

ACTIVIDADES REALIZADAS Y GRADO DE CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS AL CIERRE DEL PROYECTO

Resumen del proyecto para difusión pública

Se han desarrollado **metodologías y herramientas** para evaluar efectos potenciales del cambio climático y global sobre sistemas de recursos hídricos e identificar estrategias óptimas de adaptación a escala cuenca y acuífero. La metodología se basa en construcción de escenarios futuros (con reescalado y simulación hidrológica, y proyección de demandas y usos) y modelos de gestión para evaluar múltiples impactos (hidrológicos, económicos, agronómicos y ambientales) y estrategias.

Para obtener **series hidrológicas futuras**, se propone un método de selección de modelos climáticos con mejor ajuste entre escenario de control e histórico bajo la hipótesis de que proporcionan proyecciones más fiables, así como de “ensamblado” de simulaciones con pesos según el ajuste control-histórico. Se propone generar series hidrológicas futuras en un sistema perturbando las históricas según los cambios en medias y desviaciones típicas previstos en las proyecciones climáticas disponibles en Europa (proyectos PRUDENCE y ENSEMBLE) mediante dos enfoques: corrección de series hidrológicas y simulación hidrológica de series climáticas corregidas. Ambos se utilizaron para definir escenarios futuros de recarga y aportaciones y generar múltiples escenarios sintéticos futuros con modelos ARMA. En cuanto a la simulación hidrológica, se han desarrollado metodologías para simulación eficiente del flujo subterráneo y relación río-acuífero en modelos de gestión. En el acuífero Serral-Salinas se simuló escenarios futuros de recarga, mostrando el efecto clave de cambios en la varianza de las series de lluvia en zonas semiáridas sobre la recarga total. Para el caso de Mancha Oriental, un modelo de simulación hidrológica detallado en SWAT ha permitido la simulación integral de procesos lluvia-escorrentía y procesos agronómicos en escenarios futuros. Además, se ha desarrollado una metodología que, mediante matrices de respuesta y funciones de lixiviado, permite vincular cambios en el uso de fertilizantes con concentraciones de nitrato en el acuífero. Los trabajos han permitido caracterizar el impacto del cambio climático en la **demanda** de riego,

producción de cultivos y lixiviado mediante modelos agronómicos (funciones de producción y lixiviado de nitratos en cultivos de la Mancha Oriental con EPIC). Usando cadenas de Markov y autómatas celulares se obtuvieron mapas probabilísticos de futuros **usos del suelo** combinando tendencias históricas, fuerzas motrices y proyecciones europeas (EuRuralis).

La investigación en **modelos hidroeconómicos** se ha centrado en su desarrollo para simular el impacto del cambio global y evaluar y diseñar estrategias de adaptación. Se han desarrollado modelos probabilísticos de redes bayesianas para incorporación explícita de las distintas fuentes de incertidumbre en la gestión y adaptación, tanto en el complejo sistema Mancha Oriental y en el acuífero de Serral-Salinas, mediante redes bayesianas dinámicas. Se han desarrollado modelos hidroeconómicos de simulación para valoración de impactos y estrategias de adaptación en las cuencas del Serpis y Júcar, y modelos de optimización para la selección óptima de un programa de medidas de adaptación al cambio climático, con aplicación a la cuenca del río Orb, Francia. Por último, se ha estudiado el potencial de instrumentos económicos, como políticas eficientes de precios del agua, para gestionar la escasez.

Se han publicado 11 artículos SCI del primer cuartil (2 en revisión) y presentado más de 20 ponencias en congresos internacionales, finalizando con unas jornadas internacionales para difundir los resultados e intercambiar experiencias con expertos (Granada, junio 2013). Más información en la web del proyecto: <http://www.iiama.upv.es/igme/sawares>

Consecución de objetivos del proyecto

<p>OBJETIVO 1: Generación de escenarios hidrológicos de cambio climático para modelos de gestión de recursos hídricos.</p>	<p>Progreso y consecución del objetivo: <u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u> Se ha llevado a cabo un estudio de la información disponible y se han propuesto una serie de transformaciones que permitan adaptar la información inicial a la escala de análisis requerida por el sistema (“downscaling”). La metodología se ha aplicado en dos sistemas a escala de cuenca (Cuenca del Serpis y del Júcar) y dos a escala acuífero (Serral Salinas y La Mancha Oriental). Parte de estos trabajos se incluyen en 2 artículos SCI (D. Pulido-Velazquez et a., 2011a, 2014).</p>
<p>OBJETIVO 2: Simulación del efecto del cambio climático sobre las aguas subterráneas y la relación río-acuífero.</p>	<p>Progreso y consecución del objetivo: <u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u> Se simularon los posibles efectos del CC sobre los acuíferos Serral Salinas y La Mancha Oriental. Se partió de modelos MODFLOW previamente calibrados sobre los que se simularon nuevos escenarios en los que se modificó la recarga con objeto de valorar el efecto de la reducción en las entradas hidrológicas al acuífero producida por el cambio climático. Parte de estos trabajos se incluyen en 2 artículos SCI (D. Pulido-Velazquez et a., 2011a, 2014). En La Mancha Oriental se ha calibrado un modelo de transporte de contaminantes para valorar concentraciones de Nitratos. Se ha desarrollado una metodología que, mediante matrices de respuesta y funciones de lixiviado, permite vincular cambios en el uso de fertilizantes con concentraciones de nitrato (ver artículo SCI Peña-Haro et al., 2010).</p>
<p>OBJETIVO 3: Metodologías y herramientas para simular las aguas subterráneas y la relación río-acuífero en modelos de gestión</p>	<p>Progreso y consecución del objetivo: <u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u> Se proponen y aplican metodologías y herramientas adecuadas para simular de forma eficiente las aguas subterráneas y la relación río-acuífero en modelos de gestión, con el fin de estudiar alternativas de adaptación al CC teniendo en cuenta los nuevos escenarios hidrológicos de CC generados para el sistema. Para ello, se ha realizado un análisis crítico (estudiando la idoneidad de las mismas) de las metodologías y herramientas disponibles para integrar de forma eficiente las aguas subterráneas para distintos condiciones. Parte de estos trabajos se han incluido en 3 artículos en revistas de impacto D. Pulido-Velazquez et al., 2011b; 2012; Llopis-Albert y D. Pulido-Velazquez, 2013).</p>

<p>OBJETIVO 4: Incertidumbres asociadas al estudio del impacto del cambio climático en la hidrología de un sistema</p>	<p>Progreso y consecución del objetivo: <u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>Para cuantificar las entradas hidrológicas futuras en un sistema, se ha propuesto una metodología que persigue valorar las incertidumbres asociadas a los modelos regionales de clima y poder seleccionar las características hidrológicas más representativas de un determinado escenario futuro (parte de estos trabajos han sido publicados en revistas de alto impacto; D. Pulido-Velazquez et al., 2014). También se ha trabajado en incorporar el efecto de la aleatoriedad de las series de entradas hidrológicas futuras para unas mismas condiciones climáticas, utilizando modelos estocásticos que permitan generar múltiples series sintéticas con los mismos estadísticos (ver tesina de máster (Monte, 2012) codirigida por D. y M. Pulido) Se ha explorado el estudio del efecto que las incertidumbres en los parámetros hidrogeológicos podrían tener en la simulación del estado del sistema usando técnicas de apropiadas para su integración en modelos de gestión (parte de estos trabajos se publicaron en revistas de alto impacto SCI; D. Pulido-Velazquez et al., 2011b; 2012).</p>
<p>OBJETIVO 5: Diseño y programación de modelos hidroeconómicos de gestión a escala de cuenca</p>	<p>Progreso y consecución del objetivo: <u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>Se han elaborado modelos hidroeconómicos de gestión para la cuenca del Serpis (a partir del modelo descrito en D. Pulido-Velazquez et al., 2011) y del Jucar. Los IP de ambos subproyectos han codirigido 2 tesinas de máster sobre modelos hidroeconómicos, una en El Serpis (desarrollada por X. Lozano) y otra en El Jucar (À. Escrivà), aplicación recogida en un artículo enviado a J. of Hydrology (Escrivà et al., en revisión).</p>
<p>OBJETIVO 6: Evaluación de las necesidades de riego ante el cambio climático</p>	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>Se ha empleado el modelo GEPIC calibrado para la zona con el fin de determinar el efecto del cambio climático sobre las funciones de producción y lixiviado de nitratos</p>
<p>OBJETIVO 7: Rendimiento de cultivos</p>	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>Se han obtenido funciones de producción o rendimiento de cultivos y de lixiviado de nitratos regionalizadas para los principales cultivos del caso de estudio de la Mancha Oriental (trigo, maíz y cebada). Para evaluar si es posible realizar funciones de producción distintas por zonas o si por el contrario una sola función de producción describe adecuadamente toda la zona de estudio se desarrolla</p>

	una análisis de la varianza multifactorial (ANOVA) y de la covarianza (ANCOVA).
OBJETIVO 8: Objetivos ambientales y cambio climático	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>Se ha definido un procedimiento para integrar objetivos ambientales en modelos de gestión frente al cambio climático y evaluar el impacto del cambio climático sobre el cumplimiento de los objetivos de la DMA y Directiva Hija de Protección de las Aguas Subterráneas (DHPAS). En concreto, nos hemos centrado en el objetivo de la concentración máxima de nitratos en las aguas subterráneas, establecida en 50 mg/l, en cuencas con un uso intensivo de fertilizantes en la agricultura. El procedimiento general ha sido descrito en 2 artículos publicados en el J. of Hydrology: para un caso sintético y en Peña-Haro et al., 2011 para el caso de Salobral-Los Llanos (Mancha Oriental).</p>
OBJETIVO 9: Proyección y caracterización económica de sistemas de recursos hídricos	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>El desarrollo de escenarios futuros de usos del suelo en la Mancha Oriental se ha hecho mediante uso combinado de tendencias históricas (de imágenes de satélite) y fuerzas motrices, y proyecciones europeas (EuRuralis 2.0) para, usando cadenas de Markov y autómatas celulares, cuantificar tendencias futuras y obtener mapas futuros probabilísticos de usos del suelo (Henríquez Dole, 2012).</p>
OBJETIVO 10: Diseño y programación de modelos de gestión a escala de acuífero	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>Se han desarrollado modelos de gestión mediante redes Bayesianas de los acuíferos de Serral-Salinas (Molina et al., 2013a) y Mancha Oriental (Molina et al., 2013b) para el análisis de adaptación al cambio climático. Se ha actualizado el modelo hidroeconómico de la zona del <i>Salobral-Los Llanos</i> para extenderlo a toda la <i>Mancha Oriental</i> e incorporar los efectos del cambio climático en la recarga y en la concentración de nitratos en el acuífero. Se ha incorporado también la posibilidad de la simulación de distintas políticas de adaptación.</p>
OBJETIVO 11: Análisis de resultados del modelo de gestión. Influencia de la hidrología en el cambio global.	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u></p> <p>A escala de acuífero se han analizado los impactos a largo plazo producidos por los cambios en la entradas hidrológicas debidos al cambio climático en los acuíferos Serral Salinas (parte de estos trabajos han sido recogidos en un artículo publicado en J. Hydrology [Molina et al., 2012]; y otro en Hydrological Processes [D. Pulido-Velazquez et al., 2014]). Se han simulado impactos del cambio climático en Salobral-Los Llanos y Mancha Oriental, incluyendo cambio climático y de usos, y considerando cantidad y calidad (nitratos). A escala de cuenca se analizaron los</p>

	<p>resultados en Serpis y Júcar (tesis de máster de X.Lozano en Serpis y À. Escrivà en Júcar). Parte de estos trabajos se han incluido en un artículo enviado a una revista de alto impacto JCR (Escrivà et al., under review).</p>
<p>OBJETIVO 12: Análisis económico del impacto del cambio climático.</p>	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u> Se han obtenido resultados del impacto económico del cambio climático en los siguientes casos de estudio: acuífero de <i>Serral-Salinas</i> (modelo de redes bayesianas), acuífero <i>Salobral-Los Llanos/Mancha Oriental</i> (modelo hidroeconómico para control óptimo de la contaminación por nitratos), cuenca del río <i>Serpis</i> (modelo hidroeconómico de simulación, SAD AQUATOOL) y cuenca del río <i>Júcar</i> (simulación y optimización, en GAMS). Estos trabajos han dado lugar a diversas publicaciones, tesis, tesinas y PFCs. La colaboración con BRGM ha permitido añadir un nuevo caso de estudio: impacto del cambio climático en la cuenca del <i>río Orb</i> (Francia) mediante modelo hidroeconómico de optimización (ver publicaciones en D2)</p>
<p>OBJETIVO 13: Diseño de estrategias de gestión sostenibles y económicamente eficientes frente al CC.</p>	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u> Mediante los modelos hidroeconómicos reseñados se ha procedido al diseño de estrategias de adaptación para los diversos casos de estudio. En el caso del Júcar, se han incorporado medidas de: mejora de eficiencia de riego, instrumentos económicos, cambio de prioridades en la asignación durante sequías, y mercados. Estos trabajos han dado lugar a diversas publicaciones (apartado C2b) tesis, tesinas y PFCs.</p>
<p>OBJETIVO 14: Incertidumbres en la adaptación de sistemas de recursos hídricos al cambio climático.</p>	<p><u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u> A escala acuífero, se ha realizado en un análisis holístico de incertidumbre en la simulación de impactos del cambio climático y de usos del suelo, usando la <i>Mancha Oriental</i> como estudio piloto. Para abordar la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático se han empleado diferentes escenarios hidrológicos correspondientes a distintas combinaciones MRC-MCG reescalados para así analizar la dispersión de los resultados. También se consideran diferentes escenarios de usos del suelo, teniendo en cuenta cambios socioeconómicos y posible retroalimentación de estrategias de adaptación. En cuanto a la incertidumbre en la modelación, se ha tenido en cuenta tanto la incertidumbre en los parámetros (mediante simulación de Monte Carlo estudiamos el impacto de la incertidumbre en la conductividad hidráulica en las concentraciones de nitratos; Peña-Haro et al., 2011;</p>

		Llopis-Albert, en revisión), como la propagación de incertidumbre en el acoplamiento del modelo integral de gestión. La modelación con redes bayesianas en los casos de <i>Serral-Salinas</i> (Molina et al., 2013a) y <i>Mancha-Oriental</i> (Molina et al., 2013b) han permitido incorporar la incertidumbre de forma explícita en el análisis de políticas. A escala de cuenca, ya se han mencionado los trabajos realizados en el <i>Serpis</i> (tarea IV.A).
OBJETIVO 15:	Guía y conclusiones	<u>Objetivo totalmente cumplido (100%).</u> Se ha sintetizado los trabajos realizado en una Guía Metodológica y Conclusiones, a partir del análisis y conclusiones sobre metodologías, herramientas y resultados de los diversos casos de estudio. La Guía estará disponible al público en la web del proyecto, http://www.iiama.upv.es/igme/sawares/
OBJETIVO 16:	Difusión de resultados	Se han publicado 11 artículos SCI del primer cuartil (2 en revisión) y presentado más de 20 ponencias en congresos internacionales, finalizando con unas jornadas internacionales para difundir los resultados e intercambiar experiencias con expertos (Granada, junio 2013). Más información en la web del proyecto.

ACTIVIDADES REALIZADAS Y RESULTADOS ALCANZADOS

Las principales tareas y objetivos satisfechos en cada una de ellas se describen a continuación. Para más detalle sobre una actividad se puede consultar el informe de la anualidad en que se llevó a cabo:

I.A. ESCENARIOS HIDROLÓGICOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (CC)

Se alcanzó el objetivo perseguido, desarrollar una metodología para incorporar la información sobre la evolución del clima en la definición de escenarios hidrológicos futuros de los sistemas a estudiar.

Se **analizaron** críticamente **las estimaciones** disponibles **sobre CC en España**. Se seleccionó, procesó y facilitó el acceso a la información a la **escala espacio-temporal** más adecuada para generar escenarios futuros. Se estudió la bondad de las calibraciones de los modelos climáticos regionales (MCR) con objeto de realizar una selección razonada de las proyecciones. Se elaboraron **mapas** que sintetizan la información para corregir según la metodología propuesta las series climáticas/hidrológicas históricas **incorporando el CC**.

Se **analizaron** las **metodologías** existentes para traducir los resultados de MCR en series temporales hidrológicas (aportaciones superficiales y recarga a acuíferos, básicamente) de sistemas. Se realizó una revisión crítica sobre las técnicas de regionalización existentes y sus aplicaciones. Se identificaron puntos débiles, tanto en la corrección de series históricas como en la generación de series incorporando el efecto del CC. Sobre dichas lagunas se trabaja en actividades del proyecto. No se encontraron casos en los que las series históricas se corrijan, además de con las variaciones en medias mensuales, con las variaciones en otros estadísticos como la varianza. Se **propuso una** metodología para generar series futuras incorporando el cambio esperado en estadísticos de orden uno y dos.

La metodología se aplicó en las **cuencas** del Serpis y Júcar, y los **acuíferos** Serral Salinas y La Mancha Oriental. Se trabajó sobre diferentes variables (precipitación [P], temperatura [T^a], humedad, etc) y escalas espacio temporales. En el Serpis, se evaluó el impacto del CC en series mensuales de aportaciones y otras variables climáticas (P y T^a) necesarias para evaluar los requerimientos de cultivos mediante CROPWAT (Clarke et al., 1998). Para Serral Salinas se realizó un exhaustivo análisis (bajo 2 escenarios de emisión [A2, A1B], y en base a simulaciones con numerosos MCR) de los posibles efectos producidos por el CC en la recarga de lluvia. La recarga fue evaluada simulando en un modelo agregado lluvia-escorrentía las series futuras de P y T^a generadas. En la Mancha Oriental se obtuvieron series diarias para alimentar un modelo distribuido de balance continuo SWAT [2007] y un modelo agronómico GEPIC [Liu et al., 2007]. Los casos de estudio han permitido

extraer conclusiones sobre la aplicabilidad de la metodología y han sido publicados en revistas SCI (D. Pulido-Velazquez et al., 2011a, 2014).

Principales publicaciones SCI relacionadas: D. Pulido-Velazquez et al., 2011a, 2014

I.B EFECTO DEL CC SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO.

El objetivo es simular los posibles efectos del CC sobre los acuíferos Serral Salinas y La Mancha Oriental, y analizar la relación río acuífero en los mismos. Se partió de **modelos distribuidos de flujo MODFLOW** (McDonald and Harbaugh, 1988) calibrados sobre los que se simularon escenarios futuros de recarga (generados con la metodología descrita en la actividad I.A). Parte de estos trabajos se publicó en revistas de alto impacto SCI (D. Pulido-Velazquez et al., 2011a, 2014) En La Mancha Oriental se ha calibrado un **modelo de transporte** para valorar concentraciones de Nitratos. Se ha llevado a cabo una modelación más detallada de la zona “El Salobral-Los Llanos”, con objeto de estudiar una óptima aplicación de fertilizantes en la misma. Parte de estos trabajos han sido publicados en J. Hydrology (**Salvador et al., 2010**).

Principales publicaciones SCI relacionadas: D. Pulido-Velazquez et al., 2011a, 2014; Peña-Haro et al., 2010

I.C.SIMULACIÓN DE LA HIDROLOGÍA DE ESCENARIOS DE CC EN MODELOS DE GESTIÓN

Se alcanzó el objetivo perseguido, proponer y aplicar metodologías y herramientas para **simular** de forma eficiente las **aguas subterráneas** (flujo y transporte) **y la relación río-acuífero en modelos de gestión**.

Se analizaron los pros y contras de las metodologías existentes para simular flujo y transporte en modelos de gestión (a escala de cuenca y de acuífero) y las distintas técnicas de integración de las ecuaciones de flujo en dichos modelos de gestión (acoplamiento y funciones de influencia). La integración del flujo subterráneo en modelos de gestión de cuenca complejos requiere el uso de técnicas que difieren de las clásicas en diferencias finitas, como las de autovalores (ej. D. Pulido-Velazquez et al., 2006; 2007). Sin embargo, en los modelos detallados de gestión de acuíferos se suele recurrir a técnicas clásicas (Ahlfeld et al., 2005). Se ha **estudiado la eficiencia** de la formulación por **autovalores** (reducir el coste computacional e incrementar sus ventajas para simular a escala de cuenca) en la resolución de problemas lineales de flujo subterráneo y relación río-acuífero, avanzando en el entendimiento y la conceptualización de la formulación. Parte de estos trabajos se publicaron en revistas **SCI** (D Pulido-Velazquez et al., 2011b, 2012). Se analizan distintas aproximaciones para simular la interfaz salina en acuíferos costeros (Llopis-Albert y Pulido-Velazquez, 2013).

Se ha desarrollado una **guía** sobre las **técnicas** y **herramientas** más

apropiadas para integrar la componente subterránea en modelos de gestión según la naturaleza del problema a modelar (tanto a escala de cuenca como a escala de acuífero) **y el objetivo del análisis a llevar a cabo**. Para los casos seleccionados (Serral-Salinas y La Mancha Oriental) se llevó a cabo una modelación acorde con la guía.

Principales publicaciones SCI relacionadas: D. Pulido-Velazquez et al., 2011b, 2012; Llopis-Albert y D. Pulido-Velazquez 2013

I.D. INCERTIDUMBRES EN EL IMPACTO HIDROLÓGICO DEL CC.

El objetivo es valorar algunas incertidumbres asociadas al estudio del impacto del CC en la hidrología de un sistema. Para cuantificar las entradas hidrológicas, se ha propuesto una metodología que persigue **valorar las incertidumbres** asociadas a los **MCR** empleados **y poder seleccionar** justificadamente las **características hidrológicas** (estadísticos) más representativas de un determinado escenario climático futuro en un sistema de recursos hídricos. Dicha metodología ha sido aplicada en el estudio de la recarga en los acuíferos Serral Salinas (D. Pulido-Velazquez et al., 2014) y La Mancha Oriental (ver Trillo, 2013; EFC dirigido por M. y D. Pulido). Se ha trabajado en incorporar el efecto de la **aleatoriedad de las series** de entradas hidrológicas futuras en un sistema (para unas mismas condiciones climáticas) utilizando modelos estocásticos que permitan generar múltiples series sintéticas con los mismos estadísticos que caracterizan unas determinadas condiciones climáticas o hidrológicas. Se aplicó en la generación de series de aportaciones para el el Serpis (Monte, 2012, Tesina dirigida por R. Garcia-Bartual, M. y D. Pulido). Finalmente, se estudió del efecto que las incertidumbres en las **características hidrogeológicas** que el acuífero podrían tener en la simulación de su estado en modelos de gestión. Se propone generar múltiples campos equiprobables de parámetros hidrodinámicos y analizar los resultados obtenidos al simular la evolución del estado del acuífero para cada uno de ellos aplicando el Método de Monte-Carlo. Como casos de estudio se seleccionaron acuíferos sintéticos para explorar un mayor rango de variabilidad en los parámetros. El análisis realizado será útil para posteriores estudios de CC en sistemas reales. Parte de estos trabajos se publicaron en revistas de alto impacto SCI; D. Pulido-Velazquez et al., 2011b; 2012).

Principales publicaciones SCI relacionadas: D. Pulido-Velazquez et al., 2014, 2011b, 2012,

II) EVALUACIÓN DE LAS NECESIDADES DE RIEGO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

II.A. EVALUACIÓN DE LAS NECESIDADES DE RIEGO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

Se ha hecho una revisión de metodologías para la estimación de la ET y necesidades de riego de cultivos para zonas semiáridas justificando la selección de selecciona de una versión distribuida con soporte GIS del modelo

agronómico EPIC (GEPIC; Liu et al., 2009) para los cálculos de necesidades de riego ante cambio climático. Se han modificado las funciones de producción o rendimiento de cultivos para dos cultivos fundamentales caso de estudio de la Mancha Oriental (trigo y maíz), reajustándolas según las condiciones prevista de precipitación, temperatura y concentración de CO₂ para un escenario de cambio climático. En el subproyecto GESHYDRO del presente proyecto coordinado se generaron series futuras para el periodo 2071-2100 y suponiendo un escenario de emisiones A1B a escala diaria de las variables requeridas (temperatura media, máxima y mínima; humedad media, máxima y mínima, velocidad y dirección media y máxima del viento; precipitación, temperatura, radiación y evapotranspiración) para alimentar el modelo agronómico EPIC-GEPIC. Dichas series fueron obtenidos perturbando las series históricas disponibles para el sistema con base a las predicciones de cambio en media y desviación estándar mensual obtenidas con el modelo climático regional SMHI en el marco del proyecto ENSEMBLES (2008). Se ha empleado el modelo GEPIC calibrado para la zona con el fin de determinar el efecto del cambio climático sobre las funciones de producción y lixiviado de nitratos previamente desarrolladas.

II.B. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS

Se han obtenido funciones de producción o rendimiento de cultivos y de lixiviado de nitratos regionalizadas para los principales cultivos del caso de estudio de la Mancha Oriental (trigo, maíz y cebada). Para evaluar si es posible realizar funciones de producción distintas por zonas o si por el contrario una sola función de producción describe adecuadamente toda la zona de estudio se desarrolla una análisis de la varianza multifactorial (ANOVA) y de la covarianza (ANCOVA). Queda pendiente el obtener funciones de rendimiento para ciertos cultivos de la zona que por sus características singulares no son contemplados directamente en GEPIC, mediante el uso directo de EPIC para cada zona de estudio (ej. cebolla, alfalfa).

Publicaciones relacionadas: García-Prats et al, en revisión.

II.C. OBJETIVOS AMBIENTALES DE LA DMA/DHPAS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Se ha definido un procedimiento para integrar objetivos ambientales en modelos de gestión frente al cambio climático y evaluar el impacto del cambio climático sobre el cumplimiento de los objetivos de la DMA y Directiva Hija de Protección de las Aguas Subterráneas (DHPAS). En concreto, nos hemos centrado en el objetivo de la concentración máxima de nitratos en las aguas subterráneas, establecida en 50 mg/l, en cuencas con un uso intensivo de fertilizantes en la agricultura. El procedimiento general ha sido descrito en 2 artículos publicados en el J. of Hydrology: para un caso sintético y en Peña-Haro et al., 2011 para el caso de Salobral-Los Llanos (Mancha Oriental).

II.D. PROYECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

El desarrollo de escenarios futuros de usos del suelo en la Mancha Oriental se ha hecho mediante uso combinado de tendencias históricas (de imágenes de satélite) y fuerzas motrices, y proyecciones europeas (EuRuralis 2.0) para, usando cadenas de Markov y autómatas celulares, cuantificar tendencias futuras y obtener mapas futuros probabilísticos de usos del suelo (Henríquez Dole, 2012).

III. DISEÑO y PROGRAMACIÓN DE MODELOS DE GESTIÓN HIDROECONÓMICOS A ESCALA CUENCA Y ACUÍFERO.

III.A. MODELOS HIDROECONÓMICOS A ESCALA DE CUENCA PARA ANÁLISIS DE IMPACTOS Y ADAPTACIÓN AL CC.

En el Informe de la primera anualidad se presentaron los trabajos llevados a cabo en la cuenca del río *Serpis*, incluyendo el desarrollo de un modelo de gestión para valorar impactos y políticas de adaptación a largo plazo. También se describió la metodología desarrollada para el análisis probabilístico de indicadores de rendimiento de un sistema (garantía, resiliencia, vulnerabilidad, sostenibilidad) incorporando redes bayesianas para el tratamiento de la incertidumbre (tesina de Máster de Barbero, 2012). Se ha desarrollado un modelo hidroeconómico de gestión para la cuenca del *Júcar*, el cual se ha aplicado a la valoración de impactos y el diseño de políticas de adaptación a largo plazo (tesina de Máster de Escribá, 2012, codirigida por M. y D. Pulido). El trabajo ha contado con la colaboración del Dr. J. Harou (UC London). En colaboración con BRGM se ha añadido un nuevo caso de estudio: impacto del cambio climático en cuenca del río Orb (Francia) mediante modelo hidroeconómico de optimización.

Principales publicaciones relacionadas: Pulido-Velazquez D. et al., 2014.; Peña-Haro et al., 2011; Escriba-Bou et al., en revisión; Girard et al., en revisión. Conferencia: Pulido-Velazquez et al., 2013; Girard et al., 2012 y 2013.

III. B. MODELOS HIDROECONÓMICOS DE ACUÍFERO PARA ANÁLISIS DE IMPACTOS Y ADAPTACIÓN SOSTENIBLE AL CC.

Se han desarrollado modelos hidroeconómicos de gestión de los acuíferos *Mancha Oriental* y *Serral-Salinas*. Se ha actualizado el modelo hidroeconómico de la zona del *Salobral-Los Llanos* para extenderlo a toda la *Mancha Oriental* e incorporar los efectos del cambio climático. Se parte del modelo desarrollado en la anterior anualidad, diseñado para identificar la aplicación óptima de fertilizantes que minimiza las pérdidas de renta agrícola con restricciones en las concentraciones máximas admisibles de nitratos. Se han desarrollado modelos de gestión de los acuíferos de *Mancha Oriental* (Molina et al., 2013b) y *Serral-*

Salinas (Molina et al., 2013a).

Principales publicaciones SCI relacionadas: Peña-Haro et al., 2010, Molina et al., 2013a; 2013b

IV) ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE GESTIÓN

IV.A. INFLUENCIA DE LA HIDROLOGÍA EN LOS RESULTADOS DEL CAMBIO GLOBAL

Se han alcanzado los objetivos perseguidos en esta actividad, tal y como se describe a continuación.

IV.A.1. Resultados para distintos escenarios. Sensibilidad de los modelos a la hidrología.

En el acuífero **Serral Salinas** se ha analizado la sensibilidad del modelo de redes Bayesianas a la hidrología para diversos escenarios futuros de CC (ver Molina et al., 2013a en J. Hydrology).

En la **Mancha Oriental** se analizaron los impactos sobre la recarga incorporando la variabilidad espacial de los efectos producidos por el CC. Se generaron series futuras de P, T^a, velocidad del viento, radiación y humedad y se simularon en un modelo hidrológico distribuido SWAT (2007) previamente calibrado para el acuífero (ver informe de la primera anualidad). Se analizó la sensibilidad de las simulaciones a diversos escenarios de emisiones (A2 y A1B), incluyendo para cada escenario la incertidumbre debida al uso de diferentes MRCs. Parte de estos trabajos han sido recogidos en un artículo (Garcia-Prats, en revisión).

A escala de cuenca, en el **Serpis**, se ha evaluado la sensibilidad del modelo de gestión (desarrollado en la actividad III) a la incertidumbre en las entradas hidrológicas, analizando los impactos para series generadas con distintos modelos regionales de clima.

En el **Júcar** se analizó la sensibilidad de las entradas hidrológicas a la metodología y modelos utilizados en generarlos. Se contemplaron 2 alternativas: 1) perturbar las aportaciones históricas en régimen natural con los cambios (en media y desviación estándar mensual) esperados en la escorrentía 2) simulación con modelos lluvia-escorrentía las aportaciones para las principales subcuencas del sistema a partir de las series futuras de P y T^a generadas perturbando las históricas con los cambios en media y desviación estándar mensual esperados. Se ha analizado la sensibilidad del modelo de gestión a la hidrología futura para distintos horizontes temporales. Parte de estos trabajos han sido recogidos en un artículo (Escrivà et al., en revisión).

Publicaciones SCI relacionadas: Molina et al., 2013a; Garcia-Prats, en revisión; Escrivà et al., en revisión

IV.A.2. Influencia de la incertidumbre hidrológica/hidrogeológica en las políticas de adaptación

En el **Serpis**, se estudió la influencia de las incertidumbres en las entradas hidrológicas (comparando resultados para distintos escenarios de emisiones y MRC) sobre las políticas de adaptación propuestas a largo plazo. En el **Júcar** también se ha valorado la influencia de las entradas hidrológicas (para diferentes escenarios de emisiones futuras y modelos regionales de clima) en del modelo de gestión (desarrollado en la actividad III), analizando las políticas de adaptación más apropiadas para distintos horizontes temporales. Para el acuífero **Serral Salinas**, se analizó la influencia de la recarga asociada a los escenarios de emisiones futuras (A2 y A1B) sobre las estrategias de adaptación a proponer. Se analizarán los resultados obtenidos con un SSD basado en Redes Bayesianas.

Publicaciones SCI relacionadas: Molina et al., 2013a; Escrivà et al., en revisión

IV.B. CONTAMINACIÓN, OBJETIVOS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL E IMPACTO CLIMÁTICO

Se han desarrollado matrices de respuesta para así simular el efecto del cambio climático y de usos del suelo (cambio global) en la contaminación por nitratos de acuíferos, con el acuífero Mancha Oriental como caso de estudio. Aunque inicialmente se trabajó con la zona del Salobral-Los Llanos, el análisis del lixiviado de nitratos por la fertilización de cultivos se ha extendido a todo el ámbito de la Mancha Oriental, lo que permite extender el modelo hidroeconómico (tarea III.B) a todo el dominio del acuífero. Con los resultados de una versión GIS del modelo de simulación EPIC (GEPIC) se distinguieron zonas con diferencias estadísticamente significativas de rendimiento y lixiviado de nitratos. Combinando el análisis estadístico con información del área de cultivos, se definieron las zonas de contaminación para el modelo hidroeconómico. Posteriormente se ha simulado el efecto ambiental y económico de dos posibles políticas para control de la contaminación de nitratos: precios de los fertilizantes y precios del agua, usando un modelo hidroeconómico programado en GAMS.

Principales publicaciones relacionadas: Pulido-Velazquez et al., 2013; Peña-Haro et al., 2010 y 2011; García-Prats et al., en revisión. Llopis-Albert et al., en revisión. Conferencias: Peña-Haro et al., 2011; Pulido-Velazquez et al., 2010a.

IV.C. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CASOS DE ESTUDIO

Se han obtenido resultados del impacto económico del cambio climático en los siguientes casos de estudio: acuífero de *Serral-Salinas* (modelo de redes bayesianas), acuífero del *Salobral-Los Llanos /Mancha Oriental* (modelo hidroeconómico para el control óptimo de la contaminación por nitratos), y cuenca del río *Serpis* y cuenca del río *Júcar* (modelos hidroeconómicos, de simulación en el caso del *Serpis*, y de simulación y optimización, en el caso de la cuenca del río *Júcar*). Estos trabajos han dado lugar a diversas

publicaciones, tesis, tesinas y PFCs. La colaboración con BRGM ha permitido añadir un nuevo caso de estudio: impacto del cambio climático en la cuenca del río Orb (Francia) mediante modelo hidroeconómico de optimización. Tras la caracterización coste-eficacia de diferentes medidas de mejora de eficiencias en los usos urbano y agrícola, el modelo selecciona la combinación óptima de medidas para la adaptación a nuevos escenarios de cambio climático y de usos del suelo.

Principales publicaciones relacionadas: Pulido-Velazquez et al., 2013; Peña-Haro et al., 2010 y 2011. Molina et al., 2013b. Llopis-Albert et al., en revisión. Conferencias: Peña-Haro et al., 2011; Pulido-Velazquez et al., 2010a.

IV.D. DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE GESTIÓN SOSTENIBLES y ECONÓMICAMENTE EFICIENTES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Mediante los modelos hidroeconómicos reseñados (tareas previas) se ha procedido al diseño de estrategias de adaptación para los diversos casos de estudio.

IV.E. INCERTIDUMBRES EN LA ADAPTACIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

A escala acuífero se ha realizado en un análisis holístico de incertidumbre en la simulación de impactos del cambio climático y de usos del suelo, usando la *Mancha Oriental* como estudio piloto. Para abordar la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático se han empleado diferentes escenarios hidrológicos correspondientes a distintas combinaciones MRC-MCG reescalados, para así analizar la dispersión de los resultados. También se consideran diferentes escenarios de usos del suelo, teniendo en cuenta cambios socioeconómicos y posible retroalimentación de estrategias de adaptación. En cuanto a la incertidumbre en la modelación, se ha tenido en cuenta tanto la incertidumbre en los parámetros (mediante simulación de Monte Carlo estudiamos el impacto de la incertidumbre en la conductividad hidráulica en las concentraciones de nitratos; Peña-Haro et al., 2011; Llopis-Albert, en revisión), como la propagación de incertidumbre en el acoplamiento del modelo integral de gestión. La modelación con redes bayesianas en los casos de *Serral-Salinas* (Molina et al., 2013a) y *Mancha-Oriental* (Molina et al., 2013b) han permitido incorporar la incertidumbre de forma explícita en el análisis de políticas. A escala de cuenca, ya se han mencionado los trabajos realizados en el *Serpis* (tarea IV.A).

Principales publicaciones relacionadas: Llopis-Albert et al., en revisión. Peña-Haro et al., 2011. Molina et al., 2013a y 2013b. Conferencias: Peña-Haro et al., 2014. Pulido-Velazquez et al., 2013a.

V.A. GUÍA METODOLÓGICA Y CONCLUSIONES

Se ha sintetizado los trabajos realizado en una Guía Metodológica y

Conclusiones, a partir del análisis y conclusiones sobre metodologías, herramientas y resultados de los diversos casos de estudio. La Guía estará disponible al público en la web del proyecto, <http://www.iama.upv.es/igme/sawares/>

V.B. DIFUSIÓN DE RESULTADOS Ver apartado C de este informe.

En total en el proyecto coordinado se han publicado 11 artículos SCI del primer y presentado más de 20 ponencias en congresos internacionales, finalizando con unas jornadas internacionales para difundir los resultados e intercambiar experiencias con expertos (Granada, junio 2013). Se ha compartido la información pública en la web del proyecto.

Difusión de los resultados del proyecto o subproyecto

Se han publicado un total de 11 artículos SCI de primer cuartil en el proyecto coordinado:

- 1) Pulido-Velázquez, D, JL García-Aróstegui, JL Molina, M. Pulido-Velázquez, 2014. Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate? *Hydrol. Process*; DOI: 10.1002/hyp.10191.
- 2) Molina, J.L., Pulido-Velazquez, D., García-Aróstegui, J.L., Pulido-Velazquez, M., 2013. Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support Tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *J. of Hydrology*, 479, 113–129.
- 3) Molina, J.L., Pulido-Velazquez, M., Llopis-Albert, C., D., Peña-Haro, S., 2013 Stochastic hydro-economic model for groundwater quality management using Bayesian networks. *Water Science and Technology* (ISSN 0273-1223), 6(3), 579-586.
- 4) Pulido-Velazquez, D., Llopis-Albert., C., Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M.. 2011b. Efficient conceptual model for simulating the effect of aquifer heterogeneity on natural groundwater discharge to rivers. *Advances in Water Resources*, 34(11), 1377–1389. doi:10.1016/j.advwatres.2011.07.010
- 5) Peña-Haro, S., Llopis-Albert., C., Pulido-Velazquez, M., Pulido-Velazquez, D., 2010. Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain. *J. of Hydrology*, 392 (3-4), 174–187, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.08.006.
- 6) Llopis-Albert, C. and D. Pulido-Velázquez, 2013. Discussion about the validity of sharp-interface models to deal with seawater intrusion in coastal aquifers. *Hydrol. Process.* (2013) Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.9908
- 7) Pulido-Velazquez D, Sahuquillo A, Andreu J, 2012. A conceptual–numerical model to simulate hydraulic head in aquifers that are hydraulically connected to surface water bodies. *Hydrological Processes.* (2012). Volume 26, Issue 10, pages 1435–1448, 15 May 2012 Published online in Wiley Online Library. wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.8214
- 8) Pulido-Velazquez, D., Garrote, L., Andreu, J., Martín-Carrasco, FJ, Iglesias, A. 2011a. 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. *Journal of Hydrology* 405: 110–122 doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.014.
- 9) Molina, J.L., García-Aróstegui, J.L., Bromley, J. and Benavente, J., 2011. Integrated Assessment of the European WFD. Implementation in Extremely Overexploited Aquifers Through Participatory Modelling. *Water Resour Manage.*, 25(13), 3343-3370
- 10) Pulido-Velazquez, M., Alvarez-Mendiola, E., and Andreu, J., 2013. Design of Efficient Water Pricing Policies Integrating Basinwide Resource Opportunity Costs. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 139(5): 583-592.
- 11) Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M., Llopis-Albert., C., 2011. Stochastic hydro-economic modeling for optimal management of agricultural groundwater nitrate pollution under hydraulic conductivity uncertainty. *Environmental Modelling and Software*, 26(8), 999-1008.

EN REVISIÓN:

12) Escrivá-Bou, A., Pulido-Velázquez, M., Pulido-Velázquez, D. The value of climate adaptive strategies for water management in the Júcar River Basin (Spain). En revision. *J. Hydrology*.

13) García-Prats, A., Pulido-Velázquez, M., Peña-Haro, S., Pulido-Velázquez, D. Spatial pattern analysis of nitrogen leaching responsible of groundwater pollution under current and climate change conditions. La Mancha Oriental case study. En revisión *J. Hydrology*.

Jornadas internacionales (PONENTE INVITADO)

Pulido-Velázquez et al., 2013. Assessment of future impacts and adaptation strategies to climate change in semi-arid regions. International workshop: **Assessing future scenarios of global change, impacts and adaptation measures in Water Resource Systems**. Organized by IGME-UPV-UGR. Granada, Junio 2013.

Presentaciones Orales (publicadas en actas del congreso):

Escrivá-Bou, A., Pulido-Velázquez, M., Pulido-Velázquez, D., 2013. Hydro-Economic analysis of climate adaptive strategies for water management. Sustaining Water Resources and Ecological Functions in Changing Environments. 2013 UCOWR / NIWR ANNUAL CONFERENCE. June 11-13, Lake Tahoe, California, US.

Molina J.L., D. Pulido-Velázquez, J.L. García-Arostegui, M. Pulido-Velázquez, 2012. Dynamic Bayesian Networks for the assessment of Climate Change impacts on overexploited aquifers systems. 39th IAH Congress, Confronting Global Change. Niagara Falls, Canada.

Pulido-Velázquez, D., J.L. García-Arostegui, J.L. Molina, M. Pulido-Velázquez, 2012. Assessment of the influence of climate change on groundwater recharge in semi-arid regions (Serral-Salinas, Spain). HydroPredict' 2012. 3rd International Interdisciplinary conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management: Water Resources and Changing Global Environment. Vienna, Austria, 24-27 Sept. 2012.

Pulido-Velázquez, D., Sahuquillo A, Andreu J, 2010. A conceptual model to simulate hydraulic head evolution in aquifers hydraulically connected with surface water bodies. IAHR GW Symposium. Valencia, Septiembre 2010

Peña-Haro, S., Pulido-Velázquez, M., García-Prats, A., Henríquez-Dole, L., Mocholi, A., Macián-Sorribes, H., López-Nicolas, A., 2014. Integrated Modeling for Assessing the Impacts of Climate and Land Use Change on the Mancha Oriental Groundwater System, Spain. Conference on Integrated Management of Groundwater Resources and Dependent Ecosystems. Prague, Czech Republic, 5-7 March. Oral.

Escrivá-Bou, A., Pulido-Velázquez, M., Pulido-Velázquez, D., 2013. Hydro-Economic analysis of climate adaptive strategies for water management. Sustaining Water Resources and Ecological Functions in Changing Environments. 2013 UCOWR / NIWR ANNUAL CONFERENCE. June 11-13, Lake Tahoe, California, US.

Llopis-Albert, C., Pulido-Velázquez, M., Peña-Haro, 2010. Agricultural nitrate pollution control under groundwater parameter uncertainty. A case study: el Salobral-Los Llanos aquifer. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR): International Groundwater Symposium 2010, 22–24 September, Valencia, Spain.

Álvarez-Mendiola, E.; Pulido-Velázquez, M.; Andreu, J.; Peña-Haro, S. 2011. Design of an efficient water pricing policy integrating resource opportunity cost at the river basin scale. Contribution to the EU Water Framework Directive. EGU General Assembly 2011. Vienna, Austria. 3-8 April 2011.

Peña-Haro, S.; Pulido-Velázquez, M.; Llopis-Albert, C. 2011. Cost-Benefit analysis of optimal fertilizer standards for nitrate pollution abatement. Groundwater conference 2011. Gestion des ressources en eau souterraine. Orléans, France. 14-16 March 2011.

Pulido-Velázquez, M., Peña-Haro, Llopis-Albert, C., 2010a. Optimal nitrate pollution control using a mixed integer stochastic model with predefined reliability. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR): International Groundwater Symposium 2010, 22–24

September, Valencia, Spain.

Pósters:

D. Pulido-Velazquez, J.L. García-Arostegui, J.L. Molina, I. Sanz, M. Pulido-Velazquez, 2011. Análisis de impactos futuros del cambio climático sobre los recursos subterráneos. El caso del acuífero Serral Salinas. *Congreso Ibérico sobre las Aguas Subterráneas*. AIH, Asociación Internacional de Hidrogeólogos- Grupo Español. Zaragoza, España. Sept. 2011.

Pulido-Velazquez, M.; Rivera, J. P.; Llopis-Albert, C.; Peña-Haro, S.; García-Pratz, A.; Jorque, J. M.; Pulido-Velazquez, D. 2011. Assessment of impacts of land use and climate changes on groundwater resources. *EGU General Assembly 2011*. Vienna, Austria. 3-8 April.

Pulido-Velazquez, D., Andreu, J., Delgado, F. y M. Pulido-Velazquez, 2010. Modelling conjunctive management of surface and groundwater resources in the "Vega de Granada" system. *IAHR GW Symposium*. Valencia, Septiembre 2010.

Girard, C., J.D. Rinaudo, Y. Caballero, and M. Pulido-Velazquez, 2012. Hydro-economic optimization model for selecting least cost programs of measures at the river basin scale. Application to the implementation of the EU Water Framework Directive on the Orb river basin (France). *Geographical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2012. Vienna, Austria.

Peña-Haro, S., C. Llopis-Albert, M. Pulido-Velazquez, A. Stalder, A. Garcia-Prats, and L. Henriquez-Dole, 2012. Comparison of policies for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture in the Eastern Mancha aquifer (Spain). *Geographical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2012. Vienna, Austria.

Apperl, B., M. Pulido-Velazquez, J. Andreu and C. Llopis-Albert, 2012. Contribution of the Multi-attribute Value Theory to conflict resolution in groundwater management. Application to the Mancha Oriental system (Spain). *Geographical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2012. Viena, Austria.

Pulido-Velazquez, M.; Rivera, J. P.; Llopis-Albert, C.; Peña-Haro, S.; García-Pratz, A.; Jorque, J. M.; Pulido-Velazquez, D. 2011. Assessment of impacts of land use and climate changes on groundwater resources. *Geographical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2011. Viena, Austria. 3-8 April.

Llopis-Albert, C.; Peña-Haro, S.; Pulido-Velazquez, M. 2011. Stochastic hydro-economic modelling for groundwater nitrate pollution control under uncertainty. Application to El Salobral-Los Llanos case study, Spain. *Geographical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2011. 3-8 April.

Pulido-Velazquez, M.; Rivera, J. P.; Llopis-Albert, C.; Peña-Haro, S.; García-Pratz, A.; Jorque, J. M.; Pulido-Velazquez, D. 2011. Assessment of impacts of land use and climate changes on groundwater resources. *EGU Geographical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2011. Viena, Austria. 3-8 April.

Peña-Haro, S., Pulido-Velázquez, M., Yang, H.C., Liu, J.D., Llopis-Albert, C., 2010. Application of an agronomic model to determine optimal management strategies to reduce nitrate concentrations in groundwater. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS): Groundwater Quality 2010: Groundwater Quality Management in a Rapidly Changing World*, June 13–18, ETH Zurich, Switzerland.

Peña-Haro, S., Pulido-Velázquez, M., Llopis-Albert, C., 2010. Optimal fertilizer control for meeting EU groundwater nitrate concentration standards. *International Association of Hydrological Sciences*

(IAHS): Groundwater Quality 2010: Groundwater Quality Management in a Rapidly Changing World, June 13–18, ETH Zurich, Switzerland.

TESIS DOCTORALES

1) Dr. Salvador Peña Haro. *Directores:* Manuel Pulido Velázquez, David Pulido Velázquez. *Título:* Hydro-economic modelling framework for optimal management of groundwater nitrate pollution from agriculture. *Calificación:* sobresaliente “cum laude”. *Organismo:* UPV. *Año:* 2010.

2) Dr. Jose Luis Molina. *Directores:* Jose Luis García Aróstegui, José Benavente. *Título:* Análisis integrado y estrategias de gestión de acuíferos en zonas semiáridas. Caso del Altiplano (Murcia, España). *Calificación:* sobresaliente “cum laude”. *Organismo:* Universidad de Granada. *Año:* 2009

[Nota: esta última tesis es anterior al inicio del proyecto, pero se considera importante y relacionada con el contenido del mismo, ya que contiene el modelo hidroeconómico sobre el que se ha trabajado en uno de los casos de estudio]

TESINAS DE MASTER relacionadas con el proyecto:

2012

Alvar Escrivá Bou. Tesina: *Análisis hidroeconómico de la adaptación al cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar* (sept. de 2012; codirectores: M. Pulido, D. Pulido). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

Vicente Monte Hernández. Tesina: *Generación de escenarios sintéticos futuros de hidrología superficial incorporando cambio climático. Aplicación a la cuenca alta del río Serpis* (enero de 2012; codirectores: R. García-Bartual, M. Pulido, D. Pulido). Máster en Ing. Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

Rocío Cerezuela. Tesina: *Evaluación de la recarga y de los efectos potenciales del cambio climático en el Sector Occidental de la Sierra de las Nieves (Málaga). Septiembre de 2012;* codirectores: S. Martos y D. Pulido. Máster Geología Aplicada a la Obra Civil y los Recursos Hídricos(GEORHID), UGR.

Lenin Henríquez Esaú. Tesina: *Escenarios futuros de Uso de Suelo para el Análisis del Efecto del Cambio Global en los Recursos Hídricos aplicado al Acuífero de Mancha Oriental* (enero de 2012; Director: M. Pulido). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

Ana María Barbero García. Tesina: *Redes Bayesianas para el análisis integrado de la gestión de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del río Júcar* (abril de 2012; Directores: M. Pulido, Jose Luis Molina). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

Alejandro Marín Benlloch. Tesina: *Obtención de curvas de producción y lixiviado mediante el modelo distribuido GEPIC en escenarios de cambio climático.* (marzo de 2012; director: A. García Prats). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

Girard, Corentin. Trabajo de Investigación: *Modelo de optimización hidro-económica para la determinación del programa de medidas de menor coste en la implementación de la Directiva Marco del Agua. Aplicación a la gestión cuantitativa de recursos hídricos en la cuenca del río Orb* (Francia). (Sept. de 2012; Directores: M. Pulido, J.D. Rinaudo).

2011

Xiomara Lozano Gómez. Tesina: *Modelo hidroeconómico para el análisis del impacto de cambio climático. Aplicación a la cuenca del río Serpis* (enero de 2011; codirectores: M. Pulido, D. Pulido). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.