y de los usos de la tierra y, en particular, a la urbanización. Los cambios en la precipitación y en la temperatura (Figura 10) inducen cambios de la escorrentía y de la disponibilidad de agua. La escorrentía aumentaría entre un 10% y un 40% de aquí a mediados de siglo en latitudes superiores y en ciertas áreas tropicales pluviales, incluidas ciertas áreas

populosas del este y sureste de Asia, y disminuiría entre un 10% y un 30% en ciertas regiones secas de latitudes medias y en los trópicos secos, debido a la disminución de las lluvias y a unas tasas de evapotranspiración más altas, en numerosas áreas semiáridas (por ejemplo, la cuenca mediterránea, el oeste de Estados Unidos, el sur de África o el nordeste de Brasil) padecerán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático. Las áreas afectadas por sequías aumentarían en extensión, y ello podría repercutir negativamente en múltiples sectores: agricultura, suministro hídrico, producción de energía o salud. A nivel regional, la demanda de agua de riego aumentaría sustancialmente por efecto de los cambios climáticos. (IPCC, 2007).

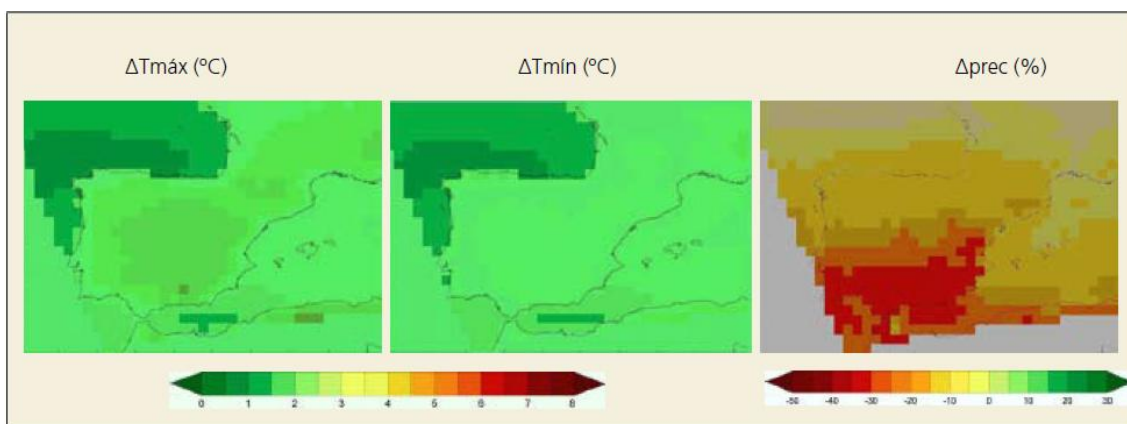


Figura 10. Variación para España de temperatura máxima, de temperatura mínima y de precipitación para el escenario A2 entre finales del siglo XXI y el período de referencia 1961-1990. Media de los resultados de los modelos regionales del proyecto PRUDENCE. (Fuente: INM, 2007)

En las extensiones en que disminuya la escorrentía podría disminuir el valor de los servicios proporcionados por los recursos hídricos. En ciertas áreas, los impactos beneficiosos de una más abundante escorrentía anual estarían probablemente atenuados por los efectos negativos de una mayor variabilidad de las precipitaciones y de una alteración estacional de la escorrentía sobre el abastecimiento y calidad del agua y por un mayor riesgo de crecidas.

Las investigaciones disponibles parecen indicar que aumentarán apreciablemente las precipitaciones de lluvia intensas en numerosas regiones, en algunas de las cuales disminuirán los valores medios de precipitación. El mayor riesgo de crecidas que ello supone plantearía problemas desde el punto de vista de la sociedad, de la infraestructura física y de la calidad del agua. Es probable que hasta un 20% de la población mundial llegue a habitar en áreas en que las crecidas aumenten posiblemente de aquí al decenio de 2080. Los aumentos de la frecuencia y gravedad de las crecidas y sequías afectarían

negativamente el desarrollo sostenible. El aumento de las temperaturas afectaría también las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce, y sus efectos sobre numerosas especies de agua dulce, sobre la composición de las comunidades y sobre la calidad del agua serían predominantemente adversos. En las áreas costeras, el aumento de nivel del mar agravaría las limitaciones de los recursos hídricos, debido a una mayor salinización de los suministros de agua subterránea.

Las **aguas subterráneas** son una fuente de recursos hídricos esencial cuya utilización se ha incrementado drásticamente en los últimos 50 años, y en muchas áreas en las últimas décadas, especialmente en zonas donde se producen sequías, fenómeno que cataliza el uso intensivo de aguas subterráneas. En numerosos casos las extracciones han producido o van a generar notables **descensos en niveles** piezométricos que pueden aumentar los costes de bombeo, inducir subsidencias, disminuir el flujo base de ríos y dar lugar a problemas medioambientales (Sophocleous, 2003). Aunque el impacto del cambio climático en los recursos subterráneos es difícil de predecir, la elevación de temperatura y los cambios en los patrones de precipitación reforzarán los problemas que actualmente se afrontan. En la región mediterránea, el incremento de fuertes contrastes climáticos estacionales (sequías severas y avenidas) fue ya observado en el pasado siglo (EEA, 2004). Estos contrastes se verán probablemente exacerbadas por el calentamiento global, con veranos más calurosos y secos, y más precipitación durante inviernos más cálidos a pesar de estaciones lluviosas más cortas. Las incertidumbres sobre los eventos extremos de lluvia y la intensidad de las sequías en el futuro son todavía importantes (Renard et al., 2006), aunque muchos estudios apuntan a un incremento de la variabilidad (Diodato, 2004). Se observarán impactos tanto el régimen hidrológico de los ríos como en la recarga a los acuíferos: se espera que los caudales de los ríos aumenten en otoño e invierno, que la fusión de la nieve se adelante, que los estiajes se prolonguen y que la recarga a los acuíferos disminuya (Merritt et al., 2006). La reducción del flujo base de los ríos probablemente produzca también un cambio de la fuente de suministro de agua en la agricultura de superficial a subterránea, incrementando la presión sobre los acuíferos.

Aunque hay una extensa literatura sobre fortalezas y debilidades de los métodos de reescalado de variables climáticas, se ha prestado una escasa atención al reescalado para examinar impactos del cambio climático en sistemas de recursos hídricos (Fowler et al., 2007b). La mayoría de los estudios en la literatura se han centrado en los impactos del cambio climático en los recursos superficiales, mientras que para sólo se han llevado a

cabo unos pocos trabajos para determinar la sensibilidad de los sistemas de aguas subterráneas y relación río-acuífero al cambio climático (Roosmalen et al., 2007). Sin embargo, los cambios previstos en la temperatura y las precipitaciones pueden producir importantes alteraciones de la recarga a los acuíferos (Jyrkama and Sykesa, 2007) que llevarán asociadas variaciones en el nivel freático, y por tanto, en la disponibilidad de recursos, en la relación río-acuífero, en los costes de bombeo y en la contaminación de las aguas subterráneas.

El cambio climático afectará a la hidrología de una región a través de cambios en la distribución, magnitud y forma de precipitación, evaporación y transpiración, humedad del suelo así como a través de cambios en la frecuencia y duración de las tormentas, avenidas y sequías.

III.6 ESCENARIOS HIDROLÓGICOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA Y EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR.

La evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos en España ha seguido diferentes líneas de trabajo, tanto en la escala espacial y temporal de simulación hidrológica como en el origen de los escenarios climáticos utilizados.

Los valores medios a largo plazo de las principales variables hidrológicas, la aplicación de leyes regionales que relacionen en valores medios anuales la precipitación, la evapotranspiración potencial (función de la temperatura) y la esorrentía total, puede proporcionar una visión de la evolución del clima de acuerdo a los escenarios del cambio climático estimados por los modelos generados para su estudio.

Como caso general para la Península Ibérica (PI) con el escenario de emisión A2 de los SRES (IPCC, 2007) común a todos los modelos es calificado como de emisiones medias-altas, muestra una tendencia de una ligera reducción de la precipitación en la mitad occidental de la Península y un ligero aumento en la mitad oriental. La literatura cita para el periodo en mención (2071-2100), el predominio de las zonas con reducción de la precipitación, siendo las regiones de la mitad sur de la Península Ibérica las que muestran un mayor grado de acuerdo para los distintos modelos y regionalizaciones. Merece la pena destacar también que el promedio de los modelos regionales de PRUDENCE muestra una reducción de la precipitación anual media para toda la Península Ibérica.

Bajo un escenario de duplicación de CO₂ muestran una estructura de máximo incremento de temperatura media diaria en verano, (hasta 5°C para mediados del siglo XXI), con una

estructura de mayor aumento en el centro de la PI, disminuyendo al acercarse a la costa (Gallardo et al., 2001). Otros trabajos posteriores a partir de los resultados de modelos individuales (Gibelin y Déqué, 2003; Giorgi et al., 2004; Räisänen et al., 2004; Sánchez et al., 2004; Schär et al., 2004; Rowell, 2005; Castro et al., 2007b; Giorgi y Lionello, 2008), todos ellos con resoluciones en torno a 50km, y para los escenarios de emisiones A2 y/o B2 [Nakicenovic y Swart, 2000], muestran patrones espaciales de cambio similares para finales del siglo XXI. Un incremento máximo de temperatura media diaria de más de 6°C en verano con aumento desde el interior de la PI hacia la costa, y de en torno a 3°C en invierno (estación de menor aumento), bajo el escenario de emisiones A2 (uno de los que proyectan un mayor aumento de gases de efecto invernadero, duplicando las concentraciones de finales del siglo XX, llegando a más de 800 ppm de concentración de CO₂ para finales del siglo).

Las proyecciones muestran un incremento de temperatura máxima en verano (5.41°C en media, con una dispersión entre 4.78°C y 5.83°C para MRCs forzados con el mismo MCG), y mínimo en invierno (2.97°C, con 2.46°C a 3.13°C entre el máximo y mínimo incrementos) para finales del siglo XXI bajo el escenario A2 de emisiones. La distribución de probabilidad del cambio de temperatura anual muestra un rango entre 2.8 y 5.7°C (percentil 1 y 99). En otoño y primavera se obtienen incrementos intermedios, siendo los valores de otoño (3.96°C en media) superiores a los de primavera (3.42°C).

Las temperaturas máximas y mínimas diarias muestran un comportamiento similar en los cambios estacionales: mayores aumentos en verano que en invierno y con el mismo patrón espacial en verano. No obstante, se observa un incremento de las máximas cerca de 1°C superior a las mínimas durante todo el año, y especialmente en verano, lo que indicaría un incremento en la amplitud de la oscilación térmica diaria (Sánchez et al., 2004).

Los cambios en la precipitación estacional prevén un descenso en verano en toda la PI, y en invierno aumentos ligeros en la mitad norte y descensos en la parte sur. No obstante, las discrepancias entre los resultados de los diferentes modelos son mayores que los obtenidos al comparar las temperaturas (CLIVAR, 2010). También se obtiene un descenso en el número total de días de lluvia en todas las estaciones y para toda la región (Sánchez et al., 2009b). Cuando se analiza el conjunto de MRCs forzados por el mismo MCG de PRUDENCE, (Christensen y Christensen, 2007) se puede ver un alto grado de acuerdo entre ellos, con un cambio negativo en la precipitación relativa para la media de toda la PI

en todas las estaciones, máximo en verano (-0.48 de media de los modelos, entre -0.39 y -0.72) y mínimo, casi inapreciable, en invierno (-0.04) para finales del siglo XXI bajo el escenario A2 de emisiones.

En el ámbito de la Cuenca Hidrográfica del río Júcar en este caso los datos generados en el marco del Proyecto PROMES, se observan unas variaciones promedio anual de las temperaturas y la precipitaciones para el periodo 2071-2100 mayores en el interior de la cuenca y corresponden a valores con incrementos promedio que van de 4.0 a 4.4 °C. En cambio, los menores incrementos de la temperatura oscilan en la zona del litoral entre de 3.5 a 3.9 °C. El incremento promedio de la temperatura para el periodo comprendido de 2071 al 2100 es de 3.1 °C con respecto a la situación actual.

En cuanto a las precipitaciones, en general, para toda la CHJ se presenta una disminución de los valores promedio para el periodo del 2071 al 2100. En la Figura 11 se puede ver que las mayores disminuciones se dan en la parte media de la cuenca hacia el litoral con disminuciones que van desde 130 hasta 170 (mm/año). Las menores disminuciones de la precipitación se observa hacia el interior de la cuenca, en la zona de la Mancha Oriental con valores que van desde los 84 a 90 (mm/año). En promedio se estima una disminución promedio de las precipitaciones de un 25.4% en la CHJ para el periodo de 2071 al 2100 con respecto a la situación actual.

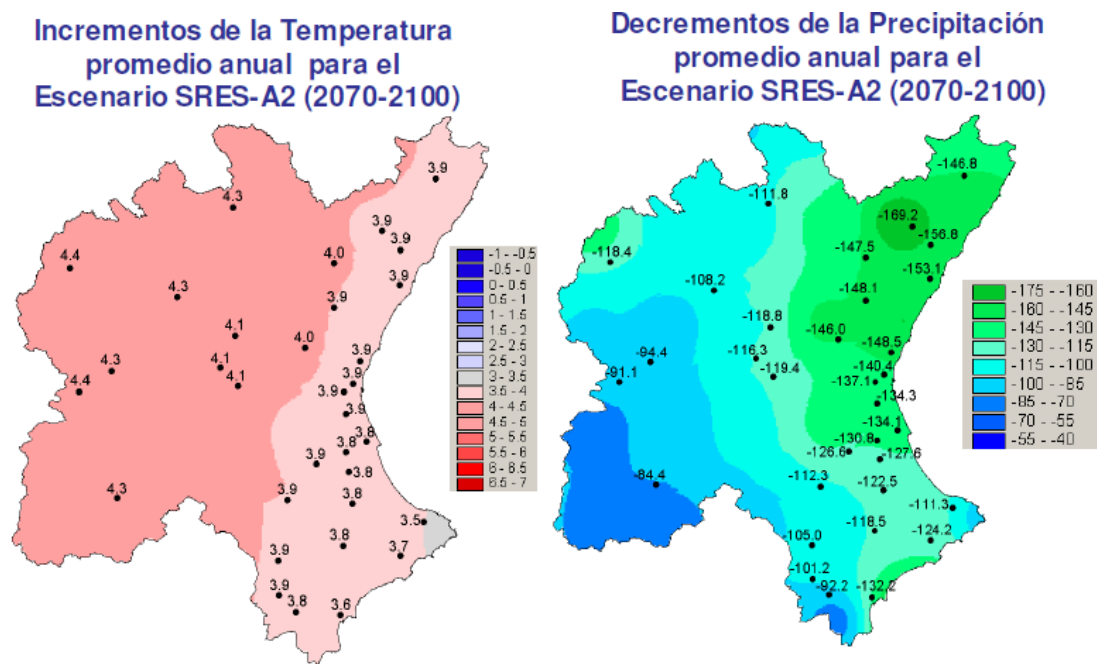


Figura 11. Escenarios climáticos HadCM3-PROMES A2 para la temperatura (°C) y la precipitación (mm/año) para el periodo 2071-2100. (Fuente Hernández, 2007)

En resumen, concluye que con los escenarios climáticos mencionados anteriormente se tiene una tendencia en cuanto a la temperatura, que indican que los mayores incrementos de la temperatura se presentarán en el interior de la cuenca, en cambio, los menores incrementos de la temperatura se presentan en la zona del litoral del Mediterráneo. En cuanto a las precipitaciones es más difícil identificar una tendencia, aunque, para los escenarios obtenidos por el Instituto Nacional de Meteorología (INM) a partir de los escenarios IS92 se presentan incrementos de las precipitaciones. Para los escenarios obtenidos con el modelo PROMES que utiliza los escenarios SRES, se presentan disminuciones en las precipitaciones en lugar de incrementos como en los del INM. La no identificación de una tendencia clara en las precipitaciones se debe esencialmente a que la ocurrencia de precipitación en cualquier lugar y momento está ligada a procesos físicos que resultan más difíciles de simular correctamente por los modelos climáticos.

Capítulo IV

METODOLOGIA PROPUESTA

IV.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGIA

La metodología propuesta se basa en el desarrollo de un modelo hidroeconómico para simular la variabilidad espacio-temporal del coste del recurso del sistema, incorporando cambios que puedan ocurrir debido al impacto del cambio climático, en las demandas agrícolas y la operatividad de la infraestructura que regula y distribuye el recurso en el sistema. Se realiza un análisis económico integrado a nivel de cuenca, modelando conjuntamente tanto los recursos superficiales como los subterráneos para dos escenarios temporales, el primer caso denominado "*escenario actual*" que comprende los datos históricos disponibles para la cuenca en el periodo 1961-1990, y el segundo escenario se denomina "*escenario futuro*" que corresponde al posible impacto del cambio climático a largo plazo (LP) (2071-2100).

Para alcanzar el objetivo de analizar el posible impacto del cambio climático a largo plazo (LP) se evalúa mediante un modelo de simulación de la gestión a escala mensual el citado periodo bajo el supuesto de un escenario de emisiones antropogénicas A2. Para ello se determinan escenarios futuros para la hidrología y las demandas del sistema corrigiendo los datos históricos disponibles para la cuenca en *situación actual* de acuerdo a la variación en las predicciones (en media y desviación estándar) de los modelos regionales GKSS y MPI del proyecto PRUDENCE para obtener los datos que serán utilizados en la simulación del *escenario futuro* en la cuenca del Serpis (apartado 6.1).

A partir de las variables climatológicas modificadas se calcularán las demandas agrícolas para los cultivos de cítricos y la alfalfa, predominantes en la zona de estudio utilizando para ello la metodología propuesta por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos. Estas demandas serían calculadas definiendo los nuevos requerimientos de los cultivos para el escenario futuro haciendo uso del programa CROPWAT de la FAO. (Smith, Clarke FAO 1998).

Una vez obtenidos los datos de aportaciones y las demandas agrícolas futuras se simuló la gestión del sistema usando el módulo SIMGES del SSD AQUATOOL (Andreu et al. 1996) para evaluar las garantías y fallos que se producen en el suministro a las demandas y se compararon los resultados con los existentes en el periodo histórico. Finalmente, se evalúa

el impacto económico de los cambios futuros en la disponibilidad de recursos y los requerimientos de riego, comparando el coste de escasez para cada una de las demandas agrícolas del sistema (situación actual y futura). Los resultados fueron obtenidos estimando el coste de escasez a partir de los déficits derivados del modelo de gestión mediante curvas económicas de demanda para el agua de riego. La evaluación económica se hace de este modo procesando los resultados del modelo de simulación con una hoja de cálculo que contiene la información económica, de esta manera puede conocerse las repercusiones ambientales y económicas que tendría la disminución de los recursos hídricos y la variación de las demandas prioritarias en el sistema de explotación de la cuenca.

Los pasos seguidos para aplicar la metodología al caso de estudio se muestran en la figura 12. La información de partida es la serie de datos hidrológicos y climáticos básicos de la Cuenca Hidrográfica del río Serpis. La información climatológica utilizada corresponde a las estaciones de Játiva y Alcoy (Tabla 6 y 7).

La evaluación integrada y cuantificación detallada de los impactos producidos por el cambio climático requiere de la utilización secuencial de diversos modelos de simulación, los cuales han sido validados en los últimos años por su utilización cotidiana tanto en los ámbitos de planificación como de gestión de cuencas hidrográficas. Sin el empleo de estas herramientas se hace difícil realizar posibles simplificaciones en la gestión, debido al elevado número de aspectos y componentes interrelacionados que deben ser considerados minuciosamente.

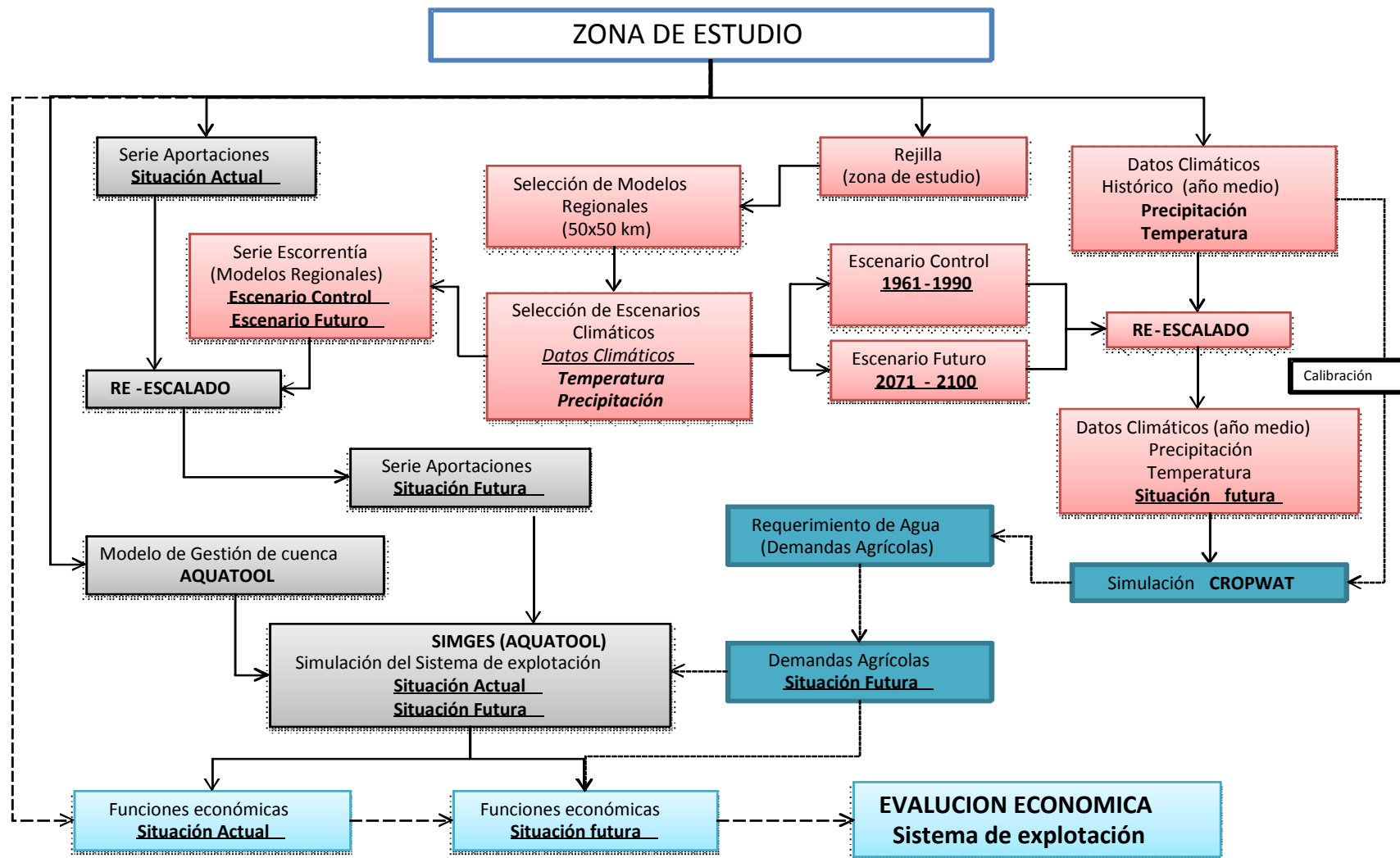


Figura 12. Metodología Propuesta.

La metodología plantea una serie etapas que se describen a continuación:

IV.2. SELECCIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS

La evaluación de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos requiere disponer de datos climáticos base y escenarios climáticos regionales. Los Modelos Climáticos Regionales utilizados en este estudio son los desarrollados en Alemania por el Instituto de Investigaciones Costeras (*GKSS*) y el instituto Max Planck (*MPI*), de los que se dispone simulaciones de clima actual (1961-1990) y de clima futuro (2071- 2100) en el marco del escenario de emisión A2 del IPCC para la obtención de parámetros climáticos (Anexo 2). Las condiciones iniciales y de contorno empleadas corresponden a los resultados del modelo global atmosférico HadAM3H (con una resolución de 250x250 km). Se parte de la selección de los resultados de los escenarios climatológicos (escenario control y de clima futuro) para la zona de la cuenca. Los datos de los MRC para la zona de estudio se obtienen de la base de datos de PRUDENCE [<http://prudence.dmi.dk>]. La base de datos cuenta con una herramienta DODS que permite seleccionar las coordenadas de la región para la que se quiere extraer información, tanto para el escenario de Control (CTL) como el de Cambio Climático (SA2) de los MRC mencionados.

Los escenarios climáticos de los MRCs seleccionados en el presente estudio, son los considerados dentro de la familia de emisiones A2 del SRES/IE-EE (IPCC 2002), cuyos parámetros fueron calibrados para reproducir las observaciones regionales del clima durante el periodo 1961-1990, por el *Climate Research Unit* (CRU)², integradas en el proyecto europeo PRUDENCE.

Para los fines de este proyecto, se ha realizado una extracción desde la base de datos PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk/>) a una celda que cubre la cuenca del Serpis. La celdilla tiene un tamaño de 0.5°x0.5° (lat-lon) (figura 13), cuyos puntos centrales están situados en 38,75 SN de latitud y -0,25 WE de longitud geográfica. Los datos, como ya se ha indicado anteriormente, se refieren al periodo de control 1961-1990 y a la proyección 2071-2100.

² El CRU (*Climate Research Center*) es un centro dedicado al estudio del cambio climático. Este centro ha desarrollado una base de datos de variables climáticas a escala mensual y estacional para escenarios en *situación actual* y *futuro* para los MRCs, con una resolución de 0.5x0.5 grados, en una celda de 100x80, [- 14.75, 34.75, 35.25, 74.75, 0, - 90].

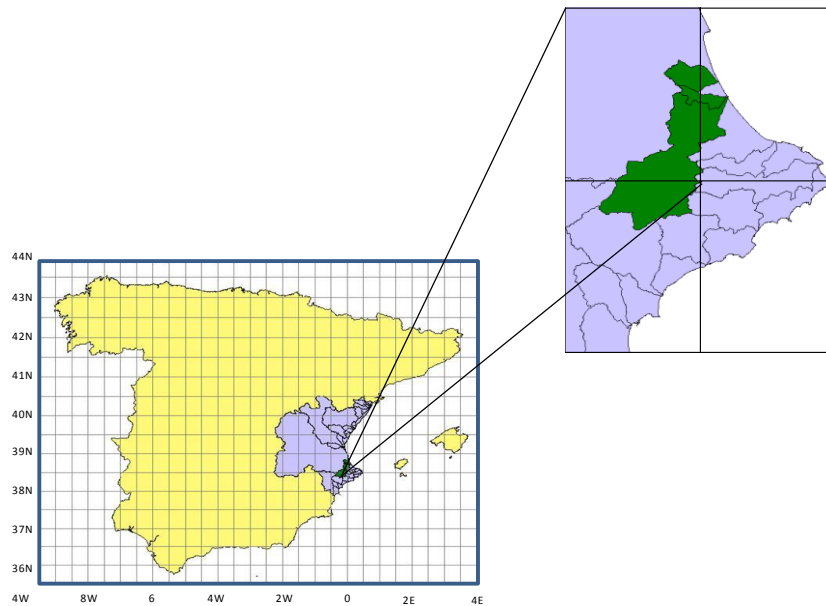


Figura 13. Celda que cubre la cuenca del Serpis para la extracción de datos del Proyecto PRUDENCE. La celdilla tiene un tamaño de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (lat-lon.)

IV.3 TÉCNICA DE REESCALADO

Con el fin de lograr el objetivo de estudiar el efecto del cambio climático en un sistema de recursos hídricos, es necesario caracterizar la hidrología y las demandas esperadas en situación futura (escenarios) para analizarlas mediante un modelo de gestión, que en esta investigación será definido a escala mensual.

Mediante una técnica de reescalado estadístico se pueden obtener los valores de temperatura, precipitación y aportaciones en el sistema, a partir de las variaciones estimadas para dichas variables por los modelos del proyecto PRUDENCE seleccionados en este estudio (Pulido-Velázquez et al., 2010).

Pulido-Velázquez *et al.* (2010) proponen una metodología sistemática para hacer uso de los resultados de los escenarios de cambio climático generados para Europa en el Proyecto de PRUDENCE para analizar el cambio en la hidrología de un sistema específico de recursos hídricos.

Para los MRCs el proyecto PRUDENCE se dispone de escenarios de control (30 años los escenarios que corresponden a la situación actual) 1961-1990 y escenarios de cambio climático (incluyendo la serie de variables climáticas e hidrológicas) para 2071-2100. La resolución espacial de estos MRCs es de 50×50 km, resolución espacial que puede ser muy gruesa para estudiar la gestión de algunos sistemas. La situación hidrológica actual debe ser caracterizada con un detalle espacial que debe estar de acuerdo con el caso de

estudio y los datos disponibles. Por esta razón, con el fin de analizar el efecto del cambio climático en un sistema se propone corregir la "serie hidrológica original " con el incremento en las principales estadísticas (media y desviación estándar) deducidas para la serie del Proyecto PRUDENCE de la zona donde el sistema se encuentra.

A continuación se describen los pasos a seguir para modificar la serie hidrológica original:

1. Definir la serie agregada para cada uno de los parámetros climáticos a utilizar: $y^{x,j}(O)$ donde X varia de 0 a X-1 (siendo X el número de años de la serie) y j varía desde 1 a 12 representando los meses de Enero a Diciembre. Por lo tanto, el producto representa el número de meses en la serie.
2. Identificar la celda de la red del Proyecto PRUDENCE donde se encuentra el sistema para obtener el valor promedio mensual (μ^j) y la desviación estándar (σ^j) de la serie del Proyecto de PRUDENCE $y^{x,j}(s)$ (donde s puede adoptar dos valores, 1 para el escenario de control y 2 para el escenario futuro). Si el sistema se encuentra en más de una celda de un sistema se interpola, por ejemplo, en proporción al área del sistema que entren en cada celda para definir la serie el Proyecto PRUDENCE a analizar.
3. Calcular cambios normalizados en la media y desviación típica en las series de aportaciones (control vs. futuro) de PRUDENCE

$$\Delta\mu^j_s = \left[\mu^j(S_{futuro}) - \mu^j(S_{control}) \right] / \mu^j(S_{control})$$

$$\Delta\sigma^j_s = \left[\sigma^j(S_{futuro}) - \sigma^j(S_{control}) \right] / \sigma^j(S_{control})$$

4. Estandarizar la serie HISTÓRICA original agregada a escala de cuenca.

$$y_{es\ tan\ dar}^{x,j}(O) = \left[y(O) - \mu^j(O) \right] / \sigma^j(O) \tag{1}$$

5. Corregir la serie histórica agregada para incorporar cambios en la media y desviación típica predichos (series agregada modificada).

$$y^{x,j}(C) = \sigma^j(C) \cdot y_{Es\ tan\ dar}^{x,j}(O) + \mu^j(C)$$

Dónde

$$\sigma^j(C) = \sigma^j(O) \cdot (1 + \Delta\sigma^j_s) \quad \mu^j(C) = \mu^j(O) \cdot (1 + \Delta\mu^j_s)$$

6. Por último, DESAGREGACIÓN ESPACIAL de la Serie Agregada futura, se hace proporcionalmente al porcentaje de contribución de cada serie al total de la cuenca
 ⇒ *series de aportaciones futuras de la cuenca*

IV.4 CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE LOS CULTIVOS

Desde la aparición de la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 en 1977, los avances en investigación y la disponibilidad de cálculos más precisos del uso del agua por los cultivos han indicado la necesidad de actualizar las metodologías de la FAO para el cálculo de ETo (FAO, 2006). Se encontró que el método de Penman modificado de la FAO producía con frecuencia sobreestimaciones del valor de ETo, mientras que otros métodos recomendados por la FAO, específicamente los métodos de la radiación, Blaney-Criddle y el método del tanque de evaporación, mostraron una correspondencia variable con respecto a la evapotranspiración de referencia del pasto.

En Mayo de 1990, la FAO organizó una consulta de expertos e investigadores, con la colaboración de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, para revisar las metodologías de la FAO para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos y para producir lineamientos para la revisión y actualización de los procedimientos utilizados. El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como el nuevo procedimiento estándar para la evapotranspiración de referencia e indicó los procedimientos para calcular los distintos parámetros incluidos en el método. Se desarrolló entonces el método de FAO Penman-Monteith, definiendo el cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia de la superficie de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23 m, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada. El nuevo método supera las limitaciones del método anterior de Penman de la FAO y produce valores que son más consistentes con datos reales del uso de agua de los cultivos obtenidos mundialmente. Además se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización del método de la FAO Penman-Monteith con datos climáticos limitados, eliminando por lo tanto la necesidad de utilizar otros métodos para la estimación de la evapotranspiración y creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivos.

El método de la FAO Penman-Monteith utiliza datos climáticos estándar los cuales pueden ser fácilmente medidos o derivados de datos comúnmente medidos. Todos los procedimientos de cálculo han sido estandarizados en función de los datos meteorológicos disponibles y la escala de tiempo de los cálculos.

Con base a lo anteriormente expuesto, se justifica la utilización del Método de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración potencial de los cultivos en el ámbito de la Cuenca del serpis.

Para el cálculo de los requerimientos de los cultivos para cada escenario (*Escenario de control* o de calibración y el *escenario futuro*) se utilizó el programa de cómputo CROPWAT versión 8 for Windows de la FAO³. (Smith, Clarke FAO 1998). El sistema Cropwat fue desarrollado por la FAO. Es un programa de computación diseñado para la determinación de requerimientos de riego para diversos cultivos. Adicionalmente, con él es posible establecer tendencias cuantitativas o niveles de adaptabilidad según la disminución en el rendimiento de los cultivos cuando se introducen diversas combinaciones o variaciones de suelo, clima y fechas de siembra. Debe tenerse presente que en el modelo, las reducciones en rendimiento sólo están relacionadas con carencias de humedad y no con otros factores como disponibilidad de nutrientes, ataques de plagas, inundación, etc.

El modelo Cropwat requiere, para estimar el requerimiento de agua del cultivo, de la siguiente información:

- Evapotranspiración de referencia del cultivo (E_{to}) estimada mediante la ecuación de Penman- Monteith basada en información mensual del clima,
- Precipitación acumulada mensual,
- Padrón de cultivos

Con la información anterior, el modelo proporciona información sobre la E_{to} (mm periodo-1), K_c , precipitación efectiva (p_p , mm) por etapa, la cual es la cantidad de precipitación retenida en el suelo, requerimiento de agua por el cultivo (E_{tm} , mm periodo-1), evapotranspiración real del cultivo (E_{tc} , mm), porcentaje de la evapotranspiración máxima consumida por el cultivo (E_{tc}/E_{tm} , %), déficit diario de humedad del suelo (mm), intervalo (d), profundidad (mm) de aplicación del riego y la estimación de la reducción RRP (%) debido al estrés por déficit de agua (cuando $E_{tc}/E_{tm} < 100\%$). Mediante el coeficiente de cultivo K_c se estima el efecto del estrés por déficit de humedad sobre el

³ http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

rendimiento, expresado como la RRP (Doorenbos y Pruitt, 1977; Burman *et al.*, 1980; Allen *et al.*, 2006).

A continuación se describen los módulos de cálculo de Cropwat:

Módulo Clima / ETo

En base a la ecuación original de Penman-Monteith y a las ecuaciones de resistencia aerodinámica y de superficie, el método FAO Penman-Monteith para estimar ETo, se expresa como:

$$E_{To} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ETo evapotranspiración de referencia (mm día-1)

Rn radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2 día-1)

Ra radiación extraterrestre (mm día-1)

G flujo del calor de suelo (MJ m-2 día-1)

T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u2 velocidad del viento a 2 m de altura (m s-1)

es presión de vapor de saturación (kPa)

ea presión real de vapor (kPa)

es - ea déficit de presión de vapor (kPa)

El ETo Penman-Monteith en el caso de estudio fue calculado utilizando las dos opciones disponibles en Cropwat: en *situación actual* (escenario de calibración) donde contábamos con todos los datos climáticos necesarios se eligió "ETo Penman-Monteith calculado a partir de datos climáticos", (se usa por defecto), y en el caso de *situación futura* se calculó en base a datos de temperatura únicamente ("ETo Penman-Monteith calculado a partir de datos de temperatura (otros datos estimados)"). En este último caso, CROPWAT 8.0 estima los valores de los otros datos climáticos (humedad, velocidad del viento, radiación solar) en base a los datos de temperatura y de altitud/latitud. CROPWAT 8.0 puede trabajar con temperaturas mínimas y máximas (por defecto), o con temperaturas medias si las temperaturas mínimas/máximas no están disponibles.

Módulo de precipitación

Desde el punto de vista de producción agrícola, la precipitación efectiva se refiere a la parte de la precipitación que puede ser efectivamente utilizada por las plantas. Esto significa que no toda la precipitación está a disposición de los cultivos, ya que una parte se pierde a través de la Escorrentía Superficial (ES) y de la Percolación Profunda (PP). La precipitación efectiva se ha estimado de acuerdo con el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, por sus siglas en inglés). Se expresa:

$$P_{ef} = P_{mensual} * (125 - 0.2 * P_{mensual}) / 125 \text{ para } P_{mensual} \leq 250 \text{ mm}$$

$$P_{ef} = 125 + 0.1 * P_{mensual} \text{ para } P_{mensual} > 250 \text{ mm}$$

Valores decadiarios de precipitación:

$$P_{ef}(dec) = P_{dec} * (125 - 0.6 * P_{dec}) / 125 \text{ para } P_{dec} \leq (250 / 3) \text{ mm}$$

$$P_{ef}(dec) = (125 / 3) + 0.1 * P_{dec} \text{ para } P_{dec} > (250 / 3) \text{ mm}$$

Módulo de cultivo

Los tipos de datos disponibles en este módulo son:

- Cultivos diferentes al arroz
- Arroz

El módulo de cultivos es esencialmente para la introducción de datos. Requiriendo datos que incluyen la fecha de siembra, coeficientes de cultivo K_c , duración de las etapas del cultivo, profundidad de las raíces y fracción de abatimiento de humedad. Para proporcionar información sobre el plan de riegos, el modelo requiere de información adicional sobre características del suelo, como la Humedad del suelo disponible total (HA) (mm m^{-1}), profundidad máxima de raíces (m) y abatimiento inicial de humedad (% del total de la HA).

Módulo de suelo

El módulo del suelo es esencialmente dato de entrada, que requiere los siguientes parámetros:

- Agua Disponible Total (ADT)
- Tasa máxima de infiltración
- Profundidad radicular máxima
- Agotamiento Inicial de la humedad del suelo

Este módulo también incluye cálculos proveyendo la Humedad de suelo disponible inicialmente

Requerimientos de Agua del cultivo

El Módulo Requerimientos de Agua del Cultivo incluye los cálculos, dando como resultado los requerimientos de riego del cultivo en base decadiaria y para toda la estación de crecimiento, siendo este igual a la diferencia entre la Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ETc) y la precipitación efectiva.

La simulación con CROPWAT se realizó para dos cultivos predominantes en las UDAs analizadas en la cuenca del Serpis, Comunidad Valenciana. Los datos climáticos se obtuvieron de dos estaciones climatológicas: Játiva (E-8296) y Estación: Alcoy (E-8065) (Tablas 5 y 6). El clima de la zona es Mediterráneo semiárido, con medias anuales de las temperaturas de 17,5 y 14,5 respectivamente, precipitación media anual de 692,5 mm y 507,7 mm. Se dispuso de series mensuales de precipitación, temperaturas máximas y mínimas. Las propiedades hidráulicas del suelo se estimaron teniendo en cuenta la textura de suelos franco-arcilloso-arenoso, con densidad y contenidos de materia orgánica de un perfil del suelo de la región considerado como representativo, con una profundidad enraizable de 60 cm y una capacidad de retención útil de 124 mm m⁻¹.

Se consideró fecha de siembra para el cultivo de cítricos del 15 de noviembre y para el cultivo de la Alfalfa 1 de febrero,

IV.5 SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DEL SISTEMA DE RECURSO HÍDRICOS SAD AQUATOOL

El Sistema Soporte a la Decisión (SSD) AQUATOOL es una herramienta para la elaboración de modelos de simulación y optimización de la gestión de recursos hídricos a escala de cuenca desarrollada por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

El módulo SIMGES del SSD AQUATOOL es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas. Este módulo permite la modelación de sistemas de recursos hídricos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. Admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos.

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario defina el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación con tendencias a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volumen objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica.

IV.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La información utilizada en el análisis económico preliminar comprende curvas de demanda Agrícola que corresponden a las 6 unidades de demanda agrícola (UDA) que se mencionan en el apartado V.5.2. Cada curva de demanda indica el coste del m³ de agua por hectárea regada del cultivo en cada una de las UDAs. Para efectos del análisis económico, el punto de corte con el eje de las abscisas corresponde a la dotación media con la que están regando en promedio las distintas UDAs analizadas.

En el apartado VI.5 se presentan las curvas económicas de demanda de riego de la UDAs utilizadas en el estudio. Se selecciona un precio de agua en el punto de cierre de la curva, que para los cítricos ronda los 0,70 €/m³.

Para evaluar el coste de escasez en situación de cambio climático en base a las nuevas condiciones que se puedan presentar, se modifican las funciones económicas para cada una UDA's manteniendo los mismos beneficios económicos máximos (asumimos que los precios de los cultivos se mantienen) en la situación actual pero adaptando las necesidades de riego según los cambios previos de precipitación y temperatura.

Para el cálculo del coste total se suma al coste de escasez mas el coste adicional de bombeo (coste de explotación ver tabla 5) en aquella UDAs que requieran bombeos adicionales a los existentes con el fin de hacer sostenible agronómicamente los cultivos. El coste unitario de bombeo es estimó haciendo uso de la información disponible en el documento *Valoración del coste de uso de las aguas subterráneas en España* (DGOH y CA, 2003). Para ello las variables hidrogeológicas fundamentales que se han considerado son la profundidad del pozo, el caudal tipo y el nivel piezométrico.

Tabla 5. Coste de extracción de agua subterránea cuenca del Serpis.

Unidad Hidrogeológica		Coste € /m3	Coste Ptas/m3
80.049	Sierra Grossa	0,12	21
80.053	Villena-Benejama	0,17	29
80.054	Almirante-Mustalla	0,13	21
80.045	Plana Gandia-Dénia	0,10	17
80.058	Almudaina-Alfaro-Segaria	0,13	22
80.060	Sierra Mariola	0,16	27
80.065	Barrancones-Carrasqueta	0,21	35
80.066	Sierra Aitana	0,14	24
80.067	Serrella-Aixorta-Algar	0,13	21

El cálculo del coste unitario de bombeos se hizo a partir de precios actualizados de todos los componentes y de forma uniforme para todo el territorio utilizando la fórmula simplificada siguiente:

$$C = \frac{A_{20} + A_{10} + G}{3.6 Q t} + a k h$$

Siendo

C Coste resultante en €/m3

A₂₀ Anualidad en € de las amortizaciones a 20 años (Proyecto, pozo, caseta, línea eléctrica). Para el interés del 4 % anual cada anualidad representa el 7.36 % de la inversión.

A₁₀ Anualidad en € de las amortizaciones a 10 años (Transformador, grupo motobomba, tubería de impulsión). Para el interés del 4 % anual cada anualidad representa el 12.33 % de la inversión.

G Gastos medios anuales de mantenimiento expresados en €

Q Caudal medio de explotación en litros/seg

t Tiempo medio de explotación en horas/año

a Coste en € de la energía necesaria para elevar 1 m³ a la altura de 1 m con un precio unidad del kwh. Es un coste unitario que permite incluir un factor de rendimiento. En los cálculos se ha considerado un rendimiento del grupo motobomba del 70 % con lo que resulta $a = 0.4/100$

k Precio en € del kwh

h Altura manométrica media de explotación en m.

En la tabla 17 se muestran el coste de la extracción de agua subterránea para las Unidades Hidrogeológicas en la cuenca del Serpis y que abastece a las distintas UDAs.

Capítulo V

CASO DE ESTUDIO CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SERPIS

V.1 AMBITO DE ESTUDIO

El Sistema de Explotación del Serpis comprende la totalidad de la cuenca de los ríos Serpis, Jaracó y Beniopa y las subcuencas litorales comprendidas entre el límite sur del término municipal de Cullera y el límite norte del término municipal de Oliva. Ocupa una superficie de 990 km².

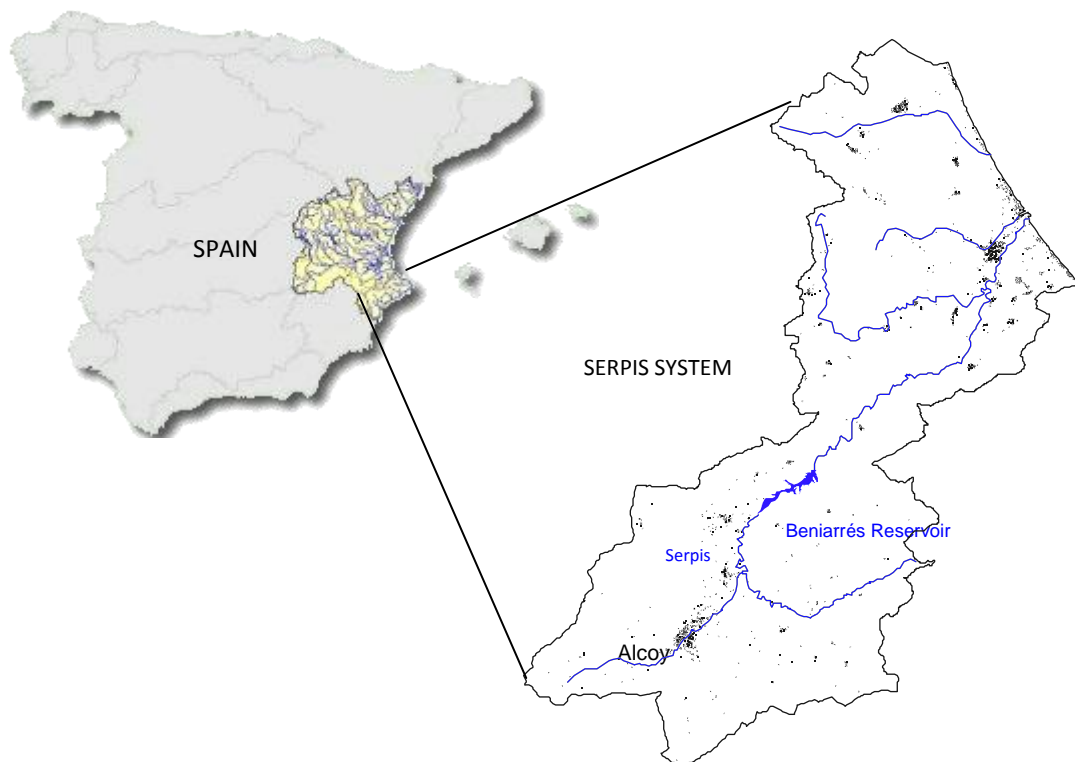


Figura 14. Localización de caso de estudio

El clima predominante en la zona es el litoral mediterráneo, aunque en la cuenca vertiente al embalse de Beniarrés se puede apreciar un ligero efecto de continentalidad. Las precipitaciones aumentan progresivamente del litoral hacia la costa. Así, en Alcoy se registra una media anual cercana a los 500 mm., mientras que la estación Játiva se aproxima a los 700 mm. La precipitación media de la cuenca se estima en 600 mm. Las temperaturas adoptan un gradiente semejante, pasando de medias anuales de 14,5 °C en el interior, a 17,5 °C en el litoral. La temperatura media asignada al sistema es de 17,5 °C.

Tabla 6. Datos Climáticos del Año medio (1940-2005). Estación de Játiva

DATOS CLIMÁTICOS**Estación: Játiva (E-8296)****Altitud: 76 m Latitud: 39 4 Longitud: 3 16 Alt. Anemómetro: 10**

	T.Med (OC)	T.Max (OC)	T.Min (OC)	HRmed (%)	HRmax (%)	HRmin (%)	Viento (km/día)	Precip. (mm)
ENE	9,9	16,3	4	64,7	72,9	54,5	205,1	65,1
FEB	11	17,9	5,2	63,7	73,1	53,9	209,5	55,3
MAR	13,1	20,9	6,3	61,7	72,3	50,9	199,1	54,8
ABR	15,3	21,9	8,1	63,9	73,6	54	197,7	59,9
MAY	18,9	25,3	11,6	66	74,5	57,4	172,5	50,6
JUN	22,9	29,9	15,9	66,7	75	58,6	160	25,7
JUL	26,2	33,3	18,7	67,5	76,1	58,8	153,5	7
AGO	26,5	33,4	19,5	69,5	78,6	56,4	151,5	19,8
SEP	23,5	30,8	16,8	69,7	79,9	53,9	141,4	62,9
OCT	18,6	25	12,4	67,5	77,4	52,1	166,5	123,5
NOV	13,9	20	7,8	68,9	77,3	56,6	163,2	84
DIC	10,7	17,3	5,3	65,7	73,9	55,6	197,4	83,9
TOTAL	17,5							692,5

Tabla 7. Datos Climáticos del año medio (1940-2005). Estación Alcoy

DATOS CLIMÁTICOS**Estación: Alcoy (E-8065)****Altitud: 562 m Latitud: 38 42 Longitud: 3 13 Alt. Anemómetro: 5**

	T.Med (OC)	T.Max (OC)	T.Min (OC)	HRmed (%)	HRmax (%)	HRmin (%)	Viento (km/día)	Precip. (mm)
ENE	7,5	12,2	2,8	65	73,7	52,6	157,9	48,2
FEB	8,2	13,1	3,3	62,5	72,9	50,5	161,5	44,9
MAR	9,9	15,5	4,4	61,1	72,1	49,5	168	44,3
ABR	11,9	17,4	6,3	63,7	72,5	53,9	162	49,3
MAY	15,5	21,6	9,5	65,4	73,6	57,2	155,7	48,1
JUN	19,7	26,2	13,2	64,1	72,1	56,2	151,2	26,4
JUL	23,5	30,7	16,3	63,8	71,3	56,1	140,5	9,2
AGO	23,6	30,3	16,8	67,7	75,6	58,2	143,5	14,2
SEP	20,4	26,7	14,1	68,4	78,5	56,2	129,7	45,7
OCT	15,3	20,7	10	68,3	77,9	55,2	144,8	67
NOV	10,8	15,6	6	69,2	78,3	54,9	141	49,6
DIC	7,1	12,1	3,3	65,4	73,5	52,8	152,6	60,9
TOTAL	14,5							507,7

La población permanente total en la zona asciende a 231.283 habitantes según datos del año 2005 (INE, 2005). Los núcleos urbanos con población superior a 15.000 habitantes son Alcoy, Gandía y Tavernes de la Valldigna. En temporada estival y debido al aflujo turístico, se registra un incremento de la población en torno al 50 % de la cifra anterior, siendo Gandía el de mayor incremento. La mayor parte de los municipios del sistema se abastecen mediante la explotación de pozos y/o manantiales.

La superficie total cultivada asciende a 37.401 ha, de las cuales 15.169 Has (41 %) corresponden a regadío, mientras que el resto (59 %) son de secano. Todos los municipios

del sistema pertenecen a la provincia de Valencia. En la zona de La Safor donde se localiza la mayor parte del regadío del sistema (86 %), la superficie de regadío es superior a la de secano, siendo los cítricos el cultivo predominante (92 %). En el resto del sistema, se localiza únicamente el 14 % del regadío, representando éste el 9 % de la superficie total cultivada en la zona; los cultivos son: frutales (42 %), herbáceos (36 %) y barbecho de regadío (17 %) (CHJ, 2009).

V.1.1 Hidrografía

El río Serpis, con 74,5 km de longitud, se inicia en las estribaciones de la Sierra de Biscoy, en donde se denomina Barranco del Troncal y río Polop. Su cauce discurre principalmente sobre materiales margosos y lleva agua tan sólo en la época lluviosa, hasta las proximidades de Alcoy, donde se le une, por la margen izquierda, el río Barchell, de corriente continua, que drena parte del acuífero de la Sierra de Mariola. Atraviesa la ciudad de Alcoy, profundamente encajado en las margas tap, y recoge los residuos líquidos urbanos e industriales y los sobrantes del río Molinar, por la margen derecha.

A su paso por Cocentaina, tras recoger las aguas del río Vallaseta por la margen derecha, su cauce se orienta S-N, para cambiar de nuevo a O-E en las proximidades de Muro de Alcoy, donde recibe, por la margen izquierda, las aguas de su tributario, el río Agres. En Beniarriés se ubica el embalse del mismo nombre, con cerrada en las calizas de la Sierra de Albureca y vaso en margas tap. A partir de Lorcha el río se encaja en los materiales carbonatados por el denominado barranco del Infierno hasta Villalonga, a lo largo del cual se produce el drenaje del acuífero, al quedar debajo del nivel regional el cauce del río. En Real de Gandía, y por la margen izquierda, recibe las aguas del río Bernisa. La desembocadura actual del río Serpis tiene lugar junto al Grao de Gandía, después de atravesar los depósitos cuaternarios de la Plana de Gandía-Denia.

Los afluentes más importantes son el Vallaseta (142 Km²) y el Bernisa (149,6 Km²). El río Vallaseta, de 20,9 km de longitud, recoge las escorrentías superficiales de parte de las sierras de Serrella (1.379 m.s.n.m.), Alfaro y Almudaina. Prácticamente todo su cauce se excava en las margas tap. Durante el estío permanece seco, al no recoger ninguna escorrentía subterránea.

El río Bernisa, de 28,6 km de longitud, tiene la mayor parte de su cuenca receptora constituida por calizas y dolomías de alta permeabilidad, motivo por el cual excepcionalmente lleva agua en su curso alto y medio. Su cauce se inicia al norte de Pinet, en Sierra Grossa, y discurre sobre materiales carbonatados prácticamente hasta Rótova, a

partir de donde excava su cauce en materiales detríticos hasta su desembocadura en el río Serpis, a la altura de Real de Gandía. A unos 4 km de su desembocadura recibe parte de los sobrantes de regadío de la margen izquierda del río Serpis, más el caudal de pequeños manantiales que nacen en su cauce.

La cuenca del río Jaracó tiene una superficie de 97,4 Km² siendo la longitud de su cauce de 13,6 km. Nace en unos manantiales situados en el núcleo de Simat de Valldigna (Fuentes Mayor y Menor). La cuenca baja se sitúa en una zona semipantanosas, tradicionalmente dedicada al cultivo del arroz, aunque en la actualidad se encuentra en vías de transformación. Sus aguas son aprovechadas para regar los naranjales de la Valldigna.

El río (más bien barranco) Beniopa tiene 12 km. de recorrido y 49,5 km² de superficie de cuenca, constituida por materiales permeables. El cauce, excavado en calizas, rara vez lleva agua en su curso medio y alto. En la parte baja ya en la Plana de Gandía, recoge sobrantes de regadíos y parte de la descarga de las marjalerías costeras.

Tabla 8. Principales índices físicos de los cauces más importantes del sistema

CUENCA	LONGITUD (Km)	SUPERFICIE (Km ²)	COTA MÁXIMA (m.s.n.m.)	COTA MÍNIMA (m.s.n.m.)
Río Jaraco	13,6	97,4	840	0
Río Beniopa	12,0	49,5	840	0
Río Vallaseta	20,9	142,0	1.462	385
Río Bernisa	28,6	149,6	836	30
Río Serpis en Beniarrés	33,2	469,0	1.462	282
Río Serpis (completo)	74,5	752,8	1.462	0

Por lo que respecta a zonas inundables, las principales áreas del sistema sometidas a riesgo de inundación son los conos aluviales de los ríos Beniopa, que afecta al casco urbano de Gandía, y tramo final del río Serpis (Grao de Gandía), y las marjalerías de Tavernes de Valldigna, Jaracó y Piles.

V.1.2 Recursos y Demandas del Sistema

La estimación de los recursos naturales y disponibles procede básicamente del estudio "Actualización del inventario de recursos hidráulicos y de disponibilidades de agua de la cuenca del Júcar" (CHJ, 1998).

Los recursos, tanto superficiales como subterráneos, asignados al Sistema de Explotación Serpis se distribuyen de la manera siguiente:

Tabla 9. Distribución de recursos superficiales y subterráneos. (Fuente: INE, 2009)

	Sistema de Explotación	Superficial		Subterráneo		Reutilización		Reutilización		Transferencia		Total
		hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³ /año
Intercomunitarios	Mijares-Plana de Castellón	122,14	43,83	153,98	55,25	2,58	0,93	0	0	0	0	278,71
	Palancia-Los Valles	256,81	56,53	152,39	33,54	45,13	9,93	0	0	0	0	454,32
	Turia	81,97	49,11	79,34	47,53	5,61	3,36	0	0	0	0	166,93
	Júcar	904,15	53,67	768,22	45,6	12,38	0,73	0	0	0	0	1.684,75
	Subtotal	1.365,07	52,81	1.153,94	44,64	65,7	2,54	0	0	0	0	2.584,70
Intracomunitarios	Serpis	45,64	40,58	66,33	58,98	0,5	0,44	0	0	0	0	112,47
	Marina Alta	5,89	7,07	71,18	85,4	1,58	1,9	4,69	5,63	0	0	83,34
	Marina Baja	21,02	33,66	31,94	51,14	9,5	15,2	0	0	0	0	62,46
	Subtotal	72,55	28,09	169,45	65,61	11,57	4,48	4,69	1,82	0	0	258,27
Mixtos	Vinalopó-Alacantí	6,93	3,44	129,94	64,54	13,84	6,87	0,4	0,2	50,23	24,95	201,34
	Cenia-Maestrazgo	7,02	6,76	96,24	92,68	0,58	0,55	0	0	0	0	103,84
	Subtotal	13,95	4,57	226,18	74,11	14,42	4,72	0,4	0,13	50,23	16,46	305,18
TOTAL CHJ		1.451,58	46,11	1.549,57	49,22	91,69	2,91	5,09	0,16	50,23	1,6	3.148,15

Para evaluar los recursos totales en el Sistema deben considerarse las extracciones por bombeo, que producen una afección a los ríos al disminuir el caudal de las emergencias. La mayor parte de los bombeos, con fines agrícolas en su mayoría, se producen en la zona de la Plana. Los recursos totales del sistema ascienden entonces a 112,07 Hm³ (CHJ, 2009).

Los recursos regulados en el embalse de Beniarrés se estiman en 16,98 Hm³/año, mientras que los recursos subterráneos alcanzan la cifra de 105,00 Hm³. Los retornos de riego suponen un volumen medio anual de 8,00 Hm³. En estas condiciones, el volumen total de recursos disponibles asciende a 129,89 Hm³. Se estima que deben mantenerse unas salidas de los acuíferos costeros al mar de 21 Hm³/año para evitar avances del frente salino, y se fija en 12 Hm³ el volumen requerido para atender las necesidades medioambientales del Sistema.

Obras e instalaciones de Infraestructura Hidráulica

En el Sistema de Explotación Serpis se cuenta con las siguientes infraestructuras:

<u>EMBALSES</u>	<u>RÍO</u>	<u>CAPACIDAD (Hm³)</u>
Beniarrés	Serpis	29,5

Tabla 10. Infraestructuras en el sistema Serpis. [(-) Fuera de uso].

<u>APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS</u>	<u>POTENCIA (Mw)</u>	<u>CAUDAL MAXIMO (m³/s)</u>	<u>SALTO MAXIMO (m)</u>
Central de Lorcha	0,68	2,8	31,0
Central de Rincón del Duque	0,12	-	-
Central de Ullals	0,13	-	-
Central de Reprimala	0,34	7,4	18,3

Masas de aguas superficiales

La definición de la red hidrográfica básica la realizó el CEDEX para todo el territorio peninsular en el marco de elaboración del *Informe de los Artículos 5 y 6*. Los criterios utilizados para la definición de la red hidrográfica fueron los siguientes: en cualquier punto de la red debe existir un área de cuenca vertiente mayor de 10 km² y una aportación media anual en régimen natural superior a 0,1 m³/s. Estos mismos criterios de definición se proponen también en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH).

Dentro de las masas de agua superficial, conforme a la IPH, se distinguen las siguientes categorías de masas de agua:

- Ríos.
- Lagos.
- Aguas de transición.
- Aguas costeras.

De acuerdo con su naturaleza, podrán clasificarse como:

- Masas de agua naturales.
- Masas de agua muy modificadas o masas de agua artificiales

La metodología (CHJ, 2009) que se empleó para definir la red hidrográfica básica consistió en utilizar un modelo de direcciones de drenaje basado en el modelo digital del terreno (MDT) de resolución 500 m x 500 m (obtenido a partir del MDT de resolución 100 m x 100 m del Servicio Geográfico del Ejército). En este modelo se incorporó como huella la red

fluvial digital del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:25.000 y se eliminaron los sumideros para conferir continuidad a la red de drenaje resultante.

Tabla 11. Descripción de las masas de agua superficiales categoría río en la cuenca del Serpis.

Cod_ MA_PHJ	Cod_ MA_ART5	Descripción	Naturaleza	Ecotipo	Separación aguas arriba	Separación aguas abajo
19.01	19.01	Río Jaraco: Cabecera - Ferrocarril	Natural	18	Cabeceras	LIC
19.02	19.02	Río Jaraco: Ferrocarril - Mar	Natural	18	LIC	Mar
20.01	20.01	Río Beniopa	Natural	18	Cabecera	Mar
21.02	21.02	Río Serpis: Pont Set Llunes EDAR Alcoy	Natural	9	LIC	Distinta presión, vertido
21.03	21.03	Río Serpis: EDAR Alcoy - E. Beniarres	Natural	9	Distinta presión, vertido	Embalse
21.03.0 1.01	21.03.01.01	Río Vallaseta	Natural	9	Cabeceras	Distinta presión, confluencia
21.04	21.04	Embalse Beniarres	Muy Modificada	-	Embalse (Beniarres)	Embalse (Beniarres)
21.05	21.05	Río Serpis: Beniarres - Lorcha	Muy Modificada	9	Embalse	LIC - Distinta categoría
21.05.0 1.01	21.05.01.01	Bco. Encantada	Natural	9	Cabecera	Distinta presión, confluencia
21.06	21.06	Río Serpis: Lorcha - Reprimala	Natural	9	LIC - Distinta Categoría	LIC
21.07	21.07	Río Serpis: Reprimala - Bco. Murta	Natural	9	LIC	Distinta Categoría
21.07.0 1.01	21.07.01.01	Río Bernisa: Cabecera - Bco. Llutxent	Natural	18	Cabecera	Distinta presión
21.07.0 1.02	21.07.01.02	Río Bernisa: Bco. Llutxent - Río Serpis	Natural	18	Distinta presión	Distinta tipología o ecotipo - confluencia
21.08	21.08	Río Serpis: Bco. Murta - Mar	Muy Modificada	9	Distinta categoría	Mar

Masas de aguas subterráneas

El vigente Plan Hidrológico del Júcar (PHJ), define unidad hidrogeológica a uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua. La delimitación de estas unidades se realizó en base a los trabajos del entonces Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas, con la colaboración del Instituto Geológico y Minero de España.

En el año 2005, el Ministerio de Medio Ambiente, a través del Área de Recursos subterráneos de la Dirección General del Agua (DGA) realizó un estudio en el que se delimitaron las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias⁴. El objetivo

⁴ Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas

principal de este trabajo era definir las masas de agua subterránea tal como dispone la Directiva Marco del Agua partiendo de las UHG existentes y de acuerdo a una serie de criterios establecidos por la DGA. Con el fin completar la información disponible en el Ministerio de Medio Ambiente, las diferentes Confederaciones Hidrográficas colaboraron en la definición de los límites de las masas de agua subterránea aportando los conocimientos y estudios específicos que disponían.

En la revisión de las masas de agua subterránea, se ha tenido en cuenta los criterios de identificación y delimitación de masas de aguas subterránea descritos en la IPH, que en gran medida coinciden con los seguidos en el estudio del MMA (2005). Estos criterios se describen a continuación:

- Las masas de agua subterránea se definirán a partir de las unidades hidrogeológicas definidas en los planes hidrológicos de cuenca.
- En la delimitación se seguirán los límites impermeables.
- En zonas remotas situadas en divisorias hidrográficas donde no haya actividades humanas significativas podrá utilizarse como alternativa la divisoria de flujo subterráneo.
- El curso de ríos efluentes también podrá utilizarse como límite en aquellos casos en que el riesgo de no alcanzar el buen estado sea diferente en las zonas en que queda dividida la unidad.
- En la delimitación también se seguirán los límites de influencia de la actividad humana, con objeto de que las masas definidas permitan una apropiada descripción del estado de las aguas subterráneas.
- Se delimitarán como masas de agua diferenciadas aquellas zonas de las unidades hidrogeológicas que, por razones de explotación, de intrusión marina, de afección a zonas húmedas o de contaminación difusa, presenten un riesgo evidente de no alcanzar el buen estado, lo que permitirá concentrar en la zona problemática el control y la aplicación de medidas.

Las Masas de aguas subterráneas (figura 14) que se adscriben al Sistema de Explotación Serpis, no necesariamente de manera exclusiva, son las siguientes:

intercomunitarias (MIMAM, 2005)

- Sierra Grossa (080.049)
- Villena-Benejama (080.053)
- Almirante-Mustalla (080.054)
- Plana de Gandía (080.045)
- Alfaro- Segaria (080.058)
- Mediodía (080.058)
- Sierra Mariola (080.060)
- Barrancones-Carrasqueta (080.065)
- Sierra Aitana (080.066)
- Serrella-Aixorta-Algar (080.067)

Masas de Aguas Subterraneas Cuenca del Serpis

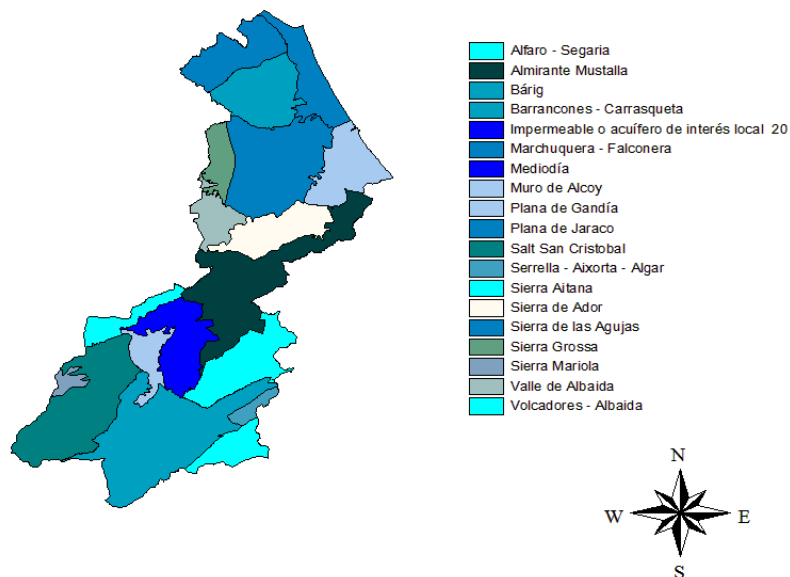


Figura 15. Masas de Aguas Subterráneas que se adscriben al Sistema de Explotación Serpis

V.2 Topología del modelo de simulación de la gestión del río Serpis

A continuación se explica la topología del modelo de simulación desarrollado con el módulo SIMGES del Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) AQUATOOL (DIHMA, UPV), de la gestión del río Serpis. La siguiente figura muestra el modelo completo desarrollado de la cuenca (Mellado Ros, *et al*, 2007).

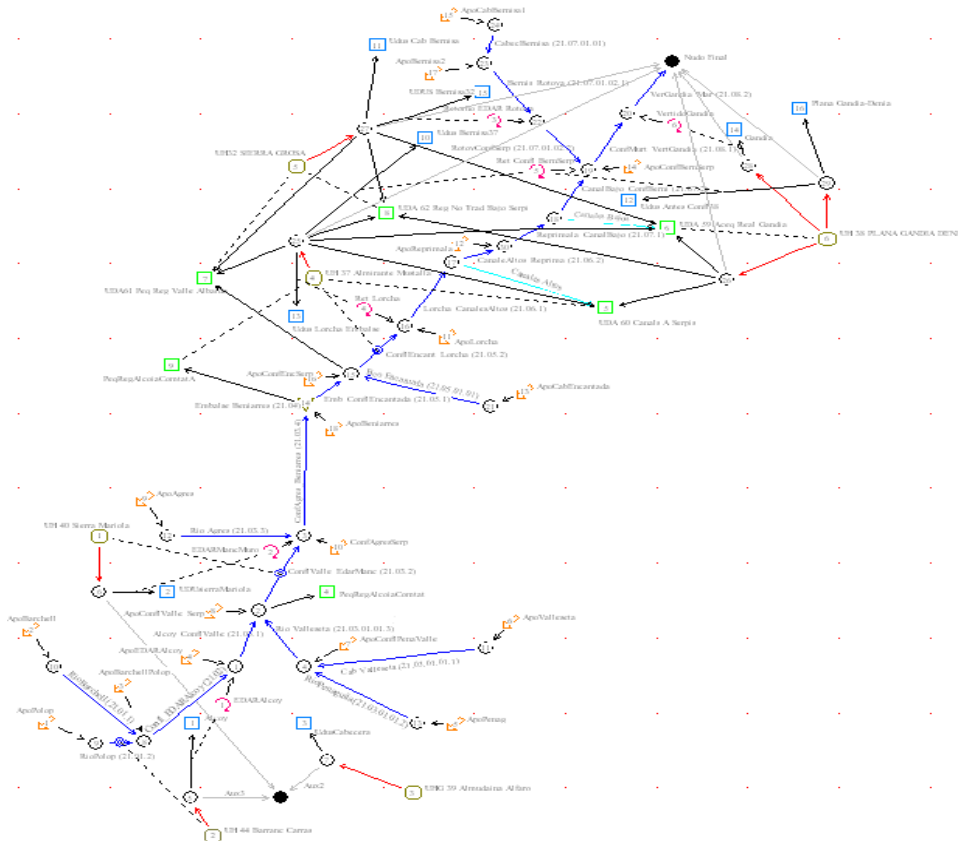


Figura 16. Esquema del modelo del río Serpis (Fuente. Mellado Ros, et. al, 2007)

V.2.1 Río Serpis aguas arriba del embalse de Beniarrés

El tramo más aguas arriba es la conducción tipo-1 [RíoBarchell (21.01.1)], la cual corresponde con el río Barxell, en este tramo, la aportación que realiza la cuenca la hemos denominado “ApoBarchell”. A continuación, se encuentra la conducción tipo-3 [RíoPolop(21.01.2)] que coincide con el tramo del río Polop, el elemento de aportación a este tramo es “ApoPolop”, el cual representa la aportación de la cuenca a ese tramo del río Serpis hasta su confluencia con el río Barxell. Este tramo de río está conectado hidráulicamente con la Unidad Hidrogeológica 44 Barrancones-Carrasqueta. En la confluencia de los ríos Barxell y Polop, se ha colocado la aportación “ApoBarchellPolop”, debido al proceso lluvia-escorrentía que tiene lugar en esa zona de intercuenca, entre los nudos 10-8 y 9-8.

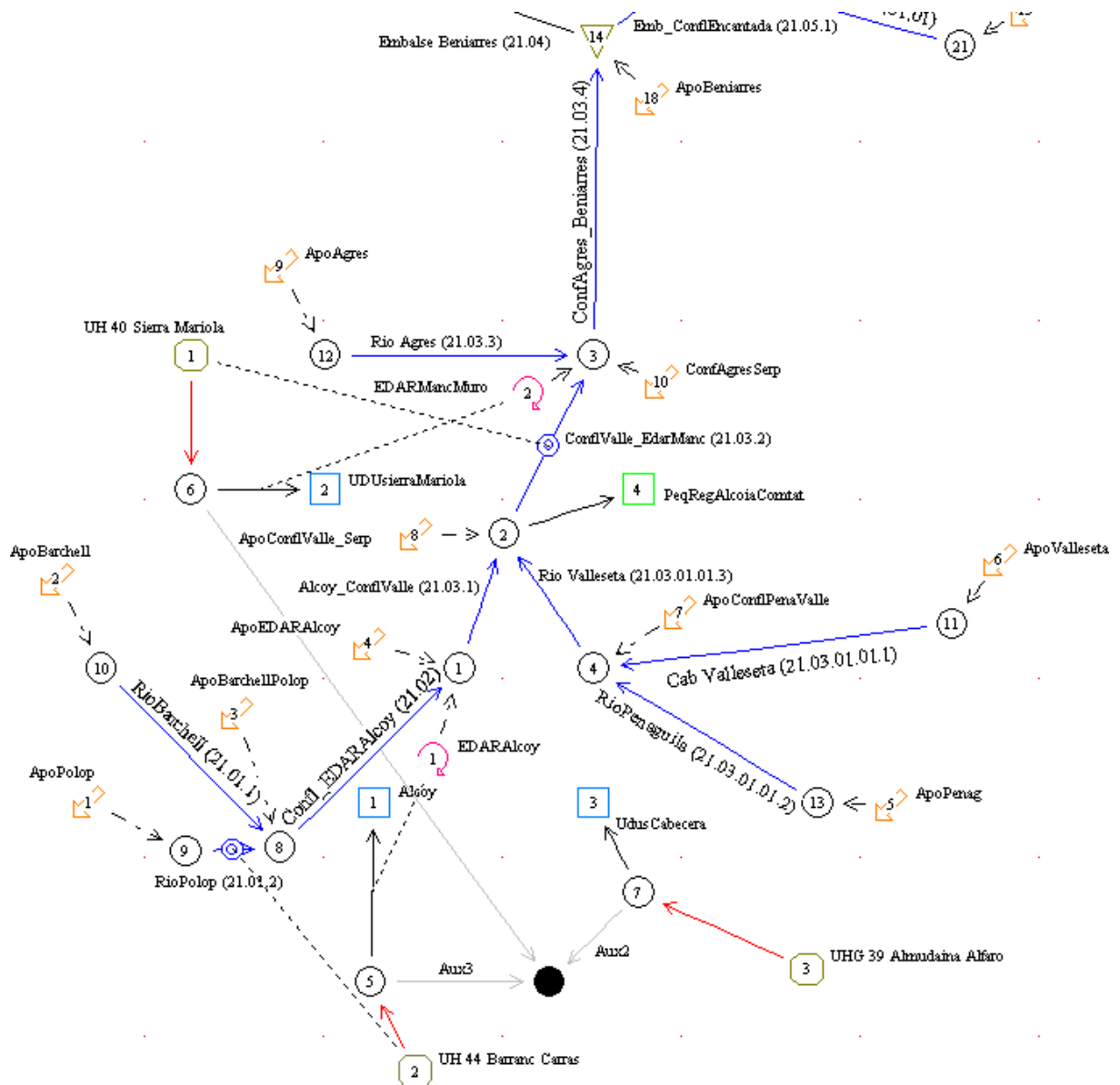


Figura 17. Detalle del modelo del río Serpis aguas arriba del embalse de Beniarrés.

Si siguiendo por el río Serpis aguas abajo, se encuentra la conducción tipo-1 [Confl_EDARAlcoy (21.02)], la cual va desde la confluencia de los ríos Barxell y Polop (nudo 8) hasta la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Alcoy (nudo 1). El elemento de aportación asociado a este nudo es "ApoEDARAlcoy", que corresponde a la aportación recogida en la cuenca entre los nudos 8 y 1.

La siguiente conducción con la que nos encontramos, es la conducción tipo-1 [Alcoy_ConflValle (21.03.1)], que va desde el vertido de la EDAR de Alcoy (nudo 1) hasta la desembocadura del río Vallseta (nudo 2). El elemento de aportación asociado a este nudo es "ApoConflValle_Serp", que corresponde a la aportación recogida en la cuenca entre los nudos 1 y 2 y entre los nudos 4 y 2 (tramo final del río Vallseta).

El inicio de río Vallaseta corresponde a la conducción tipo-1 [Cab Valleseta (21.03.01.01.1)], la cual se extiende desde la cabecera del río Vallaseta (nudo 11) hasta la desembocadura del río Penàguila (nudo 4). El elemento de aportación que lleva asociado el nudo 11 es “ApoValleseta”, que es la aportación que recibe la cabecera del Vallaseta. En el nudo 4, existe la aportación “ApoConflPenaValle”, refiriéndose a la aportación entre los nudos 11 y 4 y los nudos 13 y 4. El tramo de río Penàguila coincide con la conducción tipo-1 [RioPenaguila (21.03.01.01.2)], que va desde la cabecera del río Penàguila (nudo 13), hasta su confluencia con el río Vallaseta (nudo 4). La aportación a la cabecera del Penàguila es “ApoPenag”.

El siguiente tramo de río es la desembocadura del río Vallaseta, cuya conducción tipo-1 [Rio Valleseta (21.03.01.01.3)] va desde la confluencia con el río Penàguila hasta la confluencia con el río Serpis.

Continuando aguas abajo, el siguiente tramo con el que nos encontramos, es la conducción tipo-3 [ConflValle_EdarManc (21.03.2)] que se extiende desde la confluencia del río Vallaseta (nudo 2) hasta la confluencia del río Agres (nudo 3). Esta conducción tipo-3, está conectada con la Unidad Hidrogeológica 40 Sierra Mariola. La aportación asociada al nudo 3 es “ConfAgresSerp”, y corresponde a la aportación que tiene lugar entre los nudos 2 y 3 y los nudos 12 y 3. El río Agres coincide con una conducción tipo-1 [Rio Agres (21.03.3)] que va desde la cabecera del río (nudo 12) y la confluencia del mismo con el río Serpis (nudo 3). La aportación que se asocia a la cabecera del río Agres es “ApoAgres”.

A continuación, nos encontramos con un tramo muy pequeño que une la confluencia del río Agres y el punto de vertido de la EDAR Font de la Pedra, con la cola del embalse de Beniarres, siendo una conducción tipo-1 [ConfAgres_Beniarres (21.03.4)] y su aportación a la entrada del embalse “ApoBeniarres”.

Para representar las EDAR de Alcoy y de Font de la Pedra se consideran en el modelo los elementos de retorno “EDARAlcoy” y “EDARMancMuro” que se incorporan a los nudos “1” y “3” respectivamente.

Los recuadros de color azul, representan las unidades de demanda urbana (UDU), las cuales van asociadas a un bombeo de una o varias unidades hidrogeológicas y a una toma.

De la UH 44 Barrancones-Carrasqueta parte un bombeo al nudo 5, del cual sale una toma que alimenta a la demanada urbana de Alcoy (UDU 1). Esta demanda tiene asociada el retorno 1, que es el vertido de la EDAR de Alcoy, como ya hemos explicado anteriormente.

De la UH 39 Almudaina –Alfaro parte otro bombeo que va a parar al nudo 7, y de este nudo sale una toma que alimenta a la demanda urbana “UdusCabecera”.

De la UH 40 Sierra Mariola parte un bombeo al nudo 6, del que sale una toma que alimenta a la UDUSierraMariola. Esta demanda tiene asociada el retorno 2, que coincide con el vertido de la EDAR de Font de la Pedra.

También se observa que directamente del río, hay una derivación mediante una toma desde el nudo 2 hasta la Unidad de Demanda Agraria 4 “PeqRegAlcoyaComtat”, esta demanda agraria, es la coge agua del río aguas arriba del embalse, ya que veremos en el siguiente punto que existe otra demanda agraria para la misma zona de regadío, pero que cogerá agua directamente del embalse de Beniarrés.

V.2.2 Río Serpis Agua Abajo del Embalse de Beniarrés

Del elemento, de tipo embalse, “Embalse Beniarres (21.04)” parte un elemento de conducción tipo-1 denominado “Emb_ConflEncantada (21.05.1)” que representa el corto tramo del río Serpis entre el embalse de Beniarrés y la confluencia con el barranco de la Encantada. Dicho barranco está considerado en el modelo mediante el elemento del tipo 1 “Bco Encantada (21.05.01.01)” y por el elemento de aportación “ApoCabEncantada” que representa el aporte natural de la cuenca. Del elemento tipo embalse, también parte una derivación hacia la unidad de demanda agraria 9 “PeqRegAlcoyaComtat”, la cual ya hemos mencionado anteriormente que se abastece tanto aguas arriba del embalse como del embalse.

En el nudo que representa la confluencia entre el río Serpis y el Barranco de la Encantada (nudo 15), se incorpora un elemento de aportación denominado “ApoConfEncSerp” y que representa la aportación de la cuenca del río Serpis entre el embalse de Beniarrés y la desembocadura del Barranco de la Encantada.

Siguiendo con el curso del río aguas abajo, nos encontramos la conducción tipo-3 “ConflEncant_Lorcha (21.05.2)” que va desde la confluencia con el Barranco de la Encantada hasta la población de Lorcha (nudo 16), estando dicha conducción conectada hidráulicamente con la Unidad Hidrogeológica 37 Almirante-Mustalla. A este nudo también le llega el retorno 4 “RetLorcha”, que corresponde al vertido de la EDAR de Lorcha. El elemento de aportación asociado a este nudo es “ApoLorcha” , y representa la aportación de la cuenca para el tramo de río mencionado (ConflEncant_Lorcha (21.05.2)).

a la aportación existente entre el final de la masa de agua 21.07.01.01 y la cabecera. El siguiente tramo de río, está representado por la conducción tipo-1 “Bernis_Rotova (21.07.01.02.1)”, que se extiende desde el final de la masa de agua 21.07.01.01 hasta la EDAR de Ròtova (nudo 22), siendo en este nudo donde va a parar el vertido de la EDAR de Ròtova (Retorno EDAR Rotova). El tramo final del río Bernisa coincide con la conducción tipo-1 “RotovConfSerp (21.07.01.02.2)”, con una extensión desde la EDAR de Ròtova hasta la confluencia con el río Bernisa (nudo 19). En este nudo 19 se ha colocado la aportación “ApoConfBernSerp”, siendo ésta la aportación que recibe el río en los tramos comprendidos entre el final de la masa de agua 21.07.01.01 y la confluencia del Bernisa con el Serpis, y el tramo de río entre Reprimala y la confluencia con el Bernisa.

A partir de la confluencia con el río Bernisa, se encuentra el tramo de río representado por la conducción tipo-1 “ConfMurt_VertGandia (21.08.1)”, la cual va desde la confluencia con el Bernisa hasta el vertido de la EDAR de Gandía (nudo 20). Seguidamente a este tramo, tenemos el tramo final del río Serpis, siendo éste la conducción tipo-1 “VerGandia_Mar (21.08.2)”, que se extiende desde el vertido de la EDAR de Gandía hasta la desembocadura del Serpis en el Mar Mediterráneo.

Para representar los suministros subterráneos de poblaciones y regadíos de la zona se han considerado una serie de elementos de bombeo adicional que parten de las distintas Unidades Hidrogeológicas de la zona, y que van a parar a unos nudos auxiliares de los que parten las tomas de suministro. Este es el caso de las demandas de las poblaciones de Gandía, playa de Gandía y pequeñas poblaciones del tramo medio. Estas demandas se han considerado en el modelo mediante 3 elementos de demanda denominadas “Gandia”, “Plana Gandia-Denia” y “Udus Antes Confl38” respectivamente. A parte de las mencionadas, existen otras demandas urbanas en el tramo medio y bajo del río, “Udus Cab Bernisa, UDUS Bernisa32, Udus Bernisa37”, que son las demandas de poblaciones como Llutxent, Benicolet, Montichelvo, Ròtova, y demás poblaciones de alrededor. Más cercana al embalse se encuentra la demanda urbana “Udus Lorcha Embalse”, que es la que satisface la demanda de la población de Lorcha.

En cuanto a las demandas agrarias, tenemos las demandas “UDA61 Peq Reg Valle Albaida, UDA 60 Canals A Serpis, UDA 59 Aceq Real Gandia”, las cuales toman agua directamente del río Serpis y a través de bombeos adicionales de las Unidades Hidrogeológicas, mientras que la demanda “UDA 62 Reg No Trad Bajo Serpi”, sólo se abastece de aguas subterráneas, pero eso sí, de tres acuíferos distintos “UH32 Sierra Grosa, UH 37 Almirante Mustalla y UH 38 Plana Gandia Denia”.

En el modelo desarrollado para el sistema de explotación Serpis, (Mellado Ros, et. al, 2007) se considera 18 aportaciones naturales de la cuenca al propio río. Estas aportaciones se han obtenido mediante el modelo lluvia - escorrentía del Sistema de Integrado de Modelización Precipitación Aportación (SIMPA), se trata de un modelo hidrológico conceptual y distribuido, que simula los flujos medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de España (Estrela, T., Quintas, L. CEDEX. 1996). Mediante este modelo se obtienen series de caudales mensuales, integrando la escorrentía total en las cuencas vertientes a los puntos de simulación, utilizando para su calibración los datos históricos registrados.

Capítulo VI

APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

Para alcanzar el objetivo de analizar el posible impacto del cambio climático a largo plazo (LP) (2071-2100) en la cuenca del Serpis se recurrió a evaluar mediante un modelo de simulación de la gestión a escala mensual el citado periodo bajo el supuesto de un escenario de emisiones antropogénicas A2. Para ello se determinaron escenarios futuros a LP (2071-2100) para la hidrología y las demandas del sistema corrigiendo los datos históricos disponibles para la cuenca en el periodo 1961-1990 con los cambios (en media y desviación estándar) que los modelos regionales disponibles predicen para los escenarios futuros a LP en la zona (apartado VI.1).

Los pasos seguidos para aplicar la metodología al caso de estudio se muestran en la figura 12 La información de partida es la serie de datos hidrológicos y climáticos básicos de la Cuenca Hidrográfica del río Serpis. La información climatológica utilizada corresponde a las estaciones de Játiva y Alcoy (Tabla 6 y 7).

Se extrajo la información de los MCRs para corregir las series originales con objeto de derivar (siguiendo la metodología descrita en el apartado IV) los escenarios climáticos futuros (periodo 2071-2100) para la esorrentía y las variables climáticas temperatura y precipitación en la cuenca.

Para calcular los requerimientos de los cultivos se utilizó el programa CROPWAT versión 8 de la FAO. (Smith, Clarke FAO 1998).

Una vez obtenidos los datos de aportaciones y las demandas agrícolas futuras se simuló la gestión del sistema usando el módulo SIMGES del SSD AQUATOOL (Andreu et al. 1996) y se compararon los resultados con los existentes en el periodo histórico. Finalmente, se evalúa el impacto económico de los cambios futuros en la disponibilidad de recursos y los requerimientos de riego, comparando el coste de escasez para cada una de las demandas agrícolas del sistema (situación actual y futura). Los resultados fueron obtenidos estimando los costes de escasez a partir de los déficits derivados del modelo de gestión mediante curvas económicas de demanda para el agua de riego. La evaluación económica se hace de este modo procesando los resultados del modelo de simulación con una hoja de cálculo que contiene la información económica.

VI.1 Escenarios Climáticos a escala 50km x 50km en la zona de estudio

Los escenarios han sido generados a partir de información procedente del proyecto europeo PRUDENCE (ver capítulo III). Su base de datos incluye series temporales de escorrentías mensuales, temperatura y precipitación para dos ventanas temporales, la de clima actual o control (1961-1990) y la de clima futuro o escenario (2071- 2100). El primer periodo es utilizado para calibrar los modelos MRCs de acuerdo con la evolución observada del contenido global de CO₂ y de aerosoles sulfato, y el segundo para simular la evolución correspondiente a los escenarios de emisiones antropogénicas A2. Se extrajo la información disponible para la zona de estudio, que en este caso se localizaba sobre una celda de la celda CRU de los modelos regionales.

En esta investigación se ha utilizado la información procedente de dos MRCs: *GKSS* y *MPI*, para generar los escenarios futuros a ser estudiados con el modelo de gestión, siendo el modelo global al que se anidan ambos el HadAM3. Este trabajo podría extenderse llevando a cabo el análisis de todos los escenarios (usando la información pública generada para el periodo de análisis de todos y cada uno de los modelos regionales, incluso predicciones generadas por ENSEMBLE de los mismos) que pueden ser generados con la metodología propuesta. Esta extensión de los trabajos requeriría generar para el resto de MRCs y (ya se ha realizado para los modelos GKSS y MPI) las series de variables climáticas requeridas para estimar los cambios en las demandas agrarias. Finalmente la información generada se introduciría en el modelo de gestión para analizar el impacto producido. También se podrían estudiar las diferencias entre los resultados obtenidos con la metodología propuesta y la clásica en que simplemente se corrigen las series originales de acuerdo con el cambio en la media.

VI.1.1 Proyecciones futuras en la escorrentía en la celda del área de estudio.

Las series de PRUDENCE proceden de modelos regionales de clima, que realizan una modelación simplificada de los procesos de generación de escorrentía con una baja resolución espacial mediante parametrizaciones. Aunque manejan representaciones de la orografía, usos del suelo y otros factores, la escala espacial a la que trabajan no permite reproducir con fidelidad gran parte de los procesos de generación de escorrentía, de modo que el comportamiento hidrológico que obtienen es sólo aproximado. Este hecho se manifiesta por su escasa capacidad para cuantificar globalmente la escorrentía generada en las simulaciones de control.

Las series de escorrentía que se obtienen del modelo GKSS (tanto para el escenario control y futuro) tienen la tendencia a sobreestimar el valor medio de la escorrentía. Con el modelo MPI se prevén un comportamiento similar en los dos escenarios. Al presentarse datos extremos (incrementos) como se observa en la serie de escenario futuro del modelo GKSS, los resultados de las nuevas series (obtenidas con la metodología planteada) proyectaran como dato medio una menor afectación en las simulaciones de cambio climático.

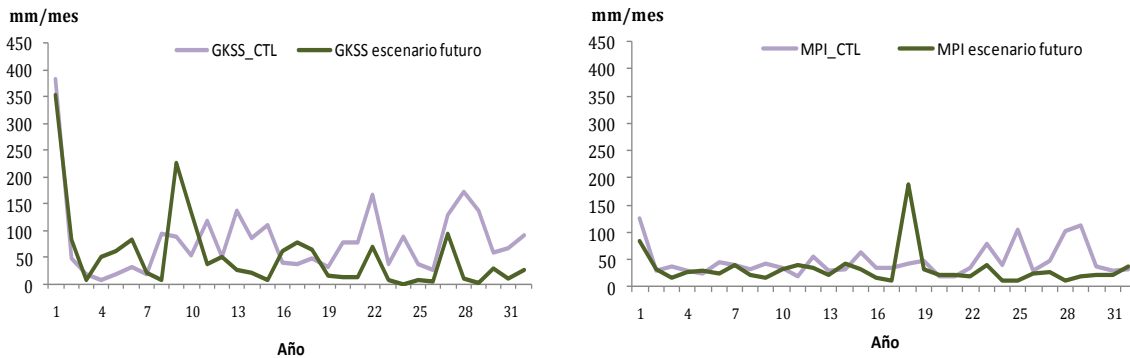


Figura 19. Secuencia temporal de escorrentía mm de los Modelos GKSS y MPI en escenario CTL y escenario futuro.

En la figura 19 se observa que, por lo general, la variabilidad de la escorrentía media proyectada para el último tercio del siglo es inferior a la del escenario de control, con porcentajes positivos o incremento en la escorrentía en los meses de octubre y noviembre. Por lo que respecta a la distribución por estaciones, las mayores disminuciones se observan en verano y las menores en otoño. No obstante, la distribución de los cambios porcentuales en la variabilidad de la escorrentía no es regular para los dos modelos.

Las series proyectan una reducción de la escorrentía para el escenario futuro. En el caso del escenario futuro del GKSS se prevé una reducción media anual 25% respecto al escenario control del mismo modelo, y con relación al escenario planteado por el modelo MPI se observa que esta reducción media anual de la escorrentía será del 30,9%. En todos los casos se produce un incremento del coeficiente de variación, lo que pone de manifiesto un aumento importante de la variabilidad de las series.

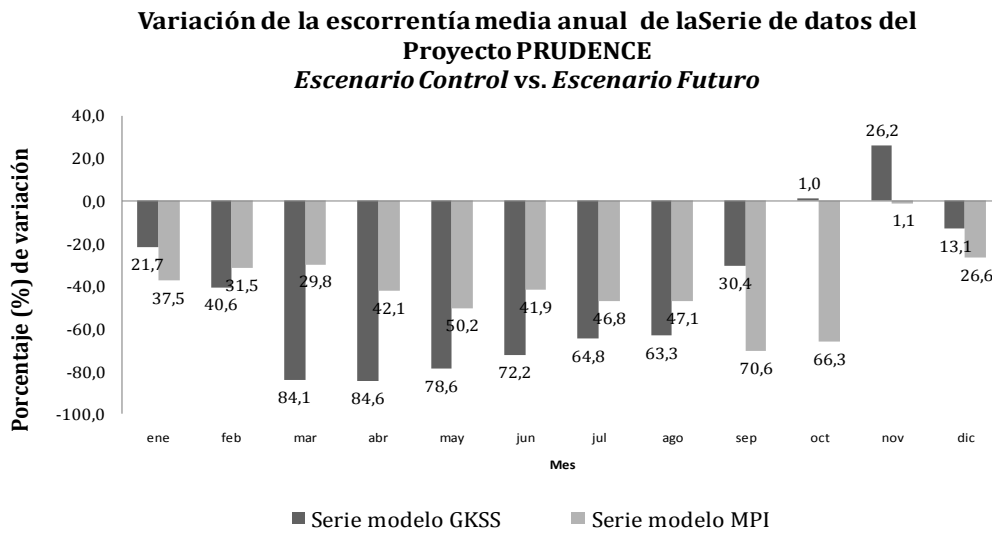


Figura 20. Comparación de la escorrentía media anual de acuerdo a las proyecciones de los modelos GKSS y MPI dentro del marco del Proyecto PRUDENCE para los Escenarios de Control y Escenario futuro.

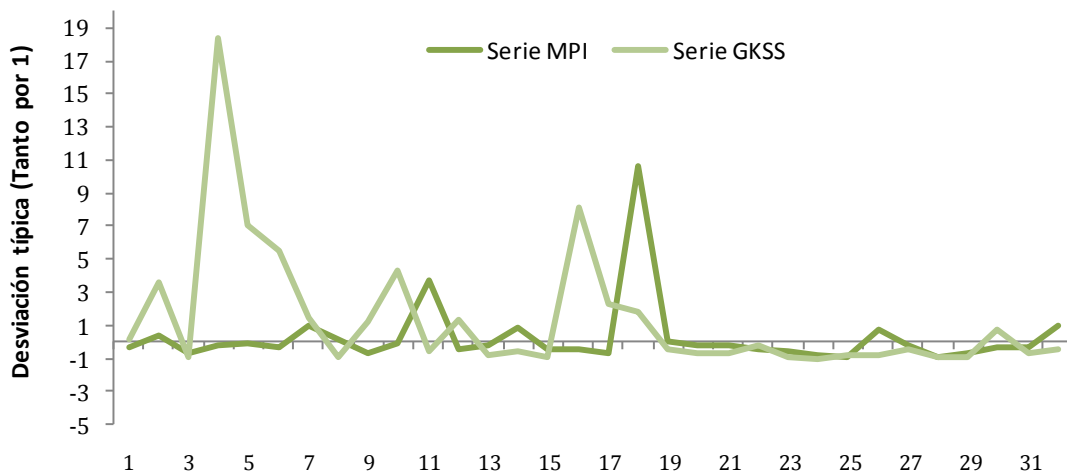


Figura 21. Proyecciones de cambio de la escorrentía (en mm/mes) promediadas para cada año. Los valores (Desviación estándar (tanto por 1)) corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990) de los modelos GKSS y MPI en Escenario de Control y Escenario futuro A2.

Puede decirse que las series aportadas por el modelo GKSS presentan más variabilidad entre los dos escenarios (escenario futuro respecto al escenario control), variabilidad que se verá reflejada en la metodología planteada.

VI.1.2 Proyecciones futuras en la temperatura en la celda del área de estudio.

A continuación se presentan los cambios proyectados para los promedios estacionales de las temperaturas medias diarias en los dos escenarios, correspondientes al último tercio del siglo XXI (periodo 2071-2100), con respecto a los valores modelados en la simulación de control (periodo 1961-1990).

Se prevé un aumento más significativo en las simulaciones realizadas con el modelo MPI que en promedio aumentan 3,7°C y un poco menores con el modelo GKSS el cual será 3,4°C respecto a la situación de control (CTL).

Las proyecciones del cambio estacional en la temperatura media diaria se muestran en la figura 20. Los meses de invierno son los que presentan menores incrementos de la temperatura diaria, con valores entre 2,5 y 3,5 °C para el modelo GKSS y entre 2,9 y 3,8°C para el modelo MPI. La estación en que los incrementos de temperatura diaria son mayores es el verano, alcanzando valores a 4.6°C con ambos modelos. En la primavera y el otoño los incrementos proyectados alcanzan valores intermedios entre los del invierno y el verano. No obstante, los incrementos en otoño son superiores a los de los meses de primavera, en especial con el modelo MPI. Los cambios proyectados para los promedios estacionales de temperaturas máximas y mínimas diarias (figuras 23 y 24) presentan un comportamiento semejante a los de las temperaturas medias. No obstante, los valores de los cambios son en torno a 1°C más elevados para las mínimas que para las máximas en el caso del modelo MPI.

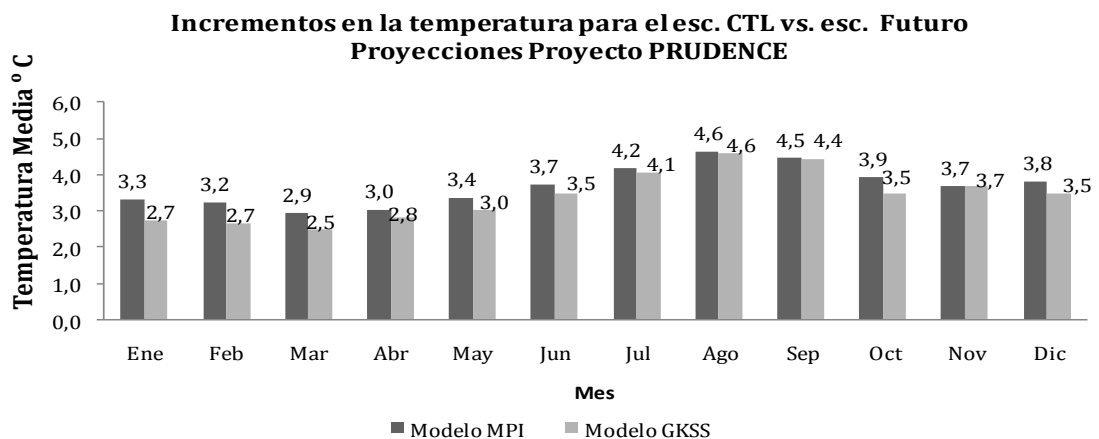


Figura 22. Incremento de la Temperatura media en °C de acuerdo las proyecciones dentro del marco del Proyecto PRUDENCE.

Un aspecto de las proyecciones de clima futuro tan importante como los cambios en los valores medios de las temperaturas o de cualquier otra variable climática, es la posible alteración en la variabilidad en relación a la del clima actual. Se entiende por variabilidad, la desviación típica respecto al promedio estadístico temporal. Se pueden considerar diversas escalas temporales de la variabilidad: la intra-estacional, la interanual o la que ocurre en escalas de decenas de años. A continuación se presentan los resultados obtenidos aplicando un análisis sencillo de variabilidad interanual, que consiste en considerar el valor de la razón porcentual siguiente:

$$\frac{\sigma_f - \sigma_a}{\sigma_a} \cdot 100$$

Donde σ_f es la desviación típica de las distribuciones de promedios mensuales de las temperatura en el escenario futuro (2071-2100) y σ_a la del escenario de control (1961-1990). Así un valor positivo (o negativo) de dicha razón indicaría el porcentaje en que aumenta (o disminuye) la variabilidad de la temperatura diaria mensual en el escenario futuro con respecto al escenario de control. Los resultados obtenidos con este análisis sencillo se muestran en la figuras 22.

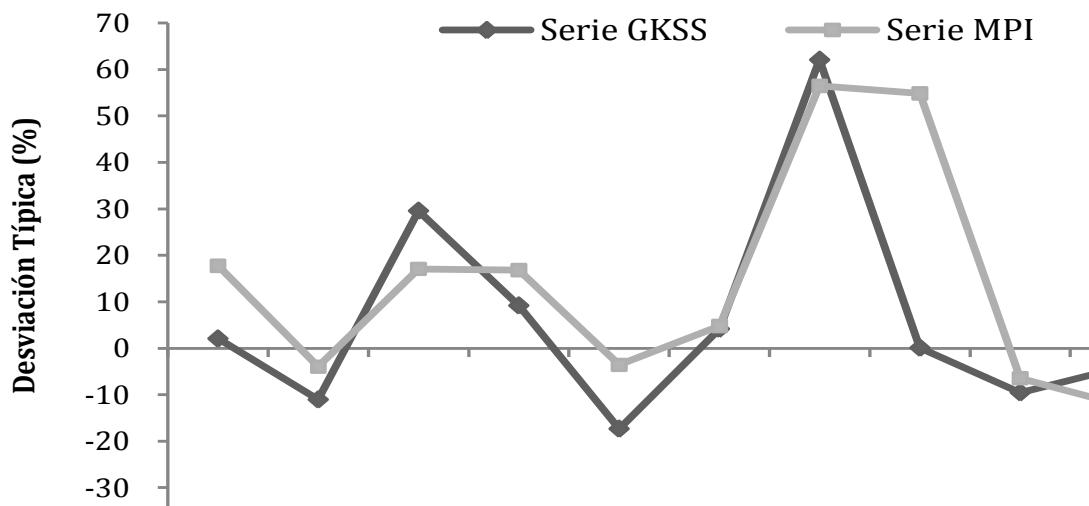


Figura 23. Proyecciones de cambio de temperatura media diaria en porcentaje, promediadas para cada estación del año, correspondientes a los modelos MPI y GKSS corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990).

En dicha figura se observa que, por lo general, la variabilidad mensual de las temperaturas medias proyectadas para el último tercio del siglo es algo superior a la del clima actual o control. Por lo que respecta a la distribución por estaciones, los mayores cambios se observan en verano y los menores en otoño. Estos incrementos en la variabilidad de las

temperaturas significan que las anomalías térmicas mensuales en el clima proyectado para final del siglo tenderán a ser más intensas que en el clima actual.

Con relación a los cambios que se producirían en la temperatura mínima, se estima que en el caso del modelo MPI aumentarían de media 3°C y será de 3,4°C en las estimaciones del modelo GKSS. El aumento de las temperaturas máximas serán del margen de 3,7°C con el modelo MPI y 3,6°C para el modelo GKSS (Figuras 24 y 25).

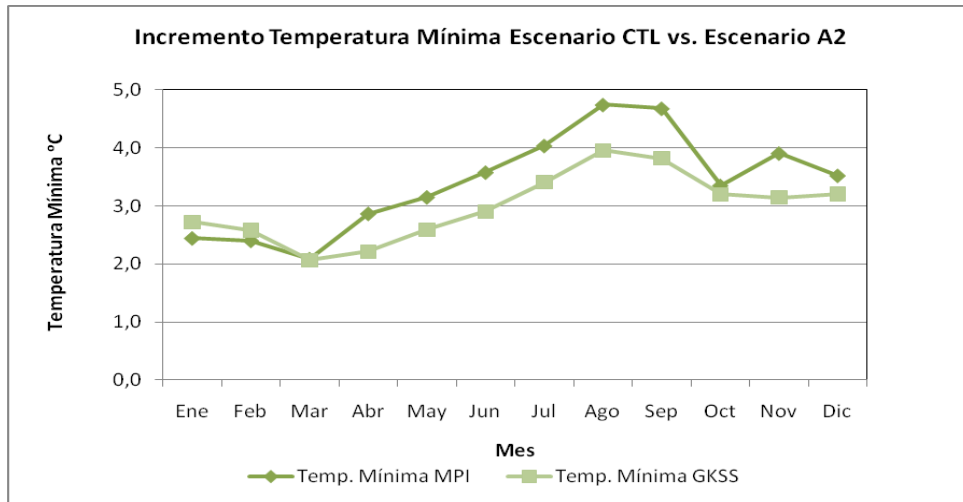


Figura 24. Incremento de la Temperatura mínima en °C de acuerdo las proyecciones dentro del marco del Proyecto PRUDENCE.

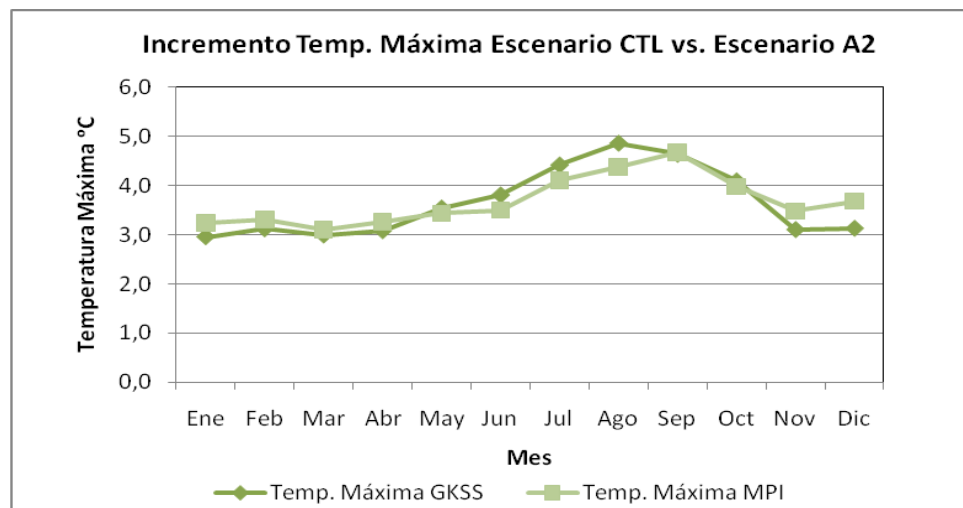


Figura 25. Incremento de la Temperatura máxima en °C de acuerdo las proyecciones dentro del marco del Proyecto PRUDENCE.

VI.1.3 Proyecciones de Precipitación en la celda del área de estudio.

A continuación se analizan los cambios proyectados para las precipitaciones estacionales medias para los dos escenarios considerados correspondientes al periodo 2071-2100, tomando como referencia los valores modelados en la simulación de control (1961-1990).

En la figura 25 se muestran los valores de los cambios estacionales expresados en mm/mes. Lo que se aprecia claramente en la figura es que los cambios tienen gran magnitud absoluta, independientemente de su signo. Así, en verano resultan reducciones que llegan a superar el valor de 47 mm con el modelo MPI. Salvo con excepciones como las que se presentan en el mes de noviembre, los cambios en precipitación tienen signo negativo. Es decir se proyectan para el último tercio del siglo 21, incrementos de precipitación estacional respecto al clima actual, siendo por lo general de mayor magnitud con el modelo MPI.

Se aprecia que para el verano se prevén disminuciones de las precipitaciones que van desde 4 mm hasta casi 48 mm. Estas últimas se presentan en el mes de septiembre para el modelo MPI, aunque el rango medio en la disminución de la precipitación es similar en los dos modelos 10 mm.

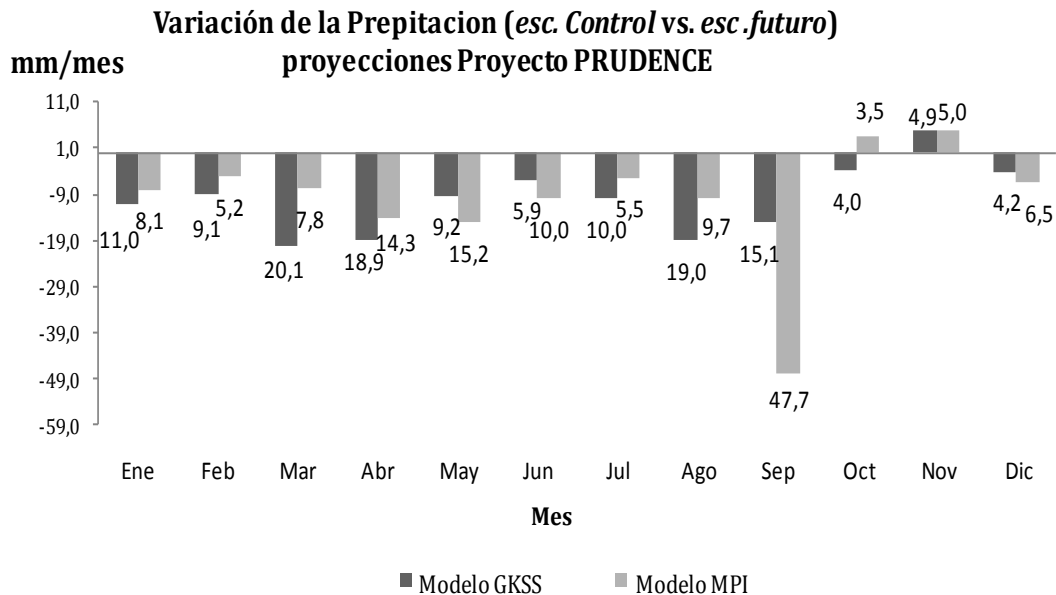


Figura 26. Variación de la precipitación con el modelo GKSS y MPI respecto a la situación actual en la celda de análisis.

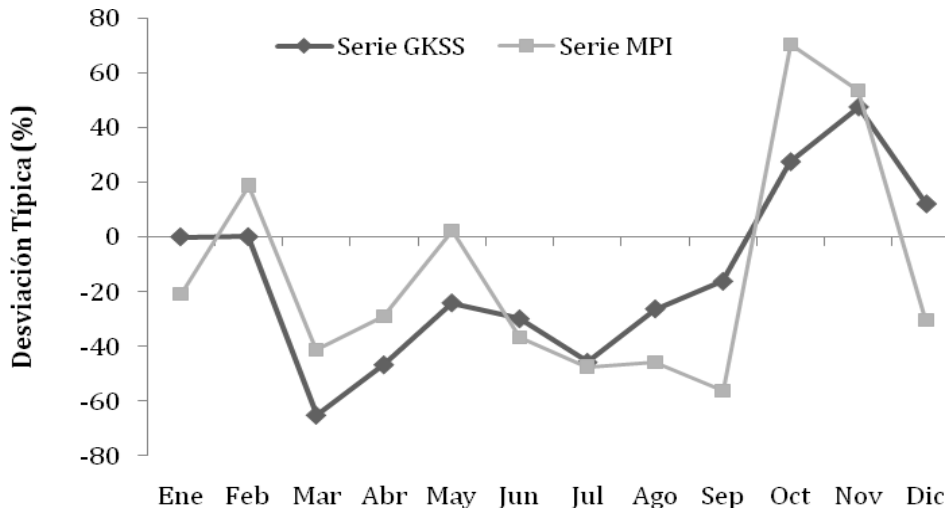


Figura 27. Proyecciones de cambio de temperatura media diaria en porcentaje, promediadas para cada estación del año, correspondientes a los modelos MPI y GKSS corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990).

Por lo que respecta al cambio en la variabilidad interanual de las precipitaciones, aplicando el mismo procedimiento sencillo que para las temperaturas, se observan cambios apreciables en todas las estaciones del año (figura 25).

VI.2 Hidrología y climatología en escenario de cambio climático para la Cuenca del río Serpis en el periodo 2071-2100.

Siguiendo con la metodología propuesta, modificamos la serie histórica original de aportaciones del sistema de explotación del Serpis y de esta manera se podrán comparar las aportaciones actuales con las aportaciones obtenidas con los escenarios climáticos futuros.

A partir de los escenarios de variabilidad hidrológica y climática presentados en la sección anterior se obtiene los escenarios de aportaciones futuras para la Cuenca del Serpis para el periodo 2071-2100 debido al cambio climático; para ello se corrige la "serie hidrológica original " con el incremento en las principales estadísticas (media y desviación estándar) deducidas para la serie del Proyecto PRUDENCE de la zona donde el sistema se encuentra. La serie modificada es repartida entre las entradas de varias series originalmente consideradas para definir el modelo de gestión manteniendo el porcentaje del total de entradas que cada uno representa en la serie "original".

En la figura 27 se observa la evolución mensual de las aportaciones. La figura muestra los ciclos secos y húmedos, y permite observar las diferencias entre la serie histórica original

y las series derivadas para el periodo 2071-2100 a partir de los MRCs seleccionados MPI y GKSS.

Respecto a las aportaciones (figura 28) obtenidas por medio de la metodología planteada para los dos modelos, se puede observar una clara reducción en las aportaciones en el escenario futuro. Reducción que se presentan similar para los dos modelos, pero hay que tener en cuenta que las series (Control y escenario futuro) del modelo GKSS tienden a sobreestimar los datos (mayor precipitación y mayor escorrentía), presentándose por tanto menos reducciones. Podría decirse que cualitativamente la reducción más importante se presentaría con el modelo GKSS.

Aspecto también evidente con relación al modelo MPI, sería su variabilidad durante toda la secuencia de la serie de aportaciones. Se observan datos extremos de incremento en las aportaciones lo cual hace el cambio porcentual medio de toda serie menor para este modelo respecto a la estimación realizada con el modelo GKSS.

Comparativo Serie aportaciones Rejilla de área de estudio (Cuenca del Serpis) Modelos Proyecto PRUDENCE

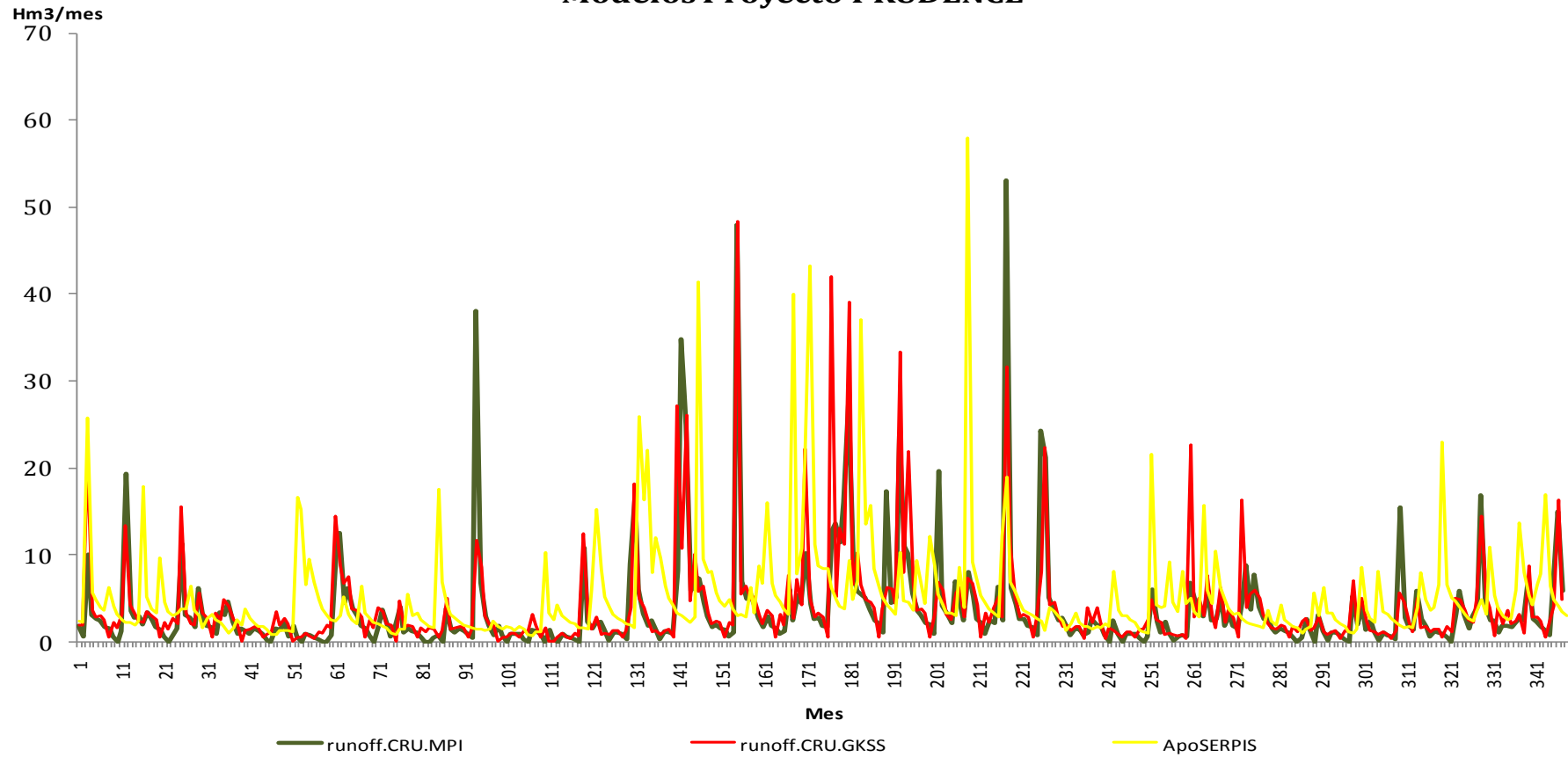


Figura 28. Comparativo escorrentía secuencial en Hm³, para modelos GKSS y MPI del Proyecto PRUDENCE, series modificadas de acuerdo a la metodología planteada.

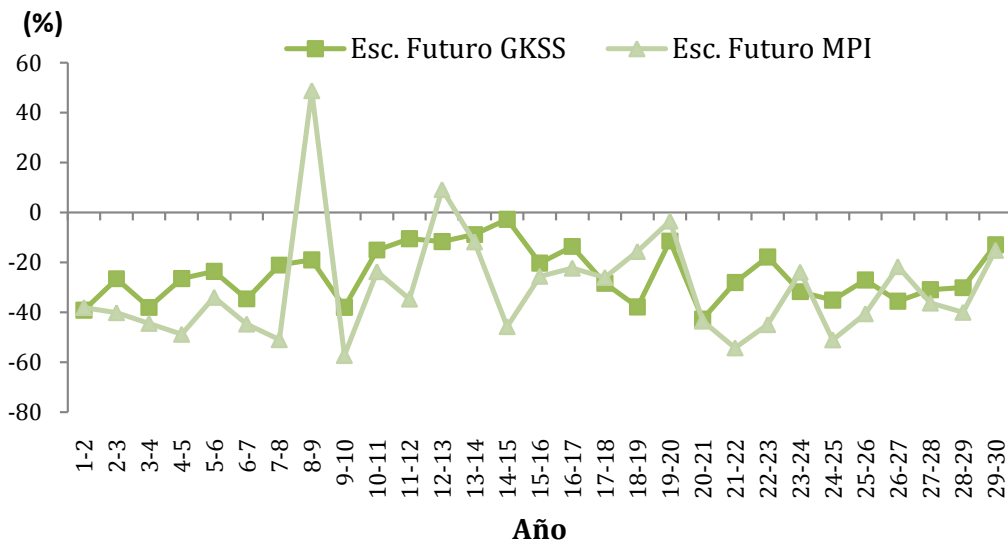
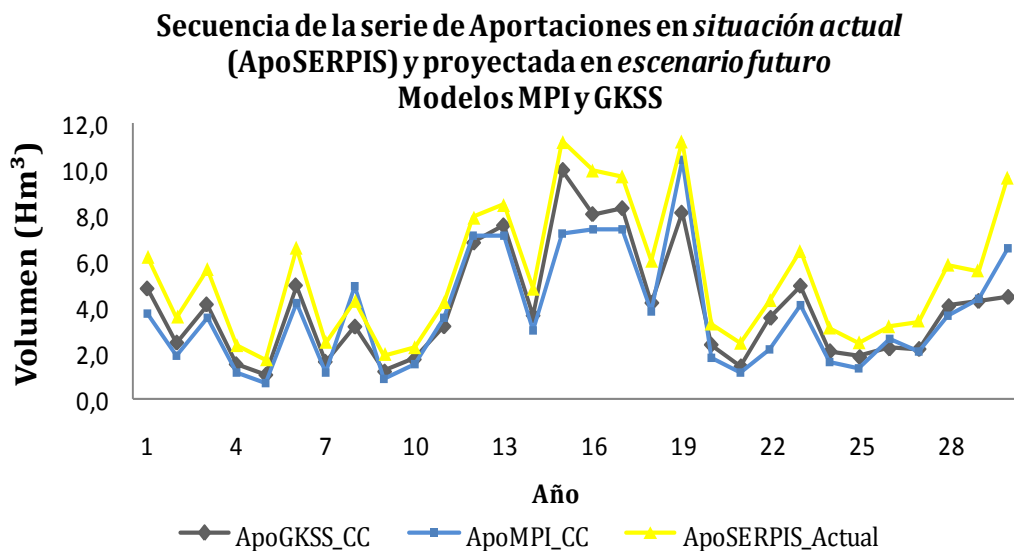


Figura 29. Cambios en porcentaje en las aportaciones en escenario futuro con los dos modelos GKSS y MPI respecto a la serie Histórica.

En la figura 29 se observa la evolución anual de las aportaciones. Respecto al escenario histórico en las aportaciones del sistema (APOSERPIS), el modelo MPI proporciona una reducción del 33% y el GKSS de un 23,9%.

Figura 30. Aportaciones anuales (Hm³/año) en escenario histórico y Escenario de cambio climático



a partir del modelo GKSS y el modelo MPI.

También se ha representado el año medio a escala mensual para las aportaciones originales y las series de cambio climático obtenidas con los dos modelos seleccionados.

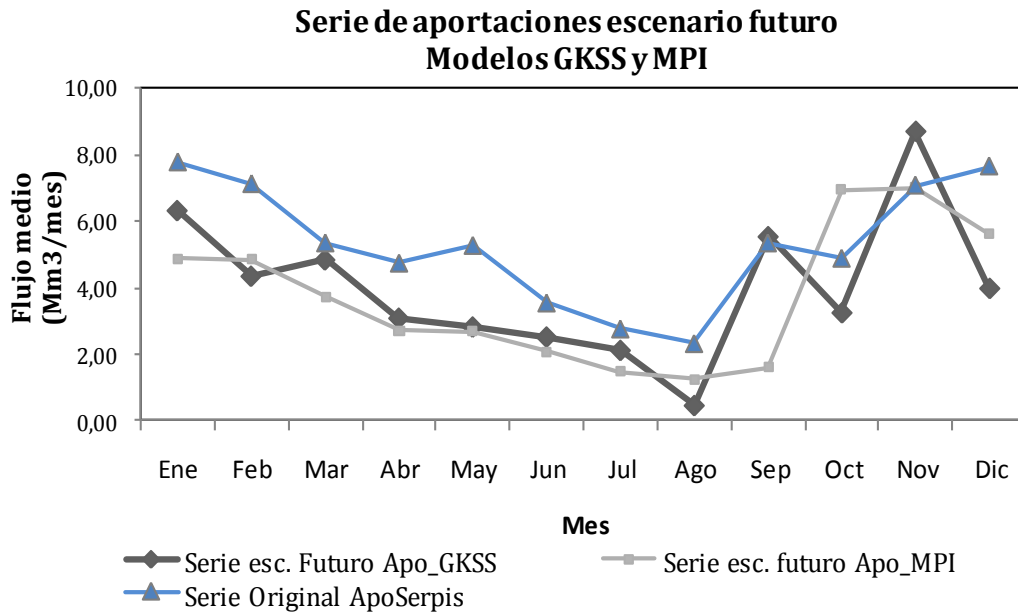


Figura 31. Comparativo de la serie Aportaciones de flujo medio mensual de 30 años de simulación para los modelos GKSS y MPI del Proyecto PRUDENCE

Para la variables temperatura y precipitación se consideran datos climáticos del año base considerados de referencia (situación actual) para calcular y obtener las estimaciones del escenario futuro, para lo cual, se corrige la "serie original " con el incremento de la media deducidas para la serie del Proyecto PRUDENCE de la zona donde el sistema se encuentra.

Las variaciones en el promedio anual de las temperaturas media y la precipitación para el periodo 2071-2100 para el escenario SRES-A2 obtenidos a partir de las previsiones del modelos MPI, indican incrementos en la temperatura media de 4,3°C en el interior de la cuenca, y de 4,5°C en la parte baja. El incremento promedio de la temperatura para toda la cuenca (2070 al 2100) es de 3.4°C con respecto al escenario histórico. Con relación a las proyecciones realizadas con el modelo GKSS, se puede observar un incremento medio de 3°C en el interior de la cuenca (Estación Alcoy) y de 3,9°C en la parte baja de la cuenca (Estación Játiva), y en promedio para toda la cuenca se estima un incremento de temperatura media de 3,5°C.

En cuanto a las precipitaciones, con las proyecciones de modelo MPI para toda la cuenca se presentan las mayores disminuciones en la parte baja con un valor de 152 mm/año. En cambio, las menores disminuciones de precipitación se presentan en la parte media-alta de la cuenca con 128 mm/año y corresponde al área de influencia del sistema de explotación de los regadíos Alcoia y El Comtat. En promedio, se estima una disminución de la precipitación de un 23,4% en la cuenca para el periodo de 2070 al 2100 con respecto a la situación actual con el modelo MPI. De acuerdo a lo calculado con el modelo GKSS se obtuvo un margen de disminución en la precipitaciones de 125 mm/año en la parte

media-alta de la cuenca y de 153 mm/año en la zona baja, con un disminución promedio de 23,1%.

Tabla 12. Proyecciones de Precipitación mm/mes para el periodo 2071-2100 en base al factor de corrección obtenido para el modelo GKSS para el año medio de las estaciones Alcoy y Játiva.

Mes	Prec Media Esc CC (ΔU_2)	Prec Media Esc control (ΔU_1)	Delta media (ΔU_j)	Serie Alcoy	Serie JATIVA	Media Modificada CC_alcoy	Media Modificada CC_JATIVA
Enero	18,5	26,6	-0,3	48,2	65,1	33,6	45,3
Feb	20,8	26,0	-0,2	44,9	55,3	36,0	44,3
Mar	23,6	31,4	-0,2	44,3	54,8	33,3	41,2
Abril	25,3	39,6	-0,4	49,3	59,9	31,5	38,3
May	19,0	34,3	-0,4	48,1	50,6	26,7	28,1
Jun	14,0	24,1	-0,4	26,4	25,7	15,4	15,0
Jul	5,3	10,8	-0,5	9,2	7,0	4,5	3,4
Ago	10,5	20,3	-0,5	14,2	19,8	7,4	10,3
Sep	24,3	72,0	-0,7	45,7	62,9	15,4	21,2
Oct	53,9	50,4	0,1	67,0	123,5	71,7	132,1
Nov	34,3	29,3	0,2	49,6	84,0	58,1	98,4
Dici	19,4	26,0	-0,3	60,9	83,9	45,6	62,8

Tabla 13. Proyecciones de Precipitación mm/mes para el periodo 2071-2100 en base al factor de corrección obtenido para el modelo MPI para el año medio de las estaciones Alcoy y Játiva.

MES	Prec Media Esc CC (ΔU_2)	Prec Media Esc control (ΔU_1)	Delta_m edia (ΔU_j)	Serie Alcoy	serie JATIVA	Media Modificada CC_alcoy	Media Modificada CC_xativa
Ene	21,71	32,69	-0,34	48,20	65,1	32,00	43,2
Feb	24,32	33,42	-0,27	44,90	55,3	32,66	40,2
Mar	19,29	39,40	-0,51	44,30	54,8	21,69	26,8
Abr	25,01	43,87	-0,43	49,30	59,9	28,11	34,2
May	15,08	24,31	-0,38	48,10	50,6	29,84	31,4
Jun	16,58	22,46	-0,26	26,40	25,7	19,49	19,0
Jul	11,24	21,24	-0,47	9,20	7	4,87	3,7
Ago	23,69	42,66	-0,44	14,20	19,8	7,88	11,0
Sep	59,07	74,14	-0,20	45,70	62,9	36,41	50,1
Oct	55,90	59,88	-0,07	67,00	123,5	62,54	115,3
Nov	59,13	54,19	0,09	49,60	84	54,12	91,7
Dic	30,07	34,23	-0,12	60,90	83,9	53,49	73,7

Se estima una disminución media de las precipitaciones entre un 25 - 30 % para el periodo de 2070 al 2100 con respecto a la situación de Control. Las proyecciones de los modelos GKSS y MPI no muestran grandes diferencias con lo que respecta al cambio en la precipitación Tablas 12 y 13.

VI.3 Cálculo del requerimiento de los cultivos

La selección de los cultivos para los que se han calculado los requerimientos de riego se ha realizado considerando los que tienen una mayor dedicación productiva en la cuenca, que son los cítricos y la alfalfa.

Con los cálculos de las dotaciones netas de los cultivos para las estaciones climáticas (figura 32) consideradas en este caso de estudio para la cuenca del Serpis se consigue, que los resultados obtenidos en una cierta zona de riego puedan ser considerados directamente, como tales dotaciones netas, en otra zona que, por lo que se refiere a necesidades hídricas de los cultivos, se considere de características similares.

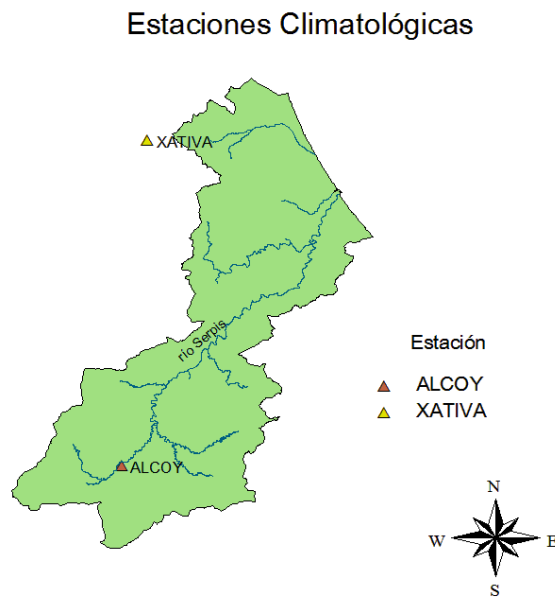


Figura 32. Ubicación estaciones climatológicas utilizadas en el caso de estudio.

El cálculo de los requerimientos de los cultivos para cada escenario se realizó con el programa de cómputo Cropwat versión 8 for Windows de la FAO (Smith, Clarke FAO 1998). Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia el programa Cropwat utiliza el Método de Penman-Monteith.

El método de Penman-Monteith ha sido utilizado para el cálculo de la evapotranspiración potencial en la estimación de las dotaciones netas de riego como se menciona en el apartado IV.3. Dicha ecuación es una representación simple de los factores físicos y fisiológicos que rigen el proceso de evapotranspiración. Con el uso de la definición de ETo de la FAO Penman-Monteith, se pueden calcular los coeficientes de cultivo en la cuenca relacionando la evapotranspiración del cultivo (ETc) con la ETo calculada, es decir, $Kc =$

ETc/ETo. El Kc sirve como un factor de agregación de las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos y la definición de referencia.

Tabla 14. Comparación de los valores de la evapotranspiración anual para los diferentes escenarios y los cambios porcentuales con respecto a la situación actual.

Evapotranspiración ETo Anual					
CULTIVO	Escenario Control	Escenario Futuro GKSS	Cambio Porcentual (%)	Escenario Futuro MPI	Cambio Porcentual (%)
Estación climática Játiva					
Alfalfa	840,1	904,6	7,7	907,1	8,0
Cítricos	791	839,4	6,1	848,5	7,3
Estación climática Alcoy					
Alfalfa	748	785	4,9	829	10,8

Como variable climática principal para el cálculo de las evapotranspiraciones se tiene la temperatura. En el apartado VI.2 de esta tesina se incluye una descripción de cada uno de los escenarios climáticos para las temperaturas y de sus tendencias en la Cuenca del Serpis. Todos los escenarios climáticos coinciden en señalar que en la parte media-baja de la cuenca se presentarían los mayores incrementos de las temperaturas, mientras que en la parte media-alta los incrementos serán menores.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se observa en la tabla 14 los cambios en los valores de las evapotranspiraciones para todos los escenarios climáticos, en donde se puede ver que en la costa los valores de la evapotranspiración en situación actual son mayores con respecto a los valores de la evapotranspiración que se obtienen en el interior de la cuenca. Los cambios en relación porcentual son menores en el escenario futuro del modelo GKSS respecto a la situación actual, llegando a duplicarse en el caso del escenario futuro MPI con respecto al cambio que se presenta en el caso escenario futuro GKSS. En resumen, los mayores valores de la evapotranspiración se presentan en la costa, igualmente podemos observar que la evapotranspiración (ETo) presenta cambios más considerables en el caso del cultivo de alfalfa.

Con las dotaciones netas de los cultivos (m³/ha) es posible calcular las demandas netas, para lo cual es indispensable conocer la superficie (ha) cultivada (tabla 16), y mediante una multiplicación se obtienen los valores de los volúmenes de agua requeridos para satisfacer la demanda consultiva de los cultivos (dotaciones netas en m³). Las dotaciones y demandas netas se han obtenido para cada uno de los cultivos mencionados con anterioridad. Finalmente, para el cálculo de las demandas brutas se han considerado los valores de las eficiencias de aplicación (tabla 16) mencionadas en el Documento Técnico

de referencia “Metodología y resultados de la estimación de demandas”. Ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2009).

Tabla 15. Especificaciones para obtener los requerimientos de agua de los cultivos por medio de Cropwat

ITEM	Cultivo			
	Alfalfa		Cítricos	
		Coef. (Kc)		Coef. (Kc)
Fecha de Plantación	01-feb		15-nov	
Etapa de crecimiento (días)				
<i>Periodo Inicial</i>	150	0,4	60	0,7
<i>Etapa de Desarrollo</i>	30	0,4	90	0,7
<i>Mediados de temporada</i>	150	0,95	120	0,65
<i>Fin de temporada</i>	35	0,9	95	0,7
Precipitación efectiva	468,2		611,1	

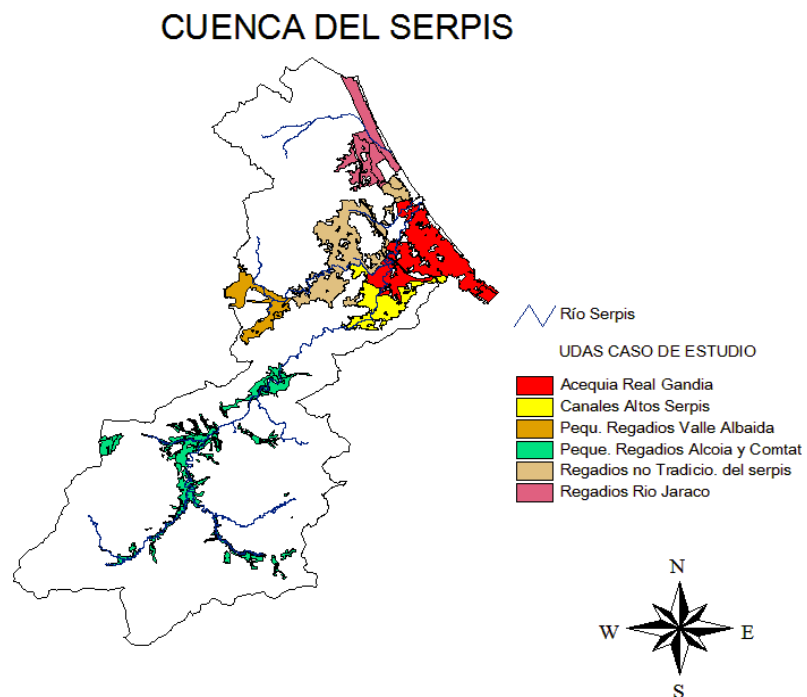


Figura 33. Unidades de Demandas Agrícola del Caso de estudio en la Cuenca del Serpis

Los resultados de las dotaciones netas de los cultivos considerados para las condiciones actuales y para los escenarios climáticos futuros se muestran en el anexo 4.

Tabla 16. Demandas agrícolas netas y brutas para el escenario control (situación actual), para su modelación en el esquema de gestión de la cuenca del río Serpis.

CODUDA	NOMUDA	Sup. regada (Ha)	origen de la UDA	Eficiencia %	Demanda Neta (Hm3)	Demanda Bruta (Hm3)
081058A	Regadíos del río Jaraco	2.034,50	Mixto	66	7,96	12,06
081059A	Acequia Real de Gandía	3.548,14	Mixto	40	13,97	35,36
081060A	Canales altos del Serpis	1.363,91	Mixto	48	5,37	11,14
081061A	Pequeños regadíos. Valle de Albaida	749,53	Mixto	84	2,95	3,81
081062A	Regadíos no tradicions. del Bajo Serpis	2.984,69	Subterráneo	65	11,72	15,95
081063A	Pequeños regadíos. Alcoia y El Comtat	890,37	Superficial	79	3,11	3,94
						83,95

Para la adecuada interpretación de los resultados de las dotaciones de riego para los cultivos de alfalfa y los cítricos es recomendable ver las consideraciones tomadas para su determinación (tabla 16), como son: la fecha de plantación, las etapas de crecimiento del cultivo, los coeficientes del cultivo, las evapotranspiraciones para cada periodo vegetativo, la lluvia efectiva considerada, entre otras características. Es también importante recordar que los valores calculados están en función de los valores de las temperaturas y precipitaciones para cada escenario climático y que su distribución mensual (de las variables antes mencionadas) es sumamente importante para el cálculo de sus necesidades en todo el periodo vegetativo del cultivo.

Para cada demanda agrícola y escenario climático se definieron entre uno o dos tipos de cultivos diferentes, en la tabla 17 se muestran las dotaciones netas que han sido calculadas por el método de la FAO por medio del programa de cómputo Cropwat versión 8. Con las dotaciones netas de los cultivos es posible obtener la demanda neta, al multiplicar la superficie en (ha) de un cultivo específico por la dotación neta (m³/ha) del mismo cultivo.

La Acequia Real Gandía es la que tiene la mayor superficie de riego con 3.548,14 (ha) constituida por el cultivo de cítricos que representa el 30.7% de la superficie total del área cultivada en la cuenca del río Serpis. La Acequia Real Gandía es la que presenta mayor requerimiento en cuanto a demandas brutas (35,36 hm³) lo que representa el 42,1% del total de la demanda de agua debido principalmente a que en esta zona se presenta las menores eficiencias de aplicación.

La demanda Regadíos no tradiciones del Bajo Serpis tiene una superficie de 2.984,69 (ha) que corresponde al 25.8% de la superficie cultivada. Los cultivos considerados en la

Demanda son la alfalfa (3%) y cítricos (97%). Las demandas netas de estos cultivos son 11,72 hm³ que corresponde al 30% de las demandas netas. En cuanto a las demandas brutas estas son 17,95 hm³ que corresponde al 21.4% del total.

La UDA Regadíos del río Jaraco tiene una superficie de 2.034,50 (ha) que corresponde al 17,6% de la superficie cultivada, los cultivos considerados son: alfalfa (7%) y cítricos (93%). Las demandas netas de estos cultivos son 7,96 hm³ que corresponde al 20.4% de las demandas netas. En cuanto a las demandas brutas estas son 12,06 hm³ que corresponde al 14,4% del total de las demandas brutas.

La unidad de demanda Canales altos del Serpis tiene aun superficie de cultivo con una superficie de 1.363,91 (ha) que corresponde al 11.8% de la superficie cultivada. El cultivo considerado son los cítricos que tienen una demanda neta de 5,37 hm³ y una de demanda bruta de 11,14 hm³ que representa el 13,3% del total.

Finalmente se encuentran las UDA's: Pequeños regadíos. Alcoia y El Comtat y Pequeños regadíos Valle de Albaida. La primera representa el 4,7% y el 4,2% de las demandas brutas respectivamente.

De acuerdo a las simulaciones realizadas se puede concluir que el incremento en las necesidades de riego de los cultivos se ven afectados en mayor grado por el incremento en la temperatura y en menor medida por la disminución en la disponibilidad de agua procedente de la precipitación.

Tabla 17. Resultado de las simulaciones realizadas con CROPWAT para los cultivos de alfalfa y cítricos de las Unidades de Demanda Agrícola de la Cuenca del Serpis

CODUDA	NOMUDA	Situación Actual		Simulación modelo MPI		Simulación modelo GKSS	
		Dem.Neta (Hm3)	Dem.Bruta (Hm3)	Dem.Neta (Hm3)	Dem.Bruta (Hm3)	Dem.Neta (Hm3)	Dem.Bruta (Hm3)
081058A	Regadíos del río Jaraco	7,96	12,06	11,47	17,38	11,01	16,68
081059A	Acequia Real de Gandía	13,97	35,36	20,13	50,96	19,31	48,88
081060A	Canales altos del Serpis	5,37	11,14	7,74	16,05	7,42	15,96
081061A	Pequeños regadíos Valle de Albaida	2,95	3,81	4,25	5,06	4,08	4,86
081062A	Regadíos no tradicions. del Bajo Serpis	11,72	15,95	16,89	25,87	16,20	24,81
081063A	Pequeños regadíos. Alcoia y El Comtat	3,11	3,94	4,48	5,67	4,13	5,23
			84		120,99		115,9

Se observa un incremento en las demandas netas totales de los cultivos del 30% respecto a la situación actual en el caso de las simulaciones realizadas con el modelo MPI, y del 27 % en las realizadas con el modelo GKSS.

VI.4 Simulaciones de gestión del sistema con el SAD AQUATOOL.

Siguiendo con la metodología propuesta, modificamos la serie histórica original de aportaciones del sistema de explotación del Serpis y de esta manera se podrán comparar las aportaciones actuales con las aportaciones obtenidas con los escenarios climáticos futuros.

El Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) AQUATOOL (Andreu et al. 1996) es una herramienta para la elaboración de modelos de simulación y optimización de recursos hídricos a escala de cuenca desarrollada por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

El modelo de simulación del sistema de recursos hídricos de la cuenca del Serpis utilizado en esta tesina ha sido desarrollado con el programa SIMGES perteneciente al Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL (Andreu et al. 1996).

En el apartado V.2 se observa el esquema con el que se procede a realizar las simulaciones de la gestión de los recursos en condiciones actuales y para las nuevas condiciones hídricas futuras (generadas a partir de los escenarios climáticos). Estas simulaciones incluyen las demandas de las condiciones actuales y las nuevas demandas agrícolas futuras, (obtenidas a partir de dos escenarios climáticos), además también se utilizan de las series de aportaciones actuales y futuras (que fueron generadas de acuerdo a la metodología propuesta) que se necesitan en el modelo y para cada uno de los escenarios climáticos.

Por tanto, la gestión del sistema se realiza para cada uno de los escenarios climáticos, con sus respectivos cambios en las demandas y aportaciones. Realizadas las simulaciones se tendrán los resultados de la gestión de los recursos con las nuevas condiciones climáticas.

Dejar satisfechas las necesidades hídricas en cantidad, calidad, espacio y tiempo implica disponer de un sistema de recursos hidráulicos, que permita adecuar las aportaciones a la estructura de la demanda. Aportaciones cuya estructura temporal está condicionada por el ciclo hidrológico y demandas, cuya estructura viene fijada por los diversos usos y aplicaciones del agua.

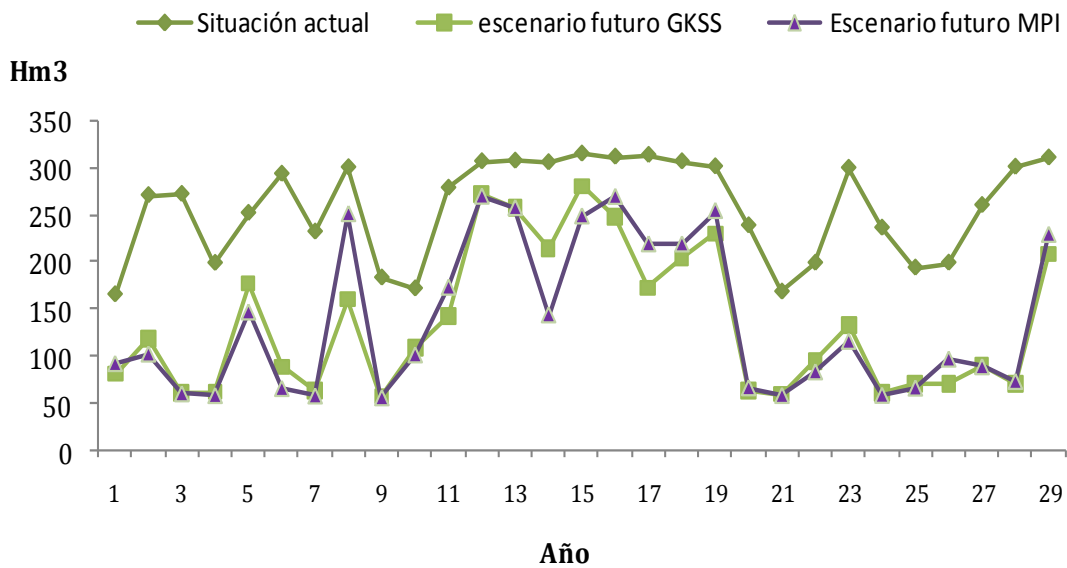


Figura 34. Volúmenes (Hm3) anuales embalsado del Embalse Beniarres para los escenarios climáticos considerados

La figuras 34 resumen gráficamente la disminución de los volúmenes embalsados para los diferentes escenarios climáticos.

Se puede observar, tanto en la gráfica, la diferencia de volumen embalsado que existe entre ambos modelos. En concreto, esa diferencia existente entre la situación actual y el escenario futuro tiene una reducción promedio de un 119 Hm3/año con el modelo GKSS y de 116 Hm3/año con el modelo MPI del total embalsado para todo el período de simulación.

A escala mensual la reducción media en Hm3 es muy diferente para ambos modelos. En el caso del modelo GKSS se observa una reducción casi constante durante todo el año hidrológico, e incrementándose levemente en la estación de verano. A diferencia de los resultados del modelo MPI, con el cual se prevé una reducción más drástica en los meses de primavera, y esta reducción se acentúan menos en los meses de verano.

En la tabla 18 se muestra el comportamiento del déficit suministro a la demanda para las simulaciones realizadas con los dos modelos.

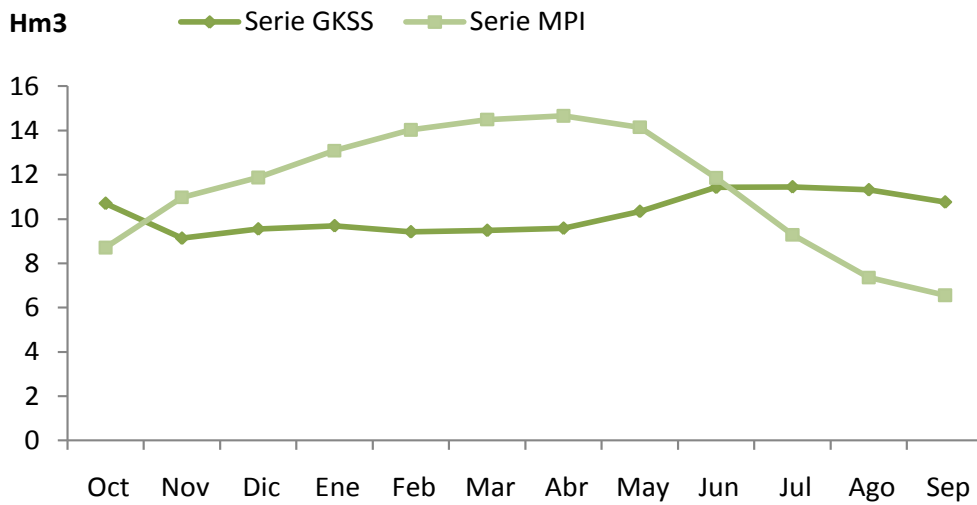


Figura 35. Reducción mensual en Hm3 del volumen embalsado en las simulaciones de los modelos GKSS y MPI.

En comparación con la situación actual, la variación en el máximo déficit se produce a largo plazo para las UDAs Regadíos del río Jaraco, Canales Altos Serpis y Pequeños Regadíos Acoia y Comtat, presentándose para este ultimo la mayor variación.

Los resultados reflejados en la tabla 18 fueron obtenidos sin modificar las reglas de operación y considerando unos bombeos máximos anuales iguales a los históricos. Los grandes déficits que se producirían bajo estas hipótesis supondrían la destrucción de los cultivos de cítricos existentes en la zona, por lo que no sería realista el llevar a cabo una valoración económica del coste de escasez a partir de las curvas de demanda en estos escenario con déficits extremos. Por ese motivo se contempló otro escenario en el que se incrementó los bombeos máximos anuales hasta alcanzar déficit máximos iguales a los históricos que permitan el sostenimiento agronómico de los cultivos. En se indica el incremento medio anual del bombeo (en Hm3/año) que fue necesario en cada unidad hidrogeológica en este nuevo escenario.

En las figuras 36.1 a la 36.6 se muestra el suministro vs. el déficit para cada una de las UDAS del sistema de explotación del Serpis para este nuevo escenario frente a los resultados obtenidos en el escenario actual.. Puede verse que la UDA que mayor déficit presenta es la UDA Pequeños regadíos Alcoia y el Comtat,

Tabla 18. Déficits y garantías de las UDAs para la situación actual y escenario futuro GKSS y MPI

Criterio Tipo Utah Regadíos río Jaraco			
	Actual	MPI	GKSS
Máx. Déficit 1año	9,16%	31,0%	29,0%
Máx. Déficit 2años	16,4%	58,62%	54,4%
Máx. Déficit 10años	52,5%	257,2%	235,9%
Garantía	100%	77,7%	59,4%
Criterio Tipo Utah AceqRealGandía			
	Actual	MPI	GKSS
Máx. Déficit 1año	5,5%	39,8%	36,2%
Máx. Déficit 2años	6,9%	70,1%	63,5%
Máx. Déficit 10años	20%	267,9%	232,0%
Garantía	98,6%	79,6%	59,38
Criterio Tipo Utah PeqRegValleAlbaida			
	Actual	MPI	GKSS
Máx. Déficit 1año	8,5%	16,5%	15,2%
Máx. Déficit 2años	17,1%	25,2%	21,09%
Máx. Déficit 10años	85,4%	86,4%	61,16%
Garantía	91,5%	94,5%	96,5%
Criterio Tipo Utah RegNoTradBajoSerpis			
	Actual	MPI	GKSS
Máx. Déficit 1año	0,06%	1,8%	1,4%
Máx. Déficit 2años	0,013%	3,4%	2,6%
Máx. Déficit 10años	0,063%	14,8%	10,08%
Garantía	100%	100%	100%
Criterio Tipo Utah CanalesASerpis			
	Actual	GKSS	MPI
Máx. Déficit 1año	0,027%	41,6%	38,8%
Máx. Déficit 2años	0,054%	65,3%	64,5%
Máx. Déficit 10años	0,269%	233,1%	232,2%
Garantía	100%	84,1%	81,6%
Criterio Tipo Utah PeqRegAlcoiaComtat			
	Actual	GKSS	MPI
Máx. Déficit 1año	14,3%	100%	95,91%
Máx. Déficit 2años	23,2%	180,2%	173,0%
Máx. Déficit 10años	60,3%	645,1%	587,4%
Garantía	95,8%	51,5%	56,4%

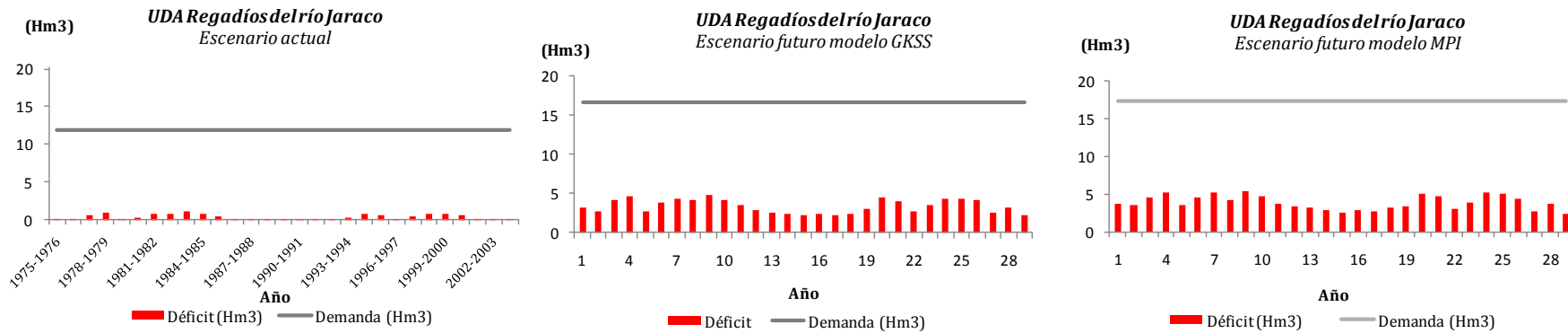


Figura 36.1 Suministro máximo a la demanda vs. Déficit en la UDA Regadíos del río Jaraco. En situación actual y escenario futuro de los modelos GKSS y MPI.

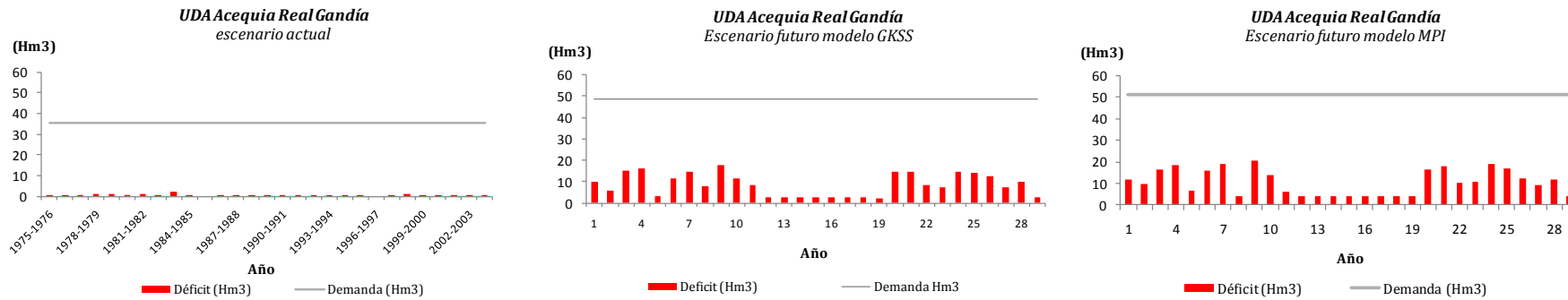


Figura 36.2 Suministro máximo a la demanda vs. Déficit en la UDA Acequia Real Gandía. En situación actual y escenario futuro de los modelos GKSS y MPI.

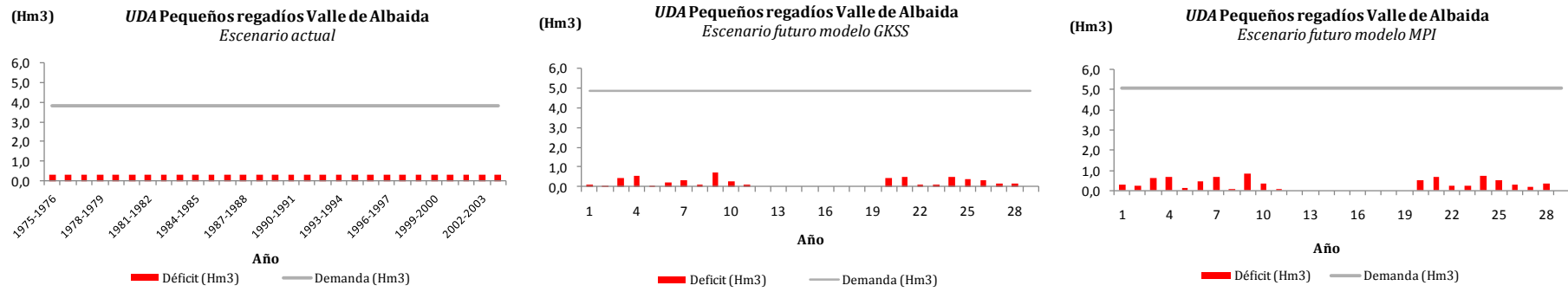


Figura 36.3 Suministro máximo a la demanda vs. Déficit en la UDA Pequeños Regadíos Valle Albaida En situación actual y escenario futuro de los modelos GKSS y MPI.

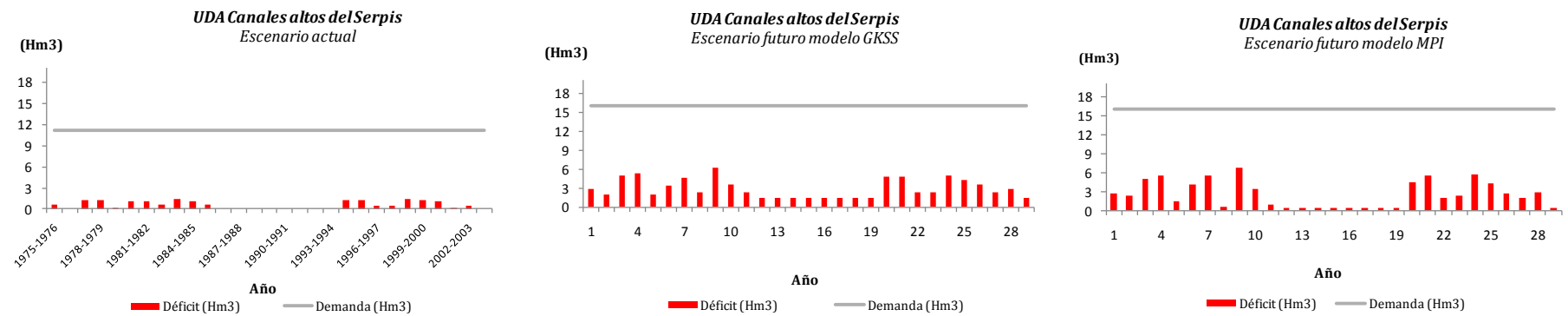


Figura 36.4 Suministro máximo a la demanda vs. Déficit en la UDA Canales Altos Serpis En situación actual y escenario futuro de los modelos GKSS y MPI.

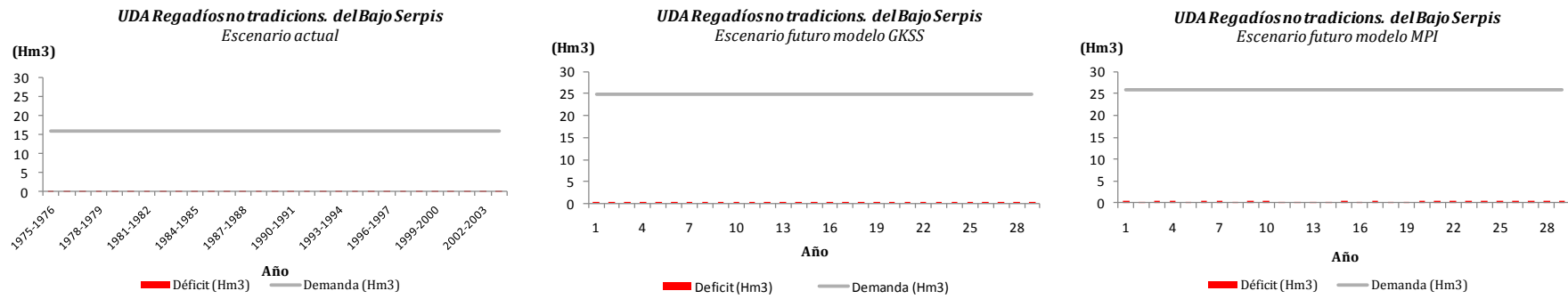


Figura 36.5 Suministro máximo a la demanda vs. Déficit en la *Regadíos tradicionales del Bajo Serpis*. En situación actual y escenario futuro de los modelos GKSS y MPI.

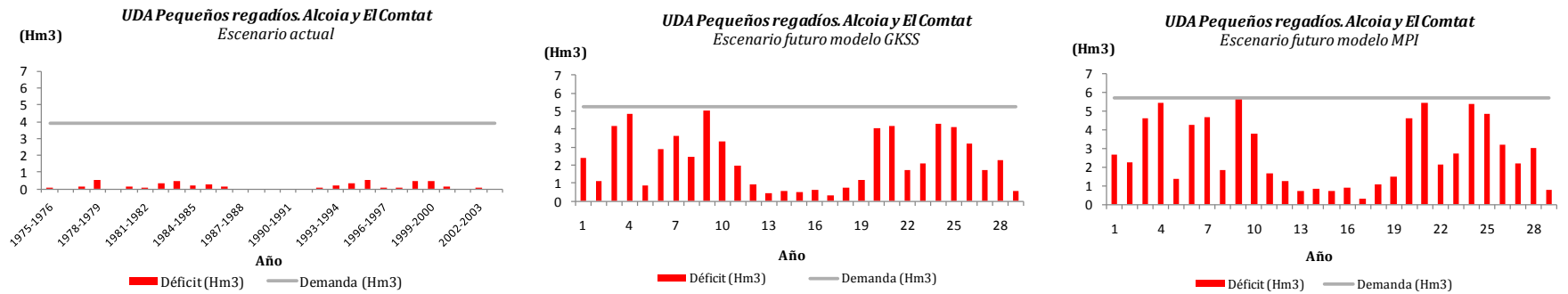


Figura 36.6 Suministro máximo a la demanda vs. Déficit en la *UDA Pequeños regadíos Alcoia y el comtat*. En situación actual y escenario futuro de los modelos GKSS y MPI.

Tabla 19. Bombeo adicional en escenario futuro para cumplir la condición igual déficit que en escenario actual

Unidad de demanda Agrícola	Cod. Unidad Hidrogeológica	Escenario GKSS		Escenario MPI	
		Bombeo Adicional medio anual (Hm ³)	Bombeo Adicional máximo anual (Hm ³)	Bombeo adicional medio anual (Hm ³)	Bombeo Adicional máximo anual (Hm ³)
Regadíos del río Jaraco	UH 80049	3,2	3,7	3,7	4,3
Acequia Real de Gandía	UH 80.045	17,7	17,7	10,4	20,3
Peq. regadíos Valle de Albaida	UH 80.049	0,2	0,5	0,2	0,5
Canales altos del Serpis	UH 80.054	2,9	6,2	2,6	6,7
Reg. no tradicions. del Bajo Serpis	UH 80.054	0,2	0,3	0,3	0,5
Peq. regadíos. Alcoia y El Comtat	UH 80.054	3,3	4,6	2,7	5,1

En la tabla 19 se muestra el bombeo adicional necesario para mantener la condición de déficit en escenario futuro en el mismo déficit histórico en escenario actual, definido con el fin de mantener las condiciones que aseguren la sostenibilidad agronómica de los cultivos.

VI.5 Modelo Hidroeconómico

La zona cultivable que el sistema del río Serpis riega presenta predominantemente una superficie para cítricos que representa el 90,3% del total del área cultivada, y prácticamente el 9,7% restante corresponde a cultivos de alfalfa.

La información económica utilizada en el análisis económico comprende las curvas de demanda de agua en la agricultura, la cuales corresponden a 6 UDA's mencionadas en los apartados anteriores. Cada curva de demanda (figura 37) indica el valor marginal del m³ por hectárea regada del cultivo en cada una de las Unidades de Demanda. Para efectos del análisis económico, el punto de corte con el eje de las abscisas corresponde a la dotación bruta media con la que están regando en promedio las distintas UDAs analizadas.

Se selecciona un precio del agua en el punto de cierre de la curva, que para los cítricos ronda los 0,70 €/m³. El precio de cierre representa el nivel del precio del agua en el que, los costes variables totales se igualan a los ingresos totales. A ese nivel de precio el input, los ingresos solo son capaces de cubrir los costes variables, por los que al agricultor le será indiferente seguir produciendo o no. Niveles de suministro por debajo de la dotación mínima requerida con la máxima eficiencia alcanzable suponen introducir un efecto de riego deficitario.

VI.5 Coste de escasez: escenario actual vs. Escenarios de cambio climático

El coste de escasez de agua está íntimamente ligado al déficit que se presente en el suministro a cada una de las demandas agrícolas.

Para evaluar el coste de escasez en escenario futuro para los dos modelos de análisis, se corrigieron las curvas de demanda económicas del caso actual para equipararlas a los nuevos niveles de demanda y suministro de agua al sistema. Esta corrección se basó en mantener para las nuevas condiciones de *escenario futuro* el mismo beneficio económico que en la situación actual.

Las curvas de demandas utilizadas en el análisis del coste de escasez se muestran en las figuras 37 (situación actual) y figura 38.1-38.2 (escenario futuro)

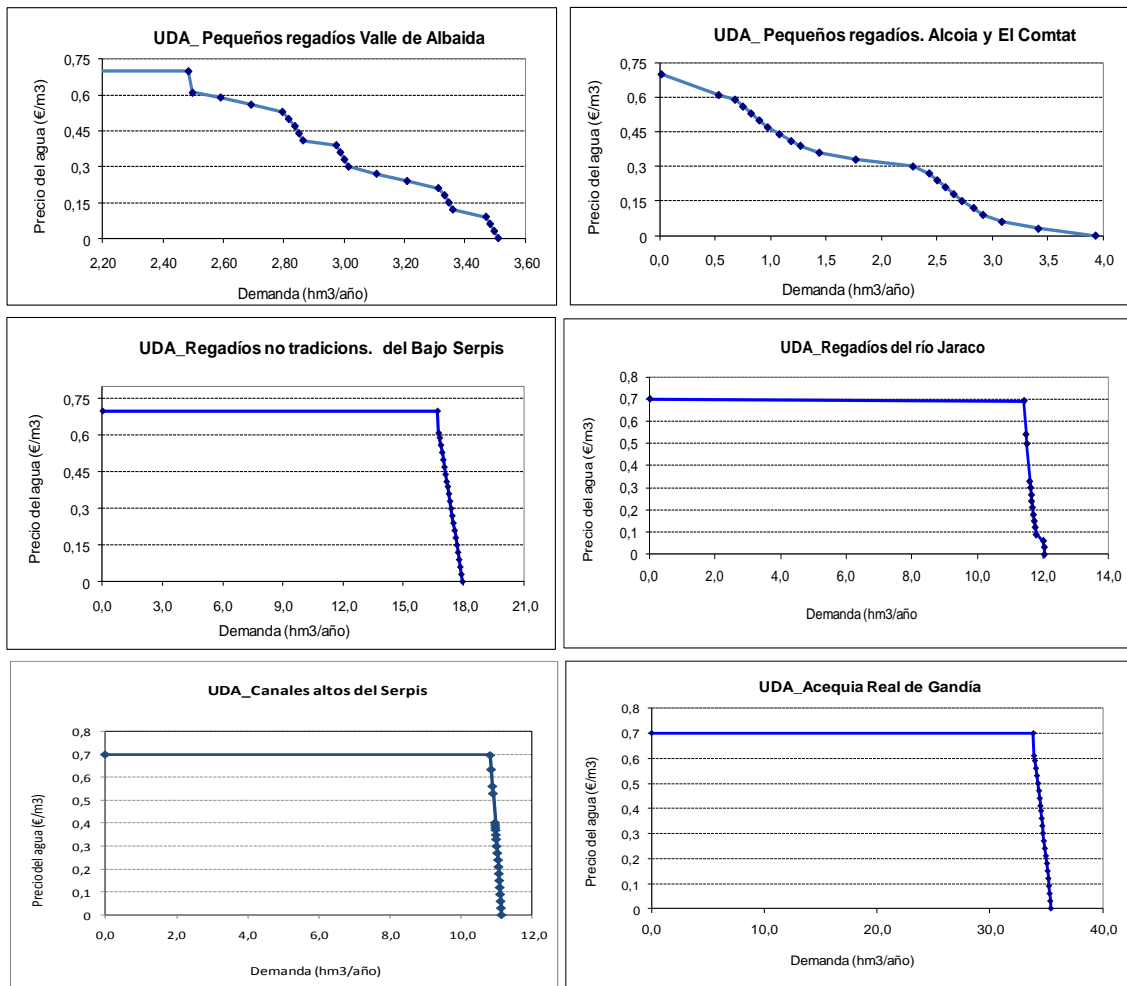


Figura 37. Curvas de Demanda anuales para los cultivos de cítricos y alfalfa y cítricos en función de su demanda volumétrica Hm3/año

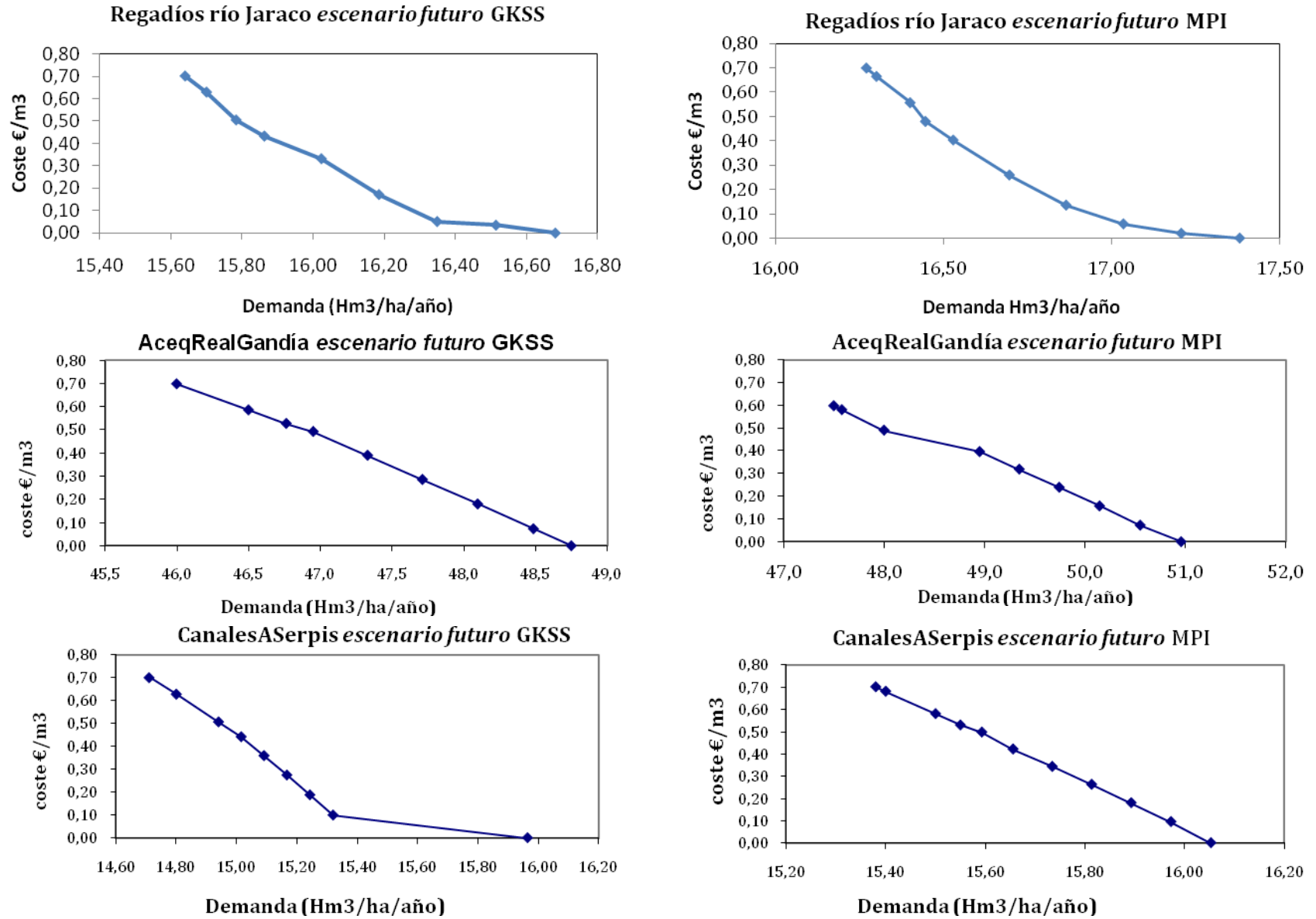


Figura 38.1 Curvas de demanda económica UDAs sistema de explotación de la cuenca del Serpis. (Continua)

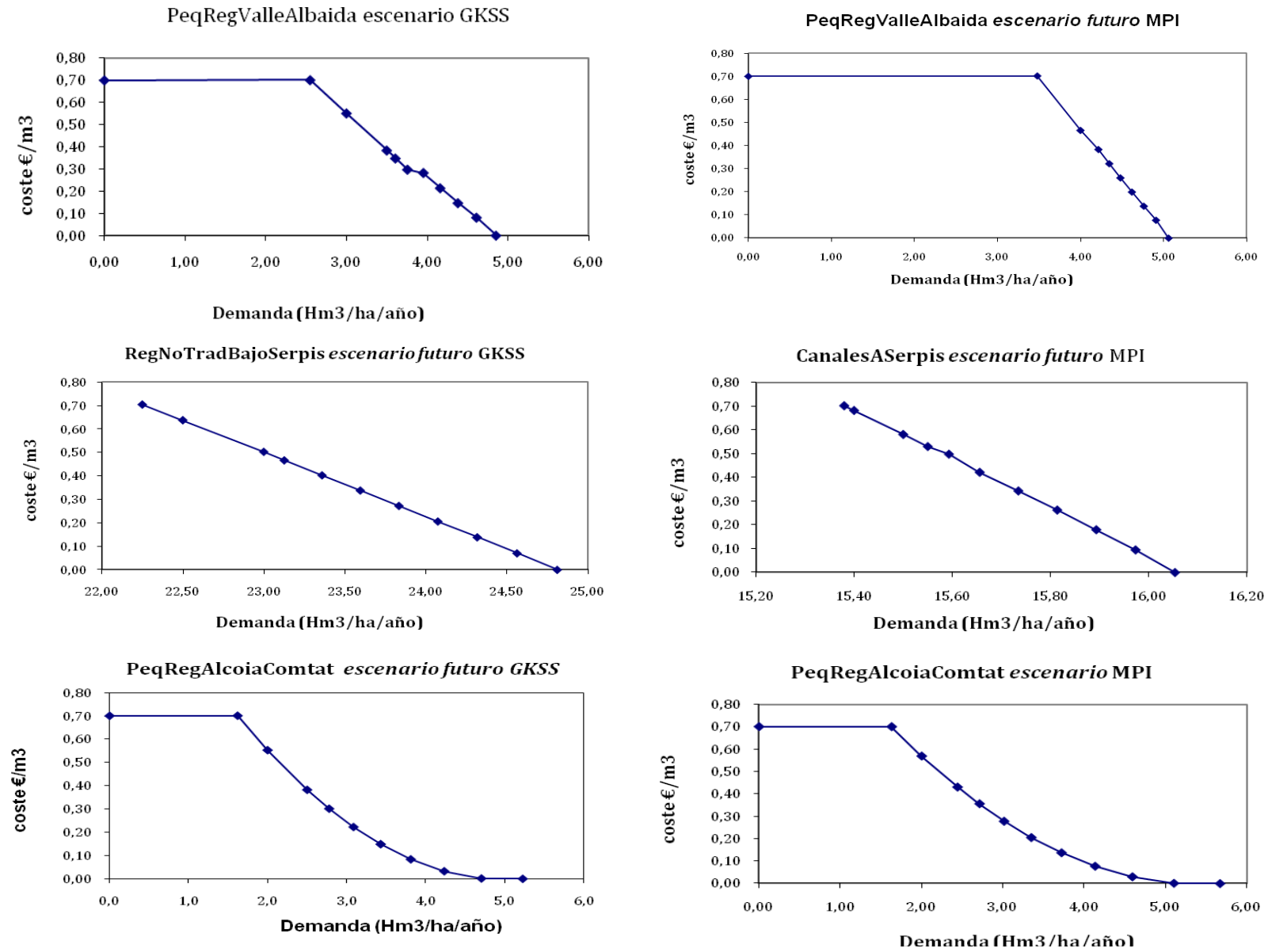


Figura 39. Curvas de demanda económica UDAs sistema de explotación de la cuenca del Serpis.

- **Escenario de Control (Situación Actual)**

Se puede comprobar que el coste de escasez en las demandas agrícolas crece de forma no lineal con el déficit (un déficit alto concentrado produce un coste de escasez mucho mayor que el de varios déficits menores con igual magnitud total pero distribuidos en el tiempo).

La UDA Acequia Real Gandía presenta una demanda brutal total de 35,36 Hm³/año para el cultivo de cítricos y tiene un déficit promedio de 0,002 Hm³, por lo que el coste de escasez es el menor que se presenta en casi todas las demandas, del orden de 132.500 €/año, siendo el periodo de 1983-1985 el que se evidencia un coste de escasez más elevado cercano al 1 millón €/año.

En el caso de la UDA río Jaraco la demanda bruta total es de 12,06 Hm³/año con un déficit en promedio de 1,093 Hm³, del cual se obtiene un coste de escasez medio de 176.000 €/año durante todo el periodo de análisis, el periodo de 1987 al 1990 representa el periodo de déficit 0.

Los Regadíos no tradicionales del Bajo Serpis y los Canales altos del Serpis, tienen un comportamiento similar con relación del déficit al suministro que oscila entre el 4% y 5% respectivamente, y el coste de escasez es bajo y además se presentan varios meses donde el coste de escasez es nulo lo que indica que para los cultivos de estas UDAs el suministro está garantizado.

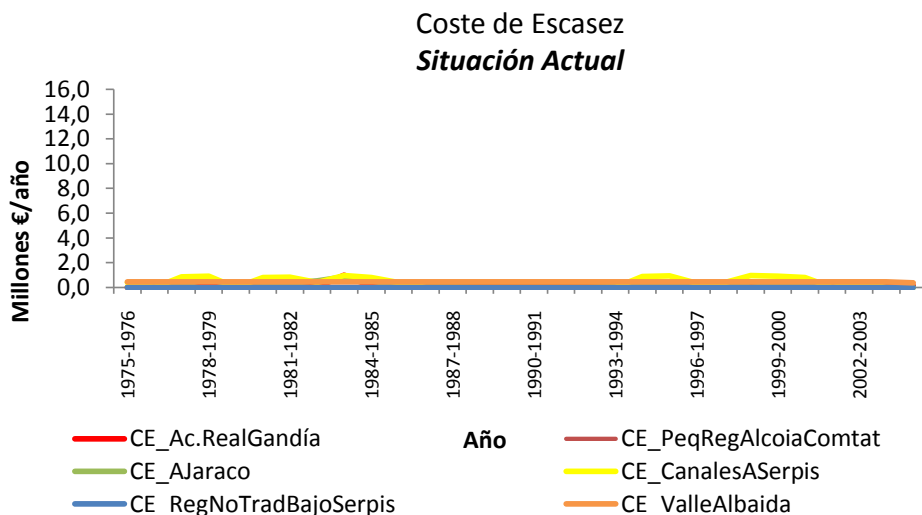


Figura 40. Coste Escasez anual en situación actual. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.

- **Escenario de Cambio Climático (Modelos GKSS y MPI)**

A continuación se analizará la variación del coste de escasez bajo la perspectiva de cambio climático para los dos modelos empleados (GKSS y MPI) respecto a la situación actual.

De acuerdo a las simulaciones realizadas a partir de las series climáticas planteadas a futuro por los modelos GKSS y MPI, observamos que en el caso de las UDA analizadas, presentan más déficit y por tanto un coste de escasez más elevado que aquellas que son utilizadas para abastecer cultivos de cítricos, siendo este cultivo más sensible a la disminución en las precipitaciones que al aumento de la temperatura.

Las tablas 19 y 20 muestran el coste del incremento en los costes de explotación total medio (en €), calculado como el *volumen extracciones adicionales por coste extracciones según el acuífero* (tabla 5).

Tabla 20. Bombeo medio (Hm³) adicional a cada UDA en el periodo de análisis (2071-2100), en escenario futuro GKSS.

Unidad de demanda Agrícola	Cod. Unidad Hidrogeológica	Bombeo (Hm³)	Coste total €
Regadíos del río Jaraco	UH 80.049	3,2	380031,7
Acequia Real de Gandía	UH 80.045	17,7	1766600,0
Peq. regadíos Valle de Albaida	UH 80.049	0,2	20085,5
Canales altos del Serpis	UH 80.054	2,9	381411,0
Reg. no tradiciones. del Bajo Serpis	UH 80.054	0,2	25376,9
Peq. Regadíos. Alcoia y El Comtat	UH 80.054	3,3	422656,9

Tabla 21. Bombeo medio (Hm³) adicional a cada UDA en el periodo de análisis (2071-2100), en escenario futuro MPI.

Unidad de demanda Agrícola	Cod. Unidad Hidrogeológica	Bombeo (Hm³)	Coste total €
Regadíos del río Jaraco	UH 80.049	3,7	438037,2
Acequia Real de Gandía	UH 80.045	10,4	1040989,7
Peq. regadíos Valle de Albaida	UH 80.049	0,2	29060,7
Canales altos del Serpis	UH 80.054	2,6	331912,4
Reg. no tradiciones. del Bajo Serpis	UH 80.054	0,3	42666,9
Peq. Regadíos. Alcoia y El Comtat	UH 80.054	2,7	351228,6

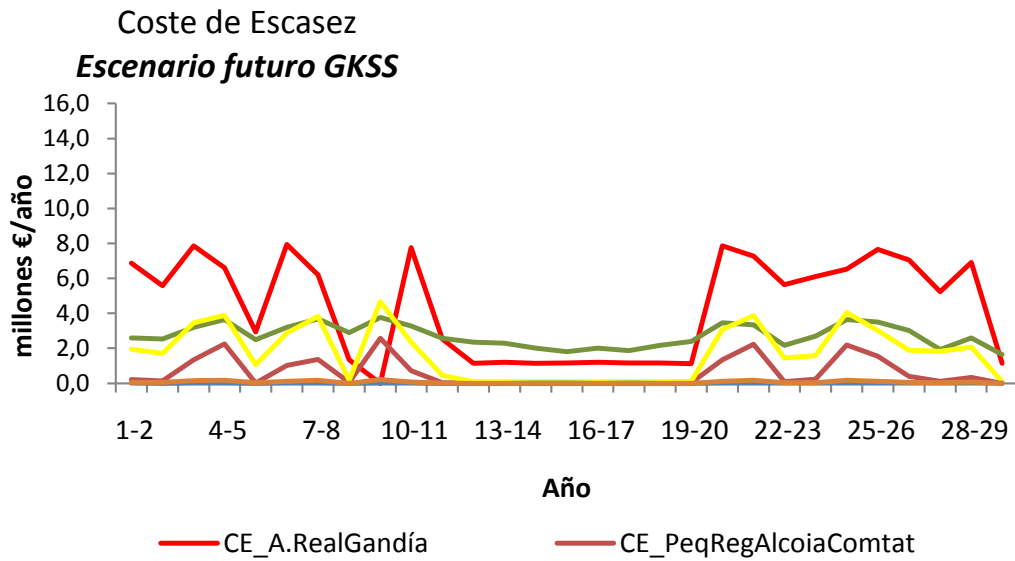


Figura 41. Coste Escasez anual ncluido el coste de los bombeos adicionales en el escenario futuro (2071-2100) del modelo GKSS. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.

En el escenario futuro, el análisis del coste de escasez parte desde el mismo momento de la selección de los escenarios climáticos (201-2100). Como primera medida tenemos que al incrementarse la temperatura se elevara el requerimiento hídrico por parte de algunos cultivos (principalmente los cítricos), además se prevé dentro de estos escenarios futuros una disminución drástica en las aportaciones al sistema, lo que dificultara el abastecimiento garantizado; por tanto, es inevitable que se presenten déficits elevados que podrían acarrear la insostenibilidad agronómica de los cultivos.

En el intento de evaluar un escenario realista a futuro, se opto por incrementar el abastecimiento hídrico a cada una de las UDAs por medio de bombeos anuales. Por consiguiente estos bombeo fueron incluidos en la evaluación de el coste de escasez para cada una de las UDAs.

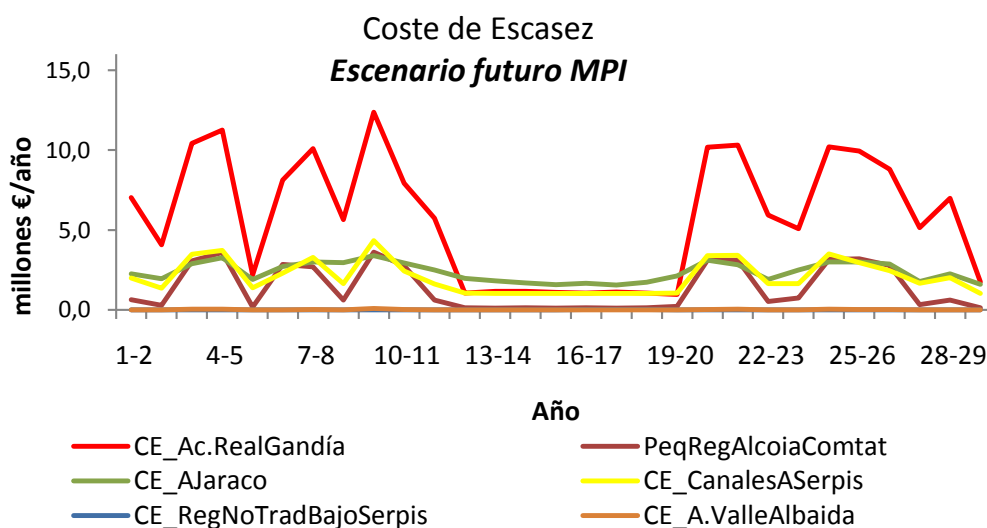


Figura 42. Coste Escasez anual en el escenario futuro (2071-2100) del modelo MPI. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.

Como se observa en las figuras 41 y 42, se incrementa el coste de escasez respecto al obtenido en situación actual.

En el caso del *escenario futuro* GKSS se presenta una sobrestimación de las aportaciones, por tanto, tendremos más disponibilidad del recurso para abastecimiento a diferencia de lo que sucede con el modelo MPI, aspecto importante que se reflejara por tanto en el déficit de cada UDA.

Para UDA *Regadíos río Jaraco*, se obtiene un coste de escasez medio para escenario MPI de aproximadamente 2.7 millones de €/año y entre tanto para el escenario GKSS este coste será de 2.7 millones de €/año, para déficits de 2,345 Hm³ y 2,236 Hm³ respectivamente.

En los escenarios GKSS y MPI se observa para las UDAs Regadíos no tradicionales del Bajo Serpis y Pequeños regadíos Valle de Albaida no sobrepasan los 30.000 €/año de coste de escasez con déficits que oscilan entre los 0,837 Hm³ y los 0,340 Hm³.

En el caso de la UDA Acequía Real Gandía se hace más evidente la variabilidad de las series de aportaciones del escenario futuro MPI, por tanto se prevén un coste de escasez medio menor de 4.3 millones €/año para el escenario MPI y de 5.8 millones €/año para el modelo GKSS.

El coste de escasez total para las seis unidades de demanda agrícola es de 11.6 millones de €/año en el caso del modelo MPI y de 9.8 millones de €/año para las simulaciones realizadas con el modelo GKSS.

Está claro que con las nuevas condiciones hídricas y de demandas del sistema en el escenario futuro, se presentará una situación de sobreexplotación a la que se encuentran sometidos algunos de estos acuíferos. Una de la Unidades hidrogeológicas más afectadas sería de Plana de Gandía (080.045), la cual resulta importante para la conservación de la Morjal de Pego – Oliva, y estaría sometida a un porcentaje de bombeo adicional elevado (17,7 Hm³/año), además esta unidad presenta en la actualidad problemas de contaminación por nitratos e intrusión marina, lo que haría la calidad de sus aguas para regadío menos idóneas.

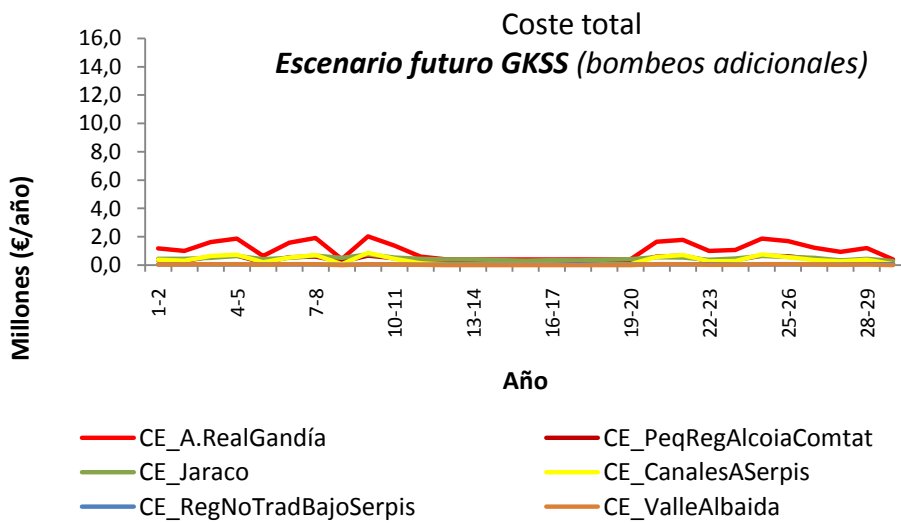


Figura 43. Coste total anual incluido el coste de los bombeos adicionales en el escenario futuro (2071-2100) del modelo GKSS. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.

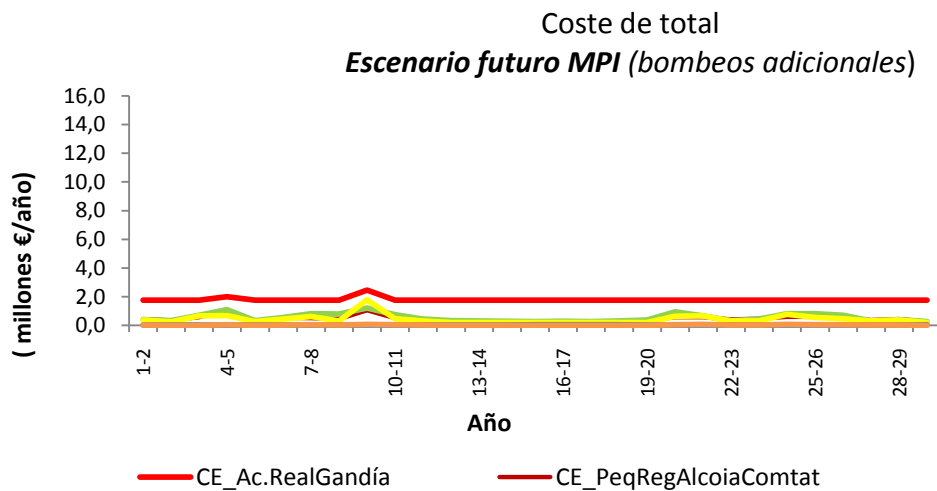


Figura 44. Coste total anual incluido el coste de los bombeos adicionales en el escenario futuro (2071-2100) del modelo MPI. Unidades de Demanda Agrícola Cuenca del Serpis.

Capítulo VII

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha desarrollado una metodología que permite hacer uso de los resultados de los escenarios de cambio climático generados para Europa, con el fin de analizar el cambio en la hidrología de un sistema específico de recursos hídricos y sus repercusiones económicas mediante el empleo de un modelo hidroeconómico.

La metodología propuesta requiere del empleo de modelos de simulación de forma secuencial, con el fin de analizar el efecto del cambio climático en un sistema, llevando a cabo la corrección, de la "serie hidrológica original " del sistema, con la variación en las principales estadísticas (media y desviación estándar) estimada a partir de las series del Proyecto PRUDENCE. La aplicación de la metodología desarrollada se ha realizado en la cuenca del Serpis.

Para final del s. XXI se espera en la cuenca del Serpis un aumento significativo en las temperaturas medias de alrededor de 3,5°C para toda la cuenca y una disminución en la precipitación de entre el 25-30% según las proyecciones disponibles de cambio climático para los modelos MPI y GKSS

El cambio de temperatura será mayor en la franja litoral para ambos modelos; en el caso de las temperaturas mínimas el incremento en las mismas tienden a ser más bajas en el caso del modelo MPI y para las temperaturas máximas el menor incremento se presenta con el modelo GKSS.

Para la precipitación, se observa que en la parte media baja de la cuenca el modelo MPI presenta una disminución mayor de las precipitaciones y en el caso del modelo GKSS las mayores disminuciones se presentan en los meses de agosto y septiembre, esto indica que hay mayor dispersión de resultados entre los modelos.

Del análisis realizado, se concluye que las mayores reducciones previstas para las aportaciones se presentan para las simulaciones realizadas con el modelo GKSS, por tanto ser presenta más inconvenientes para la satisfacer las garantías de suministro de agua a las unidades de demanda agrícolas analizadas, principalmente para aquellas aguas abajo del embalse de Beniarrés.

Las variaciones de las dotaciones de los cultivos de alfalfa y cítricos tienen una tendencia a la alza, es decir se incrementan en los escenarios climáticos. Los mayores incrementos de

las dotaciones de riego se presentan en la zona de la costa, y principalmente en aquellas unidades de demanda donde la alfalfa está presente.

Los incrementos de las dotaciones en la zona media-baja de la cuenca se deben principalmente porque las temperaturas son mayores en esta zona, se tienen mayores evapotranspiraciones y por lo tanto mayores requerimientos de riego. En cambio, las menores evapotranspiraciones se presentan en el interior de la cuenca, porque es donde también se presentan las menores temperaturas, como consecuencia se presentan también las menores dotaciones de riego.

Para la hidrología generada (periodo 2071-2100) aplicando la metodología propuesta, se consideraron dos posibles escenarios de gestión: a) no modificar las reglas de operación, limitando el bombeo máximo anual a los valores históricos b) incrementar los bombeos máximos anuales hasta alcanzar déficit máximos iguales a los históricos (que permiten el sostenimiento agronómico de los cultivos).

Manteniendo los bombeos máximos históricos se produciría grandes déficits que supondrían la destrucción de los cultivos de cítricos existentes en la zona, por lo que no sería realista el llevar a cabo una valoración económica del coste de escasez a partir de las curvas de demanda en estos escenarios con déficit extremos.

El incremento de los bombeos imponiendo que el déficit máximo no supera al existente en el periodo histórico llevaría asociado un incremento en los costes de explotación (costes de bombeo) aproximado de 2.6 millones € y agravaría la situación de sobreexplotación a la que se encuentran sometidos algunos de estos acuíferos.

Algunos modelos Regionales del clima como los aportados por el Proyecto PRUDENCE tienden a sobrestimar los datos de las series climáticas e hidrológicas. Es conveniente hacer una exhaustiva investigación para seleccionar aquellos mejor adaptados al área de estudio.

La evaluación del coste de escasez en escenarios futuros requiere de la habilidad del modelador para proyectar las demandas y generar escenarios realistas. En todo caso, este tipo de análisis nos orienta sobre el diseño de políticas de adaptación de la planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos a largo plazo para mitigar las consecuencias del cambio climático.

Este trabajo podría extenderse llevando a cabo el análisis de todos los escenarios (usando la información pública (proyecto Prudence y Ensemble) generada para el periodo de análisis con todos y cada uno de los modelos regionales) que pueden ser generados con la metodología propuesta. Esta extensión de los trabajos requeriría generar para el resto de MRCs publicados (ya se ha realizado para los modelos GKSS y MPI) las series de variables climáticas requeridas para estimar los cambios en las demandas agrarias. Finalmente la información generada se introduciría en el modelo de gestión para analizar el impacto producido. También se podrían estudiar las diferencias entre los resultados obtenidos con la metodología propuesta y la clásica en que simplemente se corrigen las series originales de acuerdo con el cambio en la media.

Se precisa definir funciones de producción de cultivos para realizar un exhaustivo análisis hidroeconómico del sistema, para facilitar y hacer más precisa la evaluación económica de los sistemas cuando se producen cambios importantes en la producción debido pues, a los cambios futuros del clima.

Es importante investigar cómo se vería afectada la calidad del recurso hídrico debido a la disminución que puede acarrear un cambio drástico de las condiciones climáticas.

Capítulo IX

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AEMET. (2009): Generación de Escenarios Regionales de Cambio Climático para España. Agencia Estatal de Meteorología.
- Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M., (2006): Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego Y Drenaje 56. FAO
- Aldrian *et al.*, E, Dümmenil Gates L, Jacob D, Podzun R, Gunawan D (2004). Long term simulation of the Indonesian rainfall with the MPI Regional Model. *Climate Dyn* 22:795-814
- Álvarez E., (2007): Estimación del coste del recurso y de restricciones ambientales en un sistema de recursos hídricos. Aplicación a la directiva Marco del Agua Europea. Trabajo de Investigación. Universidad Politécnica de Valencia.
- Andreu, J., Capilla, J., and Sanchís, E. (1996). "AQUATOOL, a generalized decision support system for water-resources planning and management." *J. Hydrol.*, 177, 269–291.
- Arribas A, Gallardo C, Gaertner MA, Castro M (2003). Sensitivity of Iberian Peninsula climate to land degradation. *Climate Dyn* 20:477-489
- Briscoe J (1996) Water as an economic good. The idea and what it means in practice. In: Proceedings of the World Congress of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). Cairo, Egypt
- Buonono E, Jones R, Huntingford C, Hannaford J (2006) The robustness of high resolution predictions of changes in extreme rainfall for Europe. *Quart J R Meteor Soc.*
- Buras N., (2001): Water resources, unresolved issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 25(1): 353.
- Burman, R. D., P. R. Nixon, J. L. Wright, and W. O. Pruitt. 1980. Water requirements. pp. 189-234. In: M. E. Jensen (ed.). Design and operation of farm irrigation systems. ASAE Monograph 3. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI, USA.
- Caballer V., Guadalajara N., (1998): Valoración económica del agua de riego / Madrid [etc.]: Mundi-Prensa, 1998 193 p.
- Clarke D., M. Smith, K. El-Askari. 1998. CropWat for Windows: User Guide, University of Southampton
- Collazos (2004): Sistema soporte de decisión para evaluación y optimización económica de sistemas de recursos hídricos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia
- CHJ (1998). Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar. Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente
- CHJ (2005) Informe para la Comisión Europea sobre los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua, Demarcación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ (2009). Documento Técnico de referencia: Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterránea. Ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ (2009). Documento Técnico de referencia: Evaluación del estado de las masas de agua superficial y subterránea. Ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ (2009). Documento Técnico de referencia: Metodología y resultados de la estimación de demandas. Ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

- Chow Ven Te, David R. Maidment, Larry W. Mays (1988). Chapters 7, 12 and 14. McGraw-Hill.
- Castro *et al.* (1993) Description of a meso-scale atmospheric numerical model. In: Diaz JI, Lions JL (eds) Mathematics, climate and environment, Masson (ISBN: 2-225-84297-3),
- Castro M, Martín-Vide J, Alonso S., (2005): El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. In: Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático (ed. Moreno Rodríguez JM), pp. 1–65. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Christensen JH, Christensen OB, Lopez P, Van Meijgaard E, Botzet M (1996) The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model, Scientific Report DMI, Copenhagen 96–4, 51
- Christensen, O. B., Christensen, J.H., Machenhauer, B., and Botzet, M.: 1998, 'Very High-Resolution Regional climate Simulations over Scandinavia - Present Climate', *J. Climate*, **11**, 3204-3229.
- Christensen, J.H. (ed.): PRUDENCE kick-off meeting, Snekkersten December 3-5, 2001. Danish Climate Centre Report No. 01-8 (Available as <http://www.dmi.dk/dmi/dkc01-8.pdf>), 2001
- Christensen, J.H., Carter, T.R., and Giordi, F., (2002). PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. EOS AGU, 82, 147.
- Christensen, J.H. and O.B. Christensen, 2003: Severe Summer Flooding in Europe, *Nature*, 421, 805-806.
- Christensen, O.B., and J.H. Christensen, 2004 Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate, *Global and Planetary Change*, 44, 107-117.
- Christensen JH, Christensen OB (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in european climate by the or this century. *Clim Change*, doi: 10.1007/s10584-006-09210-7 (this issue)
- Deidda D., (2009): Metodología para la asignación de los costes de los servicios del agua basada en la teoría de juegos cooperativos: *aplicación a la cuenca del río Turia*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia
- Déqué M, Jones RG, Wild M, Giorgi F, Christensen JH, Hassell DC, Vidale PL, Rockel B, Jacob D, Kjellström E, de Castro M, Kucharski F, van den Hurk B. (2005). Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. *Climate Dynamics* **25**: 653–670.
- DHI,(2006) Water & Environment, MIKE BASIN: A versatile decision support tool for integrated water resources management and planning, Hørshelm, Denmark, retrieved from <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/index.htm> .
- Diodato, N., (2004). Estimating Rusle'S Rainfall Factor In The Part Of Italy With A Mediterranean Rainfall Regime. *Hydrology And Earth System Sciences*, 8(1): 103-107.
- DGOH y CA. (2003). Valoración del coste de uso de las aguas subterráneas en España
- Doorenbos, J. and W. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Döscher, R., Willén, U., Jones, C., Rutgersson, A., Meier, H. E. M., Hansson, U. and Graham, L. P.: 2002, 'The development of the coupled regional ocean-atmosphere model RCAO', *Boreal Env. Res.*, **7**, 183-192.
- DWRC, 2000. "CALSIM Water Resources Simulation Model". Department of Water Resources, Bay-Delta Office, California. (No se ha encontrado referencias publicadas), referencia on line <http://modeling.water.ca.gov/hydro/model/index.html>

- EEA (2004): Air pollution in Europe 1990-2000, Topic report 4/2003, Copenhagen.
- ENSEMBLES PROJECT, (2009). European Commission's 6th Framework Integrated Project from 2004-2009 (through the contract GOCE-CT-2003-505539) under the Thematic Sub-Priority "Global Change and Ecosystems" (web site <http://ensembles-eu.metoffice.com/>).
- Estrela, T., Quintas, L. (1996) *El Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportación, SIMPA*. Revista de Ingeniería Civil, nº 104, páginas 43-52. CEDEX. Ministerio de Fomento.
- FAO, (2006) Evapotranspiración del cultivo ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE 56 Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. ISBN 9789253042197
- Fowler HJ, Kilsby CG, Stunell J. 2007. Modelling the impacts of projected future climate change on water resources in northwest England. *Hydrology and Earth System Sciences* **11**(3): 1115–1126.
- Frank A. Ward, (2009): Economics in integrated water management, Environmental Modelling & Software, Volume 24, Issue 8, Pages 948-958, ISSN 1364-8152,
- Frei, C Christensen, J.H., Deque, M., Jacob, D., Jones, R.G. and Vidale, P.L (2003). Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. *J. Geophys. Res.*, 108 (D3), 4124, doi: 10.1029/2002JD002287
- Gallardo C, Arribas A, Prego JA, Gaertner MA, Castro M (2001). Multi-year simulations with a high resolution regional climate model over the Iberian Peninsula: current climate and 2xCO2 scenario. *Quart J Roy Meteor Soc* 127:1659-1682
- García N., (2007): Metodología para la generación y evaluación de políticas de operación en sistemas de recursos hídricos. Aplicación a un sistema de México. Tesis Doctoral. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia
- Gaertner MA, Christesen OB, Prego JA Polcher J, Gallardo C, Castro M (2001) The impact of deforestation on the hydrological cycle in the western Mediterranean: an ensemble study with two regional climate models. *Climate Dyn* 17:857-873
- Garrido, et al, (2004): La importancia del valor, costo y precio de los recursos hídricos en su gestión. Proyecto FODEPAL. FAO.
- Gibelin AL, Déqué M (2003) Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim Dyn* 20:327–339
- Giorgi F, Marinucci MR, Bates GT, DeCanio G (1993) Development of a second generation regional climate model (REGCM2). Part II: Cumulus cloud and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon Weather Rev* 121:2814–2832
- Giorgi F, Mearns LO (1999) Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *J Geophys Res* 104:6335–6352
- Giorgi F, Bi X, Pal JS (2004b) Means, trends and interannual variability in a regional climate change experiment over Europe (2070-2100). *Climate Dyn* 22:839-858
- Hagemann S, Botzet M, Dümenil L, Machenhauer B, (1999). Derivation of global GCM boundary conditions from 1 km land use satellite data. MPI Report 289, Max-Planck Institut für Meteorologie.
- Giorgi, F., Huang, Y., Nishizawa, K., and Fu, C.: 1999, 'A seasonal cycle simulation over eastern Asia and its sensitivity to radiative transfer and surface processes', *J. Geophys. Res.*, **104**, 6403-6423.
- Harou, J., Pulido, M., 2009 *et al*, (2009) Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology* 375 (2009) 627–643
- Heck P, Lüthi D, Wernli H, Schär C (2001). Climate impacts of European-scale anthropogenic vegetation changes: a study with a regional climate model. *J Geophys Res-Atmos* 106 (D8): 7817-7835

- Hennemuth, B Rutgersson A, Bumke K, Clemens M, Omstedt A, Jacob D, Smedeman AS (2003) Net precipitation over the Baltic Sea for one year using models and data-based methods. *Tellus* 55A:352-367
- Hernández (2007). Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España
- INE (2009). *Instituto Nacional de Estadística*. <http://www.ine.es>
- INM. (2007) Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Madrid.
- IPCC (2001^a). Tercer informe de evaluación. La base científica. Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC (2002). Informe Especial de Escenarios de Emisiones del IPCC para Responsables de Políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ISBN: 92-9169-413-4.
- IPCC (2003). Future climate in world regions: and intercomparison of modelbased projections for the new IPCC emissions scenarios.
- IPCC-WGI, (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Mannig, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L Miller (eds.)) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 996 pp.
- Jacob, 2001 D. Jacob, A note to the simulation of the annual and interannual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin, *Meteorology and Atmospheric Physics* 77 (2001) (1-4), pp. 61-73.
- Jenkins H., Pulido M., Rosenberg D., Medellín-Azuara J., Lund R, Howitt R., (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*.
- Jenkins, M.W., Lund, J.R., Howitt, R.E., (2003): Using economic loss functions to value urban water scarcity in California. *Journal of the American Water Works Association* 95 (2), 58-70.
- Jones, C.G., Willén, U., Ullerstig, A. and Hansson, U.: 2004, 'The Rossby Centre Regional Atmospheric Climate Model Part I: Model Climatology and Performance for the Present Climate over Europe', *Ambio*, 33:4-5, 199-210.
- Jyrkama, M. I., and J. F. Sykes (2007). The impact of climate change on groundwater, *The Handbook of Groundwater Engineering* 2nd Edition, 2, 28-1-28-42.
- Labadie, J.W., (1995) MODSIM: River Basin Network Flow Model for Conjunctive Stream-Aquifer Management. Program User Manual and Documentation, Colorado State University.
- Lehmann A. Lorenz P, Jacob D (2004) Exceptional Baltic Sea inflow events in 2002-2003. *Geophysical Research Letters* 2004GL020830
- Lenderink van den Hurk B, van Meijgaard E, van Ulden A, Cuijpers H (2003) Simulation of present-day climate in RACMO2: first results and model developments. KNMI technical report 252:24
- Loucks, D., Stedinger, J., and Haith, D. (1981), *Water resource systems planning and analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Loucks Daniel P. van Beek, E., Stedinger, J., Dijkman, J., Villars, M., (2005) *Water Resources Systems planning and management: An introduction to Methods, Models and applications*. <http://hdl.handle.net/1813/2804>

- Maass, A., Hufschmidt, M., Dorfman, R., Thomas, H., Marglin, S., Fair, G.,(1962): Design of Water-Resources Systems. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Meier, H.E.M., Döscher, R., and Faxen, T.: 2003, 'A multiprocessor coupled ice-ocean model for the Baltic Sea. Application to the salt inflow.', *J. Geophys. Res.*, **108**, C8:3273.
- Merritt D.M. y Wohl E.E. 2006. *Plant dispersal along rivers fragmented by dams*. River Research and Applications 22:1-26.
- Mellado Ros, *et al.*, (2007). Diagnóstico, simulación, y propuesta de medidas para la mejora de la calidad del agua en la cuenca del río serpis. Ejercicio final de carrera. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia España.
- MIMAM (2005): Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias.
- NNakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z.: (2000): Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp. Available online at: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>*
- Pal JS, Small EE, Eltahir EAB (2000). Simulation of regional-scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J Geophys Res* 105:29579-29594
- Paredes J., (2004): Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España
- PNACC, 2006. Plan nacional de adaptación al cambio climático. Marco de Referencia para las Actividades de Evaluación de Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático.
- PRUDENCE PROJECT, 2004. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for defining European climate change risks and effects. The Prudence Projects by the EU through contract EVK2-CT2001-00132 (web site <http://prudence.dmi.dk/>).
- Pulido-Velazquez, D; Garrote, L., Andreu, J., Martin-Carrasco, FJ, Iglesias, A, 2010. A methodology to diagnose the effect of climate change and to identify adaptive strategies to reduce its impacts in conjunctive-use systems at basin scale. En revision en *Journal of Hydrology*.
- Pulido-Velázquez, M., Andreu, J., Sahuquillo, A., (2007). Economic optimization of conjunctive use of surface and groundwater at the basin scale. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132 (6), 454–467
- Pulido-Velázquez, M., Jenkins, M.W., Lund, J.R., (2004): Economic values for conjunctive use and water banking in southern California. *Water Resources Research* 40 (3).
- Pulido- Velázquez M., (2003): Optimización Económica de la Gestión del Uso Conjunto de Aguas superficiales y Subterráneas en un sistema de Recursos Hídricos. Contribución al Análisis económico propuesto en la Directiva Marco Europea del Agua. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelson, P. and Willén, U.,(2004). European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim. Dynam.*, 22, 13-31

- Sanchez E, C. Gallardo, M. A. Gaertner, A. Arribas y M. Castro (2004), "Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach" *Global and Planetary Change*, 44, 163- 180.
- Schär Schär C, Lüthi D, Beyerle U, Heise E (1999) The soil-precipitation feedback: a process study with a regional climate model. *J Climate* 12:722-741.
- Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, Appenzeller C (2004) The role of increasing temperature variability for European summer heat waves. *Nature* 427:332-336
- Semmler, D. Jacob, K.H. Schlünzen and R. Podzun, (2004) Influence of sea ice treatment in a regional climate model on boundary layer values in the Fram Strait region, *Monthly Weather Review* **132** (2004), pp. 985-999
- Stappeler J, Doms G, Schaettler U, Bitzer HW, Gassmann A, Damrath U, Gregoric G (2003) Mesogamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorol Atmos Phys* 82:75-96
- Staniforth, (1997). Regional modelling: a theoretical discussion. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63, 15-29.
- Solera A., (2003): Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistemática de recursos hídricos. Aplicación a las cuencas de los ríos tajo y Júcar. Tesis doctoral Departamento de Ingeniería Hidráulica y medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia - España.
- Sophocleous, (2003). Global and Regional Water Availability and Demand: Prospects for the Future. *Natural Resources Research*. Volume 1 / 1992 - Volume 19 / 2010
- Sumpsi, J.M, Garrido, A. Blaco, M. Valera, C., y E. Iglesias.[1998]. Economía y política de gestión del agua en agricultura. Mundi-Prensa. Madrid - España
- Triana, E. (2004): Evaluación económica de adopción de limitaciones en explotación de embalses. Trabajo de investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados. Universidad Politécnica de Valencia, España. Septiembre, 2004.
- Van Den Hurk *et al.*, (2005) Soil control on runoff response to climate change in regional climate model simulations. *Journal of Climate*, 18, 3536-3551.
- Vidale P.L., D. Lüthi, Frei C., Seneviratne S. and C. Schär, 2003: Predictability and uncertainty in a regional climate model, 2003: *J. Geophys. Res.*, 108(D18), 4586 , doi: 10.1029/2002JD002810.
- Villalobos, 2003. Análisis previos para la obtención de reglas de gestión de recursos hídricos en cuencas mexicanas. Trabajo de investigación presentado para obtener el Diploma de Estudios Avanzados por la Universidad Politécnica de Valencia.
- Young, R.A., (2005). Determining the economic value of water: concepts and methods. Resources for the Future, Washington, DC.
- Zagona, Edith A., Terrance J. Fulp, Richard Shane, Timothy Magee, and H. Morgan Goranflo (2001), RiverWare: A Generalized Tool for Complex Reservoir Systems Modeling, *Journal of the American Water Resources Association*, AWRA 37(4):913-929.