

Trabajo Fin de Máster

MEJORAS DE LA COMPONENTE SUBTERRÁNEA Y LA RELACIÓN RÍO- ACUÍFERO DEL MODELO PATRICAL EN EL ÁMBITO DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

Intensificación

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

SEBASTIÁN PABLO VÁZQUEZ

Director:

MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN

Codirector/es:

TEODORO ESTRELA MONREAL

LAURA TANCO BALLESTEROS

MARZO, 2017



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

A Eve y mi familia

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer profundamente a mis tutores, Dr. Teodoro Estrela, Jefe de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Júcar, al Dr. Miguel Ángel Pérez Martín y a Laura Tanco Ballesteros, por la presencia, el tiempo, sus conocimientos y experiencias que han compartido conmigo y me han permitido crecer y llevar adelante mi trabajo.

A Dña. Arancha Fidalgo Pelarda, por su tiempo y predisposición a todas mis consultas.

A todo el equipo de trabajo, Francesc, María José, Juan, Miquel, Pedro, Amparo, Encarna, Javier y a todos los que siempre estuvieron presentes y con la mejor voluntad y paciencia nos acompañaron técnicamente e hicieron mejor nuestra estadía en la oficina.

A la Dra. Cecilia Dufilho por introducirme en el mundo de los modelos y de los recursos hídricos, y al Dr. Eduardo Cassiraga por su acompañamiento durante todo el máster.

A mis compañeros de beca por las experiencias y almuerzos compartidos.

A Diego, Loli y toda la familia que me recibieron en su casa e hicieron más fácil mi llegada a Valencia.

A todos MUCHAS GRACIAS

INDICE MEMORIA

1. RESUMEN	17
2. INTRODUCCION Y OBJETIVOS.....	21
3. ANTECEDENTES	25
3.1. MODELO DE APLICACIÓN	25
3.2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO HIDROLÓGICO PATRICAL	25
3.3. PARÁMETROS DE LA FORMULACIÓN DE TÉMEZ.....	28
3.4. ESTUDIOS PREVIOS.	30
3.4.1. Caracterización de masas subterráneas.	30
3.4.2. Estudios piezométricos.....	31
3.4.3. Manantiales y relación río acuífero.....	32
3.4.4. Salidas al mar.....	35
4. AMBITO DE ESTUDIO	37
4.1. LÍMITES ADMINISTRATIVOS	38
4.2. MARCO FÍSICO.....	40
4.3. CLIMA.....	42
4.4. RED HIDROGRÁFICA PRINCIPAL	44
4.5. ZONIFICACIÓN SUPERFICIAL.....	45
4.6. ZONIFICACIÓN SUBTERRÁNEA.....	47
5. METODOLOGIA	49
5.1. DATOS DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	49
5.2. MAPA GEOLÓGICO Y LITOESTRATIGRÁFICO.....	49
5.3. ASPECTOS EVALUADOS.....	51
5.3.1. Caudales.....	52
5.3.1.1. Puntos de control.	52
5.3.1.2. Indicadores de Bondad de Ajuste.	54
5.3.2. Piezometría.....	56
5.3.3. Transferencias laterales.....	57

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patrical
en el ámbito de la CHI

5.3.4.	<i>Salidas al mar.</i>	59
5.3.5.	<i>Balance de agua subterránea.</i>	60
5.3.6.	<i>Evapotranspiración potencial. Método Penman-Monteith.</i>	60
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	63
6.1.	DATOS	63
6.1.1.	<i>Relación río acuífero.</i>	63
6.1.2.	<i>Manantiales</i>	64
6.2.	CONTRASTE DE MODELOS	65
6.2.1.	<i>Contraste de caudales con PBIAS</i>	66
6.2.1.1.	Caudales de la serie completa.	66
6.2.1.2.	Caudales de la serie reciente.	66
6.2.2.	<i>Contraste de caudales con NSE</i>	67
6.2.2.1.	Caudales de la serie completa	67
6.2.2.2.	Caudales de la serie reciente.	67
6.2.2.3.	Hidrogramas del modelo 2016.	68
6.2.3.	<i>Piezometría.</i>	69
6.2.3.1.	Contraste de niveles piezométricos.	70
6.2.4.	<i>Transferencias laterales.</i>	71
6.2.5.	<i>Salidas al mar.</i>	72
6.2.5.1.	Salidas al mar en la serie completa.	72
6.2.5.2.	Salidas al mar en la serie reciente.	73
6.2.6.	<i>Balance de agua subterránea</i>	73
6.2.6.1.	Balance del ciclo hidrológico de la serie completa.	73
6.2.6.2.	Balance del ciclo hidrológico de la serie reciente.	74
6.2.6.3.	Recargas de la serie completa.	74
6.2.6.4.	Recargas de la serie reciente.	75
6.2.6.5.	Pérdidas en río en la serie completa.	75
6.2.6.6.	Pérdidas en río en la serie reciente.	76
6.2.7.	<i>Evapotranspiración Penman- Monteith.</i>	76
6.3.	EVALUACIÓN DEL MODELO PLAN JÚCAR 2015	77

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patrical
en el ámbito de la CHI

6.4. EVALUACIÓN DEL MODELO 2016.	78
7. CONCLUSIONES	81
8. LÍNEAS FUTURAS	87
9. REFERENCIAS	89

AÑEXOS

- I. Informe de niveles piezométricos por sistemas modelo Plan Júcar 2015.
- II. Informe de niveles piezométricos por sistemas modelo 2016.
- III. Informe de caudales mensuales por sistemas modelo Plan Júcar 2015.
- IV. Informe de caudales mensuales por sistemas modelo 2016.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Mapa Geológico. b) CORINE land cover 2000 map.....	26
Figura 2. Modelación del ciclo en dos capas, zona superficial y zona profunda o acuífero.	27
Figura 3. Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico Patricial.	27
Figura 4. Precipitación temperatura y aportación en la red fluvial en octubre de 2000.....	28
Figura 5. Ficha elaborada por el IGME.	31
Figura 6. a) Mapa piezométrico encomienda IGME 1970-1974. b) Mapa piezométrico elaborado por la CHJ 2005. c) Mapa piezométrico encomienda IGME 2008. Fuente: CHJ.....	32
Figura 7. Localización geográfica de los manantiales inventariados en el ámbito de DHJ. Zona septentrional.	34
Figura 8. Localización geográfica de los manantiales inventariados en el ámbito de DHJ. Zona meridional.....	35
Figura 9. Confederaciones Hidrográficas y Cuencas Intracomunitarias.	38
Figura 10. Ámbito territorial de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.....	39
Figura 11. Hidrográfica y modelo digital del terreno de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. ...	40
Figura 12. Mapa litológico. Fuente: PHJ 2015-2021.	42
Figura 13. Distribución espacial de la temperatura media anual (°C) en la DHJ. Fuente: CHJ. ...	43
Figura 14. Precipitación Media Anual (mm). Fuente: CHJ.	44
Figura 15. Red hidrográfica principal. Fuente: CHJ.	45
Figura 16. Sistemas de explotación de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Fuente: CHJ. ...	46
Figura 17. Masas de agua subterránea. Fuente: CHJ.	48
Figura 18. a) Mapa Geológico, modelo actual y b) Mapa litoestratigráfico, modelo nuevo.....	50
Figura 19. Mapas de Infiltración máxima (IMáx).	51
Figura 20. Puntos de control contrastados.	54
Figura 21. Red operativa de piezómetros.	56
Figura 22. Mapa de permeabilidad de los límites de masas subterráneas.	58
Figura 23. Referencias bibliográficas respecto a salidas al mar.	59
Figura 24. Balance del ciclo Hidrológico.	60
Figura 25. Estaciones SIAR seleccionadas.	62
Figura 26. Relación Río Acuífero. Fuente: CHJ.	64

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patrical
en el ámbito de la CHI

Figura 27. Manantiales incorporados al modelo.....	65
Figura 28. a) PBIAS. Modelo Plan Júcar 2015 b) PBIAS. Modelo 2016.....	66
Figura 29. a) PBIAS. Modelo Plan Júcar 2015 b) PBIAS. Modelo 2016.....	66
Figura 30. a) NSE. Modelo Plan Júcar 2015 b) NSE. Modelo 2016.....	67
Figura 31. a) NSE. Modelo Plan Júcar 2015 b) NSE. Modelo 2016.....	67
Figura 32. Hidrograma Río Turia en el embalse de Benageber.....	68
Figura 33. Hidrograma Río Cabriel en el embalse de Contreras.....	68
Figura 34. Hidrograma Río Júcar en el embalse de Tous.	69
Figura 35. a) NSE piezometría Modelo Plan Júcar 2015 b) NSE piezometría modelo 2016.....	69
Figura 36. Ejemplo de ajuste de piezometría en el modelo 2016.....	70
Figura 37. Ejemplo de ajuste de piezometría en el modelo 2016.....	70
Figura 38. Ejemplo de ajuste de piezometría en el modelo 2016.....	71
Figura 39. Transferencias del modelo Plan Júcar 2015.....	71
Figura 40. Transferencias del modelo 2016.	72
Figura 41. a) Salidas al mar. Modelo Plan Júcar 2015 b) Salidas al mar. Modelo 2016.	72
Figura 42. a) Salidas al mar. Modelo Plan Júcar 2015 b) Salidas al mar. Modelo 2016.	73
Figura 43. a) Balance del Ciclo Hidrológico. Modelo Plan Júcar 2015. b) Balance del ciclo hidrológico modelo 2016.....	73
Figura 44. a) Balance del Ciclo Hidrológico. Modelo Plan Júcar 2015. b) Balance del ciclo hidrológico modelo 2016.....	74
Figura 45. a) Recargas en el modelo Plan Júcar 2015 b) Recargas en el modelo 2016.....	74
Figura 46. a) Recarga en el modelo Plan Júcar 2015 b) Recarga en el modelo 2016.	75
Figura 47. a) Pérdidas en río modelo Plan Júcar 2015 b) Pérdidas en río modelo 2016.	75
Figura 48. a) Pérdidas en río modelo Plan Júcar 2015 b) Pérdidas en río modelo 2016.	76
Figura 49. a) ETP Penman Monteih modelo Plan Júcar 2015 b) ETP Penman Monteih modelo nuevo.....	76
Figura 50. Comparación con ETP calculada por el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío.	77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficie de la CHJ por provincia y comunidad autónoma. Fuente: CHJ.	39
Tabla 2. Valores medios mensuales de IMáx según modelo y sistema de explotación.	51
Tabla 3. Escala estadística general recomendada para paso de tiempo mensual.	55
Tabla 4. ETP en mm/año en estaciones SIAR.	62
Tabla 5. Tipo, número y longitud de los tramos definidos según su comportamiento.	64

1. RESUMEN

Datos del proyecto
Título del TFM en español: “Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricál en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar”
Título del TFM en inglés: “Improvements of the groundwater component and the river-aquifer interaction of the Patricál model in the Júcar River Basin District”
Título del TFM en Valenciano: “Millors de la component subterrània i la relació riu-aqüífer del model Patricál en l'àmbit de la Confederació Hidrogràfica del Xúquer”
Alumno: SEBASTIÁN PABLO VÁZQUEZ
Director: DR. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN
Codirector/es: DR. TEODORO ESTRELA MONREAL
Codirector/es: DÑA. LAURA TANCO BALLESTEROS
Fecha de Lectura: Marzo del 2017

Resumen
<p>La Directiva Marco del Agua europea (DMA, 2000/60/CE), establece como principal objetivo el alcanzar el buen estado de las masas de agua superficiales y subterráneas, utilizando como herramienta fundamental los planes hidrológicos de cuenca y los programas de medidas. Es así que en el Anejo 2 de su Plan Hidrológico, la Confederación Hidrográfica del Júcar, efectúa la estimación de los recursos hídricos totales con que cuenta cada uno de los sistemas de explotación en los que se encuentra dividida la demarcación hidrográfica. Dicha estimación la realiza mediante el modelo de simulación PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua), que simula el ciclo hidrológico de forma distribuida en el espacio, con una resolución de 1 Km x 1 Km, y con un paso de tiempo mensual (Pérez. 2005 y Pérez et al. 2013). En este contexto se desarrolla el presente Trabajo Final de Máster, que con el objetivo de mejorar la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo PATRICAL, considerará el uso de un nuevo mapa geológico, que tendrá en cuenta la permeabilidad de las formaciones en</p>

su componente vertical; se definirán la permeabilidades de los límites de las masas de aguas subterráneas existentes en el ámbito de estudio que significará una re calibración de las transferencias laterales; se incorporará al modelo información de la interrelación existente entre cauces fluviales y formaciones geológicas permeables; se incorporará un mapa de descargas de manantiales que mejorará al modelo en cuanto a la forma que se produce el drenaje a la red superficial; se contrastarán nuevas estimaciones de ETP con información provenientes de otros organismos oficiales y se considerarán diversos estudios que sirven de referencia en cuanto a los volúmenes de descarga subterránea al Mar Mediterráneo. Todos los cambios mencionados generarán nuevos resultados, los que a través de diversos aspectos, serán evaluados para juzgar la mejora del modelo.

Resume

La Directiva Marc de l'Aigua europea (DMA, 2000/60/CE), estableix com a principal objectiu aconseguir el bon estat de les masses d'aigua superficials i subterrànies, utilitzant com a eina fonamental els plans hidrològics de conca i els programes de mesures. És així que en l'Annex 2 del seu Pla Hidrològic, la Confederació Hidrogràfica del Xúquer, efectua l'estimació dels recursos hídrics totals amb els que disposa cadascun dels sistemes d'explotació en els quals es troba dividida la demarcació hidrogràfica. Aquesta estimació la realitza mitjançant el model de simulació PATRICAL (Precipitació Aportació en Trams de Xarxa Integrats amb Qualitat de l'Aigua), que simula el cicle hidrològic de forma distribuïda en l'espai, amb una resolució d'1 Km x 1 Km, i amb un pas de temps mensual (Pérez. 2005 i Pérez et al. 2013). En aquest context es desenvolupa el present Treball Final de Màster, que amb l'objectiu de millorar la component subterrània i la relació riu-aquífer del model PATRICAL, considerarà l'ús d'un nou mapa geològic que tindrà en compte la permeabilitat de les formacions en el seu component vertical; es definiran la permeabilitats dels límits de les masses d'aigües subterrànies existents en l'àmbit d'estudi que

significarà una nova calibració de les transferències laterals; s'incorporarà al model informació de la interrelació existent entre llits fluvials, formacions geològiques permeables; s'incorporarà al model un mapa de descàrregues de brolladors que millorarà al model quant a la forma que es produeix el drenatge a la xarxa superficial; es contrastaran noves estimacions de ETP amb informació provinents d'altres organismes oficials i es consideraran diversos estudis que serveixen de referència quant als volums de descàrrega subterrània al Mar Mediterrani. Tots els canvis esmentats generaran nous resultats, els que a través de diversos aspectes, seran avaluats per a jutjar la millora del model.

Abstracts

The European Water Framework Directive (DMA, 2000/60 / EC) has as main objective to achieve good surface and groundwater bodies, using watershed hydrological plans and measures programmes as a key tool. It is so, in Annex 2 of its Hydrological Plan, the Júcar River Basin District makes the estimation of the total of water resources that each of the exploitation systems in which the hydrographic demarcation is divided. This estimation is carried out using the PATRICAL simulation model (Precipitation Contribution in Integrated Water Sizes with Water Quality), which simulates the hydrological cycle distributed in space with a resolution of 1 km x 1 km and monthly time step (Pérez. 2005 & Pérez et al. 2013). In this context, the present Final Master's Thesis is developed with the purpose of improvement of the groundwater component and the river-aquifer relationship of the PATRICAL, it will be will considered the use of a new geological map, that will take into account the permeability of the formations in its vertical component; ando also will define the limits permeabilities of the groundwater bodies existing in the field of study; thus it means a re-calibration of lateral transfers; incorporated into the model information of the interrelationship existing between riverbeds and permeable geological formations. Additionally, a map of springs discharges will be incorporated to the mode, improving the model regarding the form that

the drainage takes place into the surface network. It will contrast ETP estimates with information from other official bodies, and it will be considered various studies that serve as reference towards the volumes of underground discharge in the Mediterranean Sea. All the the changes mentioned above will generate new results, which through various aspects will be evaluated to judge the model's improvement.

Palabras clave español (máximo 5): Plan hidrológico – Recursos Hídricos – Componente subterránea - PATRICAL –

Palabras clave valenciano (máximo 5): Pla hidrològic - Recursos hídrics – Component subterrània - PATRICAL

Palabras clave inglés (máximo 5): Hydrological plan – Water resources – Groundwater component - PATRICAL

Fecha: Marzo del 2017

Fdo. (Alumno)

2. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

La Directiva Marco del Agua europea (DMA, 2000/60/CE), establece como principal objetivo el alcanzar el buen estado de las masas de agua superficiales y subterráneas, utilizando como herramienta fundamental los planes hidrológicos de cuenca y los programas de medidas.

La planificación hidrológica es una obligación legal que define objetivos para conseguir el buen estado y la adecuada protección de las masas de agua de la Demarcación, la satisfacción de las demandas de agua y el equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial. Estos objetivos han de alcanzarse incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales.

Las Confederaciones Hidrográficas ejercen las funciones atribuidas por el texto refundido de la Ley de Aguas, en adelante TRLA, que se desarrollan en el Real Decreto 984/1989 de 28 de julio sobre la estructura orgánica y funciones de las unidades dependientes de la Presidencia de las Confederaciones Hidrográficas. Entre dichas funciones se encuentra la relativa al proceso de elaboración del plan hidrológico, así como su seguimiento y revisión.

El TRLA, aprobado por RD Legislativo 1/2001, de 20 de julio, en su artículo 42 a) c') sobre el contenido de los planes hidrológicos de cuenca, hace referencia al inventario de recursos hídricos.

El apartado 2.4 de la Instrucción de Planificación Hidrológica, IPH en adelante, aprobada por la Orden Ministerial ARM 2656/2008, desarrolla los contenidos mínimos que deberá abarcar el inventario de recursos hídricos naturales, que deberá contener en la medida de los posible:

- a) Datos estadísticos que muestren la evolución del régimen natural de los flujos y almacenamientos a lo largo del año hidrológico.

b) Interrelaciones de las variables consideradas, especialmente entre las aguas superficiales y subterráneas, y entre las precipitaciones y las aportaciones de los ríos o recarga de acuíferos.

c) La zonificación y la esquematización de los recursos hídricos naturales en la demarcación hidrográfica.

d) Características básicas de calidad de las aguas en condiciones naturales.

El plan hidrológico de la cuenca del Júcar (PHCJ), hace una estimación de los recursos totales con que cuenta cada uno de los sistemas de explotación en los que se divide la Demarcación Hidrográfica del Júcar, considerando por un lado los aportes debidos a la escorrentía superficial y por otro lado, las aportaciones provenientes de las descargas subterráneas.

La Confederación Hidrológica del Júcar, en adelante CHJ, realiza la evaluación de recursos hídricos mediante el modelo de simulación PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua), que simula el ciclo hidrológico de forma distribuida en el espacio, con una resolución de 1 Km x 1 Km, y con un paso de tiempo mensual (Pérez. 2005 y Pérez et al. 2014). Este modelo realiza la simulación del ciclo hidrológico en régimen natural aplicando la formulación de Témez (1977) en cada pequeño elemento en que se discretiza el territorio, incluyendo las transferencias laterales entre acuíferos, el movimiento del agua a través de la red fluvial, las relaciones río-acuífero (considerando la posibilidad de pérdidas en cauces) y la evolución de la piezometría media de los acuíferos. El modelo requiere la calibración de un conjunto de parámetros que permitan reproducir lo más ajustado posible a la realidad los caudales naturales y niveles piezométricos que se registran dentro de la cuenca.

Los modelos necesitan mantenerse actualizados, y mantener una mejora constante a los efectos de reproducir de manera ajustada los resultados modelados respecto a los registrados. Por ello el objetivo del presente Proyecto Final de Máster es mejorar la componente subterránea y su vinculación con las aguas superficiales, mediante la actualización de información base del modelo y

*Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patrical
en el ámbito de la CHI*

ajustando, concretamente, las transferencias de agua entre las masas y sus salidas al mar.

3. ANTECEDENTES

3.1. Modelo de aplicación

La Confederación Hidrográfica del Júcar, en sus planes hidrológicos, efectúa la evaluación de los recursos hídricos de la cuenca mediante el modelo de simulación PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua), siendo éste un modelo del ciclo hidrológico distribuido espacialmente y con paso de tiempo de simulación mensual (Pérez, 2005).

Este modelo realiza la simulación del ciclo hidrológico en régimen natural o en alterado, por la actividad antrópica, aplicando la formulación de Témez (1977) en cada elemento en el que se discretiza el territorio (p.e. resolución de 1km x 1km), incluyendo las transferencias laterales entre acuíferos, el movimiento del agua a través de la red fluvial, las relaciones río-acuífero (considerando la posibilidad de pérdidas en cauces) y la evolución de la piezometría media de los acuíferos.

Como fue mencionado anteriormente, el modelo puede funcionar en régimen natural o en régimen alterado. En el caso del régimen alterado considera la evolución temporal y distribución espacial de los retornos de riego que recargan los acuíferos, y las extracciones de aguas subterráneas (agrícolas y urbanas). Se debe considerar que el modelo reproduce el ciclo hidrológico natural y parte del ciclo hidrológico alterado ya que no incluye la gestión de embalses ni las modificaciones que se reproducen en el régimen de caudales por los mismos.

3.2. Características del modelo hidrológico PATRICAL

La escala mensual permite aplicaciones a muchos problemas prácticos. Los parámetros son derivados para la calibración desde las características de la cuenca en cada celda, que reduce significativamente los grados de libertad del modelo y lo vuelve más robusto (Pérez et al. 2014).

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricial en el ámbito de la CHI

Las características de la cuenca son incorporadas al modelo mediante el mapa de uso de suelo CORINE land cover 2000 map (Figura 1b), el mapa geológico derivado del mapa litográfico del Instituto Geológico y Minero de España (Figura 1a) y la pendiente del terreno – derivada del modelo de Elevación Digital 100 x 100 m² del Centro Geográfico de la Armada de España.

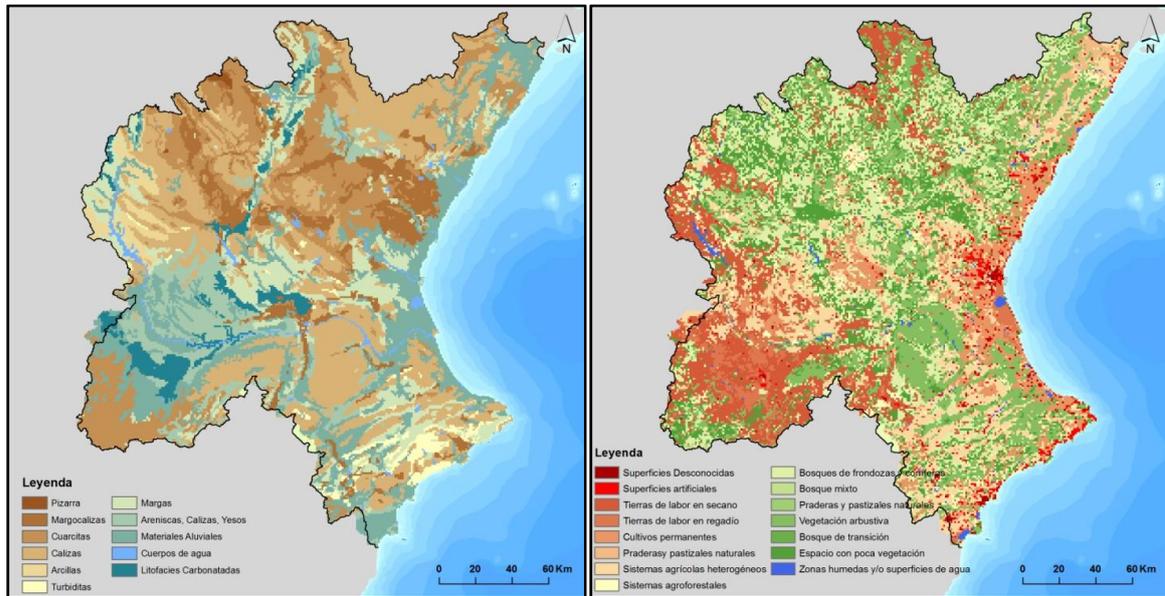


Figura 1. a) Mapa Geológico. b) CORINE land cover 2000 map.

La cuenca que se modela se divide en dos capas o zona en vertical (Figura 2): una zona superior, formada por la superficie del terreno y discretizada en celdas; y una zona inferior, formada por los acuíferos que, de forma agregada, reciben aguas de las celdas superiores. Estas zonas se caracterizan porque:

- La zona superior representa la superficie del terreno hasta donde alcanza la capacidad de extracción de agua de la vegetación, y se corresponde con la parte de la zona no saturada, donde en sus poros coexisten el agua y el aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- La zona inferior o acuífero, representa los almacenamientos de agua subterránea que se producen en la cuenca, se encuentra saturada y las salidas de agua que se producen de la misma son: el desagüe a la red de drenaje superficial, las salidas al mar y las transferencias laterales entre acuíferos.

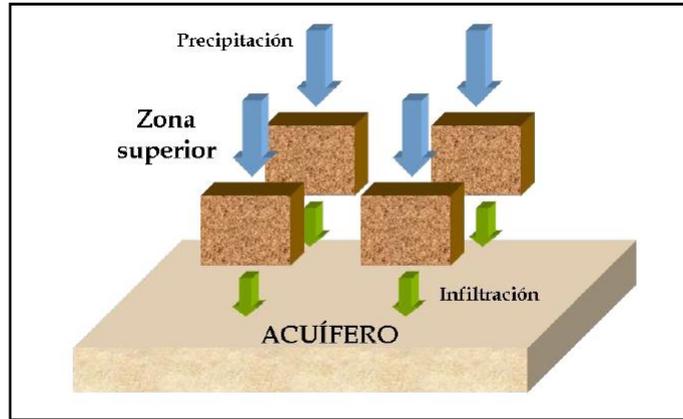


Figura 2. Modelación del ciclo en dos capas, zona superficial y zona profunda o acuífero.

El modelo reproduce los principales flujos y almacenamientos de agua del ciclo en cada una de las celdas en que se ha discretizado la cuenca, preservando en todo momento el principio de continuidad o de conservación de la masa.

Los módulos con los cuales opera el modelo son los siguientes: a) nieve b) generación de escorrentía y almacenamiento de humedad en el suelo c) separación de la escorrentía en flujo superficial e infiltración d) agua subterránea e) red de drenaje y f) transferencia subterránea (Pérez et al. 2014).

En el esquema (Figura 3) los rectángulos representan almacenamientos, las elipses flujos de agua y los rectángulos con bordes suavizados son las variables de entrada al modelo.

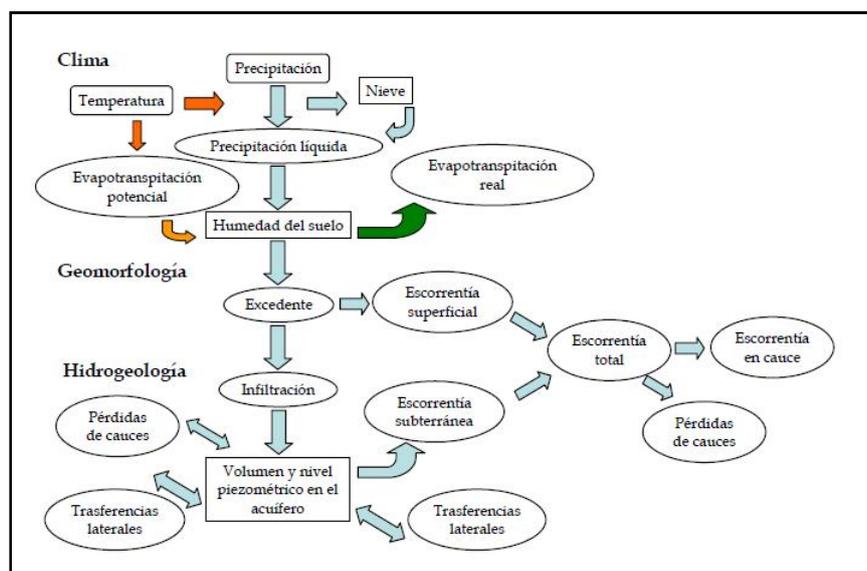


Figura 3. Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico Patricial.

Los datos de entrada necesarios para el funcionamiento del modelo son los valores de lluvia total mensual y de temperatura diaria media mensual (Figura 4), procedentes de las estaciones meteorológicas, con los cuales se calcula por interpolación los mapas mensuales de lluvia y temperatura, del que se derivan los mapas de evapotranspiración potencial mensual. Los mapas mensuales de precipitación y de evapotranspiración potencial son la información de partida para el modelo de simulación y se calcula: en primer lugar, la porción de lluvia líquida que cae en cada celda, manteniéndose el resto en forma de nieve sobre la superficie de terreno; en segundo lugar, con dicho valor de lluvia líquida y con las características fisiográficas de la cuenca en cada celda mediante la formulación de Témez: el flujo de excedente generado, la evaporación real producida y el volumen en forma de humedad retenido por el terreno. El excedente, a su vez, se descompone en escorrentía superficial directa y en infiltración a los acuíferos, que interactúan entre sí y se transfieren agua en función de las diferencias de altura piezométrica que tengan.

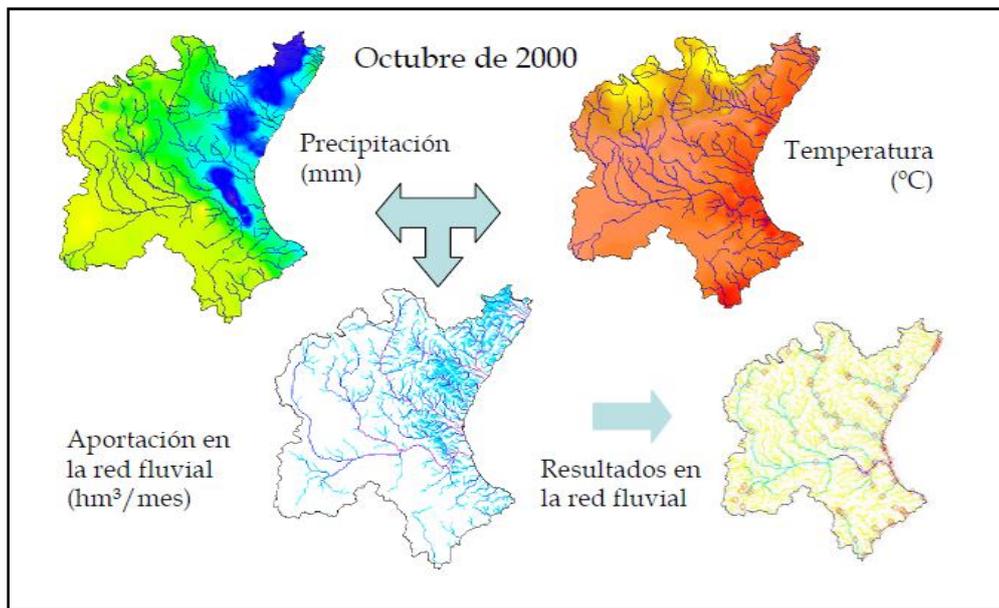


Figura 4. Precipitación temperatura y aportación en la red fluvial en octubre de 2000.

3.3. Parámetros de la Formulación de Témez.

Como fue mencionado en apartados anteriores el modelo Patrical aplica la formulación de Témez (1977). En el presente apartado se pretende abordar

brevemente los parámetros involucrados a efectos de un mejor entendimiento a instancias posteriores de mejoras en el modelo.

En el modelo de Témez el agua que procede de la precipitación se distribuye de tres maneras diferentes a saber:

- El excedente (T) que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo, y en un flujo que discurre superficialmente (Aportación superficial). Este flujo superficial se evacua a través del cauce dentro del período simulado. Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el período simulado (Aportación subterránea) y la otra parte permanece almacenada para salir en meses posteriores.
- La evapotranspiración real de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (Ht).
- La humedad del suelo (Ht) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico (Hmáx).

La humedad del suelo y la evapotranspiración que produce la vegetación están fuertemente relacionadas. El potencial matricial del agua del suelo depende del contenido de humedad del suelo, y este potencial es el que debe superar la vegetación durante la respiración para obtener agua del suelo mediante los procesos de ósmosis, de forma que a mayor contenido de humedad del suelo, menor es la presión que debe superar la vegetación para obtener agua y, por lo tanto, mayor puede ser su desarrollo biológico y la evapotranspiración que produce. Este efecto se sucede de igual forma, pero a la inversa, cuando los contenidos de humedad del suelo son bajos.

La capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm), depende de la textura, pendiente del terreno y espesor de la franja del suelo donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de Hmáx aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención superficial de agua (poca pendiente, presencia de vegetación, cultivos, etc.).

Por otro lado a partir del déficit de humedad se obtiene el valor umbral de precipitación utilizando un factor adimensional de inicio de excedente, “C”.

La infiltración producida en el tiempo simulado corresponde con la fracción de agua que penetra en el suelo y acaba recargando el acuífero. Es por tanto la parte del excedente que no discurre superficialmente. La infiltración al acuífero es función del excedente y del parámetro denominado infiltración máxima ($I_{m\acute{a}x}$), que expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno, dependiendo ésta de las propiedades del mismo, de la intensidad de la lluvia y su concentración.

Para simular el comportamiento del acuífero, Témez plantea el modelo unicelular, el cual se basa en la hipótesis de proporcionalidad entre el volumen almacenado en el acuífero y el caudal cedido a la red superficial. La relación entre el volumen y el Caudal se establece por medio de la constante “ α ”.

Finalmente la formulación contempla el ajuste de cuatro parámetros: $H_{m\acute{a}x}$, C, $I_{m\acute{a}x}$ y α . Los parámetros $H_{m\acute{a}x}$ y C regulan el almacenamiento de agua en el suelo, $I_{m\acute{a}x}$ separa la escorrentía superficial de la subterránea y el parámetro α regula el drenaje subterráneo.

3.4. Estudios previos.

3.4.1. **Caracterización de masas subterráneas.**

En el año 2009 el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) completó el trabajo de la caracterización adicional de las masas de agua en riesgo correspondientes al ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (IGME-DGA 2009b). El mismo se realizó en el marco del Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España, del Ministerio de Educación y Ciencia, para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricial en el ámbito de la CHI

El objeto del documento elaborado, fue adaptar la información procedente de la caracterización inicial y adicional a la nueva división de masas de agua subterránea definidas tras la publicación de la IPH y que constituyen la unidad básica de gestión en el nuevo PHJ, generando un conjunto de fichas (figura 5) que constituyan una caracterización básica de cada una de las nuevas masas de agua subterránea.

Mencionadas fichas fundamentalmente se centran en la caracterización del espacio físico: geología, litología, permeabilidad, límites y geometría de las formaciones geológicas e hidrogeológicas contenidas en la masa, etc.

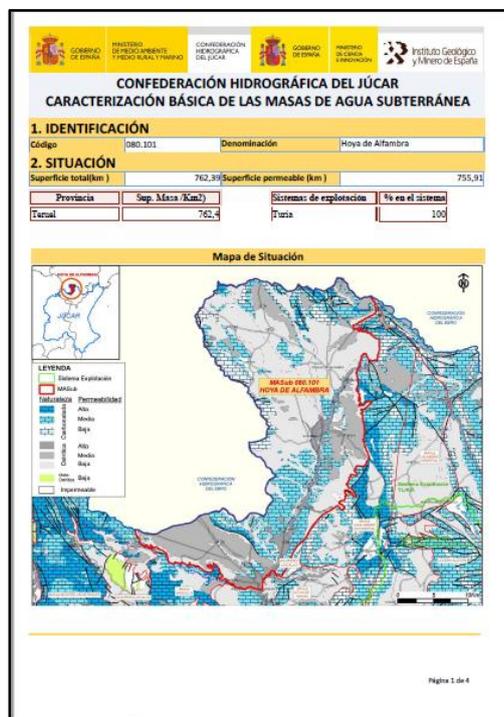


Figura 5. Ficha elaborada por el IGME.

3.4.2. Estudios piezométricos.

También en el marco del “Acuerdo para la Encomienda de Gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas” el IGME elaboró en el año 2008 (Figura 6c) el mapa piezométrico de España con los objetivos de lograr un mapa lo más aproximado posible a un estado de régimen natural o influenciado en el menor grado posible, de los acuíferos y que sea un mapa representativo del estado

actual de las aguas subterráneas, elaborado con los datos de las redes oficiales de control piezométrico existente en cada cuenca hidrográfica.

Considerados entonces Para la elaboración del trabajo utilizaron mapas de referencia como el comprendido entre 1970 y 1974 (Figura 6a) ambos inclusive, coincidente con la elaboración de estudios dentro del Programa de Investigación de las Aguas Subterráneas (PIAS) en la Cuenca Hidrográfica del río Júcar, dentro de los cuales se llevaron a cabo inventarios extensivos de puntos de aguas en todos los acuíferos y el mapa piezométrico general elaborado por la Confederación Hidrográfica del Júcar en 2005 (Figura 6b) que les ha servido como de guía en las áreas con menor densidad de datos.

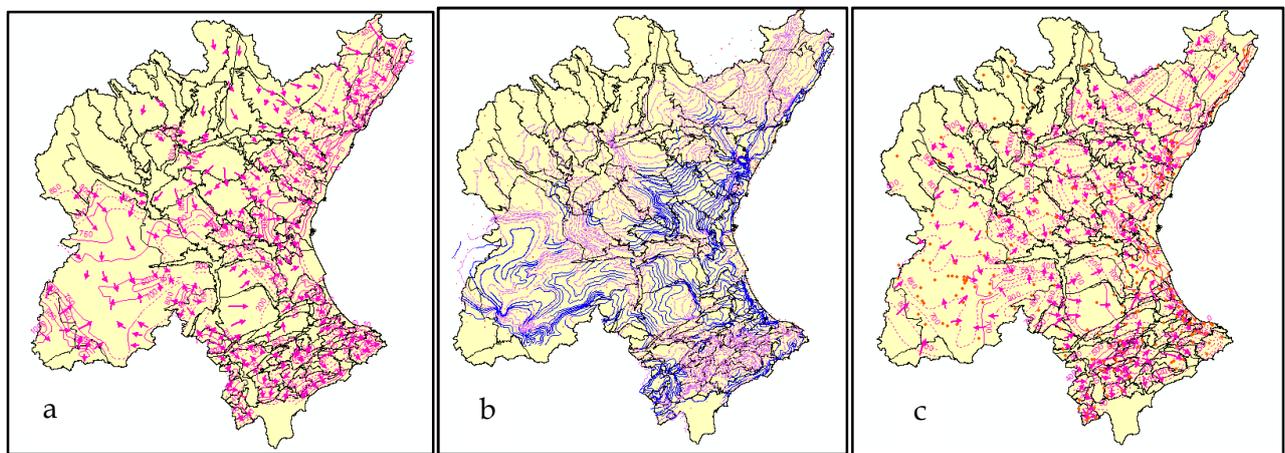


Figura 6. a) Mapa piezométrico encomienda IGME 1970-1974. b) Mapa piezométrico elaborado por la CHJ 2005. c) Mapa piezométrico encomienda IGME 2008. Fuente: CHJ

3.4.3. Manantiales y relación río acuífero.

En el marco de la Actividad 4 del Acuerdo para la Encomienda de gestión, suscrito entre la Dirección General del Agua y el Instituto Geológico y Minero de España, se han llevado a cabo trabajos para la identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica en las 90 masas de agua subterránea (MASb) definidas en el ámbito geográfico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ).

En el desarrollo de los trabajos trataron y validaron un gran número de datos foronómicos de diversa naturaleza y procedencia. Esa información les fue útil para caracterizar el modelo conceptual de las relaciones río-acuífero y humedal-acuífero. En las estaciones en que se dispone de series foronómicas adecuadas, los datos de los aforos les permitió cuantificar la interrelación entre los cursos fluviales y las zonas húmedas, así como las formaciones geológicas permeables (FGPs) con las que se encuentran relacionados hidrogeológicamente. El IGME efectuó un trabajo inicial de recopilación, tratamiento y validación de los datos foronómicos de diversas fuentes, principalmente del IGME y de la CHJ, con el objetivo de caracterizar adecuadamente la interrelación entre las aguas superficiales y subterráneas.

Como resultado del trabajo fueron seleccionadas y analizadas, en total, 775 estaciones de control y medida en la Demarcación Hidrográfica del Júcar, que les ha permitido cuantificar las relaciones río-acuífero y humedal-acuífero. Cuantitativamente la mayoría de estaciones seleccionadas procede de los puntos de control de aguas subterráneas: 553 manantiales y 96 hidrómetros, obtenidos a partir de las bases documentales e inventarios del IGME y de la CHJ.

También estudiaron 110 estaciones de la red oficial de aforos de aguas superficiales, de las cuales 41 son estaciones activas y 69 históricas. Con carácter complementario también utilizaron otros datos procedentes de estudios y proyectos de investigación hidrogeológica realizados en distintos sectores del ámbito de la demarcación hidrográfica, así como algunos datos foronómicos obtenidos por la Diputación Provincial de Alicante (DPA).

Por otra parte en la elaboración de los trabajos de caracterización de la relación río-acuífero y humedal-acuífero han tenido en cuenta diversos inventarios de manantiales y puntos de control hidrométrico procedentes de base de datos del IGME, de la red operativa de hidrometría de la CHJ, del inventario de la manantiales de Guardería fluvial de la CHJ y del inventario del sistema de gestión hidrológica Geshidro de CHJ.

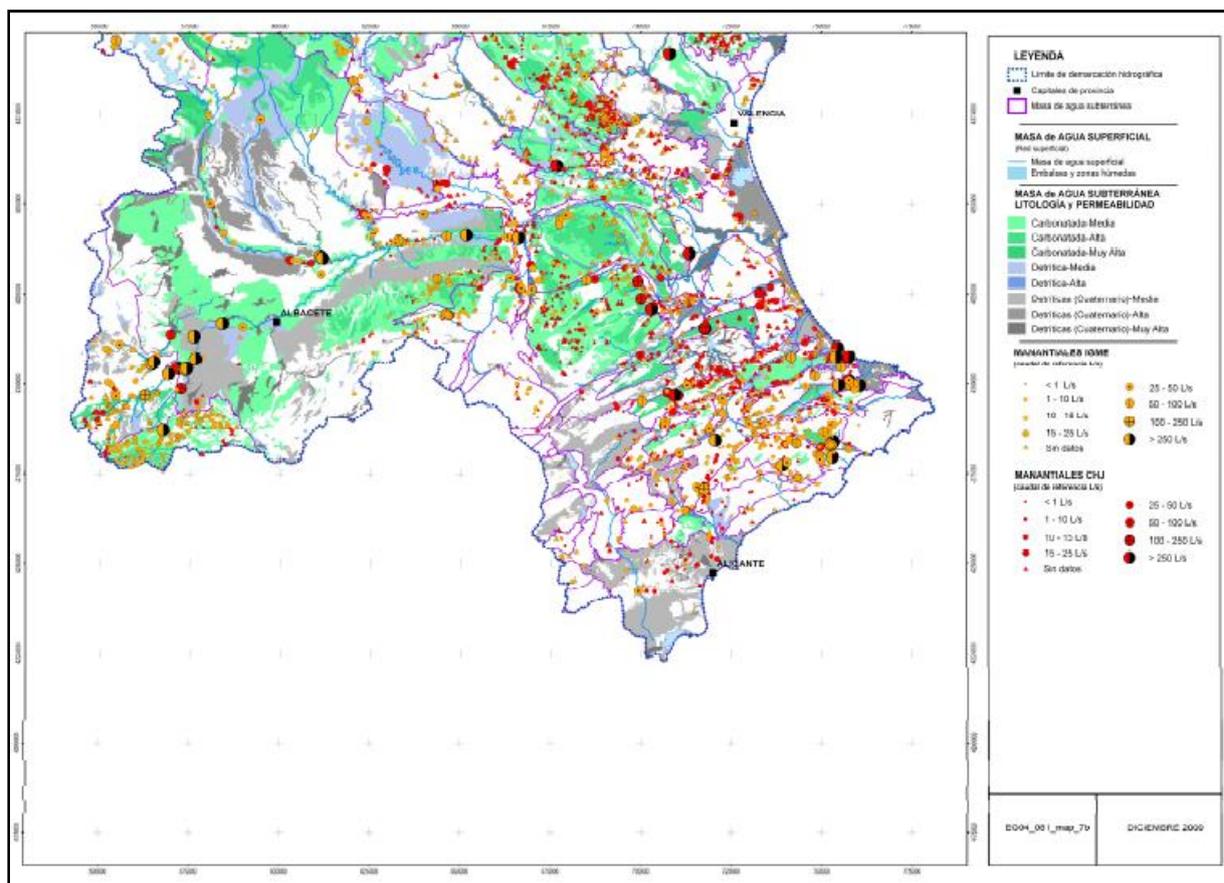


Figura 8. Localización geográfica de los manantiales inventariados en el ámbito de DHJ. Zona meridional.

Fuente CHJ.

Presentan diversos períodos de mediciones foronómicas, que abarcan desde principios de los años setenta, en los puntos con registros más antiguos, hasta el momento de la elaboración del trabajo.

3.4.4. Salidas al mar.

Para abordar este aspecto se efectuó la búsqueda de trabajos de diferentes fuentes que pudieran aportar referencias en cuanto a volúmenes de descarga al Mar Mediterráneo registrados en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Entre las publicaciones y trabajos hallados se podría mencionar al **IGME. 1996**, “Jornadas sobre el libro blanco de las aguas subterráneas” que aporta caudales de salida al mar según sistema de explotación”; **Renau et al. 2013** “Valoración del impacto de los cambios futuros en los usos del suelo en la plana de Oropesa-Torreblanca”; **Ballesteros et al. 2012** “Metodología de estudio de

descargas subterráneas al mar desde acuífero kárstico en el oeste del mar mediterráneo”; **G Gómez. 2003** “Actualización del estado de la intrusión marina en el acuífero de la plana de Sagunto (Valencia, España)”; **Ballesteros et al. 2001** “Recuperación de la calidad del acuífero costero de la plana de Jávea mediante la explotación sostenible de sus recursos”; **IGME-UJI. 2009** “Descargas ambientales al mar en las masas de agua subterránea costeras de la provincia de Castellón”, **IGME, 1988.** “Las aguas subterráneas en la Comunidad Valenciana. Uso, calidad y perspectivas de utilización, entre otros.

4. AMBITO DE ESTUDIO

Conforme al artículo primero del Real Decreto 125/2007, de 2 de febrero, por el que se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas, se entiende por demarcación hidrográfica la zona terrestre y marina compuesta por una o varias cuencas hidrográficas vecinas y las aguas de transición, subterráneas y costeras asociadas a dichas cuencas, de acuerdo con el artículo 16 bis.1 del Texto Refundido de la Ley de Aguas aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

El apartado 3 del artículo 2 del Real Decreto 125/2007, tras las modificación de 2015, establece la siguiente definición de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Comprende el territorio de las cuencas hidrográficas intercomunitarias (Figura 9) y, provisionalmente, en tanto se efectúa el correspondiente traspaso de funciones y servicios en materia de recursos y aprovechamientos hidráulicos, el territorio de las cuencas hidrográficas intracomunitarias comprendido entre la margen izquierda de la Gola del Segura en su desembocadura y la desembocadura del río Cenia, incluido su cuenca; y además la cuenca endorreica de Pozohondo y el endorreísmo natural formado por el sistema que constituyen los ríos Quejola, Jardín y Lezuza y la zona de Los Llanos, junto con las aguas de transición. Las aguas costeras tienen como límite sur la línea con orientación 100° que pasa por el límite costero entre los términos municipales de Elche y Guardamar del Segura y como límite norte la línea con orientación 122,5° que pasa por el extremo meridional de la playa de Alcanar.

Dichos organismos tienen como función las tareas de planificación hidrológica, gestión de los recursos del dominio público hidráulico, concesión de derechos de explotación de los recursos acuíferos, construcción y planeamiento de infraestructuras hidráulicas y gestión medioambiental, con especial atención a la preservación de recursos y la calidad del agua.



Figura 9. Confederaciones Hidrográficas y Cuencas Intracomunitarias.

Fuente: <http://www.mma.es>

4.1. Límites administrativos

La Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) limita con las demarcaciones del Ebro y Segura al norte y sur, respectivamente, y del Tajo, Guadiana y Guadalquivir al oeste, bordeando al este con el Mediterráneo. La superficie total del territorio de la Demarcación, excluyendo las aguas costeras, es de 42.735 km².

Este ámbito se extiende dentro de cinco Comunidades Autónomas (Aragón, Castilla-La Mancha, Cataluña, Comunidad Valenciana y Región de Murcia) y de siete provincias: la totalidad de Valencia, gran parte de Albacete, Alicante, Castellón, Cuenca y Teruel, una pequeña zona de Tarragona y una zona muy pequeña de Murcia. Las provincias de la Comunidad Valenciana suponen la mayor parte del territorio de la cuenca sumando cerca del 50% de su extensión total (Tabla 1).

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricial en el ámbito de la CHI

Provincia	Área en la provincia (km ²)	Área en la CA (km ²)	Comunidad Autónoma
Tarragona	88,00	88,00	Catalunya
Teruel	5.373,84	5.373,84	Aragón
Cuenca	8.680,54	16.089,34	Castilla – La Mancha
Albacete	7.408,80		
Castellón/Castelló	5.785,11	21.120,13	Comunidad Valenciana
Valencia/València	10.813,30		
Alicante/Alacant	4.521,72		
Murcia	64,01	64,01	Región de Murcia
Total DHJ	42.735,32	42.735,32	Total DHJ

Tabla 1. Superficie de la CHI por provincia y comunidad autónoma. Fuente: CHJ.

En la Figura 10 se observa el ámbito territorial de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, que incluye las aguas de transición y las costeras asociadas.



Figura 10. Ámbito territorial de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

El sistema Ibérico actúa como una barrera para los frentes marinos, forzando a las nubes cargadas de humedad a elevarse a capas atmosféricas más altas. Una vez el aire se eleva y enfría, se produce la condensación de las gotas, y posteriormente la precipitación. En este sistema montañoso nace el principal río del ámbito territorial de la Demarcación, que a su vez le da nombre: el río Júcar. Además, nacen los ríos Turia y Mijares. Los tres ríos proporcionan conjuntamente aproximadamente el 65% de la escorrentía media de todo el ámbito.

En la parte Sur y Suroeste se extiende la parte final de las montañas del sistema Bético, que en este punto se dispersan parcialmente. En esta área montañosa nacen los ríos Serpis y Vinalopó. La llanura costera es una plataforma aluvial que se extiende a lo largo de la franja costera, está delimitada por el sistema Ibérico en la parte noroeste, la llanura continental en el oeste y el sistema Bético en el sur. Proporciona un suelo rico en nutrientes que sostiene la mayor parte de la producción agrícola de regadío del ámbito territorial de la Demarcación y se caracteriza por el hecho de que más del 80% de la población total vive en esta franja costera. Finalmente, la llamada zona de la Mancha se caracteriza por presentar una superficie relativamente llana con una altura media de 650 m y estar localizada en la parte oeste entre los sistemas montañosos Ibérico y Bético. Esta llanura alberga un acuífero de grandes dimensiones denominado acuífero de la Mancha Oriental, conectado al río Júcar cuando éste atraviesa la llanura. El acuífero y el río muestran claras interacciones de drenaje y recarga.

Un aspecto importante del marco físico es la litología existente en la zona (Figura 12). Las calcarenitas y las margas son los grupos predominantes, aunque también se tienen proporciones de calizas y material aluvial muy significativas. Este último grupo se encuentra fundamentalmente en los tramos finales de los ríos principales (Mijares, Júcar y Turia).

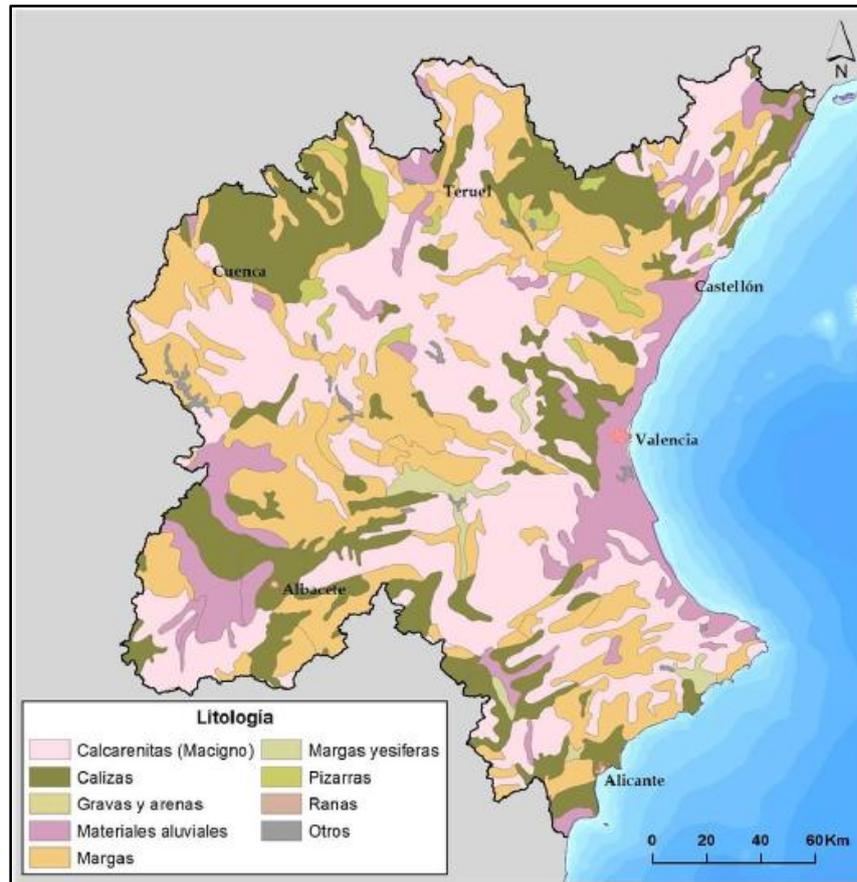


Figura 12. Mapa litológico. Fuente: PHJ 2015-2021.

Este material sedimentario está constituido por los aportes sólidos de los ríos, que una vez alcanzan la costa son rápidamente dispersados por las corrientes marinas. La corriente marina predominante se mueve de norte a sur. La costa presenta numerosos elementos geomorfológicos como playas, cordones dunares, acantilados y fondos de roca, que soportan un gran número de ricos ecosistemas. Los sistemas terrestres alimentan los ambientes marinos cercanos a la costa con materiales sedimentarios.

4.3. Clima

El clima descrito en ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar (Figura 13) es un clima típico mediterráneo con veranos largos y cálidos y con inviernos suaves. Se sitúa dentro de los pisos bioclimáticos termo-mediterráneo y meso-mediterráneo de ombroclimas secos. Los máximos térmicos se registran en los meses de julio y agosto, coincidiendo con la estación seca. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 14 y los 16,5 °C. Las oscilaciones

térmicas mayores se dan en la zona de la Mancha con 20° C de diferencia entre las temperaturas medias a lo largo del año. Generalmente, la distribución de temperaturas se adapta al relieve, si bien el gradiente térmico entre las tierras del interior y las llanas costeras es más acusado en invierno que en verano.

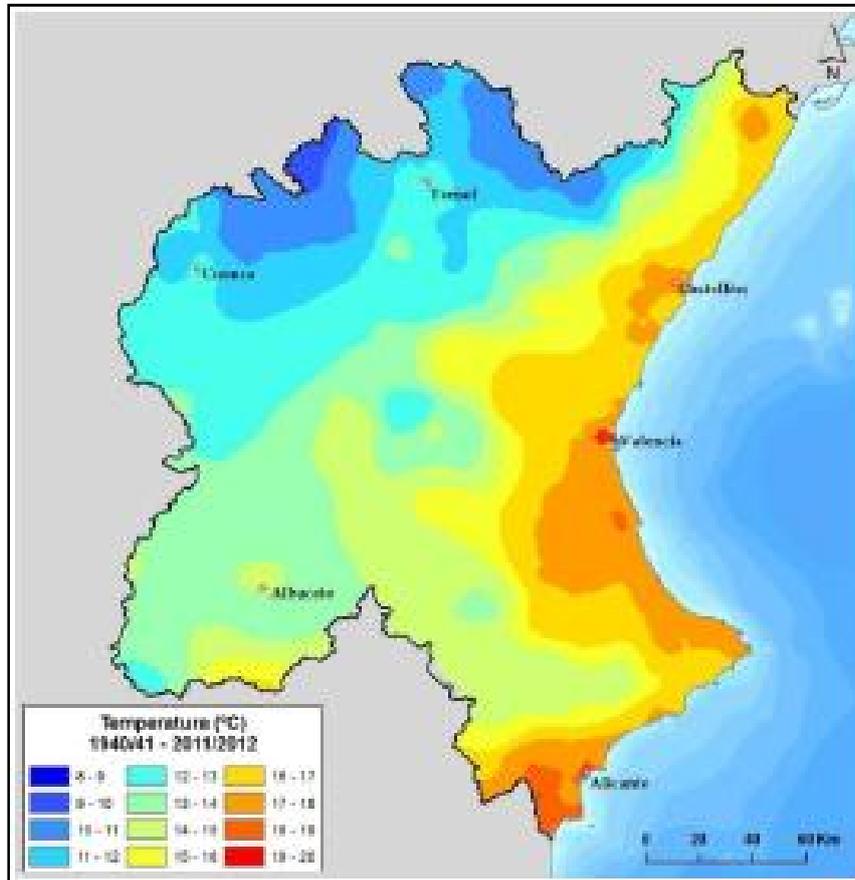


Figura 13. Distribución espacial de la temperatura media anual (°C) en la DHJ. Fuente: CHJ.

La pluviosidad media anual (Figura 14) es de unos 500 mm, no obstante existe una gran variabilidad espacial con valores a 200 mm en las regiones más meridionales, mientras que en otras zonas alcanza valores superiores a 1000 mm tal como se muestra en la figura siguiente.

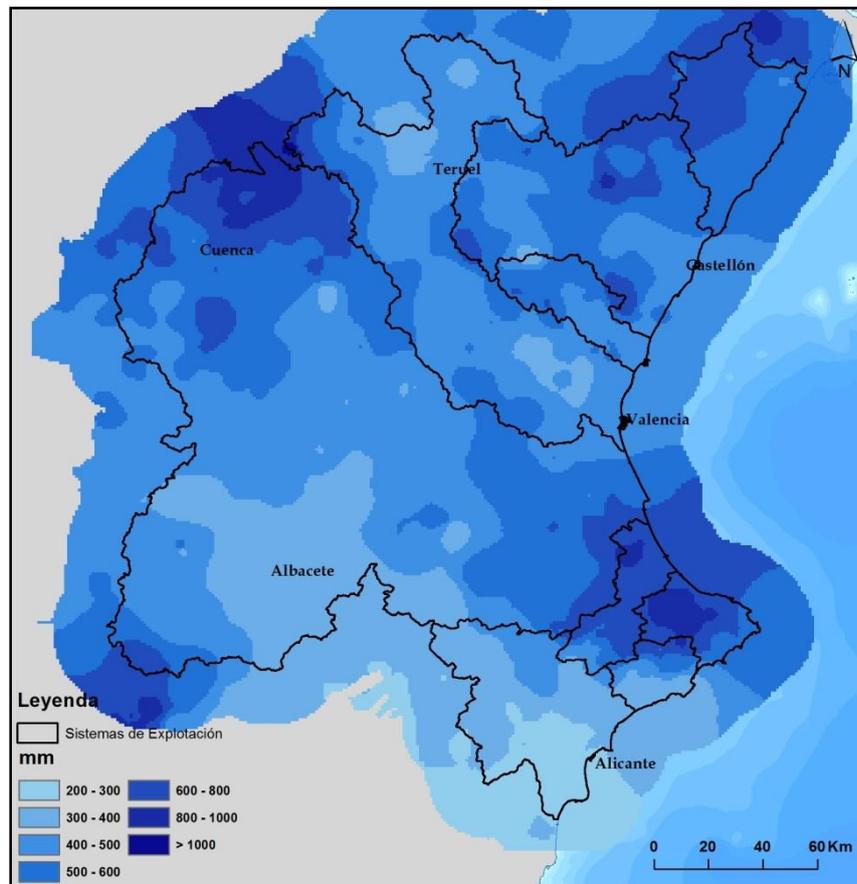


Figura 14. Precipitación Media Anual (mm). Fuente: CHJ.

Asimismo, durante los meses de octubre y noviembre pueden producirse episodios de precipitación de gran intensidad y corta duración, conocido comúnmente como “gota fría”. La mayor parte de la superficie del ámbito territorial de la Confederación está cubierta por materiales muy permeables que favorecen la infiltración de las aguas superficiales de precipitación hacia estratos subterráneos.

4.4. Red hidrográfica principal

La definición de la red hidrográfica básica la realizó el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para todo el territorio peninsular en el marco de elaboración del Informe para la Comisión Europea sobre los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua (CHJ, 2005). 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 adoptaron también en la IPH. Aplicando estos criterios al ámbito de la DHJ, se obtiene una longitud total de las masas de agua superficial clasificadas como ríos del orden de 5.600 km en el ámbito de la DHJ. En la Figura 15 se muestra la red hidrográfica principal.

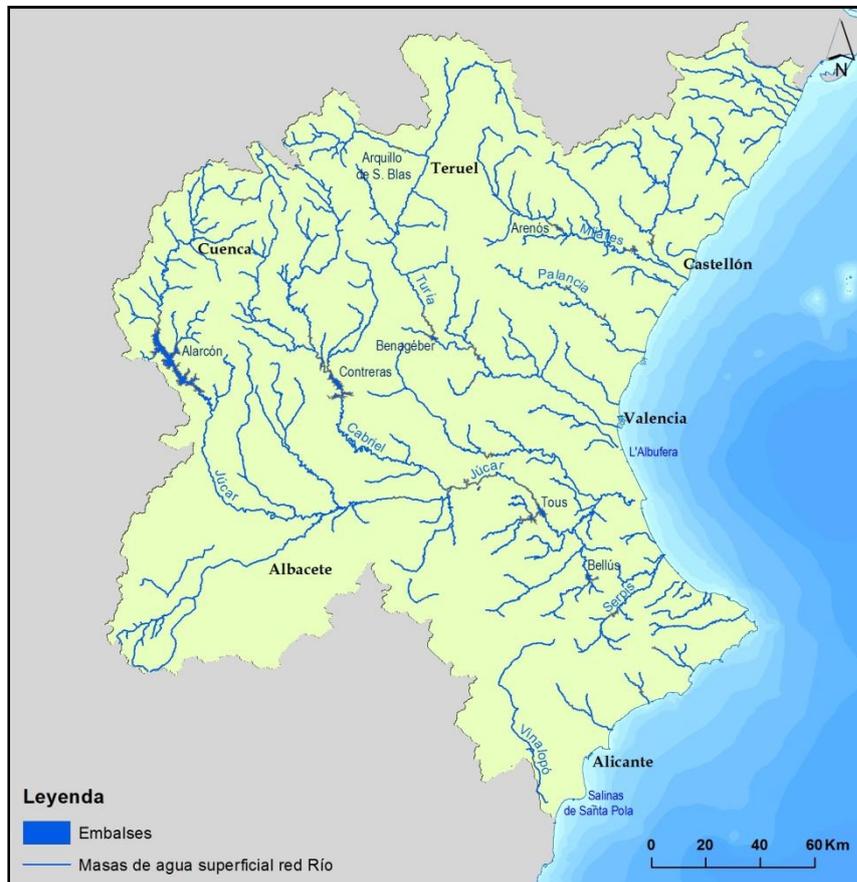


Figura 15. Red hidrográfica principal. Fuente: CHJ.

4.5. Zonificación superficial

Los principales ríos de la DHJ son: Cenia, Mijares, Palancia, Turia, Júcar, Serpis y Vinalopó. De ellos cabe destacar, los ríos Júcar y Turia, con una longitud de 512 y 280 km respectivamente.

Las masas de agua superficial fueron revisadas en el marco de elaboración del nuevo plan hidrológico de cuenca. Éstas se pueden distinguir en ríos, lagos, aguas de transición y aguas costeras. Además, de acuerdo con su naturaleza, pueden clasificarse como masas de agua naturales o como masas de aguas muy modificadas y artificiales. En el ámbito de la DHJ se han definido un total de 304

masas de agua superficial de la categoría ríos. Dentro de estas masas de agua están englobados los embalses (27 masas de agua muy modificadas asimilables a lagos) y la balsa de la Muela (masa de agua artificial asimilable a lago).

Un sistema de explotación (Figura 16) está constituido por masas de agua superficial y subterránea, obras e instalaciones de infraestructura hidráulica, normas de utilización del agua derivadas de las características de las demandas y reglas de explotación que, aprovechando los recursos hídricos naturales, y de acuerdo con su calidad, permiten establecer los suministros de agua que configuran la oferta de recursos disponibles del sistema de explotación, cumpliendo los objetivos medioambientales.

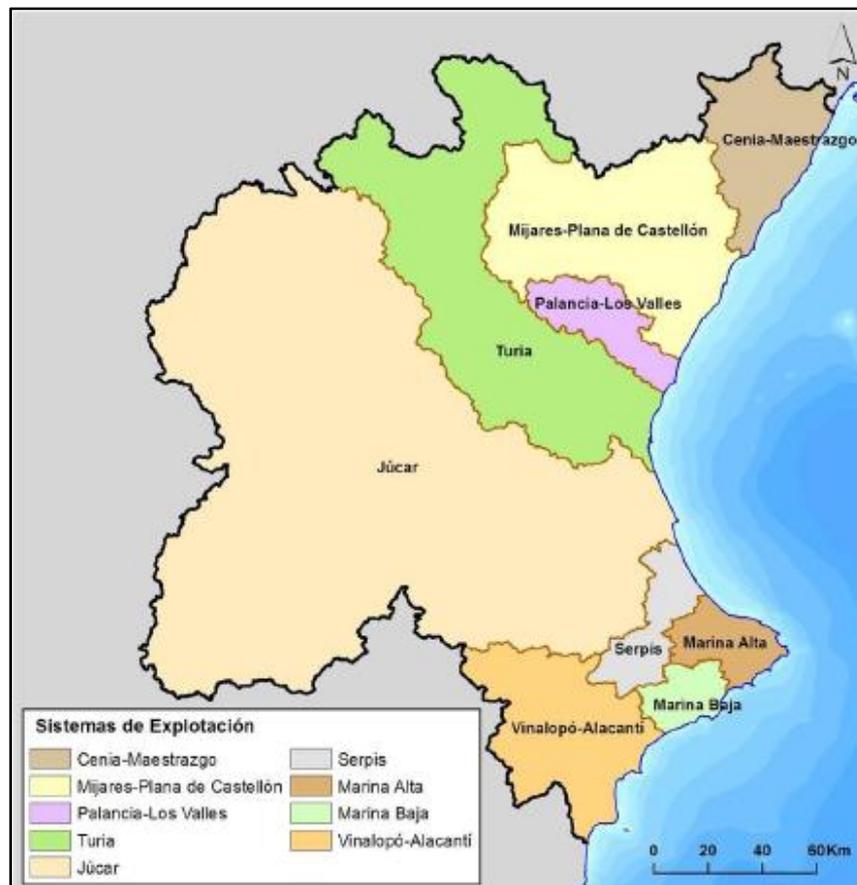


Figura 16. Sistemas de explotación de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Fuente: CHJ.

4.6. Zonificación Subterránea

Las masas de agua subterráneas delimitadas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar cuantifican un valor total de 90. Cubren una superficie total en el ámbito de la Demarcación de aproximadamente 40.520 Km², distribuida en el marco de cinco comunidades autónomas: Comunidad Valenciana (49,7%), incluyendo toda la provincia de Valencia y parte de las provincias de Castellón y Alicante; Castilla-La Mancha (37,9%), con la presencia parcial de las provincias de Cuenca y Albacete; Aragón (12,1%) con parte de la provincia de Teruel; Cataluña (0,2%) con tan sólo una pequeña parte del extremo meridional de la provincia de Tarragona y finalmente la Región de Murcia (0,1%) con una pequeña parte de la provincia de Murcia en el término municipal de Yecla.

Las superficies de las masas de agua definidas varían dentro del siguiente rango:

- a) La masa de agua subterránea de mayor superficie es la de la Mancha Oriental (080.129) con una superficie de 7.118 Km².
- b) La masa de agua subterránea de menor superficie es la de Jávea (080.180) que cuenta con una superficie de 10 Km².

La ubicación y límites de las masas de agua subterránea definidas se muestran en la Figura 17.

Las masas de agua subterránea se localizan total o parcialmente en uno o varios sistemas de explotación, ya que estos se delimitan a partir de las cuencas hidrográficas y no de las masas de agua subterráneas.



Figura 17. Masas de agua subterránea. Fuente: CHJ.

5. METODOLOGIA

La metodología aplicada en el desarrollo del trabajo, parte de un modelo actual (en adelante llamaremos “**modelo Plan Júcar 2015**”), al que no se le ha realizado ningún ajuste, para pasar a un modelo nuevo (en adelante llamaremos “**modelo 2016**”), al que si se le han realizado los ajustes, y que a través de diferentes aspectos que serán desarrollados en incisos posteriores, los modelos serán contrastados para evaluar su ajuste.

En todos los casos, las series hidrológicas utilizadas para contrastar los modelos son las correspondientes a la serie completa, período 1940/41-2013/2014 y la serie reciente, período 1980/81-2013/14.

5.1. Datos de entrada del modelo hidrológico.

Las series meteorológicas proceden de la Agencia Española de Meteorología, AEMET, y del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la CHJ. Se han utilizado los datos históricos de la red de medida de precipitación y de temperatura media diaria, que comprenden medidas desde octubre de 1940 hasta septiembre del 2014. A las series históricas de precipitación le aplican un procedimiento de completado mediante correlación bivariada con estacionarización mensual previa.

Los mapas de precipitación y de temperatura son interpolados mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado con seis estaciones. La evapotranspiración potencial es obtenida utilizando el método de Thornthwaite, corregido en función de coeficientes mensuales procedentes de la comparación de resultados entre los métodos de Penman Monteith y Thornthwaite empleados en el Libro Blanco del Agua de España (MIMAM, 2000).

5.2. Mapa geológico y litoestratigráfico.

El mapa litoestratigráfico de España representa las unidades cartográficas caracterizadas según criterios litoestratigráficos e hidrogeológicos

fundamentalmente. Es decir el IGME ha incorporado aquellas unidades que manifiestan un alto interés hidrogeológico, bien por su propia naturaleza litológica (alta permeabilidad) o porque se consideran que forman parte esencial de la definición del acuífero.

A diferencia del mapa geológico (Figura 18a) utilizado en el modelo hasta la actualidad que tenía en cuenta la naturaleza de los materiales (rocas y sedimentos) que aparecen en la superficie terrestre, el mapa litoestratigráfico (Figura 18b) considera la permeabilidad.

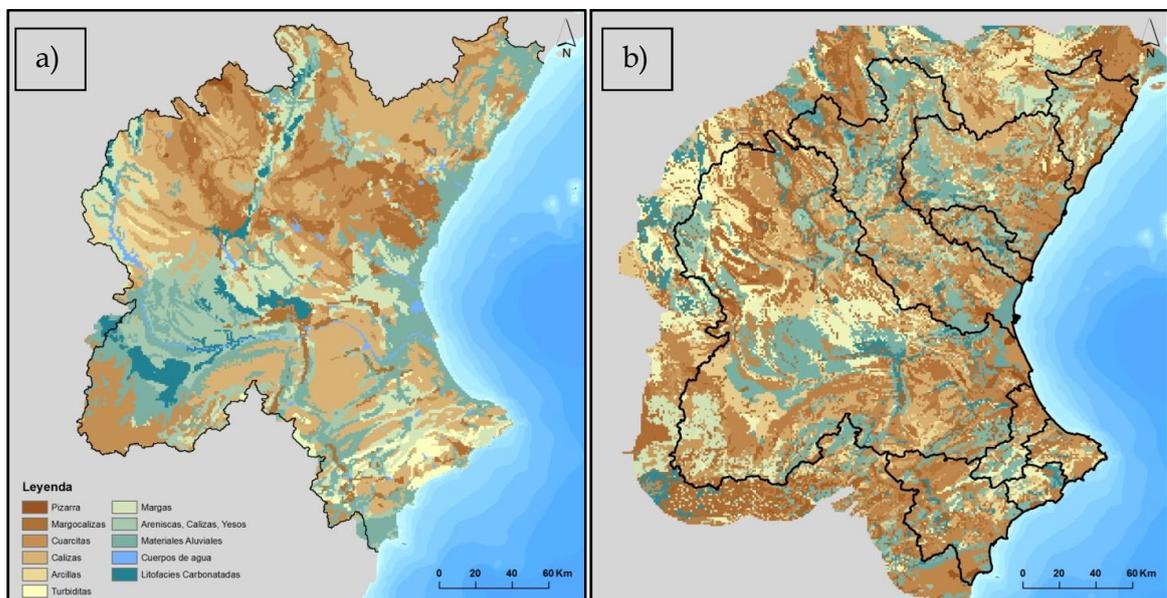


Figura 18. a) Mapa Geológico, modelo actual y b) Mapa litoestratigráfico, modelo nuevo.

Tal y como fue mencionado en apartados anteriores la infiltración en el terreno, entre otros aspectos está condicionado por las características del mismo. Consecuencia de ello la CHJ reclasificó el parámetro $I_{m\acute{a}x}$ en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

En las Figuras 19a y 19b se observan los rango de infiltración máxima y su distribución, oscilando entre 40 y 1500 mm/mes en el mapa geológico y entre 1 y 1224 mm/mes en el mapa litoestratigráfico.

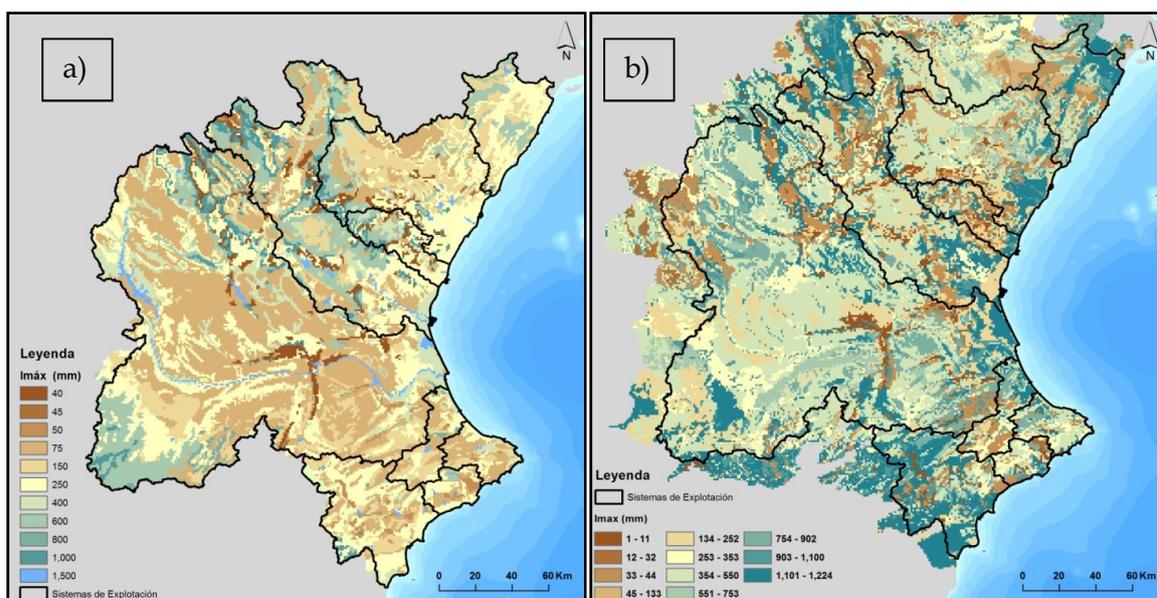


Figura 19. Mapas de Infiltración máxima (Imáx).

En la Tabla 2 se observa, por sistema de explotación, valores medios mensuales de infiltración según se utilice el mapa geológico o el litoestratigráfico y la diferencia entre ellos, siendo claramente mayor las infiltraciones en este último.

SISTEMA DE EXPLOTACIÓN	Imax modelo actual		Imax modelo nuevo		Diferencia entre modelos	
	PROMEDIO	DESVÍO	PROMEDIO	DESVÍO	PROMEDIO	DESVÍO
Cenia - Maestrazgo	305.44	201.13	603.82	432.53	298.38	231.40
Mijares-Plana de Castellón	264.19	252.14	478.47	356.12	214.29	103.98
Palancia - Los Valles	383.29	296.69	409.19	427.61	25.90	130.93
Turia	379.08	313.20	471.14	391.46	92.06	78.25
Júcar	260.50	282.21	548.78	345.20	288.28	62.99
Serpis	205.03	207.11	496.44	398.22	291.41	191.11
Marina Alta	173.06	191.30	548.35	327.65	375.29	136.35
Marina Baja	223.43	238.31	438.59	360.81	215.16	122.50
Vinalopó	211.49	186.64	775.18	456.69	563.68	270.05

Tabla 2. Valores medios mensuales de Imáx según modelo y sistema de explotación.

5.3. Aspectos evaluados.

A continuación se desarrollarán los criterios o indicadores por los cuales se juzgó la mejora del modelo.

5.3.1. Caudales.

Para realizar el contraste de las aportaciones obtenidas con las series registradas se han utilizado los mismos doce puntos que la CHJ utiliza en su anejo 2 del Plan Hidrológico 2015-2021 correspondientes a series aforadas restituidas al régimen natural.

Según la IPH, “Las series de aportaciones obtenidas se contrastarán con las series registradas en estaciones de aforos en periodos de escasa alteración antrópica, una vez analizadas para filtrar y corregir posibles errores, o con series restituidas al régimen natural, especialmente las correspondientes a puntos situados en los tramos medios y finales de los ríos.

5.3.1.1. Puntos de control.

A continuación se detallan los puntos (Figura 20) donde se ha realizado mencionado contraste:

- Sistema de explotación Júcar
 - ✓ Aportaciones naturales de entrada al embalse de Alarcón.
 - ✓ Aportaciones naturales hasta el embalse de Contreras.
 - ✓ Aportaciones naturales hasta el embalse de Molinar.
 - ✓ Aportaciones naturales hasta el embalse de Tous.
 - ✓ Aportaciones naturales hasta el azud de Sueca.

De estas series se dispone de un periodo completo de datos desde octubre de 1.940.

- Sistema de explotación Turia:
 - ✓ Aportaciones naturales de entrada al embalse de Arquillo de San Blas.
 - ✓ Aportaciones naturales hasta el embalse de Benagéber.

- ✓ Aportaciones naturales hasta el embalse de Loriguilla.
- ✓ Aportaciones naturales hasta la estación de aforos de Manises.

A excepción de la serie de Arquillo, de la que se tienen datos desde octubre de 1.940, el resto de series no están restituidas para todo el periodo. En el caso de Benagéber se tienen datos desde diciembre de 1.946, en Loriguilla desde octubre de 1.979 y en Manises desde agosto de 1.994.

- Sistema de explotación Mijares:

- ✓ Aportaciones naturales de entrada al embalse de Arenós. De esta serie se disponen de datos desde enero de 1.979.
- ✓ Aportaciones naturales hasta el embalse de Sichar: Esta serie está restituida desde octubre de 1.986.

- Sistema de explotación Palancia-los Valles:

- ✓ Entrada en el embalse del Regajo. Se disponen de mediciones desde octubre de 1959.

- Sistema de explotación de la Marina Baja:

- ✓ Entrada en el embalse de Guadalest. Se disponen de mediciones desde octubre de 1.967.

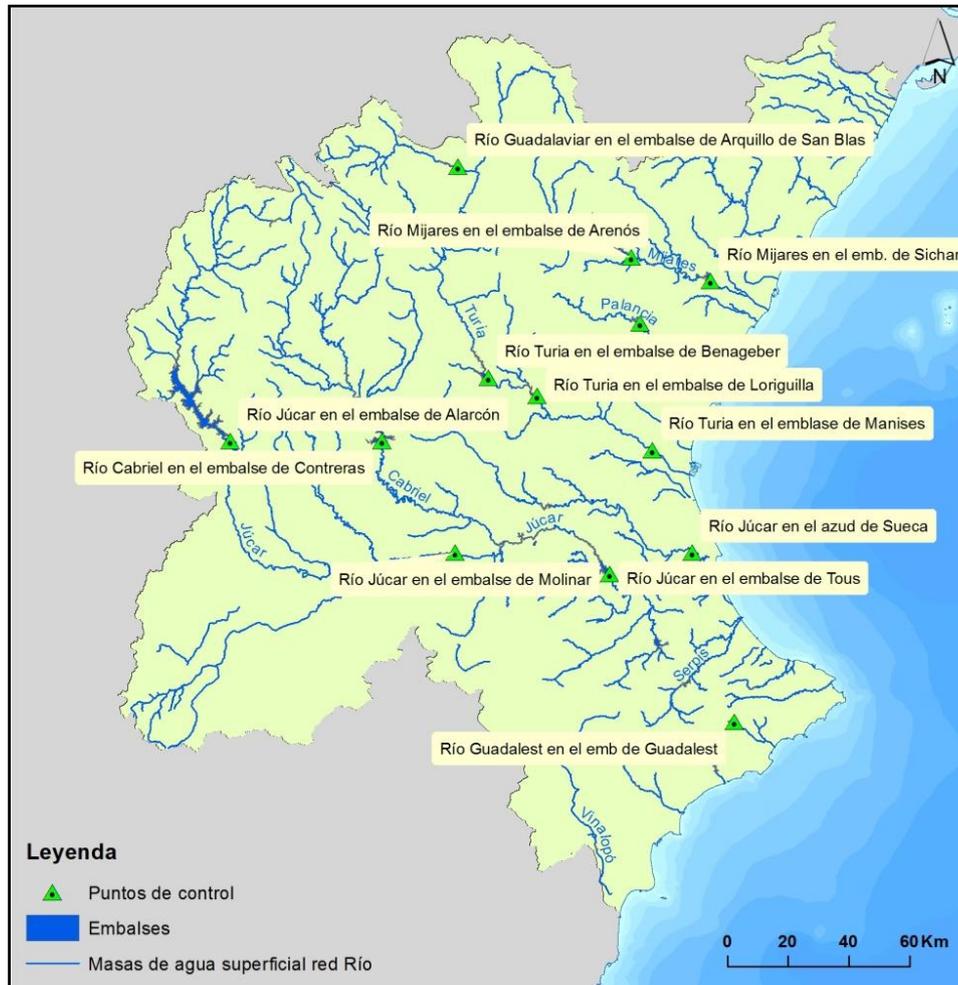


Figura 20. Puntos de control contrastados.

5.3.1.2. Indicadores de Bondad de Ajuste.

Como indicadores de bondad de ajuste se utilizarán dos de los tres recomendados por Moriasis et al. 2007: 1) (NSE) Nash-Sutcliffe efficiency y 2), sesgo por ciento (PBIAS). Recomienda el uso de mencionados indicadores sin perjuicio del uso agregado de las técnicas gráficas.

Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) comparado con la varianza de los datos medidos (Nash and Sutcliffe, 1970)

NSE indica hasta qué punto los datos observados versus los datos simulados se ajusta a la línea de 1:1. NSE es calcula como se muestra en la ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2}$$

NSE oscila entre $-\infty$ y 1.0 (1 incluido), con NSE = 1 siendo el valor óptimo. Valores entre 0.0 y 1.0 generalmente son vistos como niveles aceptables de rendimiento, considerando que valores < 0.0 indica que el valor medio observado es un mejor predictor que el valor medio simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable.

Por otro lado el Percent bias (PBIAS), miden la tendencia promedio de los datos simulados siendo estos mayores o más pequeños que los datos observados. (Gupta et al. 1999)

El valor óptimo de PBIAS es 0.0, valores de baja magnitud indican un ajuste exacto del modelo simulado. Valores positivos indican sesgo de subestimación de modelo y valores negativos indica el sesgo de sobreestimación de modelo (Gupta et al., 1999).PBIAS es calculado con la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})}$$

Donde PBIAS es la desviación de los datos evaluados, siendo expresados en porcentaje. En la tabla 3 se pueden observar las diferentes escalas consideradas según se trate de NSE o PBIAS.

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 \leq PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 \leq PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$	$PBIAS \geq \pm 70$

Tabla 3. Escala estadística general recomendada para paso de tiempo mensual.

5.3.2. Piezometría.

La Confederación Hidrográfica del Júcar desde el año 2.000 tiene en funcionamiento una red de piezometría operativa compuesta aproximadamente por 320 puntos de control. El objetivo de la misma es disponer de un programa de seguimiento que proporcione información suficiente y fiable sobre su estado cuantitativo. Se contrastarán mediante los estadísticos desarrollados en apartado anterior los niveles piezométricos obtenidos en régimen alterado.

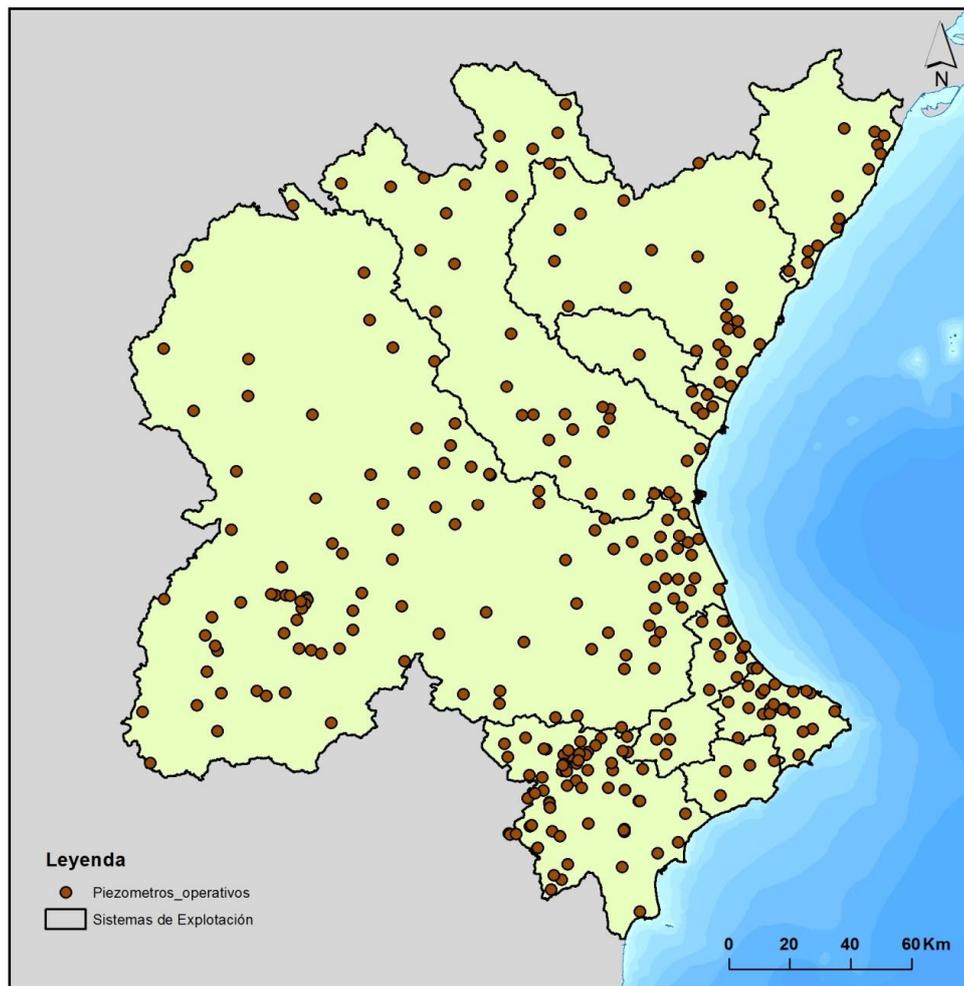


Figura 21. Red operativa de piezómetros.

Además del análisis gráfico de algunos piezómetros será utilizado el indicador de eficiencia de Nash - Sutcliffe para juzgar la bondad del ajuste.

5.3.3. *Transferencias laterales.*

Tal como fuera descrito en puntos anteriores, la CHJ tiene identificadas 90 masas de agua y 26 masas clasificadas como masas de agua impermeables o acuíferos de interés local.

El anejo 2 del Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar, manifiesta la complejidad en la evaluación del recurso subterráneo renovable, ya que su adecuada estimación debe tener en cuenta tanto la compleja relación entre las aguas superficiales y subterráneas como los flujos laterales entre masas de agua subterránea, para evitar la frecuente doble contabilidad.

Es así que para el presente trabajo y contando con las fichas y particularmente utilizando los parámetros “tipo” y “sentido de flujo” se efectuó la revisión de las 90 masas de agua subterráneas y haciendo uso de herramientas de información geográfica se logró representar en el mapa de masas (Figura 22) la permeabilidad de sus límites y el sentido del flujo si la ficha lo indicaba.

El apartado límite y geometría resume de manera concreta toda la información básica para definir la geometría de la masa de agua subterránea y contempla los siguientes parámetros:

- **Límites laterales:** incorpora la información relativa a los límites establecidos entre las diferentes masas de agua subterránea.
- **Criterio:** recoge la característica definitoria en la que se fundamenta la delimitación, considerándose que se trate de la presencia de materiales que constituyan una barrera impermeable, la presencia de un accidente tectónico (falla), un umbral hidrogeológico, un cauce o la línea de costa que actúen como límites hidrogeológicos naturales, o bien que se trate de una división de carácter convencional o cualquier otro tipo no especificado.
- **Tipo:** Establece básicamente si el límite permite el flujo de agua, indicando si es abierto, cerrado, una combinación de ambos, o si la circulación existente está restringida o condicionada por otros factores.

- **Sentido de flujo:** describe la existencia de entradas o salidas en el sector considerado, y si éstas son variables en función de las condiciones hidrodinámicas.
- **Conexión con:** describe brevemente las características de los límites definidos para las masa y la relación de ésta con las masas de agua subterráneas adyacentes.



Figura 22. Mapa de permeabilidad de los límites de masas subterráneas.

Como se observa en la figura es establecieron 4 categorías, permeable para aquellos límites que eran de tipo “abierto”, semipermeable para el tipo “abierto-cerrado”, impermeable para el tipo “cerrado” y se agregó una categoría extra en función que al momento de la confección se detectó alguna contradicción en la información detallada en la ficha.

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricial en el ámbito de la CHI

En el caso de las transferencias entre masas, la información es cualitativa, dando sólo el sentido del flujo del agua subterránea. Como se observa en la figura dicha información no se encontró disponible en todas las fichas.

5.3.4. Salidas al mar.

Otro aspecto considerado en la mejora de la componente subterránea fueron las salidas al mar.

Para ello se partió desde las salidas que el modelo actual reproduce y efectuando una revisión de trabajos científicos (Figura 23) r, en su mayoría llevados a cabo por el Instituto de Geología y Minería de España, es que se tomaron como referencia al momento de establecer transferencias laterales entre las masas de agua subterránea y lograr un mejor ajuste en las salidas al mar.

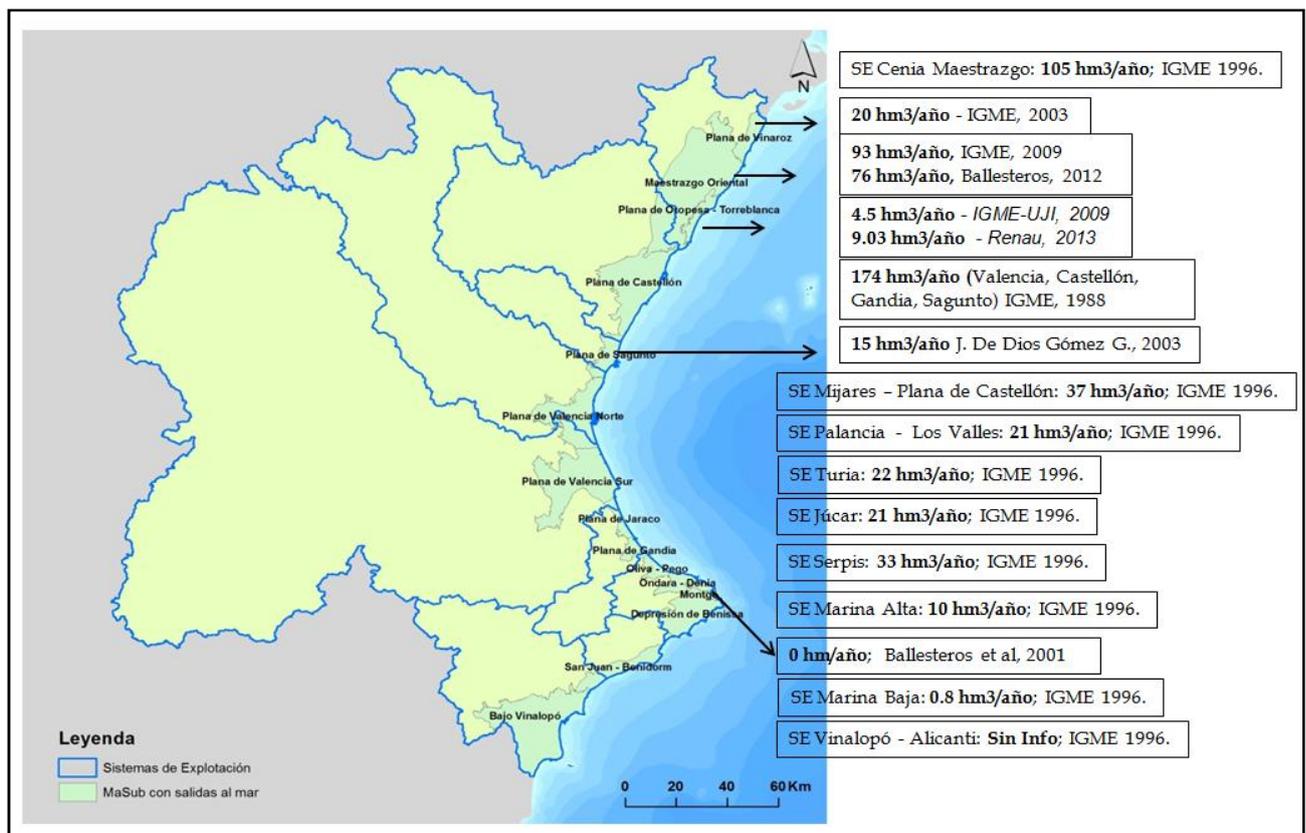


Figura 23. Referencias bibliográficas respecto a salidas al mar.

5.3.5. Balance de agua subterránea.

En la evaluación del recurso subterráneo se ha adoptado un enfoque general analizando el ciclo hidrológico en su totalidad (Figura 24). Estimando los recursos hídricos en régimen natural a través del modelo, no sólo de las componentes superficiales, sino también de las diferentes variables de la componente subterránea, tales como la infiltración por lluvia, pérdidas en ríos, descargas a ríos y salidas al mar, aunque éste último será analizada de manera particular.

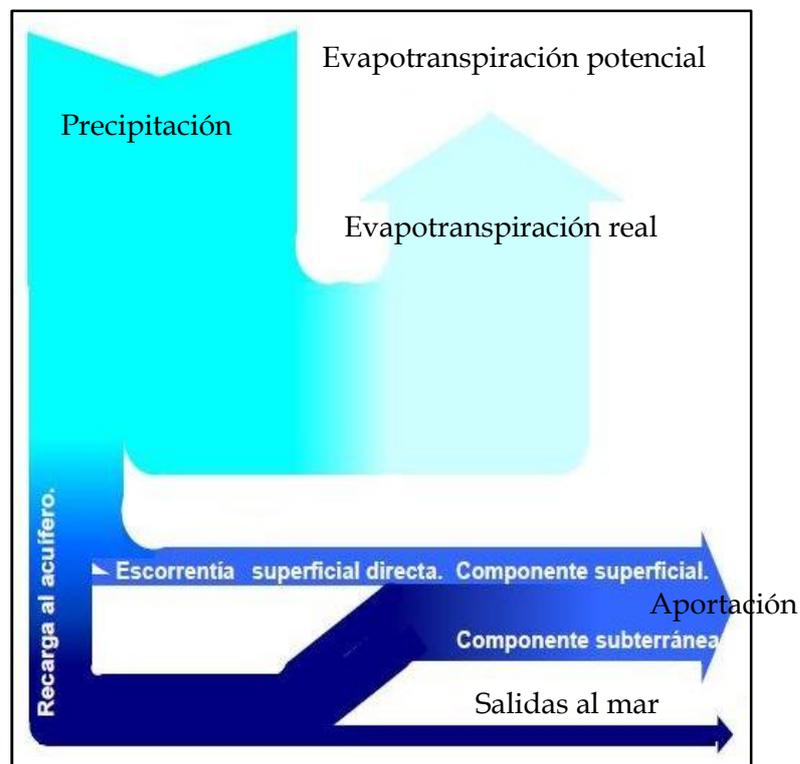


Figura 24. Balance del ciclo Hidrológico.

5.3.6. Evapotranspiración potencial. Método Penman-Monteith

El concepto de evapotranspiración potencial (ETP), introducido por Charles Thornthwaite en 1948, define esta variable como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en óptimas condiciones, y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua.

La evapotranspiración depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad de suelo y el desarrollo vegetal de la planta y es un componente fundamental del balance hidrológico y un factor clave en la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera. Su cuantificación se hace necesaria para evaluar los recursos hídricos disponibles en el territorio.

Como fue mencionado en apartados anteriores la evapotranspiración para incorporar al modelo es calculada mediante el método de Thornthwaite, corregido en función de coeficientes mensuales procedentes de la comparación de resultados entre los métodos de Penman Monteith y Thornthwaite empleados en el Libro Blanco del Agua de España (MIMAM, 2000).

Es así que a los efectos de contrastar los mapas de evapotranspiración utilizados, ya sea en el modelo actual o en el modelo nuevo se utilizará información de los Sistemas de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR).

El ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, promueve desde el año 1998 la instalación, explotación y mantenimiento de estos sistemas, formando una red de 361 estaciones. Mencionados sistemas permiten obtener desde sus sitios web la ETP calculada mediante el método Penman-Monteith.

Para evaluar y contrastar los modelos se seleccionaron estaciones de las provincias de Valencia, Teruel; Alicante, Castellón y Albacete (Tabla 3) y se comparó con las ETP del modelo en la misma ubicación que las estaciones, tal como se observa en la figura 25.

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricol
en el ámbito de la CHI



Figura 25. Estaciones SIAR seleccionadas.

Provincia	Estación	Coordx	CoordY	ETP Pen-mon	serie de datos
valencia	Campo de Acis	657,938	4,366,610	1,217.39	2001/2002-2015/2016
valencia	Liria	703,474	4,396,160	1,091.38	2001/2002-2015/2016
valencia	Villanueva de Castellon	714,192	4,326,970	1,096.50	2001/2002-2015/2016
valencia	Montesa	704,640	4,314,380	1,101.17	2001/2002-2015/2016
valencia	Pedralba	696,061	4,382,190	1,173.92	2001/2002-2015/2016
valencia	Cheste	693,888	4,376,790	1,057.71	2001/2002-2015/2016
Valencia	Chulilla	685,917	4,394,130	1,284.04	2008/2009-2015/2016
Valencia	Villalonga	742,476	4,308,520	1,036.51	2001/2002-2015/2016
Valencia	Xàtiva	712,192	4,319,500	1,112.82	2001/2002-2015/2016
Albacete	Albacete	595,166	4,311,730	1,293.53	2001/2002-2015/2016
Albacete	Almansa	664,097	4,307,740	1,293.20	2001/2002-2015/2016
Albacete	Motilleja	606,281	4,335,780	1,185.68	2001/2002-2015/2016
Albacete	Tarazona	593,160	4,345,720	1,092.72	2001/2002-2015/2016
Cuenca	Cañete	615,188	4,431,790	1,039.35	2001/2002-2015/2016
Cuenca	El Picazo	578,157	4,367,640	1,244.74	2001/2002-2015/2016
Cuenca	Villanueva de la Jara	599,274	4,362,320	1,271.80	2001/2002-2015/2016
Cuenca	Mariana	573,120	4,445,040	937.79	2001/2002-2015/2016
Alicante	Ondara	761,033	4,300,940	1,082.42	2001/2002-2015/2016
Alicante	Villena	685,028	4,274,030	1,323.74	2001/2002-2015/2016
Alicante	Camp de Mirra	693,720	4,283,550	1,221.38	2001/2002-2015/2016
Alicante	Altea	754,320	4,276,840	1,151.66	2001/2002-2015/2016
Alicante	Planes	729,927	4,296,220	1,063.52	2001/2002-2015/2016
Castellón	Castellón Benadresa	745,965	4,430,550	1,095.40	2001/2002-2015/2016
Castellón	San Rafael del Río	784,970	4,499,150	1,084.86	2001/2002-2015/2016
Castellón	Onda	739,849	4,427,960	1,143.20	2008/2009-2015/2016
Castellón	Segorbe	715,427	4,410,510	1,021.81	2001/2002-2015/2016
Castellón	Benicarló	788,624	4,478,990	946.59	2001/2002-2015/2016
Teruel*	Teruel	655,755	4,467,910	1,013.39	2001/2002-2015/2016

* Única estación dentro del ámbito de la CHI.

Tabla 4. ETP en mm/año en estaciones SIAR.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1. Datos

Como ha sido detallado en apartados anteriores, a partir de estudios realizados por el IGME se ha obtenido información que en este proceso de mejora se han incorporado al modelo y que hasta el momento no contaba con ellos.

6.1.1. *Relación río acuífero.*

En el conjunto de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) han estudiado la interrelación existente entre cauces fluviales, formaciones geológicas permeables y manantiales y caracterizado en 357 tramos de cauces fluviales, que representan una longitud de 3367,6 kilómetro (Tabla 5). Estos tramos se encuentran relacionados hidrogeológicamente con 75 MASbs. El comportamiento mayoritario es de río efluente o ganador (252 tramos). Han identificado 84 tramos en cauces influentes o perdedores, y únicamente 21 tramos variables.

La gran mayoría de los tramos de río definidos (ver figura 26) como ganadores se localizan geográficamente en el sector septentrional de la DHJ, y también en las zonas montañosas del sector central. Los tramos perdedores se sitúan mayoritariamente en las zonas costeras, en las que la variación piezométrica y la transición hacia las formaciones hidrogeológicas de las planas costeras favorece la infiltración a través de los cauces fluviales. En el régimen influenciado actual también se han caracterizado como perdedores diversos tramos de cauces fluviales en la Mancha Oriental. Los tramos de río con conexión variable se localizan principalmente en el sector central de la demarcación hidrográfica, coincidiendo fundamentalmente con los cursos medios y bajos de los ríos Júcar y Turia.

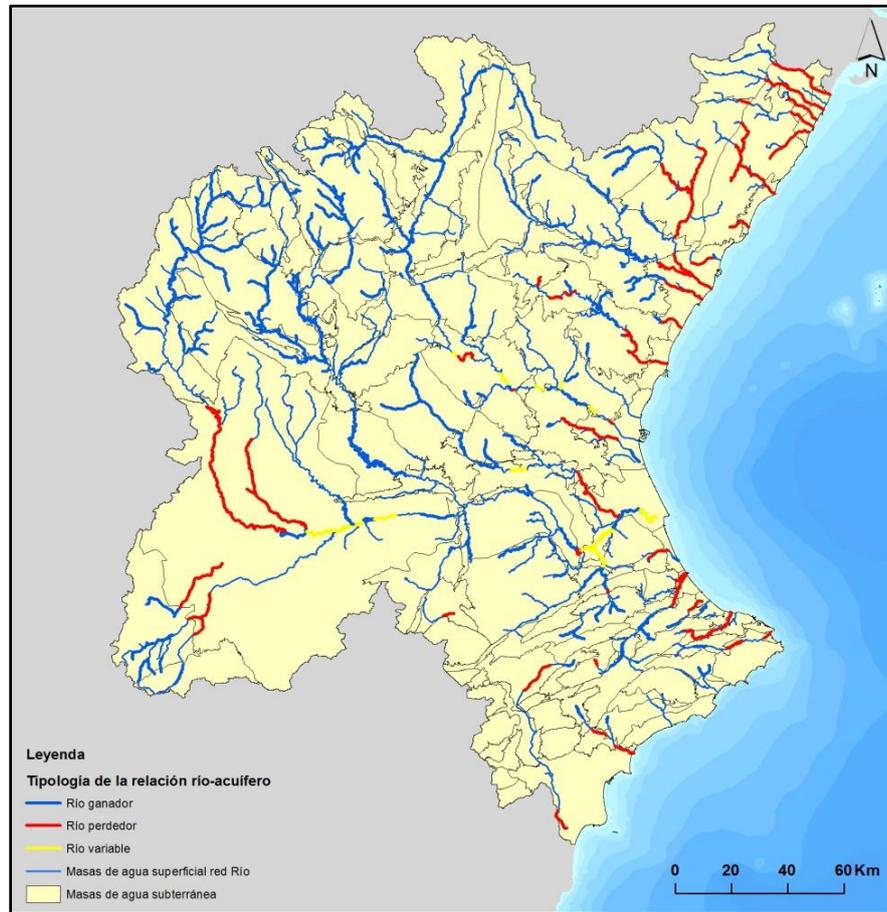


Figura 26. Relación Río Acuífero. Fuente: CHJ.

Tipo de tramo	Nº de tramos	Longitud total (m)
Tramos en cauces efluentes o ganadores	252	2.487.051
Tramos en cauces influentes o perdedores	84	754.203
Tramos variables (estacionales o hiperanuales)	21	126.331

Tabla 5. Tipo, número y longitud de los tramos definidos según su comportamiento.

6.1.2. Manantiales

De todas las surgencias puntuales de aguas subterráneas, que están distribuidas por todo el ámbito geográfico de la DHJ identificadas por el IGME, se han seleccionados aquellas de categoría principal (permitieron cuantificar las relaciones río-acuífero) y sólo aquellas de categoría general que superaran los 0.5 hm³/año. El objetivo e incorporar los manantiales (Figura 27) es tener información del sitio por donde se producen las salidas al sistema superficial y poder contrastar eso con la red de medida de caudales.

Los aforos de las surgencias identificadas presentan diversos periodos de mediciones, que abarcan desde principios de la década de 1970 en los puntos con registros más antiguos, hasta el momento en el que se efectuó el trabajo por parte del IGME. Se dispuso de datos de caudal para 3.723 manantiales, si bien la mayoría presenta una o dos mediciones de caudal por punto. De esa relación fueron seleccionados aproximadamente 360 manantiales, mediante el criterio desarrollado en el párrafo anterior.

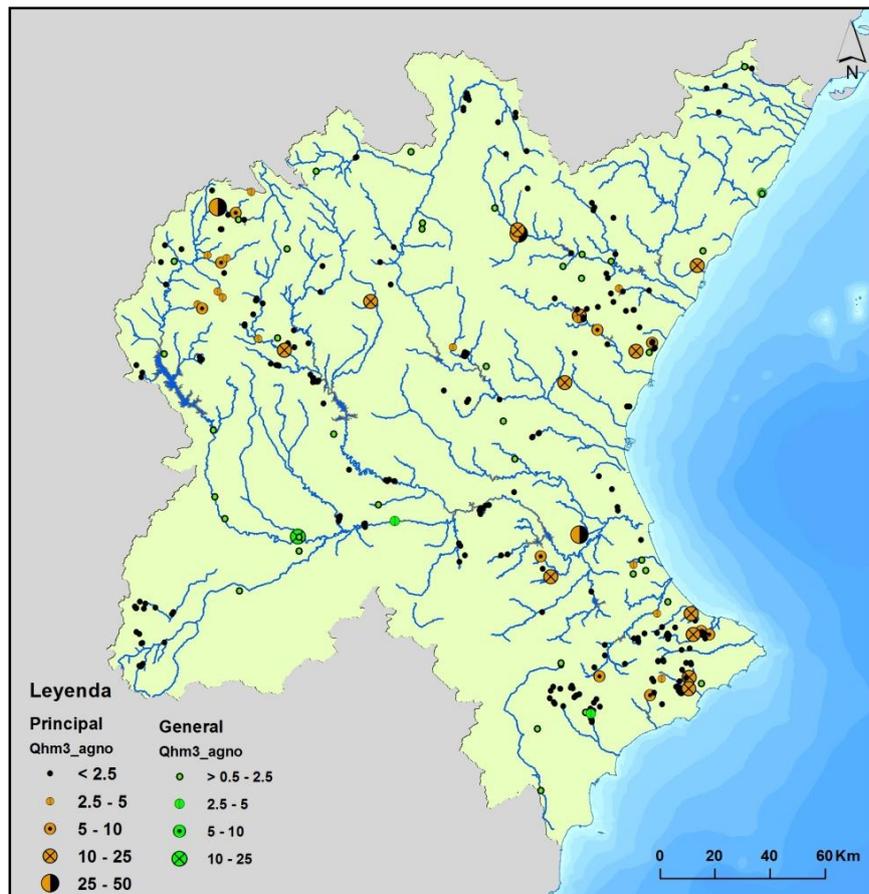


Figura 27. Manantiales incorporados al modelo.

6.2. Contraste de modelos.

A continuación se desarrollarán cada uno de los aspectos evaluados descritos en el punto 4.3.

6.2.1. Contraste de caudales con PBIAS

En la figuras 28a y 28b se observa el ajuste existente, en la serie completa, del modelo Plan Júcar 2015 y el modelo 2016 respectivamente, mientras que en las figuras 29a y 29b se observa el ajuste existente, en la serie reciente. En ambos casos el indicador de bondad de ajuste es el Percent bias.

6.2.1.1. Caudales de la serie completa.

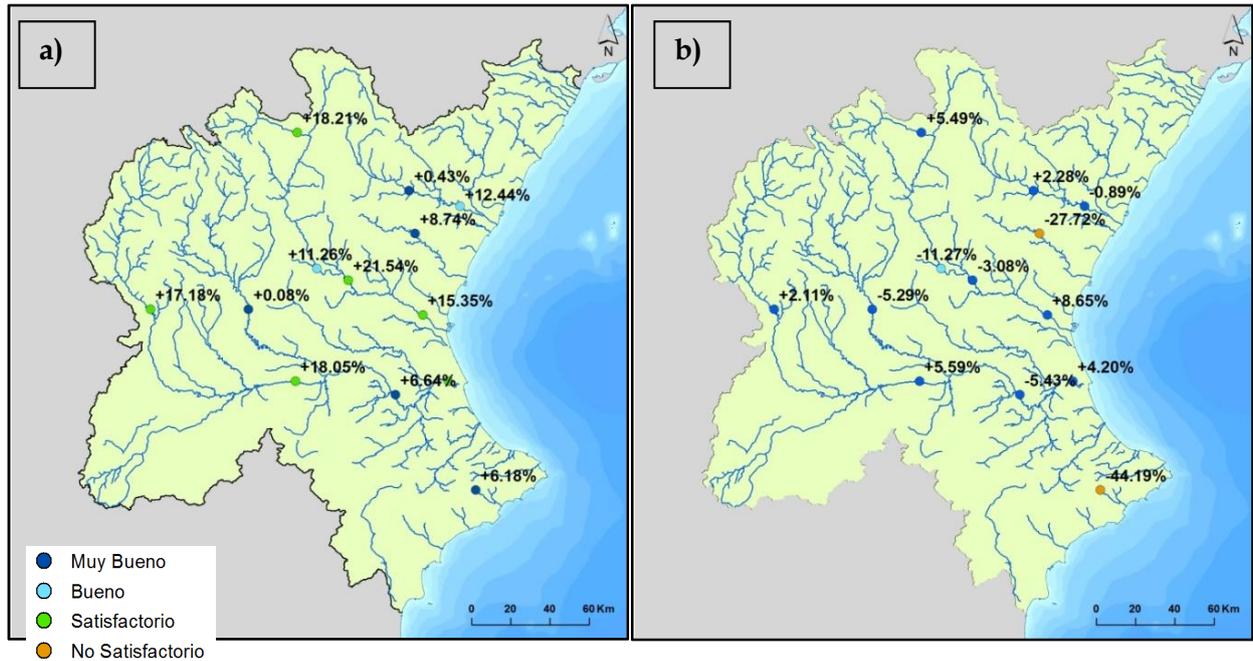


Figura 28. a) PBIAS. Modelo Plan Júcar 2015 b) PBIAS. Modelo 2016.

6.2.1.2. Caudales de la serie reciente.

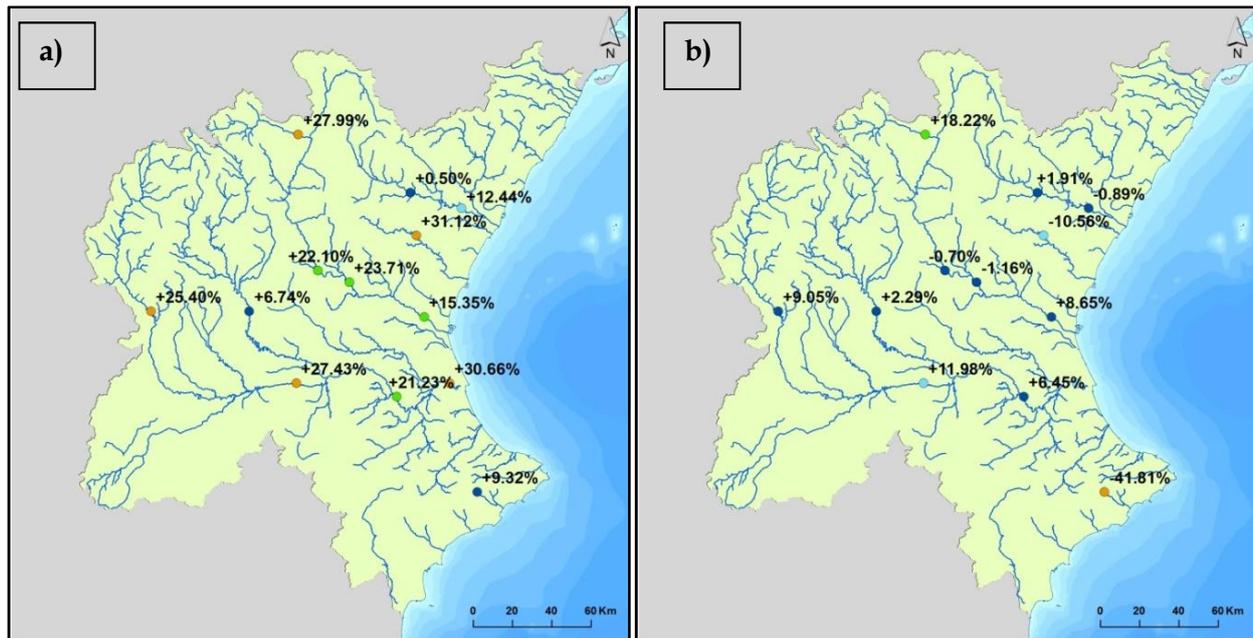


Figura 29. a) PBIAS. Modelo Plan Júcar 2015 b) PBIAS. Modelo 2016.

6.2.2. Contraste de caudales con NSE

En la figuras 30a y 30b se observa el ajuste existente, en la serie completa, del modelo Plan Júcar 2015 y el modelo 2016 respectivamente, mientras que en las figuras 29a y 29b se observa el ajuste existente, en la serie reciente. En ambos casos el indicador de bondad de ajuste es el NSE.

6.2.2.1. Caudales de la serie completa

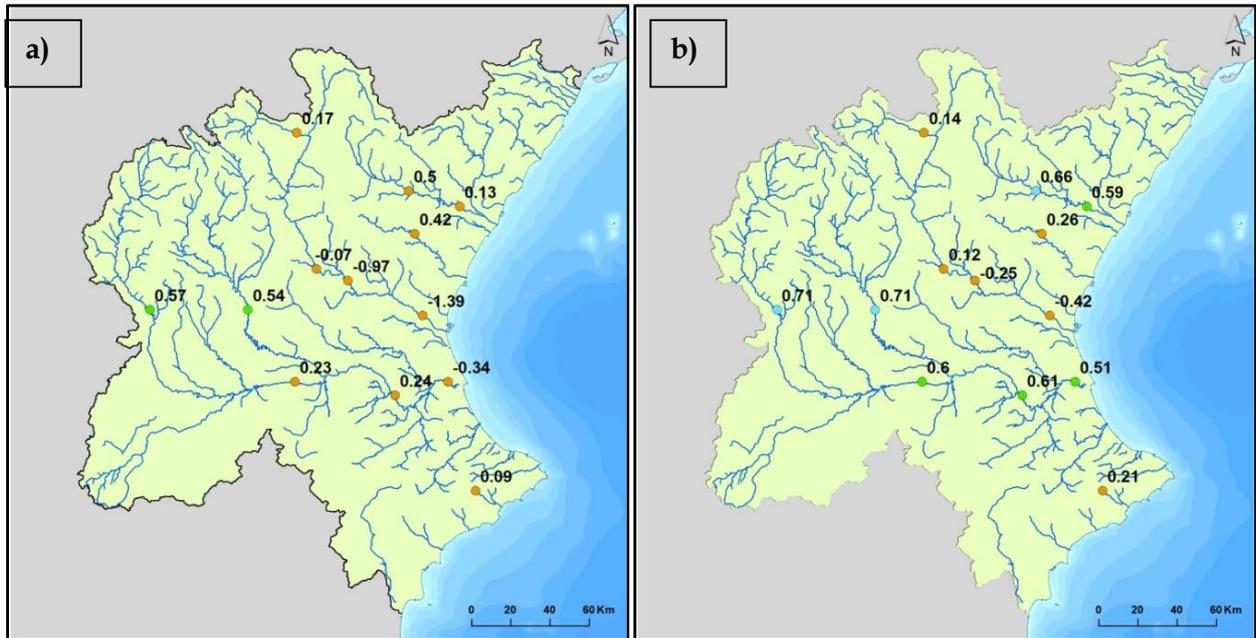


Figura 30. a) NSE. Modelo Plan Júcar 2015 b) NSE. Modelo 2016

6.2.2.2. Caudales de la serie reciente.

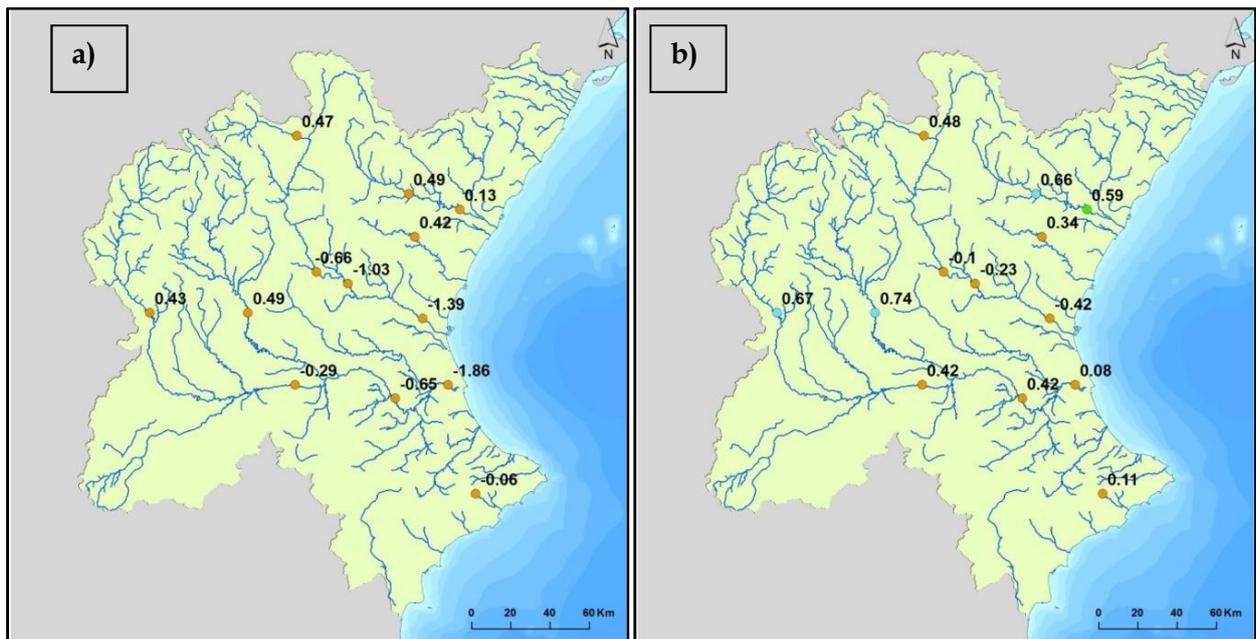


Figura 31. a) NSE. Modelo Plan Júcar 2015 b) NSE. Modelo 2016.

6.2.2.3. *Hidrogramas del modelo 2016.*

Las figuras 32, 33 y 34 corresponden a hidrogramas del modelo 2016 de los embalses Benageber, Contreras y Tous respectivamente, donde la línea verde representa caudales observados y la línea azul a los simulados.

Nombre punto control: Río Turia en el embalse de Benageber

Turia Código punto control: 14090

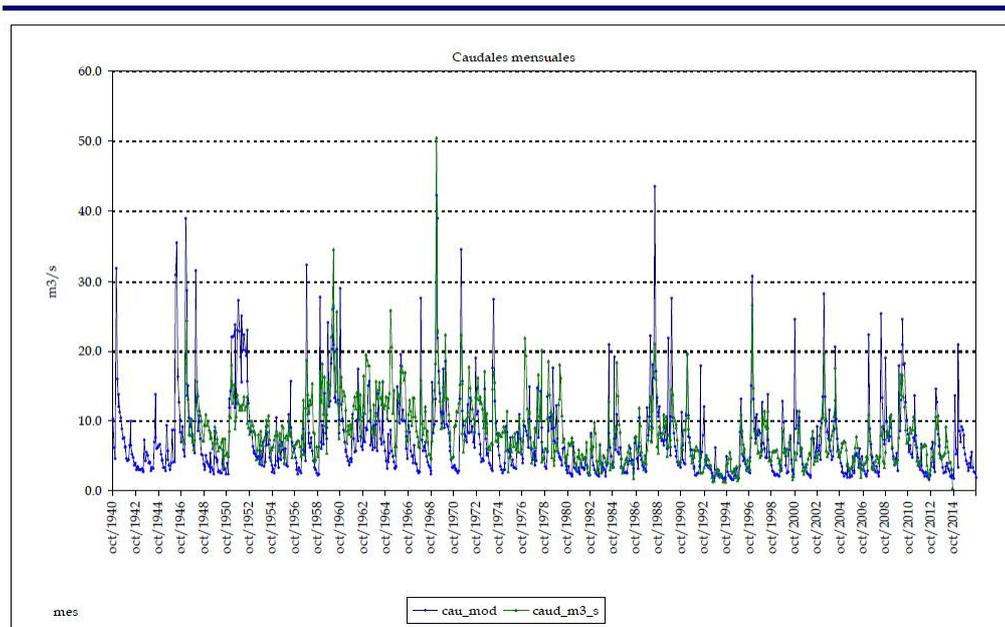


Figura 32. Hidrograma Río Turia en el embalse de Benageber

Nombre punto control: Río Cabriel en el embalse de Contreras

Júcar Código punto control: 15380

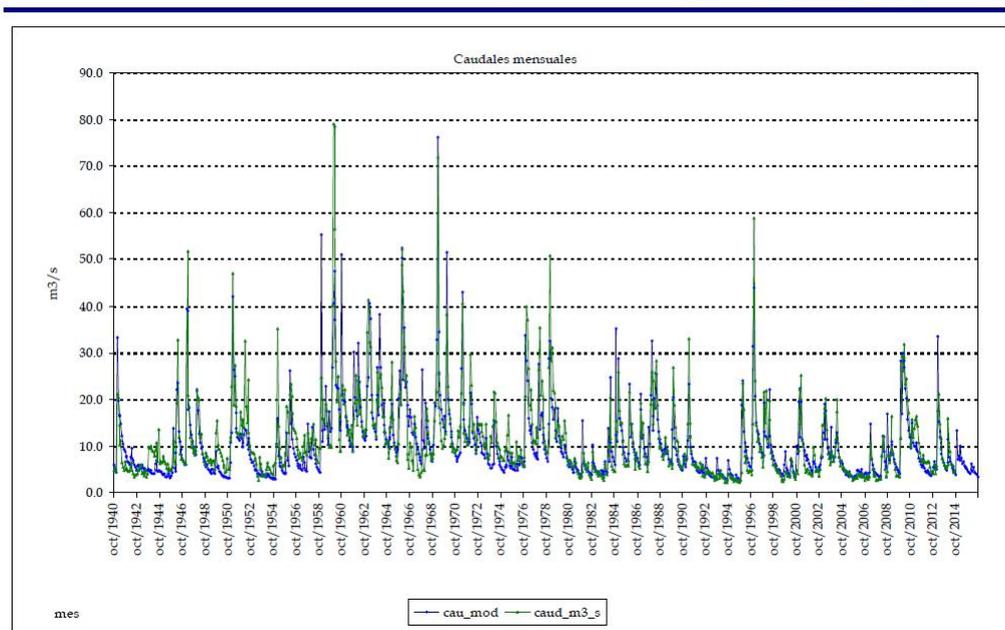


Figura 33. Hidrograma Río Cabriel en el embalse de Contreras.

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricial en el ámbito de la CHI

Nombre punto control: Río Júcar en el embalse de Tous

Júcar Código punto control: 15455

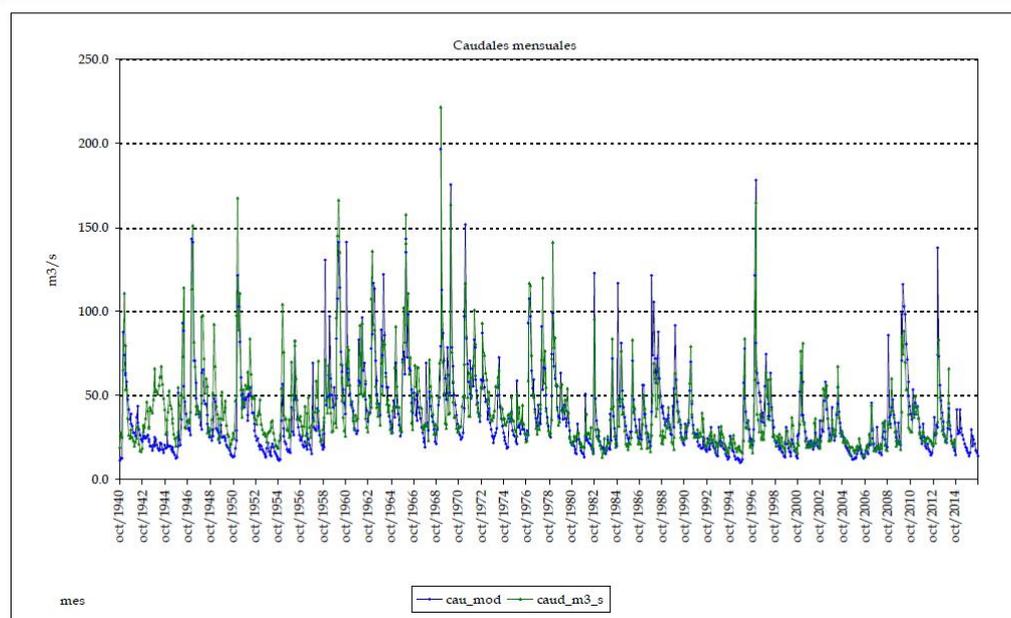


Figura 34. Hidrograma Río Júcar en el embalse de Tous.

6.2.3. Piezometría.

En la figuras 35a y 35b se observa el ajuste existente, en la serie completa, y en régimen alterado, del modelo Plan Júcar 2015 y el modelo 2016 respectivamente. El indicador de bondad de ajuste es el NSE.

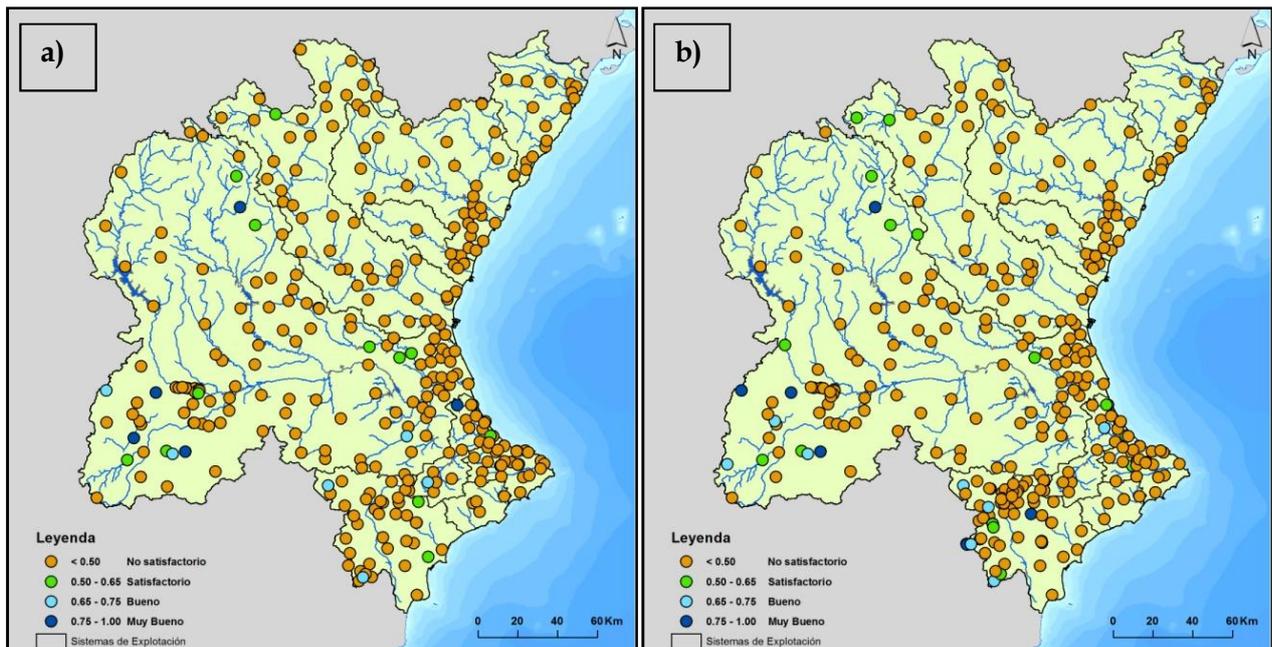


Figura 35. a) NSE piezometría Modelo Plan Júcar 2015 b) NSE piezometría modelo 2016.

6.2.3.1. *Contraste de niveles piezométricos.*

Las figuras 36, 37 y 38 corresponden a contrastes de niveles Piezométricos en las masas de agua subterránea Mancha Oriental N, Marchuquera-Falconera y Mancha Oriental S del modelo 2016 respectivamente, donde las líneas de colores distintas del azul corresponden a niveles piezométricos observados y la línea azul a los simulados.

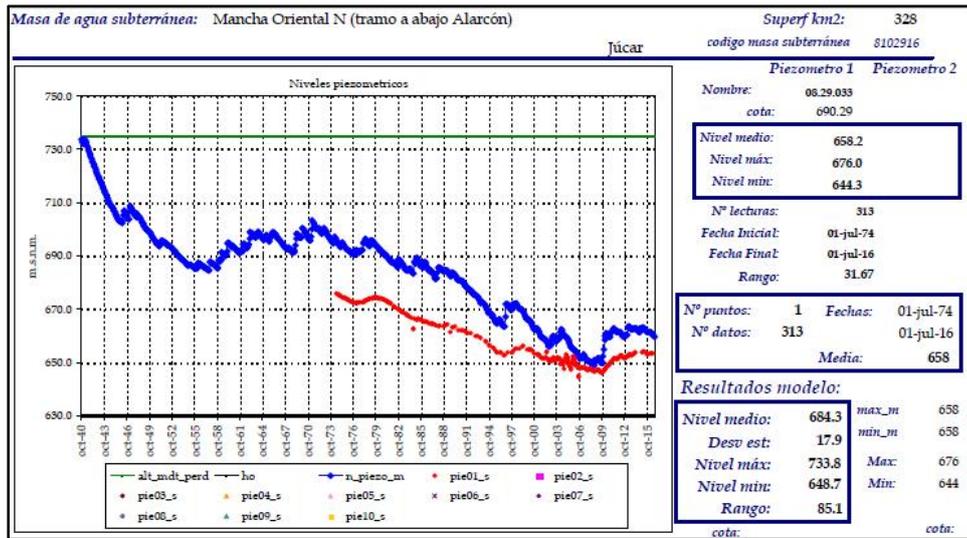


Figura 36. Ejemplo de ajuste de piezometría en el modelo 2016.

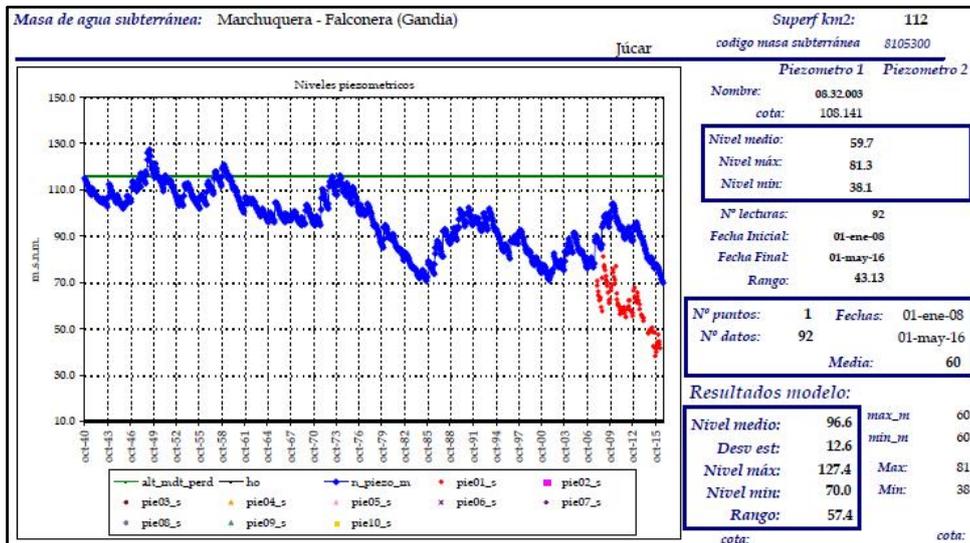


Figura 37. Ejemplo de ajuste de piezometría en el modelo 2016.

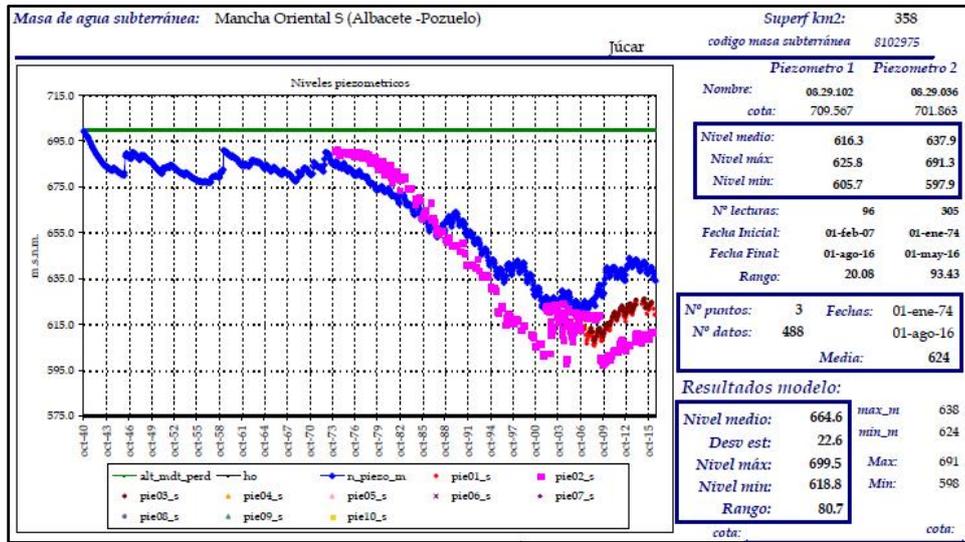


Figura 38. Ejemplo de ajuste de piezometría en el modelo 2016.

6.2.4. Transferencias laterales.

En la figura 39, se pueden observar las transferencias entre las masas de agua subterránea antes de considerar la permeabilidad de sus límites, mientras que en la figura 40, las transferencias son definidas teniendo en cuenta los límites impuestos.

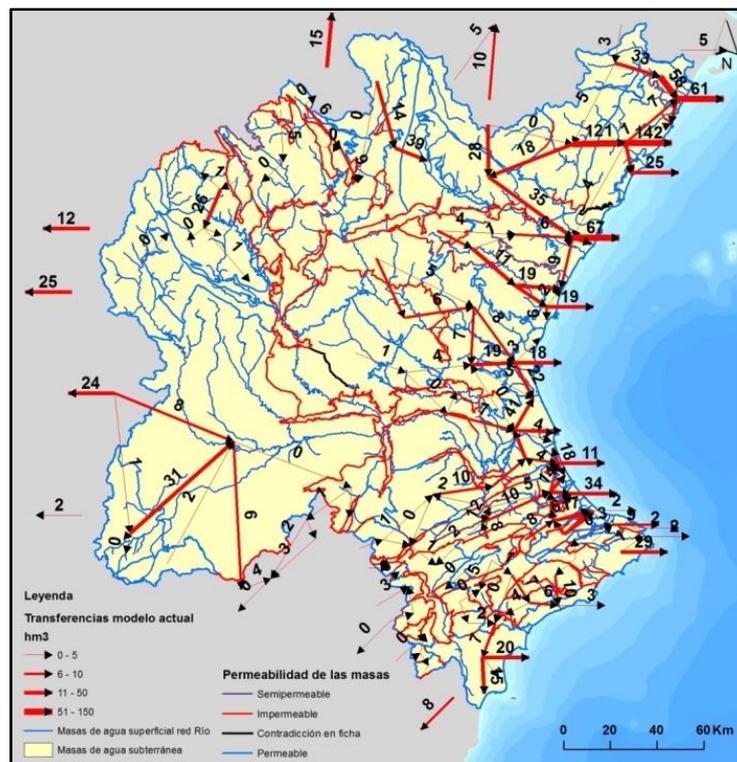


Figura 39. Transferencias del modelo Plan Júcar 2015.

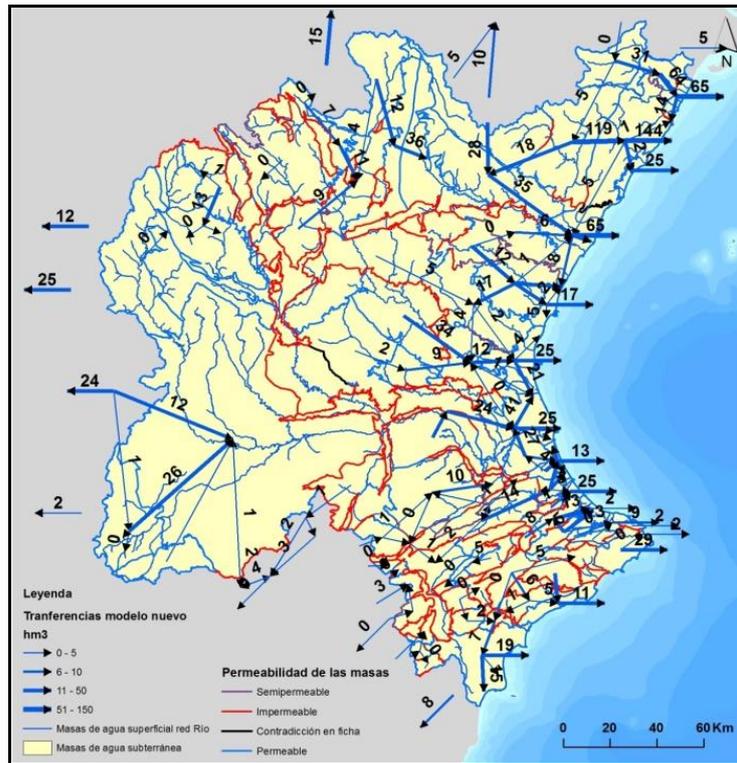


Figura 40. Transferencias del modelo 2016.

6.2.5. Salidas al mar.

En la figuras 41a y 41b se observan las salidas al mar simuladas, en la serie completa, por el modelo Plan Júcar 2015 y el modelo 2016 respectivamente, mientras que en las figuras 42a y 42b se observan las salidas al mar simuladas en la serie reciente.

6.2.5.1. Salidas al mar en la serie completa.

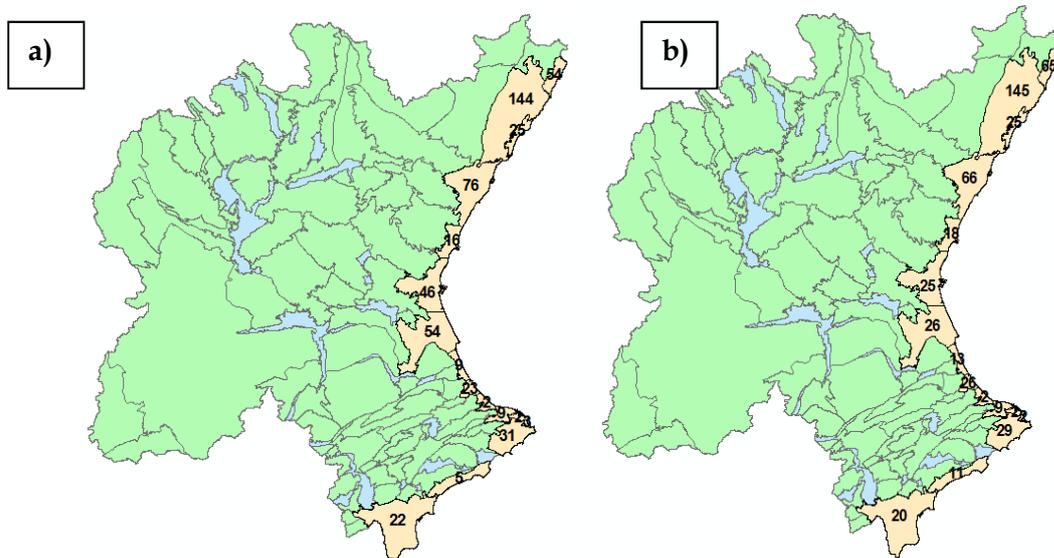


Figura 41. a) Salidas al mar. Modelo Plan Júcar 2015 b) Salidas al mar. Modelo 2016.

6.2.5.2. Salidas al mar en la serie reciente.

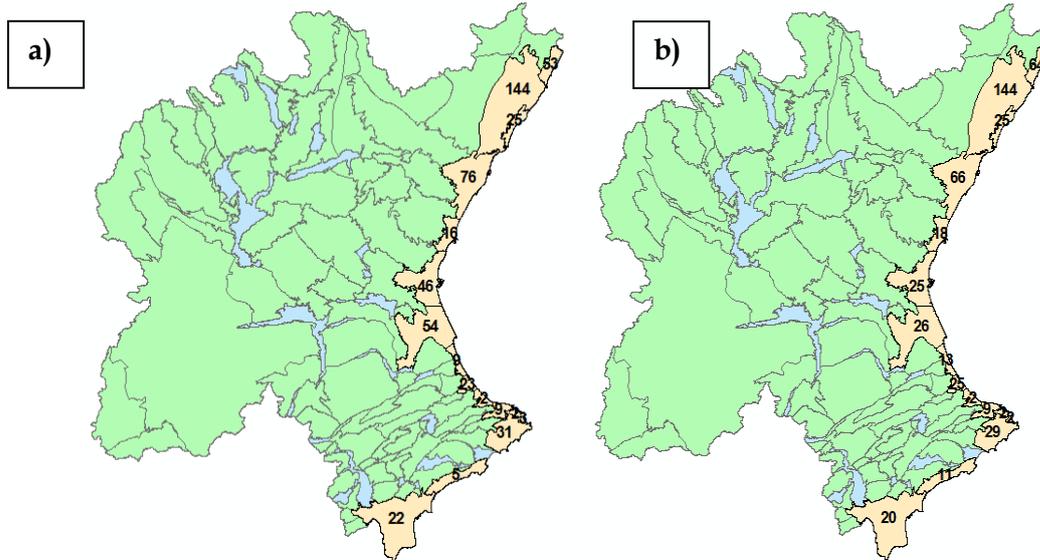


Figura 42. a) Salidas al mar. Modelo Plan Júcar 2015 b) Salidas al mar. Modelo 2016.

6.2.6. Balance de agua subterránea

En las figuras 43a y 43b se observan los balances del ciclo hidrológico simulados, en la serie completa, por el modelo Plan Júcar 2015 y el modelo 2016 respectivamente, mientras que en las figuras 44a y 44b se observan los balances del ciclo hidrológico simulados en la serie reciente.

6.2.6.1. Balance del ciclo hidrológico de la serie completa.

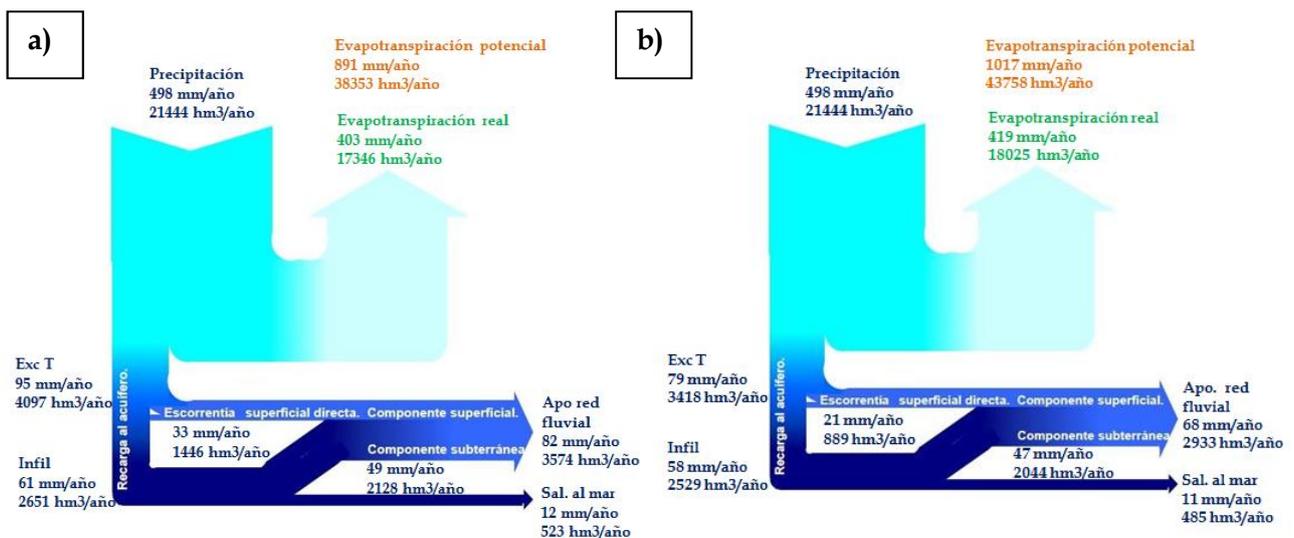


Figura 43. a) Balance del Ciclo Hidrológico. Modelo Plan Júcar 2015. b) Balance del ciclo hidrológico modelo 2016.

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricol en el ámbito de la CHI

6.2.6.2. Balance del ciclo hidrológico de la serie reciente.

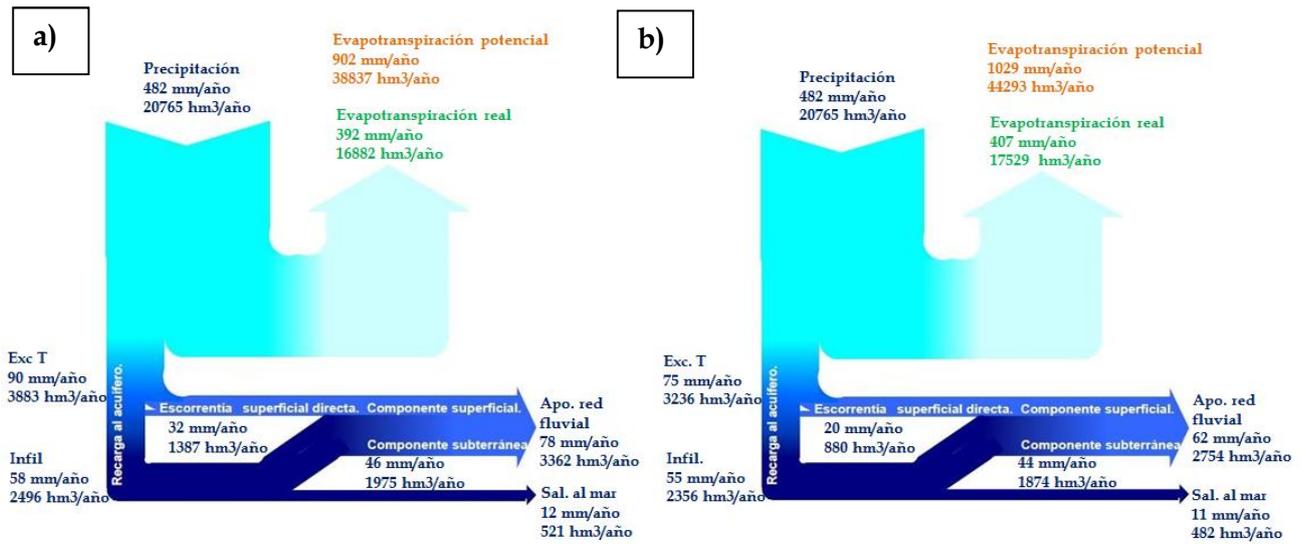


Figura 44. a) Balance del Ciclo Hidrológico. Modelo Plan Júcar 2015. b) Balance del ciclo hidrológico modelo 2016.

6.2.6.3. Recargas de la serie completa.

En las figuras 45a y 45b se observan las recargas de las masas subterráneas simuladas, en la serie completa, por el modelo Plan Júcar 2015 y el modelo 2016 respectivamente, mientras que en las figuras 46a y 46b se observan las recargas de las masas subterráneas simuladas en la serie reciente.

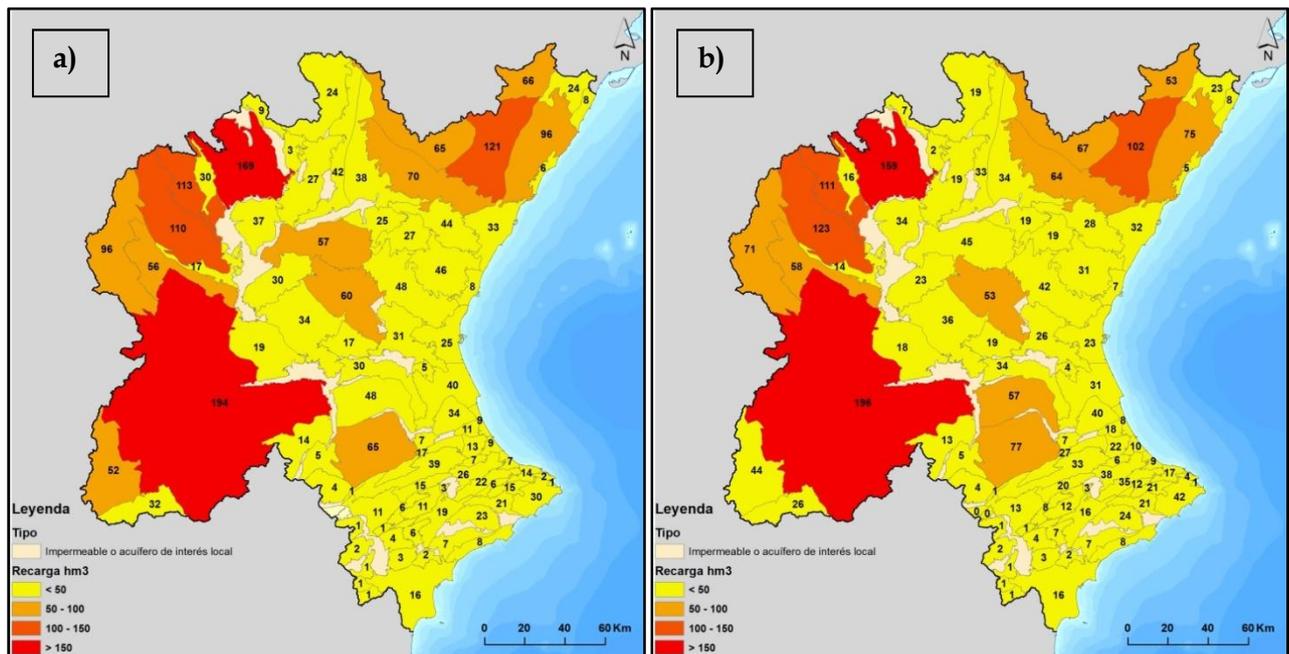


Figura 45. a) Recargas en el modelo Plan Júcar 2015 b) Recargas en el modelo 2016.

6.2.6.4. Recargas de la serie reciente.

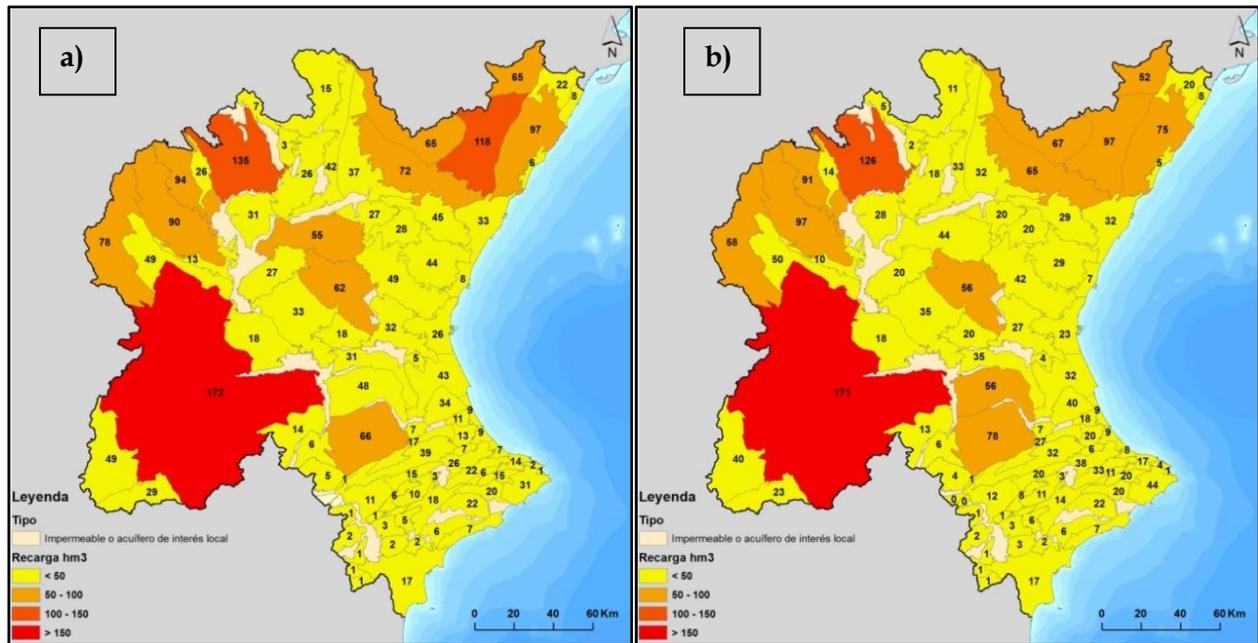


Figura 46. a) Recarga en el modelo Plan Júcar 2015 b) Recarga en el modelo 2016.

6.2.6.5. Pérdidas en río en la serie completa.

En las figuras 47a y 47b se observan las pérdidas de ríos simuladas, en la serie completa, por el modelo Plan Júcar 2015 y el modelo 2016 respectivamente, mientras que en las figuras 48a y 48b se observan las pérdidas de ríos simuladas en la serie reciente.

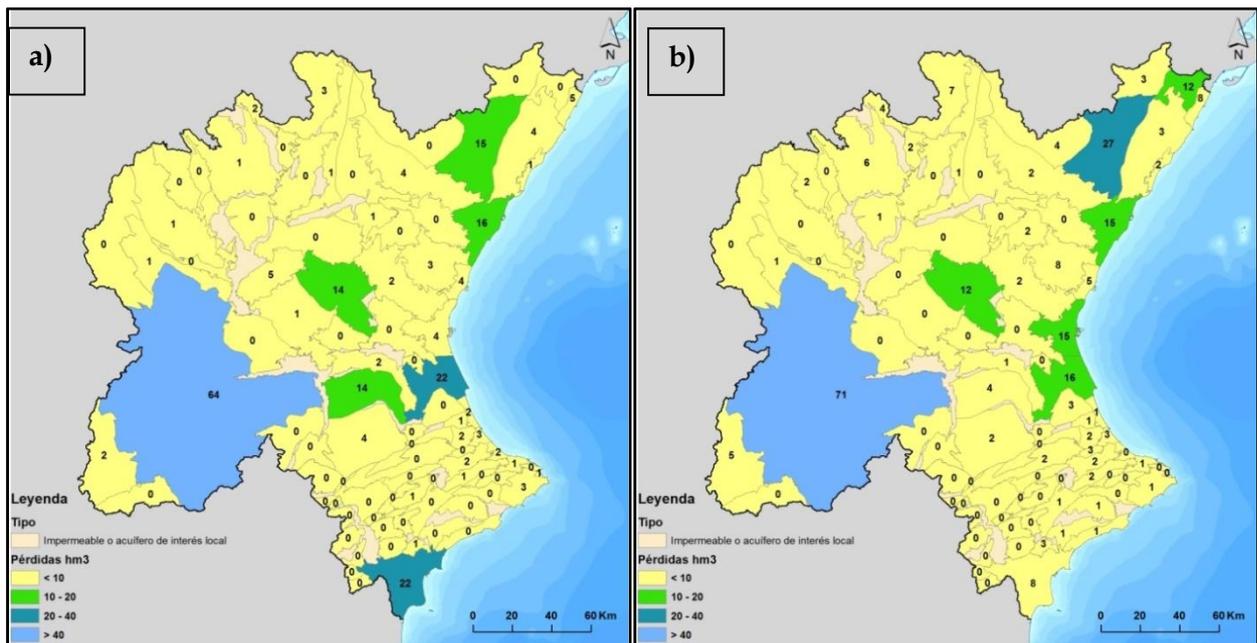


Figura 47. a) Pérdidas en río modelo Plan Júcar 2015 b) Pérdidas en río modelo 2016.

6.2.6.6. Pérdidas en río en la serie reciente.

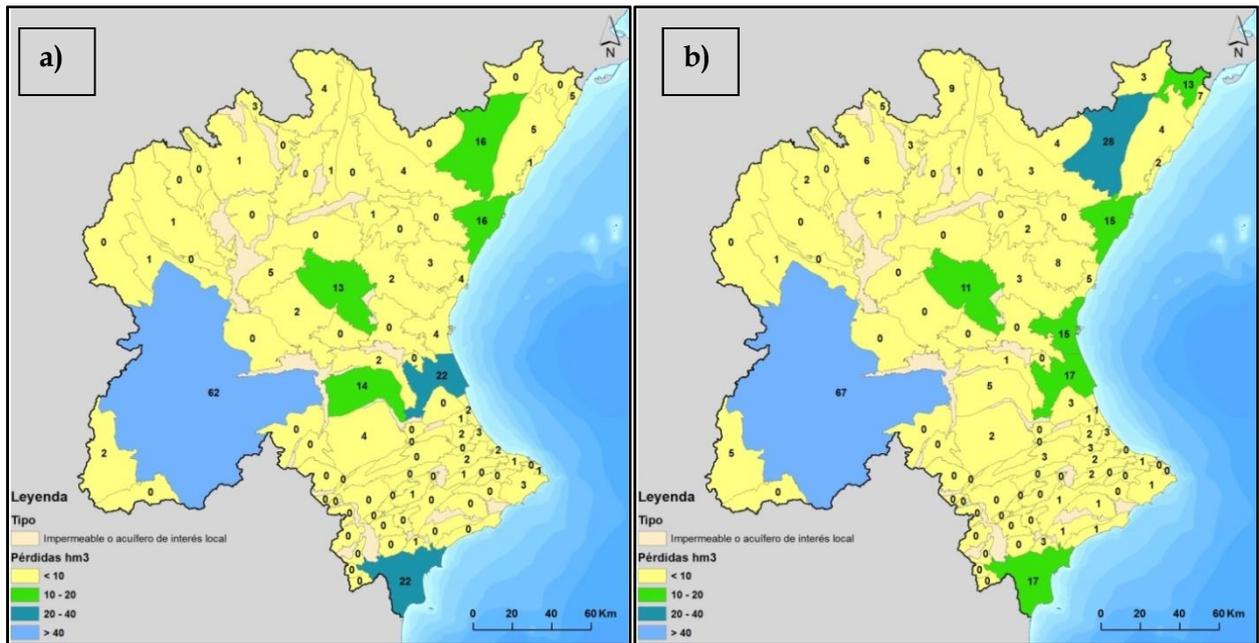


Figura 48. a) Pérdidas en río modelo Plan Júcar 2015 b) Pérdidas en río modelo 2016.

6.2.7. *Evapotranspiración Penman- Monteith.*

En las figuras 49a y 49b se observan los mapas de evapotranspiración potencial correspondientes a los modelos Plan Júcar 2015 y modelo 2016 respectivamente, mientras que en la figura 50 se observa la comparación en las estaciones seleccionadas de la ETP de los modelos con la ETP calculada en los Sistemas de Información Agroclimática para el Regadío.

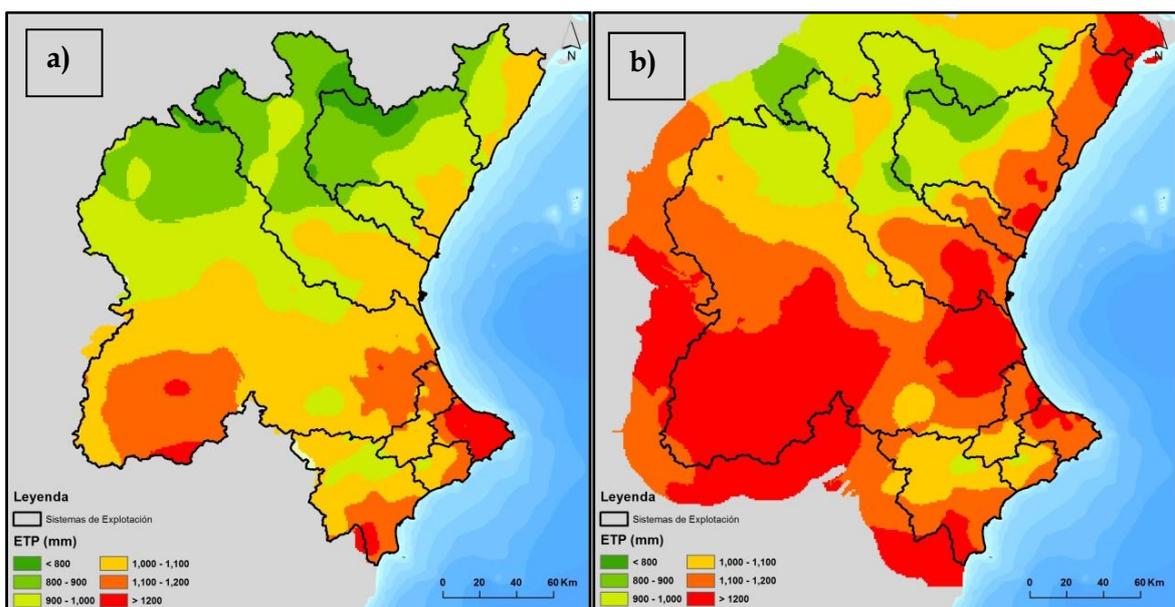


Figura 49. a) ETP Penman Monteith modelo Plan Júcar 2015 b) ETP Penman Monteith modelo 2016.

Mejoras de la componente subterránea y la relación río-acuífero del modelo Patricál en el ámbito de la CHI

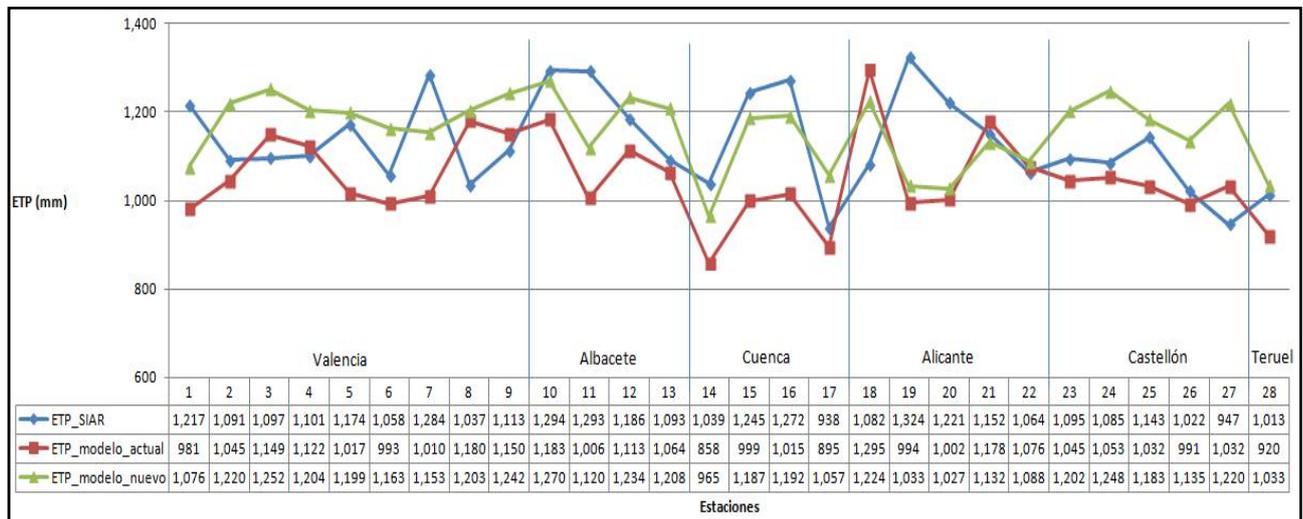


Figura 50. Comparación con ETP calculada por el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío.

6.3. Evaluación del modelo Plan Júcar 2015

Comenzando por los ajustes de caudales en los puntos seleccionados el modelo actual presenta considerando el indicador PBIAS, ajustes satisfactorios y muy buenos en la serie completa mientras que en la serie reciente presentas algunos puntos control con ajustes no satisfactorios.

En el caso del indicador NSE presenta algunos puntos satisfactorios aunque la mayoría de los puntos de control presentan ajustes no satisfactorios para la serie completa, mientras que para la serie reciente todos los puntos de control presentan ajustes no satisfactorios.

En el caso de la piezometría, el indicador NSE presenta ajustes no satisfactorios en su mayoría, aunque algunos piezómetros presentan ajustes satisfactorios, buenos y muy buenos.

En lo que respecta a las transferencias laterales el modelo actual no tenía en cuenta las permeabilidades de las masas, lo cual no representa de manera acertada el flujo subterráneo entre masas.

Las salidas al mar del modelo actual, considerando y tomando como referencias la bibliografía consultada se encuentran en general muy por encima de los valores determinados en otros estudios.

El balance hídrico del modelo actual genera un excedente de 4097 hm³/año para la serie completa y 3883 hm³/año en la serie reciente. Dicho excedente se distribuye en la componente superficial y subterránea y considerando las salidas al mar, genera una aportación a la red fluvial de 3574 hm³/año y 3362 hm³/año respectivamente.

Finalmente el contraste de la evapotranspiración calculada por el SIAR muestra que el modelo Plan Júcar 2015 presenta valores cercanos en las provincias de Valencia y Castellón, no siendo así en las provincias de Albacete, Cuenca, Teruel y Alicante.

6.4. Evaluación del modelo 2016.

Comenzando por los ajustes de caudales en los puntos seleccionados el modelo nuevo presenta considerando el indicador PBIAS, ajustes buenos y muy buenos en su mayoría en la serie completa y dos puntos en la categoría no satisfactorio en la serie completa mientras que en la serie reciente presenta puntos de control con ajustes satisfactorios, buenos y en su mayoría muy buenos y sólo un punto no satisfactorio.

En el caso del indicador NSE presenta respecto del modelo actual el paso de dos puntos de la categoría satisfactorio a bueno y cuatro puntos de no satisfactorio a satisfactorios, siendo el ajuste para el resto de los puntos no satisfactorio en la serie completa, mientras que para la serie reciente existe mejoras en cuatro puntos pasando tres de ellos a la categoría de bueno.

En el caso de la piezometría el indicador NSE presenta ajustes no satisfactorio en su mayoría, aunque algunos piezómetros presentan ajustes satisfactorios, buenos y muy buenos.

En lo que respecta a las transferencias laterales el modelo nuevo considera las permeabilidades de las masas, permitiendo ello, al momento de asignar transferencias lograr un esquema más representativo y acertado del flujo subterráneo entre masas.

Las salidas al mar del modelo nuevo, considerando y tomando como referencias la bibliografía consultada los sistemas de explotación Júcar, Turia y Palancia presentan valores muy similares a los determinados en otros estudios.

El balance hídrico del modelo actual genera un excedente de 3418 hm³/año para la serie completa y 3236 hm³/año en la serie reciente. Dicho excedente se distribuye en la componente superficial y subterránea y considerando las salidas al mar, genera una aportación a la red fluvial de 2933 hm³/año y 2754 hm³/año respectivamente.

Finalmente el contraste de la evapotranspiración calculada por el SIAR muestra que el modelo 2016 presenta valores cercanos en las provincias de Albacete, Cuenca, Teruel y Alicante no siendo así en las provincias de Valencia y Castellón.

7. CONCLUSIONES

El plan hidrológico de la cuenca del Júcar (PHCJ), estima, para cada uno de los sistemas de explotación en los que se encuentra dividida la Demarcación Hidrográfica, los recursos hídricos totales, considerando por un lado los aportes debidos a la escorrentía superficial y por otro lado, las aportaciones provenientes de las descargas subterráneas.

Dicha estimación la efectúa mediante el modelo de simulación PATRICAL, (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua), siendo éste un modelo del ciclo hidrológico distribuido espacialmente y con paso de tiempo de simulación mensual (Pérez, 2005). Este modelo realiza la simulación del ciclo hidrológico en régimen natural o en alterado, por la actividad antrópica, aplicando la formulación de Témez (1977) en cada elemento en el que se discretiza el territorio (p.e. resolución de 1km x 1km), incluyendo las transferencias laterales entre acuíferos, el movimiento del agua a través de la red fluvial, las relaciones río-acuífero (considerando la posibilidad de pérdidas en cauces) y la evolución de la piezometría media de los acuíferos.

Para desarrollar el presente trabajo y a instancias de cumplir con su objetivo de mejorar la componente subterránea y la relación río-acuífero, en primera instancia se avanzó en conocer e identificar las componentes que permiten al modelo PATRICAL la simulación del ciclo hidrológico y a la revisión de diversos trabajos efectuados en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ).

Existen importantes estudios, como el realizado en el marco del Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), del Ministerio de Educación y Ciencia, para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

En él, el IGME generó un conjunto de fichas que constituyó una caracterización básica de cada una de las masas de agua subterránea, centrándose en su espacio físico, geología, litología, permeabilidad, límites y geometría de las formaciones geológicas e hidrogeológicas.

Por otro lado, en el marco de la Actividad 4 de dicho acuerdo, se llevaron adelante trabajos para la identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica en las 90 masas de agua subterránea (MASb) existentes en la demarcación hidrográfica.

En el desarrollo del trabajo, trataron y validaron un gran número de datos foronómicos de diversa naturaleza y procedencia. Esa información les fue útil para caracterizar el modelo conceptual de las relaciones río-acuífero y humedal-acuífero.

También en el marco del acuerdo, en el año 2008 el IGME elaboró el mapa piezométrico de España con los objetivos de lograr un mapa lo más aproximado posible a un estado de régimen natural o influenciado en el menor grado posible, elaborado con los datos de las redes oficiales de control piezométrico existente en cada cuenca hidrográfica. Para la elaboración del mapa en cuestión, utilizó mapas de referencia como el comprendido entre 1970 y 1974 y el mapa piezométrico general elaborado por la CHJ en el 2005 que les ha servido como guía en las áreas con menor densidad de datos.

Finalmente en lo que a revisión respecta, se efectuó la búsqueda de diversos trabajos que pudieran aportar referencias en cuanto a volúmenes de descarga subterránea al Mar Mediterráneo registrados en el ámbito de la CHJ.

En segunda instancia, para la elaboración del trabajo, la metodología aplicada, fue partir de un modelo actual, llamado **“modelo Plan Júcar 2015”**, al que no se le ha realizado ningún ajuste, para pasar a un modelo nuevo, llamado

“**modelo 2016**”, al que sí se le han realizado ajustes. De ésta manera y a través de distintos aspectos desarrollados se evaluó la mejora del modelo.

El modelo requiere la incorporación de series históricas de precipitación y temperatura, las que proceden de la Agencia Española de Meteorología, AEMET, y del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la CHJ. Se han utilizado los datos históricos que comprenden medidas desde octubre de 1940 hasta septiembre del 2014. Para contrastar los modelos fue utilizada la serie hidrológica completa, período 1940/41-2013/2014, y la serie reciente, período 1980/81-2013/14.

El modelo Plan Júcar 2015 cuenta dentro de su información de base, con un mapa geológico, que tiene en cuenta la naturaleza de los materiales (rocas y sedimentos) que aparecen en la superficie terrestre, confiriéndole a todo el ámbito estudiado diferentes valores de infiltración máxima, parámetro que separa la escorrentía superficial de la subterránea. Como primer ajuste, mencionado mapa fue reemplazado por el mapa litoestratigráfico de España que además de lo considerado por el mapa geológico, también considera aspectos hidrogeológicos fundamentalmente, lo que llevó a una reclasificación de la infiltración máxima en el ámbito de estudio.

Para juzgar la mejora del modelo Plan Júcar 2015 se abordaron diversos indicadores: en primer lugar se analizaron los caudales en régimen natural, simulados respecto a los observados, en 13 puntos de control considerados representativos dentro del ámbito estudiado, utilizando indicadores de bondad como el Percent bias y el indicador de eficiencia Nash-Sutcliffe; de igual manera con este último indicador se analizó la piezometría a través de la red operativa con la que cuenta la CHJ. Mediante el estudio de caracterización de las masas se revisaron las 90 fichas elaboradas y utilizando los parámetros “tipo” y “sentido de flujo” y haciendo uso de herramientas de información geográfica se logró representar un mapa de masas con la permeabilidad de sus límites y el sentido del flujo si la ficha lo indicaba. La revisión de antecedentes, en su mayoría estudios elaborados por el IGME, sobre descargas subterráneas al Mar Mediterráneo, permitió tomar referencias y ser consideradas al momento de

establecer transferencias laterales entre masas subterráneas. Otro aspecto utilizado en la evaluación del modelo es el análisis global del ciclo hidrológico, estimando los recursos hídricos en régimen natural a través del modelo, no sólo de la componente superficial, sino también de las diferentes variables de la componente subterránea, tales como la infiltración por lluvia, pérdidas en ríos, descargas a ríos y salidas al mar. Por último se evaluaron los mapas de evapotranspiración potencial, utilizando información proveniente de Sistemas de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Existe una red de 361 estaciones que alimentan estos sistemas y permiten obtener desde sus sitios web la ETP calculada mediante el método Penman-Monteith. Es así que se seleccionaron estaciones de las provincias de Valencia, Teruel; Alicante, Castellón y Albacete para contrastar la ETP de los modelos.

Como tercera instancia y como resultado de los trabajos efectuados por el IGME en la identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico, se incorporó al modelo el mapa de la relación río ganador/perdedor/variable con respecto a los acuíferos de la demarcación, como así también un mapa con una selección de las surgencias puntuales, identificadas por el IGME, definidas con carácter de “principal”, por que permitieron cuantificar las relaciones río-acuífero y aquellas de carácter general que no fueron utilizadas para la cuantificación de las relaciones pero que superaban los 0.5 hm³/año. Es importante destacar que hasta el momento el modelo no contaba con esta información incorporada.

Finalmente se contrastaron los modelos y atendiendo a cada uno de los aspectos evaluados se puede afirmar que en el caso de los caudales simulados el modelo 2016 es superador al Plan Júcar 2015, obteniendo mejores ajustes, principalmente en el sistema de explotación Júcar. En el caso de la piezometría no es tan clara la mejora ya que en ambos modelos la mayoría de los piezómetros presentan ajustes no satisfactorios. En cuanto a las transferencias laterales, claramente significa una mejora sustancial del modelo Plan Júcar 2015, ya que permite definir las de un modo más cercano a como realmente ocurren. Las salidas al mar en el modelo 2016, también ha mejorado, como se puede observar

al comparar las salidas en los sistemas de explotación Júcar, Turia y Palancia con las referencias consultadas. El resto de los sistemas, aún mantienen salidas al mar, muy superiores a lo que afirman los estudios. Desde el punto de vista del balance del ciclo hidrológico, el modelo actual con el aumento de la evapotranspiración genera 679 hm³/año de aportaciones. Las descargas disminuyen entre 122 hm³/año y 140 hm³/año, las pérdidas en ríos aumentaron entre 67 hm³/año y 70 hm³/año mientras que las salidas al mar disminuyeron entre 38 hm³/año y 39 hm³/año para la serie completa y la serie reciente respectivamente. Considerando que las aportaciones simuladas en el modelo Plan Júcar 2015 podrían estar sobreestimadas y que el modelo 2016 ha presentado un mejor ajuste, principalmente en el sistema de explotación Júcar, para ajustar aún más las aportaciones surgen dos frentes a ser tenidos en cuenta: aumentar la evapotranspiración y aumentar las salidas al mar. Finalmente el contraste de la evapotranspiración calculada por el SIAR muestra que el modelo 2016 presenta valores cercanos en las provincias de Albacete, Cuenca, Teruel y Alicante no siendo así en las provincias de Valencia y Castellón donde los valores de la ETP SIAR son más bajos que los del modelo 2016 y más parecidos a los del modelo Plan Júcar 2015.

Desde una visión general y considerando todos los aspectos evaluados, el modelo 2016, ha sido superador al modelo Plan Júcar 2015.

8. LÍNEAS FUTURAS

Ante las conclusiones desarrolladas y los trabajos existentes mencionados en el presente trabajo, surgen posibles líneas futuras que significarían continuar con la mejora del modelo.

Una primera línea futura puede ser entorno al inventario de manantiales realizado por el IGME, identificando aquellos que resulten más significativos, estableciendo un criterio claro de decisión para su elección. También profundizar el conocimiento de las aportaciones subterráneas a humedales como la Albufera de Valencia.

Una segunda línea futura puede ser profundizar en el conocimiento de las características hidrodinámicas de los acuíferos, coeficientes de almacenamiento, transmisividades, y el ajuste del modelo a los niveles piezométricos.

Una tercera y última línea futura puede ser profundizar en el ajuste de la ETP, puesto que las provincias de la costa mediterránea como Valencia y Castellón parecen tener mayor desajuste entre la información de otros organismos y la utilizada en el modelo 2016 y considerando que una disminución en el modelo 2016 de los valores de la ETP puede traducirse en mayores salidas al mar, ello iría en un sentido contrario a las referencias bibliográficas que muestran caudales menores a los modelados.

9. REFERENCIAS

- Ballesteros, B.J., López, J., Grima, J., García, O. & Gago, M. (2001). Recuperación de la calidad del acuífero costero de la Plana de Javea mediante la explotación sostenible de sus recursos. Investigación, gestión y recuperación de acuíferos contaminados. Madrid, I- 183-194
- Ballesteros, B. J., Mejías, M., Antón-Pacheco, C., Domínguez, J. A., Garcia-Orellana, J., Garcia-Solsona, E., & Masqué, P. (2012). Methodological study of submarine groundwater discharge from a karstic aquifer in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Hydrology*. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.020
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ). (2015). Plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Júcar - ciclo de planificación hidrológica 2015 - 2021 - memoria, 896
- Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ) www.chj.es
- Gómez Gómez, J.D.D. (2003). Actualización del estado de la intrusión marina en el acuífero de la plana de Sagunto (Valencia, España), 87-93.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143. doi: 10.1061/(ASCE) 1084-0699(1999)4:2(135)
- IGME, (1966). Jornadas sobre el libro blanco de las aguas subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España. 77 pp. Madrid
- IGME, (1988). Las aguas subterráneas en la Comunidad Valenciana. Uso, calidad y perspectivas de utilización. Colección informe. Instituto Geológico y Minero de España. 298 pp. Madrid
- IGME (2009). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. Demarcación Hidrográfica del Júcar. Instituto Geológico y Minero de España. 141 pp.

Instituto Geológico y Minero de España; Universitat Jaume I de Castelló (IGME - UJI, 2009b). Descargas ambientales al mar en las masas de agua subterránea costeras de la Provincia de Castellón (Cuenca del Júcar). Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua, Madrid

MIMAM, E. (2000). Libro Blanco del Agua en España

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente
www.mapama.gob.es

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. doi: 0.13031/2013.23153

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. Doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6

Pérez-Martín M.A. (2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Europea del Agua. Ph.D. Tesis, Universidad Politécnica de Valencia, España

Pérez-Martín, M. A., Estrela, T., Andreu, J., & Ferrer, J. (2014). Modeling water resources and river-aquifer interaction in the Júcar River Basin, Spain. *Water Resources Management*, 28(12), 4337–4358. doi: 10.1007/s11269-014-0755-3

Renau - Pruñonosa, A. (2013). Nueva herramienta para la gestión de las aguas subterráneas en acuíferos costeros. Volumen ecológico de remediación (ver). Metodología y aplicación a la Plana de Oropesa - Torreblanca (Masa de agua subterránea 080.110). Tesis doctoral. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana

Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla La Mancha. Sistema de Información Agroclimática para el Regadío www.crea.uclm.es

Sistema de Información Agroclimática para el Regadío. España
www.eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx

Témez JR (1977). Modelo matemático de transformación precipitación-aportación. ASINEL