

Trabajo Fin de Máster

Evaluación de las posibilidades de abastecimiento con agua subterránea a la ciudad de Valencia y su área metropolitana

**Intensificación: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS
HÍDRICOS**

Autor:

ARIADNA CALLEA

Tutor:

EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor/es:

HELIODORO SANCHO IRANZO

SEPTIEMBRE, 2019



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Evaluación de las posibilidades de abastecimiento con agua subterránea a la ciudad de Valencia y su área metropolitana.

Título del TFM en inglés: Evaluation of the possibilities of supplying groundwater to the city of Valencia and its metropolitan area.

Título del TFM en Valenciano: Avaluació de les possibilitats d'abastiment amb aigua subterrània a la ciutat de València i la seua àrea metropolitana.

Alumno: ARIADNA CALLEA

Tutor: EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor/es: HELIODORO SANCHO IRANZO

Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE DE 2019

Resumen

El cambio climático que está experimentado el área mediterránea en los últimos años se está traduciendo en una reducción de las precipitaciones medias anuales, así como en un aumento de la frecuencia y duración de los períodos de sequía. Como consecuencia de ello, los niveles máximos alcanzados en los embalses de cabecera de las cuencas de los ríos Júcar y Turia, en los últimos años, están por debajo de los conseguidos en épocas anteriores, habiendo sido necesario en el último año iniciar la aplicación de Planes de Gestión de Sequías. Esto último ha supuesto la reducción de los aportes de agua destinada a riego agrícola, así como el inicio de campañas de concienciación para estimular el ahorro de agua destinada al consumo humano.

El abastecimiento de agua potable a Valencia y su área metropolitana depende casi totalmente del agua superficial procedente de los ríos Turia y Júcar, en este último caso a través del Canal de Trasvase Júcar-Turia, que se trata en las plantas potabilizadoras de La Presa y El Realón, situadas en los términos municipales de Manises y Picassent, respectivamente. El agua superficial producida en La Presa es complementada con agua subterránea procedente de un pozo radial y varios pozos situados en el interior de la planta potabilizadora.

Dentro del área metropolitana existen poblaciones que se abastecen total o parcialmente con agua subterránea procedente de pozos propios, que en la mayoría de los casos no es potable, siendo necesario tratarla o mezclarla con agua procedente de las plantas potabilizadoras de La Presa y El Realón a través del Sistema Básico Metropolitano, para poder cumplir con la normativa de aguas destinadas a consumo humano.

Con el fin de minimizar la dependencia de los ríos Turia y Júcar para el abastecimiento de agua potable a Valencia y su área metropolitana, es necesario incorporar recursos alternativos que garanticen el suministro a medio y largo plazo, sin necesidad de llegar a aplicar restricciones que afecten a la economía local, así como a la vida normal de las personas. Las aguas subterráneas son el principal recurso a considerar.

Este trabajo presenta un estudio de las posibilidades de explotación de los acuíferos de la Plana de Valencia con el fin de suministrar agua a la ciudad y su entorno. Para ello se diseña y construye un modelo numérico de flujo de agua subterránea de los acuíferos de las planas norte y sur de Valencia, utilizando el código MODFLOW (Mc Donald, y Harbaugh, 1984) y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, 2009). Posteriormente el modelo se calibrará para conseguir reproducir el comportamiento del sistema lo más fielmente posible a la realidad.

Se propone una configuración de pozos y caudales de extracción en la ciudad (unos 1000 l/s continuamente más 600 l/s en caso de emergencia) y en el área metropolitana (1000 l/s en caso de emergencia) y se evalúa la respuesta del sistema en el marco de una serie de escenarios futuros que tengan en cuenta posibles situaciones de sequía y/o cambio climático. El primer escenario estudia la situación actual del sistema. El segundo escenario evalúa el efecto de las nuevas extracciones en continuo con un horizonte en el año 2027 sin cambio climático. Los escenarios tercero y cuarto plantean una disminución en los recursos hídricos del 12% y del 20%, respectivamente así como la puesta en marcha de pozos de emergencia.

Para el cumplimiento de los objetivos es de vital importancia conocer bien la zona a estudiar, sus propiedades físicas, las detracciones del sistema, series y datos históricos observados, así como el funcionamiento de las formaciones hidrogeológicas y con qué elementos interactúan, aspectos que requieren de herramientas como un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual permite procesar correctamente la cantidad de datos a implementar en el modelo.

Así se espera construir una herramienta práctica y realista que sirva de soporte para una gestión y planificación sostenible de los recursos hídricos del acuífero de la Plana de Valencia.

Palabras clave: modelación matemática, agua subterránea, Plana de Valencia, acuíferos.

Resum

El canvi climàtic que està experimentat l'àrea mediterrània en els últims anys s'està traduint en una reducció de les precipitacions mitjanes anuals, així com un augment de la freqüència i duració dels períodes de sequera. Com a conseqüència d'això, els nivells màxims aconseguits en els embassaments de capçalera de les conques del Xúquer i del Túria, en els últims anys, estan per davall dels aconseguits en èpoques anteriors, havent sigut necessari en l'últim any iniciar l'aplicació de Plans de Gestió de Sequeres. Això últim ha suposat la

reducció de les aportacions d'aigua destinada a reg agrícola, així com l'inici de campanyes de conscienciació per a estimular l'estalvi d'aigua destinada al consum humà.

El proveïment d'aigua potable a València i la seua àrea metropolitana depèn quasi totalment de l'aigua superficial procedent dels rius Túria i Xúquer, en aquest últim cas a través del Canal de Transvasament Xúquer-Túria, que es tracta en les plantes potabilitzadores de La Presa i El Realón, situades en els termes municipals de Manises i Picassent, respectivament. L'aigua superficial produïda en La Presa és complementada amb aigua subterrània procedent d'un pou radial i diversos pous situats a l'interior de la planta potabilitzadora.

Dins de l'àrea metropolitana existeixen poblacions que es proveeixen totalment o parcialment amb aigua subterrània procedent de pous propis, que en la majoria dels casos no és potable, sent necessari tractar-la o mesclar-la amb aigua procedent de les plantes potabilitzadores de La Presa i El Realón a través del Sistema Bàsic Metropolità, per a poder complir amb la normativa d'aigües destinades a consum humà.

Amb la finalitat de minimitzar la dependència dels rius Túria i Xúquer per al proveïment d'aigua potable a València i la seua àrea metropolitana, és necessari incorporar recursos alternatius que garantisquen el subministrament a mitjà i llarg termini, sense necessitat d'arribar a aplicar restriccions que afecten l'economia local, així com a la vida normal de les persones. Les aigües subterrànies són el principal recurs a considerar.

Aquest treball presenta un estudi de les possibilitats d'explotació dels aquífers de la Plana de València amb la finalitat de subministrar aigua a la ciutat i el seu entorn. Per a això es dissenya i construeix un model numèric de flux d'aigua subterrània dels aquífers de les planes nord i sud de València, utilitzant el codi MODFLOW (Mc Donald. i Harbaugh, 1984) i la interfície gràfica d'usuari ModelMuse (Winston, 2009). Posteriorment el model es calibrarà per a aconseguir reproduir el comportament del sistema el més fidelment possible a la realitat.

Es proposa una configuració de pous i cabals d'extracció a la ciutat (uns 1000 l/s contínuament més 600 l/s en cas d'emergència) i en l'àrea metropolitana (1000 l/s en cas d'emergència) i s'avalua la resposta del sistema en el marc d'una sèrie d'escenaris futurs que tinguen en compte possibles situacions de sequera i/o canvi climàtic. El primer escenari estudia la situació actual del sistema. El segon escenari avalua l'efecte de les noves extraccions en continu amb un horitzó l'any 2027 sense canvi climàtic. Els escenaris tercer i quart plantegen una disminució en els recursos hídrics del 12% i del 20%, respectivament així com la posada en marxa de pous d'emergència.

Per al compliment dels objectius és de vital importància conèixer bé la zona a estudiar, les seues propietats físiques, les detraccions del sistema, sèries i dades històriques observades, així com el funcionament de les formacions hidrogeològiques i amb quins elements interactuen, aspectes que requereixen d'eines com un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG), el qual permet processar correctament la quantitat de dades a implementar en el model.

Així s'espera construir una eina pràctica i realista que servisca de suport per a una gestió i planificació sostenible dels recursos hídrics de l'aqüífer de la Plana de València.

Paraules clau: modelació matemàtica, aigua subterrània, Plana de València, Albufera, aqüífers.

Summary

The climate change that the Mediterranean area is undergoing in recent years is being translated into a reduction in annual average rainfall, as well as an increase in the frequency and duration of drought periods. As a result, the maximum levels reached in the head reservoirs of the Júcar and Turia basins, in recent years, are below those achieved in previous times, having been necessary in the last year to start the application of Plans of Drought Management. The latter has led to the reduction of the contributions of water destined to agricultural irrigation, and the beginning of awareness campaigns to stimulate the saving of water destined for human consumption as well.

The supply of drinking water to Valencia and its metropolitan area depends almost entirely on surface water from the Turia and Júcar rivers, in the latter case through the Júcar-Turia Transfer Channel, which is treated at the La Presa water treatment plants and El Realón, located in the terms of Manises and Picassent, respectively. The surface water produced in La Presa is complemented by underground water from a radial well and several wells located inside the water treatment plant.

Within the metropolitan area there are populations that are totally or partially supplied with groundwater from their own wells, which in most cases is not potable, being necessary to treat or mix it with water from the water treatment plants of La Presa and El Realón through the use of the Metropolitan Basic System, in order to accomplish with the regulations for water intended for human consumption.

In order to minimize the dependence of the Turia and Júcar rivers for the supply of drinking water to Valencia and its metropolitan area, it is necessary to incorporate alternative resources that guarantee the supply in the medium and long term, without the need to apply restrictions that affect to the local economy, as well as to the normal life of people. Groundwater is the main resource to consider.

This paper presents a study of the possibilities of use of the aquifers of the Plana of Valencia with a view to supply water to the city and its surroundings. For this, a numerical model of groundwater flow of the aquifers of the north and south flats of Valencia is designed and made, using the MODFLOW code (Mc Donald and Harbaugh, 1984) and the graphical user interface ModelMuse (Winston, 2009). Subsequently, the model will be calibrated to reproduce the behavior of the system as closely as possible to reality.

A configuration of wells and extraction flows is proposed in the city (about 1000 l/s continuously plus 600 l / s in case of emergency) and into the metropolitan area (1000 l/s in



case of emergency) and the response is evaluated of the system within the framework of a series of future scenarios that take into account possible situations of drought and/or climate change. The first scenario studies the current situation of the system. The second scenario assesses the effect of new continuous extractions with a horizon in 2027 without climate change. The third and fourth scenarios consider a decrease in water resources of 12% and 20%, respectively, as well as the start-up of emergency wells.

For the fulfillment of the objectives it is vitally important to know the area to be studied, its physical properties, the detractions of the system, series and historical data observed, as well as the operation of the hydrogeological formations and with what elements they interact, aspects that require tools such as a Geographic Information System (GIS), which allows to correctly process the amount of data to be implemented in the model.

Thus, it is hoped to build a practical and realistic tool that will support a sustainable management and planning of the water resources of the aquifer of Valencia.

Keywords: mathematical modelling, groundwater, Plana of Valencia, Albufera, aquifer.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la beca que Global Ómnium, en el marco de la Cátedra que la empresa tiene con el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, me ha concedido para llevar a cabo mi trabajo de fin de máster.

También desearía agradecer a mi tutor Eduardo Cassiraga por prestarme su tiempo siempre que le tocaba la puerta del despacho y escuchar mis ideas con respeto y dedicación, sin olvidar su gran conocimiento en la hidrogeología y su don para enseñar.

A mi tutor de empresa Heliodoro Sancho Iranzo por resolernos las dudas con la mayor celeridad posible siempre que lo solicitamos y brindarme la posibilidad de desarrollar este proyecto.

A mi tutor de la carrera Miguel Ángel Pérez Martín por su ayuda desinteresada y por despertar en mí el interés en la investigación.

Al profesorado del MIHMA que gracias a su profesionalidad, calidad y exigencia han hecho de mí la ingeniera en la que me he convertido.

A mis papás, a los amigos que he ganado en el camino, y a mi compañero de vida Adrián, por compartir juntos esta aventura.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se presentarán en las VI Jornadas de Ingeniería del Agua que tendrán lugar en la ciudad de Toledo en octubre de 2019.



ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Estado del arte. Modelos previos.....	4
2. Modelo conceptual	7
2.1 Descripción del área.....	7
2.2 El sistema hidrológico	7
2.3 El sistema hidrogeológico.....	8
2.3.1 Límites del sistema	8
2.3.2 Unidades hidrogeológicas.....	10
2.3.3 Dominios hidrogeológicos.....	14
2.4 Modelo hidrogeológico conceptual. Entradas y salidas al sistema.....	15
2.4.1 Lago de la Albufera	16
3. Modelo propuesto	19
3.1 Discretización espacial	20
3.1.1 Topografía.....	21
3.1.2 Estructura geológica	21
3.2 Discretización temporal	23
3.3 Parámetros hidráulicos.....	24
3.4 Condiciones de borde.....	27
3.4.1 Límites laterales.....	28
3.4.2 Cuerpos de agua superficial.....	30
3.4.3 Drenajes	31
3.4.4 Recarga	34
3.5 Condición inicial.....	36
3.6 Bombeos	37
3.6.1 Bombeos Global Ómnium	37
3.6.2 Bombeos CHJ	42
3.6.3 Bombeos duplicados AAVV y CHJ	43
3.6.4 Achiques del metro de Valencia	44
3.6.5 Bombeos totales.....	45
4. Calibración del modelo en régimen transitorio y análisis de los resultados.....	47
4.1 La calibración en régimen influenciado.....	47



4.2 La calibración de las condiciones de contorno	48
4.3 La calibración de las propiedades físicas de los acuíferos.....	48
4.4 Los piezómetros de control.....	51
4.5 Balances de masa del sistema	51
4.5.1 Balance global	51
4.5.2 Balance parcial.....	53
4.6 Análisis piezométrico	59
4.7 Relación río-acuífero	71
5. Aplicación del modelo. Escenarios	73
5.1 Escenario 1: situación actual.....	74
5.2 Escenario 2: horizonte 2027 sin efecto del cambio climático	74
5.2.1 Condiciones de borde	74
5.2.2 Recarga: precipitación y retornos de riego	74
5.2.3 Bombeos	75
5.2.4 Balances.....	76
5.3 Escenario 3: horizonte 2027 con reducción de la precipitación del 12%	78
5.3.1 Recarga: precipitación y retornos de riego	78
5.3.2 Bombeos	78
5.3.3 Balances.....	79
5.4 Escenario 4: horizonte 2027 con reducción de la precipitación del 20%	82
5.4.1 Recarga: precipitación y retornos de riego	82
5.4.2 Bombeos	82
5.4.3 Balances.....	82
6. Calidad de las aguas y del suelo	89
7. Conclusiones.....	95
8. Líneas futuras	97
9. Bibliografía.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la precipitación y la temperatura para el periodo 1980/1981-2016/2017. Fuente: Elaborado con datos del modelo PATRICAL.	1
Figura 2. Serie restituida en Arquillo de San Blas (1940/1941-2011/2012). Fuente: Modificado de Plan Hidrológico Nacional, CHJ. Ciclo 2015/2021 (2015a).....	2
Figura 3. Delimitación de masas de agua subterránea en la DH J. Fuente: Modificado de Plan Hidrológico Nacional, CHJ. Ciclo 2015/2021 (2015a).	3
Figura 4. Visión conjunta de la Plana de Valencia Norte y Sur junto al área metropolitana de Valencia a la que da servicio la empresa Aguas de Valencia.	7
Figura 5. Delimitación del sistema de estudio.	9
Figura 6. Geología. Según Cartografía 1:200.00 IGME. Fuente: Sahuquillo (2012).....	10
Figura 7. Geología. Leyenda. Fuente: Sahuquillo (2012).....	11
Figura 8. Corte litoestatigráfico VII-VII' aguas abajo de la Albufera en la Plana de Valencia Sur. Fuente: Modificado de Ballesteros et al. (2012).	13
Figura 9. Corte litoestatigráfico X-X' sobre la Plana de Jaraco en la Plana de Valencia Sur. Fuente: Modificado de Ballesteros et al. (2012).....	13
Figura 10. Profundidad del muro del acuífero (izquierda) y espesor saturado (derecha). Fuente: Sahuquillo (2012).....	14
Figura 11. Mapa de permeabilidades de la Plana de Valencia. Fuente: IGME (2006).....	15
Figura 12. Parque Natural y lago de la Albufera de Valencia. Fuente: CHJ (2003).	17
Figura 13. Evolución mensual de los niveles medios en el lago. Fuente: Modificado de C.H.J. (2007).....	18
Figura 14. Distribución anual piezométrica del pozo 08.26.103 cerca de Sollana. Fuente: Elaboración propia con datos de la C.H.J.	18
Figura 15. Captura del modelo con las celdas activas e inactivas de la primera capa.....	20
Figura 16. Captura del modelo con las celdas activas e inactivas de las capas 2 (izquierda) y 3,4 (derecha).	21
Figura 17. Estructura geológica resultante del acuífero en el entorno Albufera.	23
Figura 18. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d consideradas en el modelo numérico para los materiales cuaternarios de la capa superior.	25
Figura 19. Distribución del rendimiento específico S_y para los materiales cuaternarios de la capa superior.	25
Figura 20. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d (izquierda) y rendimiento específico S_y (derecha) considerados en el modelo numérico para los materiales terciarios de la 2ª capa.	26

Figura 21. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d y del rendimiento específico S_y considerados en el modelo numérico para los materiales terciarios de la 3ª capa.	26
Figura 22. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d (izquierda) y del rendimiento específico S_y (derecha) consideradas en el modelo numérico para los materiales mesozoicos de la última capa.	27
Figura 23. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.25.009 en la Plana de Sagunto.	29
Figura 24. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.26.043 en el contorno de Sierra de las Agujas.	30
Figura 25. Mapa de la relación río ganador/perdedor/variable con respecto al acuífero de la DHJ. Fuente: IGME (2010).	31
Figura 26. Localización de los canales de riego y el lago de la Albufera en ModelMuse. ...	33
Figura 27. Localización de los humedales, manantiales y del lago de la Albufera en ModelMuse.	33
Figura 28. Evolución anual de las recargas consideradas en el modelo. Periodo 1980/1981-1981/2017.	34
Figura 29. Distribución de la recarga de lluvia definida en ModelMuse según zonas de PATRICAL.	35
Figura 30. Zonificación de las UDAs definida en ModelMuse para recarga por retorno agrícola.	35
Figura 31. Alturas piezométricas iniciales definidas en ModelMuse. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.	36
Figura 32. Esquema general del abastecimiento al área metropolitana de Valencia. Fuente: http://www.benetusser.es/sites/default/files/presentacion_emshi_master_de_gestion_del_agua_mar_2017.pdf	38
Figura 33. Situación detallada de los pozos de la ETAP de La Presa.	38
Figura 34. Plano de situación de los sondeos de investigación realizados por la CHJ.	39
Figura 35. Croquis del pozo interior 12 Bis de la ETAP de La presa.	40
Figura 36. Evolución anual de los bombeos realizados en la ETAP de La Presa por la empresa Global Ómnium.	40
Figura 37. Ubicación de los pozos de bombeo utilizados por la empresa Global Ómnium.	41
Figura 38. Evolución anual de los bombeos realizados por la empresa Global Ómnium.	41
Figura 39. Ubicación de los pozos de bombeo de la CHJ.	42
Figura 40. Evolución anual de los bombeos realizados por la CHJ.	42

Figura 41. Comparación de bombeos en un punto cercano al parque Gulliver.....	43
Figura 42. Puntos de achique de las líneas de metro 1,3 y 5.	44
Figura 43. Localización de los puntos de achique de las líneas de metro 1,3 y 5.	45
Figura 44. Evolución anual de los bombeos totales realizados sobre la Plana de Valencia	45
Figura 45. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d consideradas en el modelo numérico para los materiales cuaternarios de la capa superior tras la calibración.	49
Figura 46. Distribución del rendimiento específico S_y (izquierda) y el almacenamiento específico S_s (derecha) para los materiales cuaternarios de la capa superior tras la calibración.....	50
Figura 47. Ubicación de los pozos de observación.....	51
Figura 48. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado. Periodo 1980/1981-2016/2017.	52
Figura 49. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado. Periodo 1980/1981-2016/2017.....	53
Figura 50. Discretización espacial de las zonas de interés definidas para la ejecución del balance parcial en formato Excel (izquierda) y vista en ModelMuse (derecha).....	54
Figura 51. Entradas al acuífero en la zona de la Albufera.....	58
Figura 52. Salidas del acuífero en la zona de la Albufera	58
Figura 53. Alturas piezométricas resultantes en régimen influenciado de las 4 capas del acuífero de la Plana.....	59
Figura 54. Mapa de celdas inundadas en régimen transitorio. Enero 2017 (arriba izquierda), septiembre 2017 (arriba derecha), enero 2007 (abajo izquierda) y septiembre 2007 (abajo derecha).....	61
Figura 55. Superposición de la superficie actual del lago y en época medieval. Modificado de Palop et al. (2015).	62
Figura 56. Calibración de los pozos de observación para el régimen transitorio. Periodo 1980/1981-2016/2017.....	68
Figura 57. Alturas piezométricas observadas versus las simuladas en régimen transitorio. Periodo 1980/1981-2016/2017.....	69
Figura 58. Histograma de residuos para todas las observaciones.	70
Figura 59. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado sin cambio climático. Periodo 1980/1981-2026/2027.	77
Figura 60. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado. Periodo 1980/1981-2026/2027.....	77

Figura 61. Ubicación de los pozos en continuo y de las estaciones de bombeo propuestas para el escenario 3b y 4b.....	79
Figura 62. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12%. Periodo 1980/1981-2026/2027.	80
Figura 63. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12% y funcionamiento de pozos de sequía. Periodo 1980/1981-2026/2027.	80
Figura 64. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12%. Periodo 1980/1981-2026/2027.	81
Figura 65. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12% y funcionamiento de pozos de sequía. Periodo 1980/1981-2026/2027.	81
Figura 66. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20%. Periodo 1980/1981-2026/2027.	83
Figura 67. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20% y funcionamiento de pozos de sequía. Periodo 1980/1981-2026/2027.	83
Figura 68. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20%. Periodo 1980/1981-2026/2027.	84
Figura 69. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20% y funcionamiento de pozos de sequía. Periodo 1980/1981-2026/2027.	84
Figura 70. Entradas a través de la línea de costa Norte superior.	86
Figura 71. Salidas a través de la línea de costa Norte superior.....	86
Figura 72. Entradas a través de la línea de costa Norte inferior.	86
Figura 73. Salidas a través de la línea de costa Norte inferior.....	87
Figura 74. Entradas a través de la línea de costa Sur superior.....	87
Figura 75. Salidas a través de la línea de costa Sur superior.	87
Figura 76. Entradas a través de la línea de costa Sur inferior.....	88
Figura 77. Salidas a través de la línea de costa Sur inferior.	88
Figura 78. Piezómetros de la red de calidad de aguas subterráneas de la CHJ. Fuente: IIAMA. (2012).....	89
Figura 79. Piezómetros de la red de operativa de masas de agua subterránea escogidos.	90



Figura 80. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.131.CA002 de la serie operativa.....	91
Figura 81. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.131.CA004 de la serie operativa.....	91
Figura 82. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.141.CA008 de la serie operativa.....	92
Figura 83. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.141.045 de la serie operativa.....	92
Figura 84. Mapa Corine de usos del suelo y ubicación de los pozos de bombeo continuos y de emergencia de Global Ómnium. Fuente: modificado del Centro Nacional de Información Geográfica.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Masas de agua en riesgo de no cumplimiento. Fuente: modificado de Sahuquillo (2012).....	8
Tabla 2. Características de los distintos dominios hidrogeológicos. Fuente: IGME (2006).	14
Tabla 3. Valores de las permeabilidades según dominio. Elaboración propia con datos de Custodio et al. (1983) y Freeze et al. (1979).....	15
Tabla 4. Coordenadas del vértice NO del modelo.	21
Tabla 5. Profundidades de los pozos de la ETAP de La Presa.	39
Tabla 6. Achiques líneas de metro 1,3 y 5.....	44
Tabla 7. Dominios de permeabilidad para el modelo calibrado y según IGME (2006)...	49
Tabla 8. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio. Periodo de simulación 1980/1981-2016/2017.	52
Tabla 9. Definición de las zonas de interés definidas para la ejecución del balance parcial.	54
Tabla 10. Resumen del balance de masa parcial para el modelo en régimen transitorio. Periodo de simulación 1980/1981-2016/2017.	55
Tabla 11. Comparativa entre resultados del balance parcial del modelo actual (izquierda) y Citores (2017, derecha).....	57
Tabla 12. Indicadores estadísticos de los resultados del modelo en régimen transitorio.	70
Tabla 13. Comparación de la relación río-acuífero para diferentes modelos y estudios. .	71
Tabla 14. Resumen de los escenarios simulados.	73
Tabla 15. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio. Periodo de simulación 1980/1981-2026/2027.	76
Tabla 16. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio para subescenario 3a (derecha) y 3b (izquierda). Periodo de simulación 1980/1981-2026/2027.	79
Tabla 17. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio para subescenario 4a (derecha) y 4b (izquierda). Periodo de simulación 1980/1981-2026/2027.	82
Tabla 18. Comparativa del almacenamiento acumulado para el ciclo 2017/2018-2026/2027.	85
Tabla 19. Datos relativos a los piezómetros de la red de calidad cercanos a los pozos de Global Ómnium.	90



Tabla 20. Datos relativos a los piezómetros de la red de operativa cercanos a los pozos de
Global Ómnium. 91



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que afecta a los componentes primarios del ciclo hidrológico que definen el clima tales como temperatura, precipitación, insolación y evaporación, produciendo a su vez una variación espacio- temporal de los recursos. Además, según previsiones realizadas hasta la fecha, en España se producirá una reducción de los recursos hídricos y un aumento de la magnitud y frecuencia de fenómenos extremos como inundaciones y sequías (CHJa, 2015).

Desde el siglo pasado se ha observado un ligero descenso tanto de las precipitaciones como de las aportaciones medias en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Según figura en el Plan Hidrológico Nacional correspondiente al ciclo 2015-2021 (CHJa, 2015) y de acuerdo con los estudios desarrollados por el CEDEX sobre la evaluación de los efectos del Cambio Climático en los recursos hídricos, a medio plazo éstos se verán reducidos un 12%. Por otro lado, según indica la tesis doctoral “*Caracterización de los futuros escenarios climáticos en la Comunidad Valenciana: propuestas de mejora para la evaluación de la oferta y demanda de recursos hídricos*” (Chirivella, 2010), para el medio plazo la reducción sería del 20%.

En la Figura 1 se puede apreciar la evolución de la precipitación y la temperatura media desde principio de los años 80 representada con datos utilizados para el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). En el gráfico se observa una tendencia al alza de las temperaturas y una disminución de las lluvias, hecho que coincide con la tendencia del cambio climático sobre el arco mediterráneo.

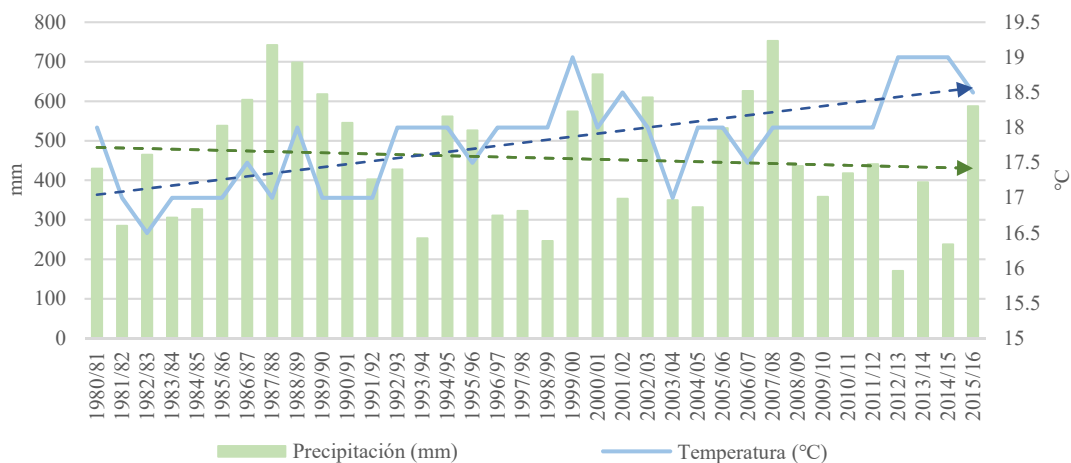


Figura 1. Evolución de la precipitación y la temperatura para el periodo 1980/1981-2016/2017. Fuente: Elaborado con datos del modelo PATRICAL.

Esta disminución de los recursos hídricos se prevé que no sea homogénea en toda la cuenca, sino que se va a concentrar en las zonas de cabecera y del interior, lo que provoca que los recursos sean menos aprovechables para la planificación hidrológica. Cabe mencionar que, las infraestructuras hidráulicas son lugares estratégicos con capacidad de regulación, sin embargo, debido a que se encuentran sobre todo en las zonas de cabecera, se volverían muy vulnerables a la reducción de recursos.

La Figura 2 muestra la evolución de la aportación anual media en el punto de control a la salida del embalse del Arquillo, en la cabecera del río Turia y en la se puede apreciar su tendencia descendente.

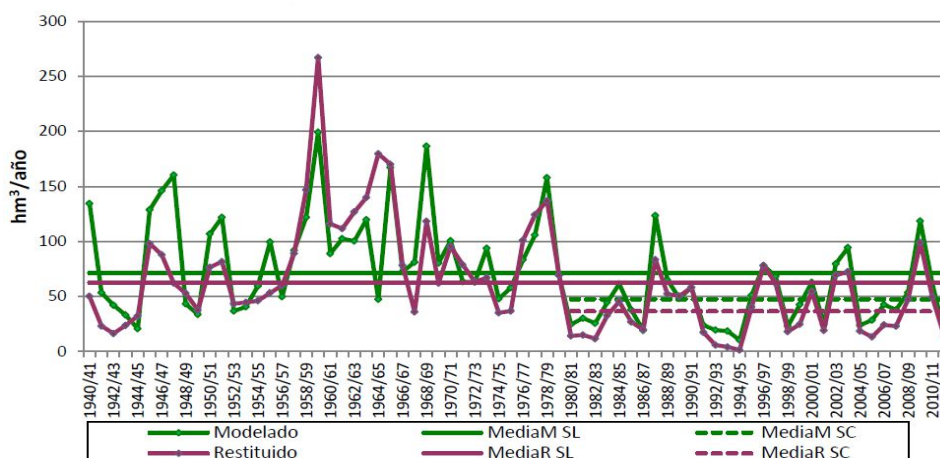


Figura 2. Serie restituida en Arquillo de San Blas (1940/1941-2011/2012). Fuente: Modificado de Plan Hidrológico Nacional, CHJ. Ciclo 2015/2021 (2015a).

En la actualidad, el abastecimiento de agua a la ciudad de Valencia se realiza mediante aguas superficiales tratadas en las plantas potabilizadoras de La Presa (Manises) y el Realón (Picassent) provenientes de los ríos Júcar y Turia apoyadas por pozos.

1.1 Objetivos

El objetivo de este estudio es analizar la posibilidad de utilizar aguas subterráneas de calidad aceptable para abastecimiento de los usos urbanos en las poblaciones del área metropolitana de Valencia en periodos de escasez hídrica asociados al cambio climático. De esta manera se pueden analizar dos aspectos fundamentales: el de disponibilidad del recurso hídrico y el de su calidad que plantea grandes problemas de contaminación por nitratos.

Esta tarea requiere del desarrollo de un modelo numérico que sea capaz de reproducir lo más fielmente posible a la realidad el comportamiento del sistema hidrogeológico. Por este motivo, se ha ampliado el área de estudio a la Plana de Valencia Norte (masa de agua número 081.141) y Plana de Valencia Sur (masa de agua número 081.142) para poder trasladar al modelo la complejidad real del sistema anteriormente mencionada.

En Figura 3 se puede apreciar la ubicación de las dos masas de agua entre todas las que conforman la DHJ.

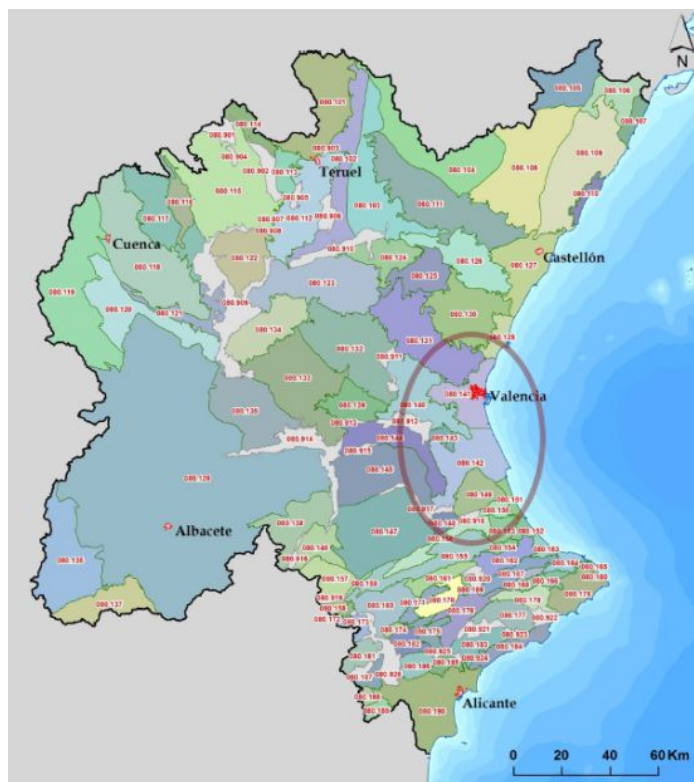


Figura 3. Delimitación de masas de agua subterránea en la DH J. Fuente: Modificado de Plan Hidrológico Nacional, CHJ. Ciclo 2015/2021 (2015a).

Gracias al modelo se podrá establecer un caudal máximo de extracción en función de los valores piezométricos de cada momento, con el fin de garantizar que no se comprometa la sostenibilidad del recurso a lo largo del tiempo.

Por otro lado, también es necesario tener un amplio conocimiento de la zona de objeto del estudio y de sus propiedades físicas, comportamiento hidrogeológico, interrelaciones con otros elementos y masas de agua, presiones a las que están sometidas las masas de agua subterránea y el histórico de datos observados.

Con estas premisas se ha diseñado y construido un modelo matemático utilizando el código MODFLOW (Mc Donald y Harbaugh, 1984) y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, 2009). Todo esto, apoyándose en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que han permitido procesar, ordenar y representar los datos a implementar en el modelo.

Una vez confirmada la bondad del modelo, se han planteado distintos escenarios de sequía para comprobar el comportamiento del sistema en situaciones en las que se le exige unas importantes extracciones complementarias de recursos hídricos subterráneos, así como el suministro de agua bruta para cada uno de ellos. Las medidas propuestas por Global Ómnium suponen en una primera etapa sustituir la extracción que se realiza actualmente en la ETAP de La Presa (12 hm³) por dos nuevas extracciones en continuo a situar en Valencia, dimensionadas para alcanzar un caudal total de 1000 l/s (31.5 hm³/año). En una segunda etapa se ejecutarían 5 nuevos pozos a emplear en situaciones de emergencia, de los cuales, dos de ellos estarían dentro de la ciudad y los otros 3 en las afueras con el fin de reforzar el área metropolitana, que llegarían a bombear en total 1600 l/s (50 hm³/año).

También ha sido necesario analizar información disponible sobre la caracterización química de los recursos subterráneos de la Plana, así como consultar estudios previos, con el fin de conocer su estado cualitativo para su posible uso como aguas de abastecimiento urbano.

Finalmente, una vez definida la viabilidad de las fuentes de suministro alternativo, así como de su ubicación, habría que llevar a cabo los estudios hidráulicos necesarios para la integración de los nuevos centros de producción en los sistemas principales de abastecimiento. Además, sería necesario seleccionar las tecnologías de tratamiento a aplicar según la calidad del agua a tratar, plantear la ubicación de los nuevos centros de producción de acuerdo con el planeamiento urbanístico actual y realizar los estudios hidráulicos necesarios para la integración en las redes de abastecimiento compatibilizándolo con la sostenibilidad ambiental.

1.2 Estado del arte. Modelos previos.

Es a principio de los años setenta cuando podría decirse que empezó la investigación hidrogeológica en España de una forma sistemática y abarcando todo el territorio nacional, en primer lugar, con la puesta en marcha del Programa “*Mapa Hidrogeológico Nacional*” y posteriormente con el “*Plan Nacional de Investigación de aguas subterráneas*” (PIAS). Es en este último en el que el Instituto Geológico Minero de España (IGME) estudia por primera vez el acuífero de la Plana de Valencia (sistema 51), y en el que se describe esta masa de agua subterránea como un sistema monocapa y se plantea un modelo hidrogeológico con un periodo de análisis entre abril de 1973 y mayo de 1974. Además, incluía el efecto de la Albufera en el efecto de descarga por surgencias.

El siguiente trabajo es el “*Modelo hidrodinámico del Caroch-Plana de Valencia*” (IGME, 1982), que es un modelo realizado con el programa de Prickett y Lonquist (Prickett et al., 1971), en el que la zona de estudio abarca desde el delta del Palancia comprendiendo, así, las Planas Norte y Sur y parte de los bordes que las limitan. En este caso, se considera un acuífero bicapa, interrelacionando ambas capas a través de un acuitardo y se utilizan datos entre el periodo octubre de 1977 y septiembre de 1980. En este modelo se incluyó la Albufera de forma que el acuífero y la Albufera estaban relacionados hidráulicamente, considerándolo como un lago que desagua al mar y que tiene variaciones de hasta 50 cm en su nivel debido a la apertura de las compuertas.

La siguiente referencia es el estudio “*Evaluación, a nivel de aplicación, de los recursos hídricos subterráneos disponibles en los acuíferos del sector del sistema 51 (Plana de Valencia). Posibilidades de su utilización inmediata*” (IGME, 1986). La extensión de este modelo fue más limitada que en el anterior, solamente cubría la plana de Valencia Sur y la totalidad del lago de la Albufera. Se plantean diversos escenarios de gestión basados en distintos niveles de recarga artificial con aguas no reguladas del río Júcar. El balance en este caso se realiza para un periodo más extenso, entre los años 1980 y 1985.

El siguiente estudio lo realiza la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) en 1989, titulado “*Caracterización estadística de los recursos subterráneos que afluyen al Júcar aguas abajo de Tous*” (CHJ, 1989). Se utiliza el mismo modelo que en el estudio anterior, pero sobre una superficie más reducida, la plana de Valencia Sur (unidad hidrogeológica 8.26). El objetivo del

estudio fue analizar las posibilidades de trasvase al Vinalopó y como respondía el embalse de Tous ante las distintas reglas de operación.

Ocho años más tarde, la CHJ publicó el *“Estudio del plan general de adecuación del sistema de explotación de los aprovechamientos tradicionales del Júcar”* (CHJ, 1997) incluyendo la misma zona de estudio que el IGME en 1986 pero modificando el modelo en otros aspectos como por ejemplo las condiciones de borde. El periodo de estudio es el más extenso hasta ese momento y abarca desde el año 1969 hasta 1995.

Ya en 2002, la CHJ desarrolló el *“Estudio de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de las cuencas media y baja de los ríos Júcar y Turia”* en el que se preveía la modelación de los acuíferos de la Plana de Valencia formada por las unidades hidrogeológicas 8.25 y 8.26 con el doble objetivo de tener una herramienta que pudiera simular el comportamiento de los acuíferos frente a acciones exteriores y tener un modelo global que permitiera la simulación del sistema Júcar-Turia. Se presentaron dos modelos, un modelo de los acuíferos del Turia medio y de tipo agregado debido al desconocimiento del funcionamiento hidrodinámico de la zona y un modelo distribuido de la Plana de Valencia Sur realizado con MODFLOW (Mc Donald, y Harbaugh, 1984). El primero de ellos está conformado por 7 celdas en el que se representan las unidades Buñol-Cheste con una celda, Liria-Casinos con dos celdas, Carraixet Náquera-Puzol con una celda y Plana de Valencia Norte con tres celdas, realizando una simulación de tipo mensual desde octubre de 1970 hasta septiembre de 2001. El segundo modelo incorpora a La Albufera y a la ciudad de Valencia que pertenecen a la unidad 8.25, considera como en el modelo previo un acuífero bicapa y realiza la simulación entre los años 1969 y 2000.

Posteriormente, Ballesteros desarrolla para el IGME el trabajo *“Uso sostenible de las masas de agua subterránea en épocas de sequía. Aplicación a la cuenca baja del río Júcar”* en el año 2012. El modelo se centra en gran medida, en el área que corresponde a la Plana de Valencia Sur y se construye con el software VISUAL MODFLOW v.4.2.0.151 desarrollado por Waterloo Hydrogeologic, Inc. Se tenía como objetivo analizar el funcionamiento del sistema bajo escenarios de sequía, por lo que se escogió como periodo de simulación el comprendido entre el 15 de abril de 2006 y el 30 de septiembre de 2008.

Finalmente, se desarrolló en el curso 2017/2018 una tesis fin de máster titulada *“Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de la Plana de Valencia Norte y Sur”* (Citores, 2018) en colaboración con la CHJ. A diferencia de los anteriores, se trabajó con las dos masas de agua subterránea debido a que tienen características hidrogeológicas similares. Además, para comprender mejor el funcionamiento hidrodinámico de la Albufera y su relación con el acuífero es necesario trabajar en toda su extensión. Para este modelo matemático, el periodo de simulación comienza en 1940 y termina en 2017, diferenciando entre un régimen estacionario (ciclo 1940/1980) bajo escasa influencia de actividad antrópica y un régimen transitorio (1980/2017) más próximo a las condiciones de explotación actuales. Se ha utilizado el código MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984) y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, 2009).

Por otro lado, el IGME ha realizado estudios locales, regionales, estudios de unidades geológicas concretas, estudios para el abastecimiento de una población o zonas de menor extensión.

El Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) también realizó junto a la Confederación y la Comisaría de Aguas del Júcar informes de la zona, entre los que destacan los siguientes:

- Estudio de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas de las cuencas media y baja de los ríos Júcar y Turia (1974). Servicio Geológico de Obras Públicas, Confederación Hidrográfica del Júcar y Comisaría de Aguas del Júcar.
- Estudio de la Plana de Sagunto y las cuencas media y baja del barranco de Carraixet (1976). Servicio Geológico de Obras Públicas.
- Las aguas subterráneas en la Comunidad Valenciana (1988). Instituto Geológico y Minero de España.
- Delimitación de unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares (1988). Dirección General de Obras Hidráulicas.
- Las aguas subterráneas en la Comunidad Valenciana: uso, calidad y perspectivas de utilización (1988). Instituto Geológico y Minero de España.
- Unidades hidrogeológicas susceptibles de reservar para uso prioritario de abastecimiento urbano (1994). Instituto Geológico y Minero de España.
- Normas de explotación de las unidades hidrogeológicas del borde exterior de La Plana de Valencia (1994). Realizado para la CHJ por PAYMASA SA.

2. MODELO CONCEPTUAL

2.1 Descripción del área

Los acuíferos de la Plana Norte y Sur de Valencia se localizan en su totalidad en la provincia de Valencia, concretamente en la zona costera que se extiende entre Puzol y Cullera, abarca 879.56 km² y limita al Este con el mar Mediterráneo y al Oeste con la Cordillera Ibérica.

En la Figura 4, se puede apreciar la ubicación del acuífero costero respecto al área abastecida por la empresa Global Ómnium (zona sombreada en rojo) que comprende la comarca de l’Horta y el área perimetral: Bétera, Náquera, Pobla de Vallbona, l’Elia, Benaguasil, San Antonio de Benagéber, Villamarchante, Ribarroja, Chiva, Cheste, Godella, Loriguilla, Turís, Sagunto, Canet, Sollana, Almussafes, Benifaió y Alginet.

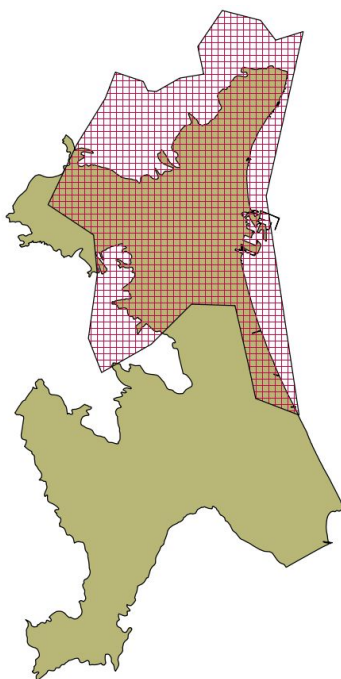


Figura 4. Visión conjunta de la Plana de Valencia Norte y Sur junto al área metropolitana de Valencia a la que da servicio la empresa Aguas de Valencia.

2.2 El sistema hidrológico

Como se ha comentado anteriormente, para realizar la descripción hidrogeológica general del acuífero se considerará a la Plana de Valencia de forma conjunta, ya que ambas masas de agua presentan cierta continuidad hidráulica y características hidrogeológicas similares.

En la Comunidad Valenciana, las aguas subterráneas se utilizan intensamente tanto para abastecimiento como para riego. De hecho, en la cuenca del Júcar se extrae el 25% del agua total bombeada en España y estando sometidas las planas litorales de la Comunidad Valenciana a una fuerte explotación (Sahuquillo, 2012).

Además, según el informe *“Síntesis de la información remitida por España para dar cumplimiento a los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua en materia de aguas*

subterráneas”, que proporcionó España en el año 2006 para el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua en materia de aguas subterráneas, hay 5 masas de agua extendidas sobre el área metropolitana de Valencia o relacionadas con ella que están en riesgo de no cumplimiento de los objetivos ambientales de contaminación difusa, intrusión salina y por extracción (Sahuquillo, 2012). Las masas de agua en riesgo son las que figuran en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Masas de agua en riesgo de no cumplimiento. Fuente: modificado de Sahuquillo (2012).

Contaminación difusa	Intrusión salina	Extracción
Medio Palancia	Plana de Sagunto	Plana de Sagunto
Liria-Casinos	Plana Norte de Valencia	Buñol-Cheste
Buñol-Cheste		Liria-Casinos
Plana Norte de Valencia		
Plana Sur de Valencia		

Según figura en los documentos iniciales del Plan Hidrológico Nacional del ciclo 2021/2027, tanto la Plana de Valencia Norte como la Plana de Valencia Sur, son masas de agua subterránea con presión debida a la intrusión salina.

Por otro lado, el abastecimiento urbano del área metropolitana de la ciudad de Valencia afecta a las cuencas hidrológicas de los ríos Turia y Júcar, así como Sagunto que tiene asignados recursos del río Palancia. Estos ríos llegan agotados al mar debido al complejo sistema de regadíos históricos que hay en la cuenca baja, de forma que los interfluvios entre estos ríos están ocupados por acuíferos costeros que desaguan al mar y a los humedales próximos (Sahuquillo, 2012).

Por este motivo, pese a que el sistema de abastecimiento de la ciudad no es demasiado complicado, sí que lo es el sistema hidrológico sobre el que está asentado, sumado a los condicionantes legales, económicos y medioambientales (IIAMA, 2012).

2.3 El sistema hidrogeológico

2.3.1 Límites del sistema

En este proyecto se han utilizado los límites definidos en el trabajo de la CHJ en el año 2009 *“Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterránea”* y que posteriormente se utilizaron en la tesis *“Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de la Plana de Valencia Norte y Sur”* (Citores, 2018).

Los contornos del acuífero de la Plana de Valencia limitan con varias masas de agua subterránea al norte, oeste y este y con el Mar Mediterráneo al este como se observa en la Figura 5. Además, se puede apreciar que en la zona sur existe un borde impermeable, es decir, no hay flujo de agua entre el acuífero y este borde.

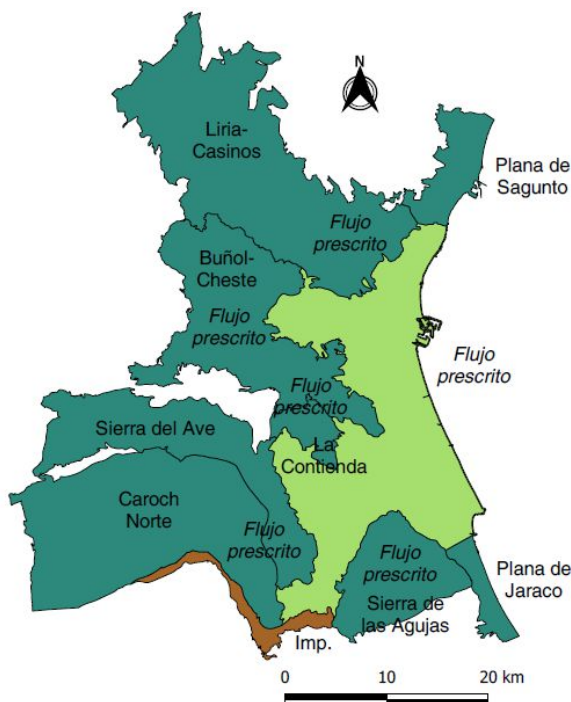


Figura 5. Delimitación del sistema de estudio.

Concretamente, las masas de agua subterráneas delimitantes son: en la zona más alejada hacia el norte, el acuífero costero de la Plana de Sagunto; más hacia la zona occidental encontramos el límite de Liria-Casinos; en la zona centro se ubica la masa de agua de Buñol-Cheste que cuenta con la presencia de un tramo que se ha considerado impermeable; el siguiente límite es La Contienda; al suroeste están los sistemas de la Sierra del Ave y de Caroch Norte; a continuación aparece otro borde impermeable del modelo; ya hacia la zona sur se observa la masa de agua de la Sierra de las Agujas; y se finaliza con la Plana de Jaraco, como último borde de transferencia lateral.

Los límites laterales anteriormente mencionados, cobran gran relevancia en el modelo debido a que se han definido como abiertos posibilitando que se produzca un flujo entre las masas subterráneas colindantes y el acuífero modelado.

En general el flujo de agua subterránea en esta zona va en dirección al mar debido a la diferencia de alturas piezométricas con el interior (zona oeste) generando un aporte subterráneo a la costa, aunque en algunas zonas concretas este comportamiento puede ser distinto.

En la fase de construcción del modelo, se ha asociado a cada contorno permeable un conjunto de piezómetros con sus series históricas reconstruidas (escogidos lo más cercano posible al borde que la información haya permitido) para poder saber cómo han variado los niveles piezométricos a lo largo del periodo de estudio. También se ha asignado a cada contorno una conductividad que regula las entradas y salidas de agua de las masas subterráneas.

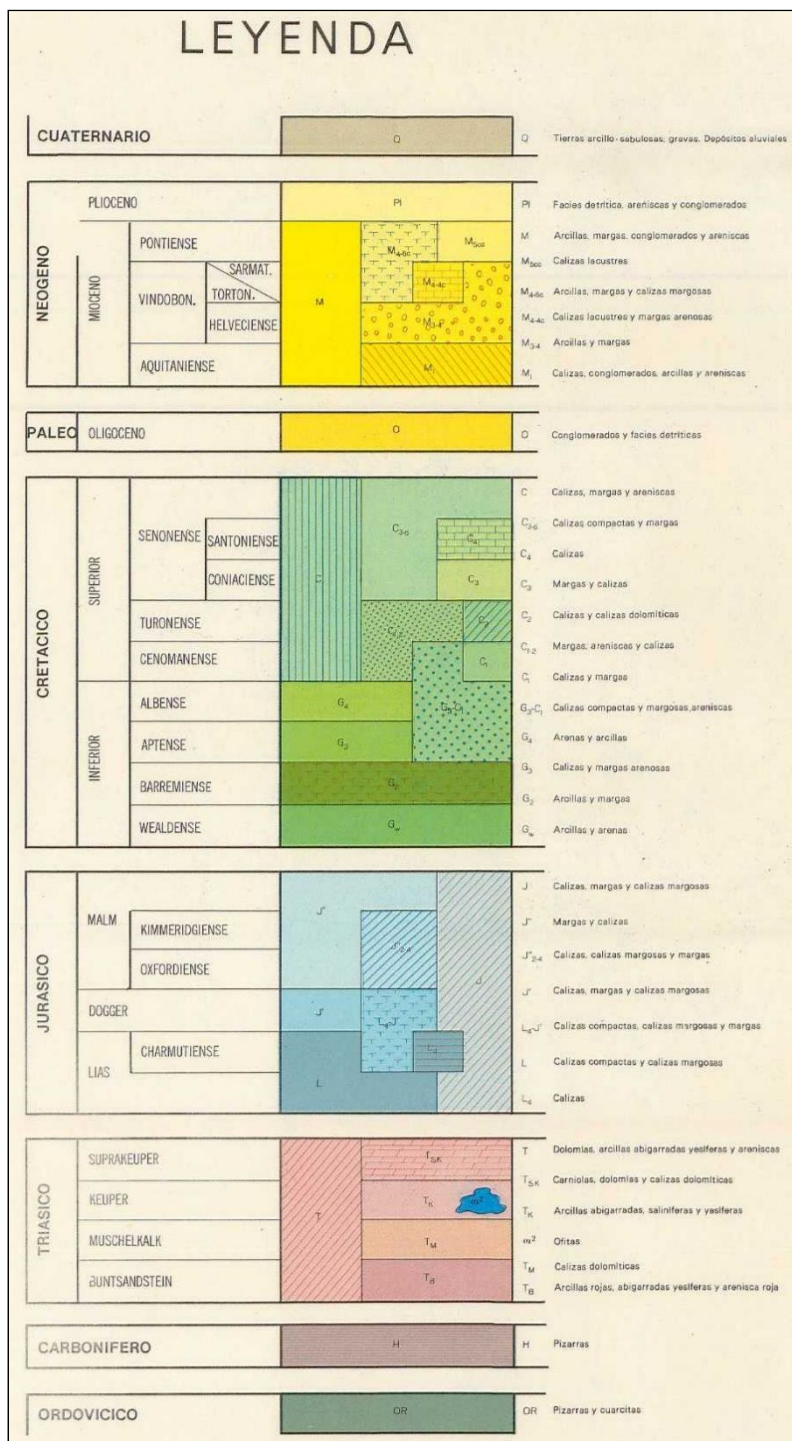


Figura 7. Geología. Leyenda. Fuente: Sahuquillo (2012).

En los modelos anteriores a Ballesteros et al. (2012), se agrupaba al acuífero de la Plana de Valencia Sur en dos acuíferos separados por una formación impermeable.

Por ejemplo, el IGME propone para la Plana de Valencia Sur y menos para la Plana de Valencia Norte, un acuífero superior formado por arenas y gravas cuaternarias y las formaciones más modernas del Mioceno separado por un acuitardo (constituido por niveles margosos y arcillosos) de un acuífero inferior donde se integran todos los tramos permeables miocenos,

cuando en realidad el acuífero superior no es un acuífero único, sino que las arenas y gravas están intercaladas por capas de arcillas y limos (Sahuquillo, 2012).

En cambio, Ballesteros et al. (2012) a partir de analizar información cartográfica geológica y geofísica existente, columnas litológicas, informes de sondeos, estudios hidrogeológicos previos y bases de datos provenientes de organismos oficiales, afirma que dicha información muestra la presencia de 4 tramos con diverso interés hidrogeológico, en vez de 2 como se consideraba anteriormente.

En este trabajo, siguiendo con la línea establecida por Ballesteros et al. (2012) estos 4 tramos han determinado el número final de capas del modelo. Estas capas de arriba hacia abajo son:

- Capa 1: constituida por materiales detríticos cuaternarios de elevada permeabilidad.
- Capa 2: formada por materiales terciarios de permeabilidad media tales como calizas, areniscas y conglomerados pliocenos.
- Capa 3: también formada por materiales terciarios, concretamente margas miocenas de baja permeabilidad.
- Capa 4: formada por materiales mesozoicos de formaciones carbonáticas permeables.

Cabe señalar, que estas unidades geológicas yacen sobre una base impermeable de facies del Keuper. Además, los espesores de las capas son más homogéneos en la Plana de Valencia Norte puesto que la geología de esta zona no se conoce con tanta exactitud.

En la Figura 8 y Figura 9, se representan dos cortes geológicos realizados para la Plana Sur de Valencia, donde se aprecian las 4 capas anteriormente definidas.

El primer corte se realiza en dirección oeste-este unos kilómetros abajo del Parque de la Albufera y el segundo también con dirección oeste-este, pero próximo a la Plana de Jaraco, aflorando en varias ocasiones el río Júcar. Es importante recalcar la variación del espesor del acuífero a lo largo de toda la Plana.

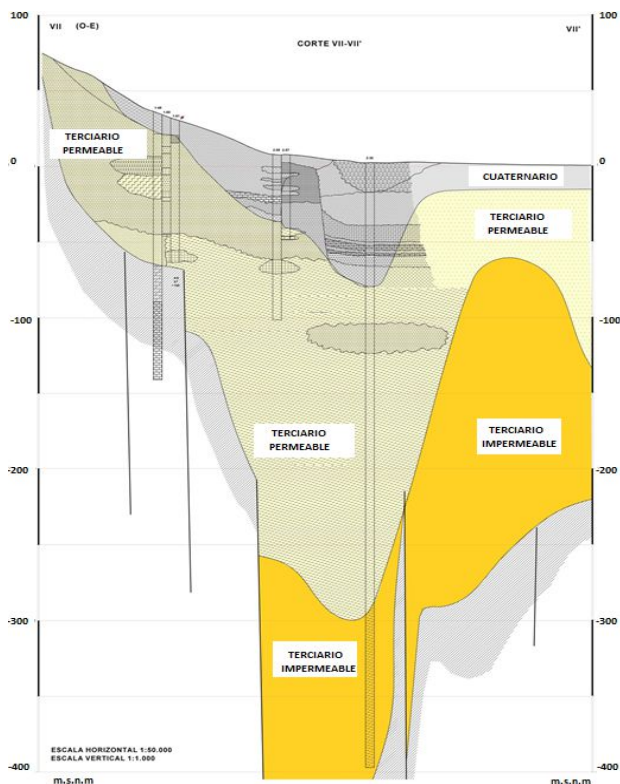


Figura 8. Corte litoestratigráfico VII-VII' aguas abajo de la Albufera en la Plana de Valencia Sur. Fuente: Modificado de Ballesteros et al. (2012).



Figura 9. Corte litoestratigráfico X-X' sobre la Plana de Jaraco en la Plana de Valencia Sur. Fuente: Modificado de Ballesteros et al. (2012).

El tramo superior al norte de La Albufera y en zonas próximas al río Turia alcanza espesores cercanos a 200 m. Al sur de La Albufera, dependiendo de la disponibilidad de información, las profundidades van desde los 10 hasta los 200 m. En el resto de la plana, la potencia conjunta de ambas formaciones oscila entre 300 m y valores inferiores a 25 m (Sahuquillo, 2012).

En la Figura 10, se puede ver la disposición de los perfiles geofísicos para un estudio del IGME en el año 1975 y el espesor saturado del acuífero.

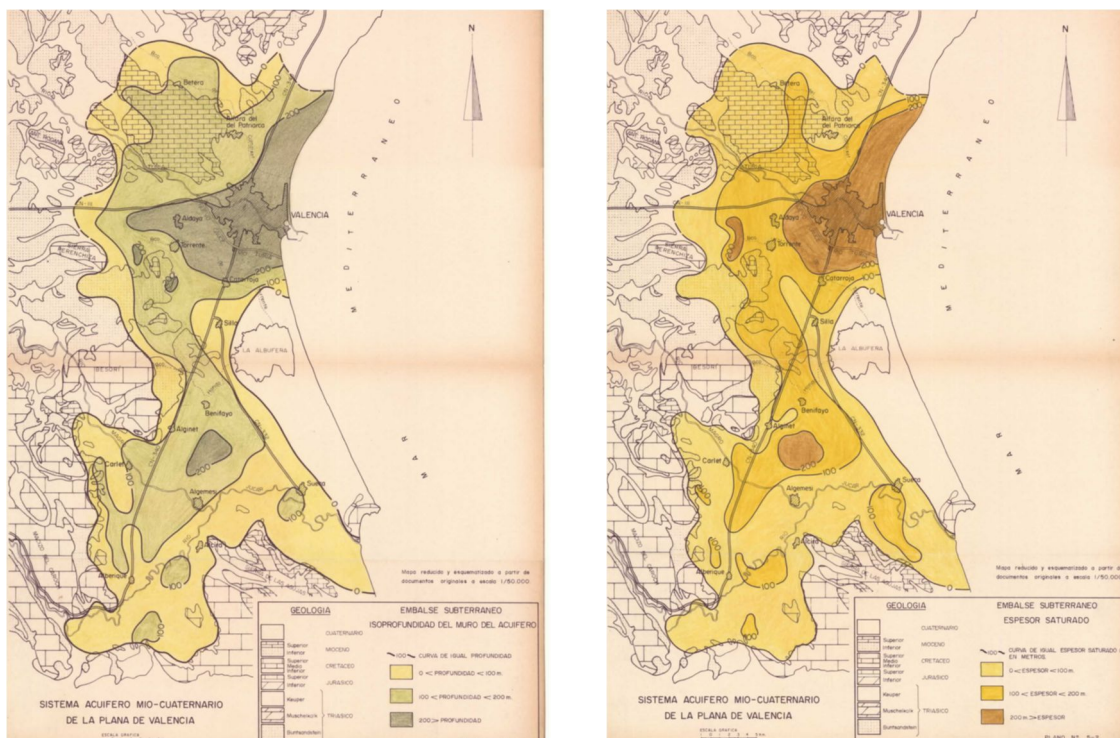


Figura 10. Profundidad del muro del acuífero (izquierda) y espesor saturado (derecha). Fuente: Sahuquillo (2012).

2.3.3 Dominios hidrogeológicos

El presente modelo se ha dividido en cinco dominios hidrogeológicos clasificados según el valor de la permeabilidad, desde muy alta hasta muy baja, a partir de un mapa de permeabilidades realizado por el IGME a escala 1:200.000. Los materiales que constituyen los diferentes dominios hidrogeológicos figuran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los distintos dominios hidrogeológicos. Fuente: IGME (2006).

Permeabilidad muy alta	Depósitos aluviales y terrazas bajas de los ríos	Gravas, arenas, limos y travertino
Permeabilidad alta	Depósitos de glacia, piedemonte, terrazas medias y altas, cordones litorales y playas	Arenas y gravas Niveles alternados de limos, arcillas, calizas, dolomías y margas
Permeabilidad media		Calizas, dolomías, margas, conglomerados y calizas travertínicas
Permeabilidad baja	Depósitos de estuario, marismas, sedimentos litorales, áreas endorreicas, lacustres y turberas	Limos, arcillas, materia orgánica, sales, yesos, margas, calizas y conglomerados
Permeabilidad muy baja		Arcillas abigarradas y yesos. Quizás presencia de margas y areniscas

En la Figura 11 se puede observar la distribución de las permeabilidades para la que se ha considerado la primera capa del modelo. Estos dominios hidrogeológicos son variables respecto a la profundidad del acuífero, por lo que han cambiado para las 3 capas inferiores como quedará detallado en la sección 3.3 *Parámetros hidráulicos*.

Pueden apreciarse la existencia de zonas con una permeabilidad muy definida y extendida, sin embargo, en ellas a veces afloran materiales con permeabilidades muy distintas en zonas de poca extensión, hecho que ha dificultado la calibración.

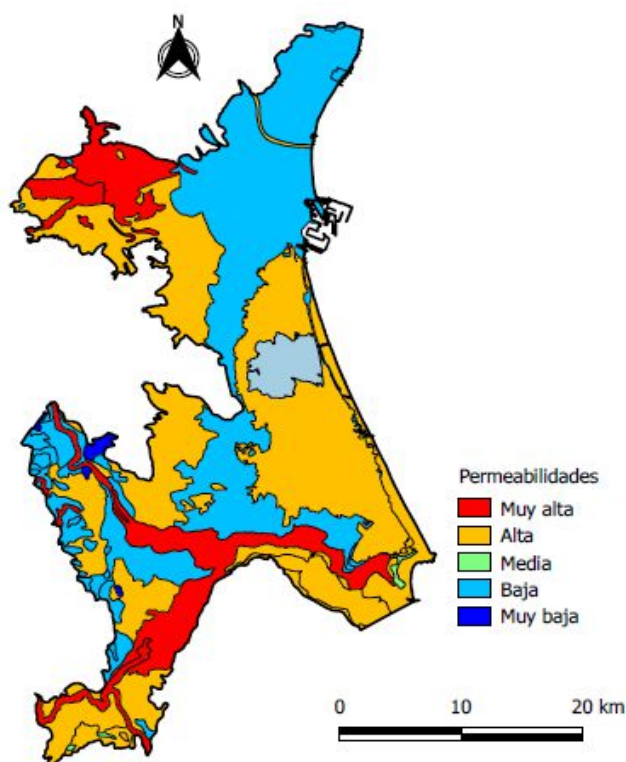


Figura 11. Mapa de permeabilidades de la Plana de Valencia. Fuente: IGME (2006).

Tabla 3. Valores de las permeabilidades según dominio. Elaboración propia con datos de Custodio et al. (1983) y Freeze et al. (1979).

	Kx (m/día)	Ss (1/m)	Sy (-)
Dominio 1	>10000-450	10^{-5} - 10^{-2}	0.20-0.35
Dominio 2	450-1	10^{-5} - 10^{-2}	0.20-0.35
Dominio 3	1-0.01	10^{-5} - 10^{-2}	0.10-0.20
Dominio 4	0.01-0.0001	10^{-5} - 10^{-2}	0.05-0.10
Dominio 5	0.000<0.000001	10^{-5} - 10^{-2}	0.05-0.10

2.4 Modelo hidrogeológico conceptual. Entradas y salidas al sistema.

El funcionamiento del sistema viene pautado por las entradas y salidas de agua de este, de modo que para poder conocerlo es necesario definir un modelo hidrogeológico conceptual.

Las entradas o fuentes son las que incorporan un volumen de agua al acuífero, mientras que las salidas o sumideros, extraen agua del sistema. En el modelo planteado, se consideran entradas:

recarga por infiltración de lluvia y por retornos de riego, pérdidas a través de los ríos, las pérdidas del lago de La Albufera y las transferencias laterales desde masas de agua subterráneas próximas. Por otro lado, se consideran salidas del sistema: los bombeos, las descargas a manantiales y canales, las descargas al lago de la Albufera y las transferencias laterales a otras masas de agua cercanas y al mar.

Cabe mencionar, que a pesar de que la infiltración del agua de lluvia sea la forma fundamental de recarga de un acuífero, en un clima mediterráneo semiárido como es el de la Plana puede haber años donde la recarga sea muy baja o nula y otros años húmedos donde la recarga sea superior a la media anual (Sahuquillo, 2012) siendo los retornos agrícolas los que producen su recarga en mayor medida debido a la marcada explotación agrícola de la zona. Además, las extracciones por bombeo para este uso juegan un rol fundamental en el almacenamiento de la Plana porque, aunque las recargas sean elevadas también se detraen volúmenes considerables de agua.

Otro aspecto esencial del modelo a tener en cuenta es la interacción de las aguas superficiales y subterráneas, es decir, la relación río-acuífero puesto que determina los volúmenes de agua intercambiados entre ambos elementos y la variación en el almacenamiento del acuífero, hecho que se puede observar en las oscilaciones de los niveles piezométricos. La descarga de agua subterránea a los ríos (flujo base), proporciona el caudal que permite un flujo continuado en los ríos permanentes en periodos secos. Por ejemplo, los ríos Magro y Albaida son perdedores casi en la totalidad de su extensión hecho que puede deberse a una baja recarga del acuífero o a que las permeabilidades del terreno son altas, mientras que el río Júcar es mayoritariamente ganador salvo en su tramo final próximo a la costa.

2.4.1 Lago de la Albufera

Mención aparte requiere el sistema de la Albufera puesto que es el humedal más importante de la Comunidad Valenciana. El lago cuenta con una superficie de 2.500 ha y se encuentra situado dentro del Parque Natural de La Albufera que tiene una superficie de 21.120 hectáreas (CHJ, 2003). Además, está conectado con los ríos Júcar y Turia y con los acuíferos de la Plana, por lo que está vinculado al sistema metropolitano de abastecimiento.

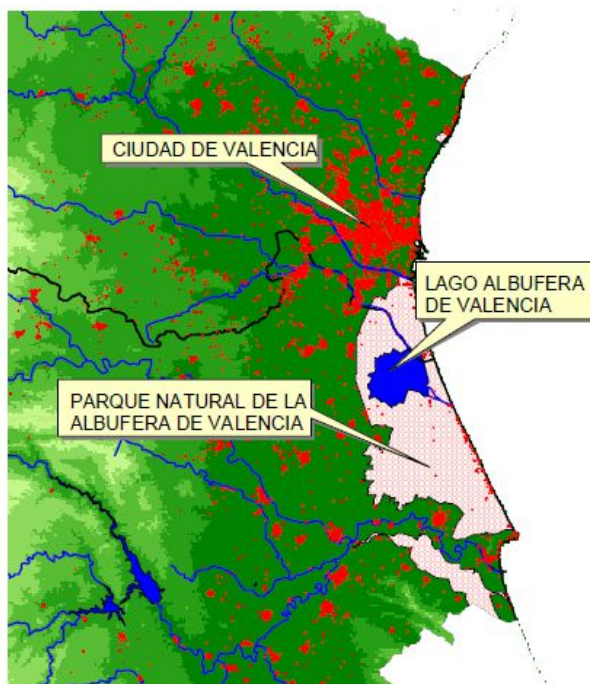


Figura 12. Parque Natural y lago de la Albufera de Valencia. Fuente: CHJ (2003).

En la actualidad la Albufera es un humedal costero de agua dulce, pero inicialmente era una laguna de agua salobre en la que se mezclaban el agua marina y la descarga de los acuíferos de la Plana de Valencia Norte y Sur la cual tenía una única salida, la Gola del Rey. Debido al desarrollo del arrozal en el siglo XVII, se tuvo que abrir nuevas golas, que son las que funcionan en la actualidad: las golas del Perelló, del Perellonet y la de Puzol. Con el paso del tiempo, el lago fue haciéndose más pequeño y junto con el desarrollo del regadío en la zona, acabó por convertirlo en un lago de agua dulce como lo conocemos en la actualidad (Sahuquillo, 2012).

Desde un punto de vista hidrológico, los aportes a La Albufera proceden sobre todo de la escorrentía superficial (natural y urbana) y subterránea y de los retornos de riego, afectados tanto por periodos de sequía como por la mejora de la gestión y modernización del sistema de regadío (CHJ, 2007). El Parque recibe los sobrantes de los sistemas de regadío del Turia por el Norte y del Júcar por el Oeste y Sur. Concretamente, por el Norte llegan al lago las aguas del Turia a través de las acequias de Favara y del Oro, por el Oeste recibe las aguas de la Acequia Real del Júcar. Además, existen tres canales de conexión con la Comunidad de regantes de Sueca que hacen posibles ciertos intercambios de agua (Sahuquillo, 2012). A estos aportes también habría que añadir la precipitación directa sobre el lago y los vertidos directos sin depurar, resultando que un 78% de los aportes de caudal al lago tienen origen antrópico y por tanto dependen del hombre (Palop et al., 2015).

Cabe destacar, que hay acequias que solamente alimentan al lago en forma de aportación superficial, aportación subterránea y con sobrantes de riego, mientras que hay otras que también vierten efluentes de las EDARs y aguas residuales urbanas e industriales sin tratar (CHJ, 2003).

En la Figura 13 se puede observar la variación de los niveles en el lago para el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1997/1998 y 2006/2007. Se puede apreciar como en el periodo otoñal noviembre-diciembre, los niveles son más altos debido a las inundaciones

masivas de los campos que se realizan en la Perellonà y cuando sólo se permiten pequeñas salidas de caudales a través de la Gola de Puzol por motivos ambientales. Por el contrario, desde marzo hasta mediados de abril los niveles son más bajos ya que es la época en la que se deja descansar la tierra. El nivel medio es de 0.26 m.s.n.m.

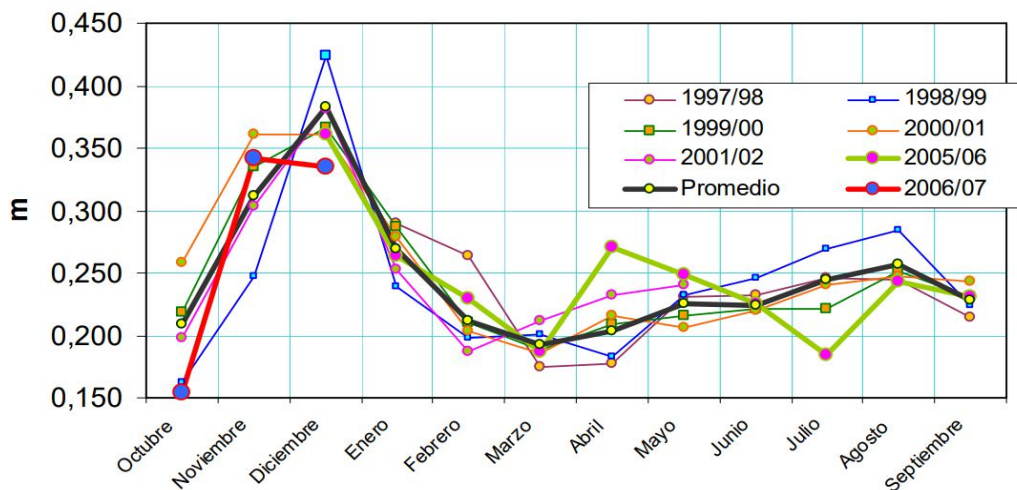


Figura 13. Evolución mensual de los niveles medios en el lago. Fuente: Modificado de C.H.J. (2007).

Si comparamos los niveles medios del lago con la serie piezométrica del pozo cercano 08.26.103 (situado al sur del lago), observamos que los niveles en la Albufera son mayores (Figura 14). Este hecho podría explicarse por la antropización del lago, mientras que, los bajos niveles piezométricos son el resultado de la acción de los canales de riego y de los bombeos realizados.

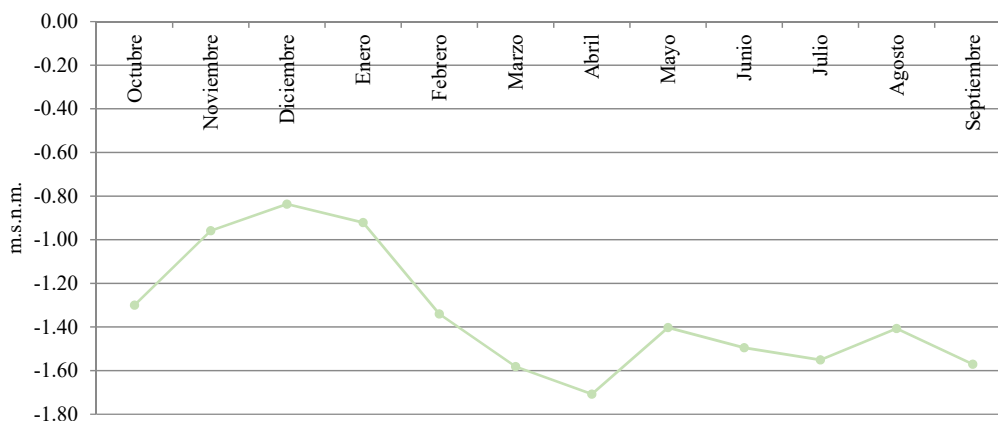


Figura 14. Distribución anual piezométrica del pozo 08.26.103 cerca de Sollana. Fuente: Elaboración propia con datos de la C.H.J.

Esto implica que el parque, de acuerdo con su configuración actual (sistema de agua dulce) no puede mantenerse con los aportes procedentes de su cuenca vertiente ni siquiera con los aportes de escorrentía superficial, que es muy reducida al tratarse de una cuenca mediterránea muy llana y permeable (Palop et al., 2015).

3. MODELO PROPUESTO

Para el desarrollo del modelo se hizo uso del código MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984), que resuelve la ecuación diferencial (1) del movimiento de un flujo monofásico en un medio poroso saturado. Puesto que para sistemas complejos no existen soluciones analíticas para dicha ecuación, para su resolución es necesario utilizar métodos numéricos, que en este caso ha sido el de diferencias finitas.

Para la formulación y desarrollo del modelo matemático se utilizó la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, 2009) de libre distribución que al igual que MODFLOW fue desarrollada y escrita por el USGS.

El movimiento en 3 dimensiones del agua subterránea de densidad constante en un medio poroso saturado, heterogéneo y anisótropo en régimen no estacionario se describe matemáticamente mediante la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

donde K_x , K_y y K_z son las componentes de la conductividad hidráulica en las direcciones “x”, “y” y “z”, respectivamente (L/T); h es la altura piezométrica (L); W es un flujo volumétrico por unidad de volumen y se utiliza para representar fuentes y sumideros (1/T); y por último, S_s es el almacenamiento específico (1/L); y t es el tiempo (T).

La ecuación anterior describe el flujo de agua subterránea siempre que los ejes principales de anisotropía estén alineados con el sistema de coordenadas de análisis.

ModelMuse permite al usuario introducir los datos de entrada para los modelos mediante objetos (puntos, líneas o polígonos). Además, los objetos son usados para especificar valores de información espacial independientemente de la discretización espacial y temporal que se haya definido previamente, por tanto, la malla y periodos de simulación pueden ser cambiados sin volver a especificar información relativa a la estructura hidrogeológica y a las condiciones de contorno, lo que supone una enorme ventaja para el modelador.

Se pueden importar datos desde una variedad de fuentes, como por ejemplo en este caso, a partir de shapefiles creados mediante la herramienta de información geográfica QGIS. Por otro lado, los resultados pueden ser visualizados en ModelMuse.

Una vez ejecutado el modelo, el programa puede realizar un balance hídrico parcial, previa definición de subzonas de interés, con el programa ZONEBUDGET. Este balance incluye el intercambio hídrico con el medio adyacente, como por ejemplo en este caso: La Albufera de Valencia, tramos fluviales, canales de riego, humedales y límites de la zona de estudio.

Para representar gráficamente los resultados de MODFLOW tanto en la fase de calibración como durante la realización de los balances globales y parciales, se ha utilizado el programa GW_Chart (Winston, 2000), también desarrollado por el USGS.

3.1 Discretización espacial

El modelo se ha discretizado horizontalmente según una malla 35 columnas y 64 filas, todas ellas cuadradas de 1 km x 1 km, lo que representa un total de 2240 celdas por capa o 2240 km². Se considera que la separación de mallado tiene la suficiente precisión para los objetivos de este modelo, presentando unos tiempos de simulación aceptables.

Por otro lado, la discretización vertical considera 4 capas, considerando las 3 primeras como convertibles, es decir, se comportarán como libres o confinadas según si los niveles piezométricos están por debajo o por arriba del techo del estrato y la cuarta capa como confinada al encontrarse aislada por un acuitardo. Esto es importante, porque a la hora de los cálculos, por ejemplo, en un acuífero confinado se utiliza el almacenamiento específico S_s , en uno libre el rendimiento específico S_y , y en uno convertible depende de cómo se esté comportando el acuífero, uno u otro parámetro.

En la Figura 15 se puede apreciar el mallado anteriormente descrito para la capa más superficial del modelo, donde las celdas activas son las coloreadas en verde y las inactivas en marrón.

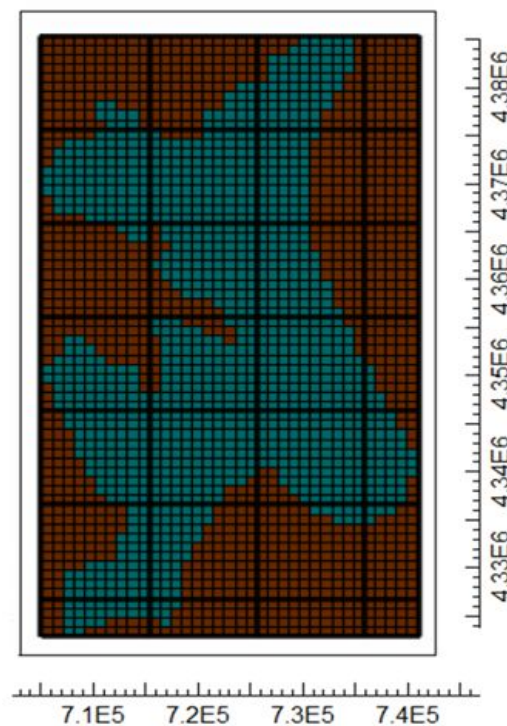


Figura 15. Captura del modelo con las celdas activas e inactivas de la primera capa.

Para el resto de las capas tratadas en este modelo, se ha utilizado la misma discretización, aunque con una distribución diferente de celdas activas e inactivas según el funcionamiento hidrogeológico del acuífero adoptado (Figura 16).

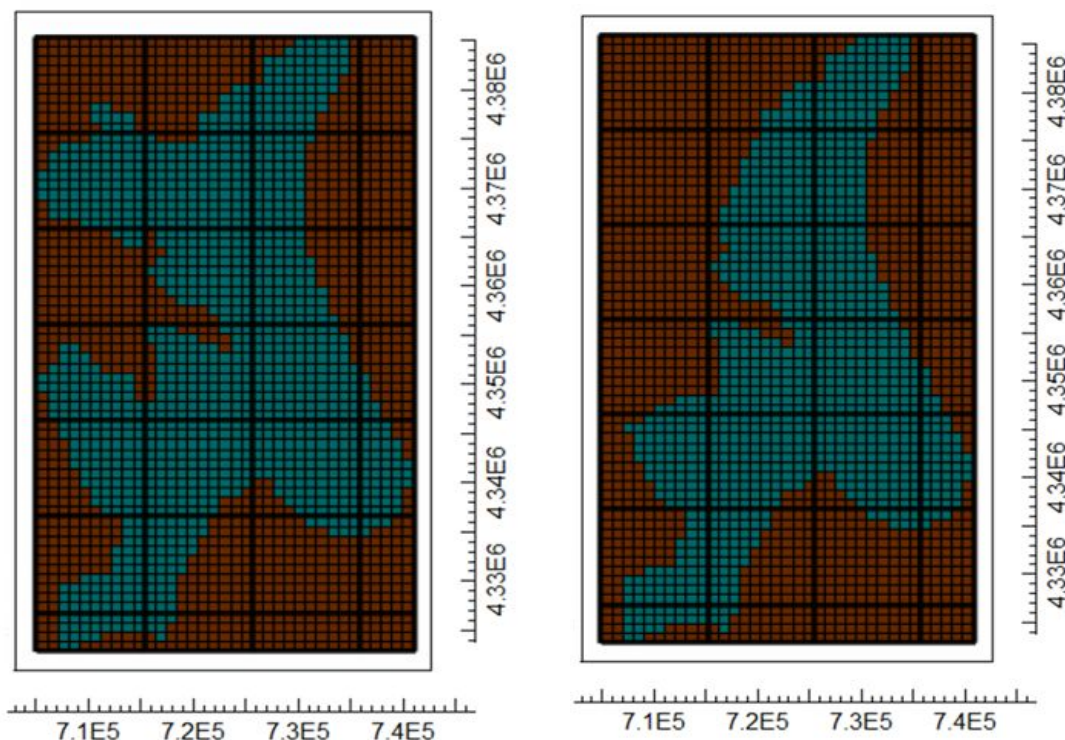


Figura 16. Captura del modelo con las celdas activas e inactivas de las capas 2 (izquierda) y 3,4 (derecha).

El dominio del modelo numérico está delimitado por las coordenadas UTM del huso 30S siendo del vértice noroeste del modelo.

Tabla 4. Coordenadas del vértice NO del modelo.

Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
705353.236	4386682.131

3.1.1 Topografía

La introducción de la topografía en el modelo se ha abordado de dos formas diferentes en el caso de la Plana Norte y la Plana Sur.

Para el acuífero norte se ha utilizado un modelo digital del terreno (MDT) con una precisión de 25 m, mientras que para el acuífero del sur se han tomado los datos de cota de la superficie del modelo realizado por Ballesteros et al. (2012), el cual tenía una precisión de cota de 119.6 m. De este modo, en el primer caso se tienen 1600 valores de cota para cada celda y en el segundo alrededor de 70. El valor medio de todas las cotas que conforman la celda es el que se asigna como altura final de la celda en cuestión.

3.1.2 Estructura geológica

Según Sahuquillo (2012): “*El área metropolitana de Valencia ocupa la zona oriental de parte de una fachada mediterránea y las formaciones modernas que se encuentran en las zonas de topografía más baja de las planas costeras y el delta del Palancia*”.

Como se definió anteriormente en el punto 2.3.2 Unidades hidrogeológicas, las 4 capas en las que se divide el modelo, asientan sobre una capa impermeable constituida por facies del Keuper y están formadas por materiales mesozoicos, terciarios y cuaternarios de diferentes permeabilidades.

Así, para que el modelo pudiera trabajar con estas cuatro capas se tuvo que definir las siguientes superficies, que de techo a base son:

- Topografía del terreno.
- Base del Cuaternario permeable.
- Base del Terciario permeable.
- Techo del Mesozoico: utilizado por falta de continuidad del Terciario de baja permeabilidad.
- Muro del acuífero o base del Mesozoico: formado por el Keuper o por materiales mesozoicos de baja permeabilidad.

Cabe destacar, que hay una gran incertidumbre en la determinación de la ubicación del muro mesozoico del acuífero puesto que prácticamente no se han realizado sondeos ni campañas geofísicas que hayan cortado o detectado estos materiales en las zonas del centro y este de la Plana de Valencia Sur. Además, debido a la falta de continuidad del terciario de baja permeabilidad, se ha utilizado el techo del Mesozoico para definir el muro de la capa 3.

Para la Plana de Valencia Norte, las superficies de las cuatro capas se han deducido a partir de información existente, tal como columnas litológicas procedentes de datos de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 1996) y sondeos realizados en la fase de construcción de pozos de sequía (TEYGE S.A., 1995). Con estos datos, se ha realizado una interpolación de los muros y techos de las 4 capas por el método estadístico de krigeado. En cambio, para la Plana de Valencia Sur los datos referentes a las superficies de las capas se han tomado del modelo de la Plana de Valencia Sur realizado por Ballesteros et al. para el IGME en el año 2012.

En la Figura 17, se observa la geología del acuífero representada en el modelo en el entorno del Parque de la Albufera donde las celdas activas están coloreadas en verde y en cuya vista frontal y lateral se pueden apreciar las 4 capas del acuífero.

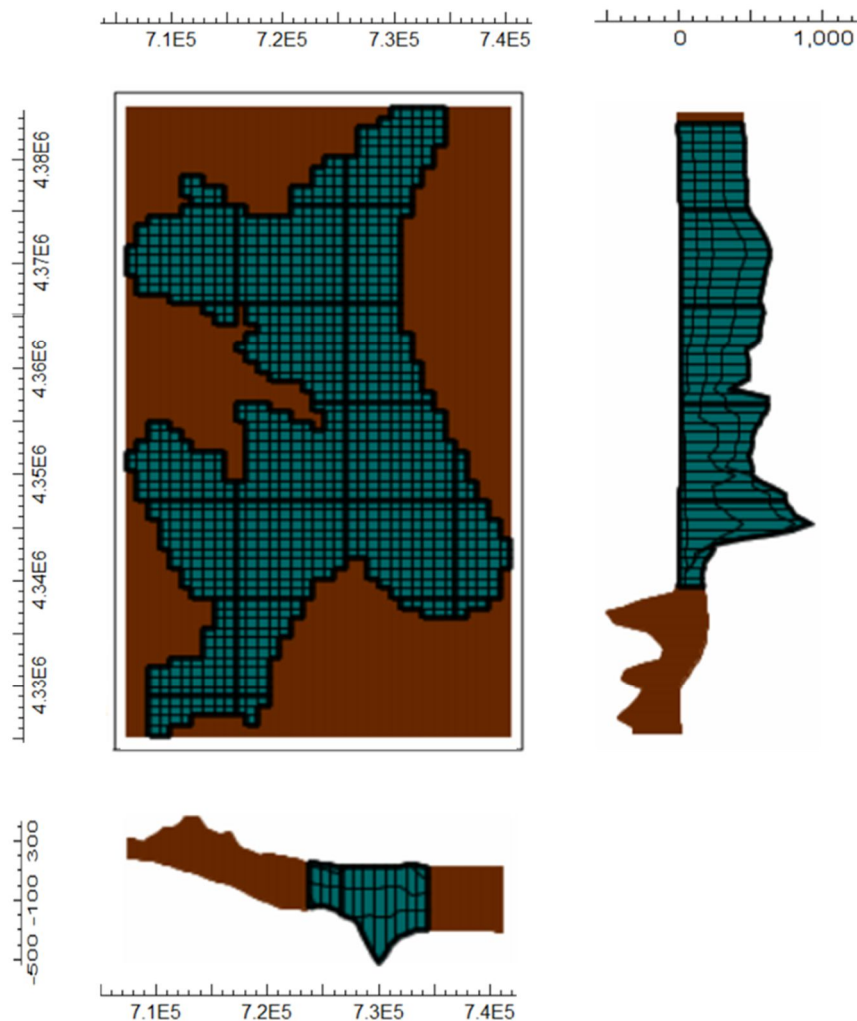


Figura 17. Estructura geológica resultante del acuífero en el entorno Albufera.

3.2 Discretización temporal

Como unidad de paso de tiempo se ha elegido el mes, suficiente para simulación hidrológica. Por otro lado, el periodo de estudio comprende desde octubre de 1980 hasta septiembre de 2017, es decir 37 años hidrológicos o 444 valores mensuales, en los que se ha intentado reproducir el funcionamiento del sistema objeto de estudio.

En el modelo anterior (Citores, 2018) se optó por definir otro periodo que discurría desde el año hidrológico 1940/1941 hasta 1979/1980, representando el régimen no influenciado donde se asumía que el medio no tenía gran influencia del hombre.

Puesto que en el modelo de partida la calibración era bastante aceptable, se asumió que los cambios realizados a partir de este momento no afectarían gravemente al modelo en régimen no influenciado, ni tampoco era de interés para este estudio, por lo que solo se ha simulado a partir de los años 80.

3.3 Parámetros hidráulicos

Para la resolución de la ecuación de flujo en medio poroso (ecuación 1) el software necesita tener definida en cada celda activa para cada capa del modelo, una serie de parámetros como son la conductividad hidráulica (K), el almacenamiento específico (S_s) y el rendimiento específico (S_y). Estos datos deberían obtenerse mediante trabajos de campo y análisis de anteriores estudios, sin embargo, en este caso sólo ha sido posible recurrir a información hidrológica disponible.

Para la definición de parámetros de la masa subterránea 081.141 se ha utilizado un mapa de permeabilidades publicado por el IGME para la primera capa del modelo y para las 3 inferiores se ha decidido darle continuidad a las ya definidas en la parte sur, puesto que se trata de la misma formación hidrogeológica y se carece de datos más precisos. Por el contrario, para la masa subterránea 081.142 la caracterización se ha realizado en base al modelo subterráneo realizado por Ballesteros et al. en el año 2012.

La información existente es mucho más abundante para la primera capa del acuífero, mucho más accesible desde la superficie del terreno que en comparación con los materiales que se encuentran a mayor profundidad. De este modo, no se tienen casi datos sobre parámetros hidráulicos de la capa inferior del acuífero (materiales del Mesozoico).

Por todo lo comentado anteriormente, los dominios de permeabilidad de los materiales cuaternarios están mucho más detallados, mientras que para el resto de los materiales, conforme aumenta la profundidad menos regionalizadas están las capas.

Los parámetros hidráulicos iniciales se han obtenido de bibliografía (Custodio et al., 1983 y Freeze et al., 1979). Posteriormente, en la fase de calibración se han ido reajustando algunos valores de estos parámetros para poder reproducir flujos y series de alturas piezométricas reales.

Los parámetros considerados en el modelo son los que figuran a continuación:

Capa 1: Materiales cuaternarios permeables

Tal como se definió en la Figura 11, hay 5 dominios de permeabilidades definidos para la primera capa del acuífero llegando a valores máximos iniciales de 849.5 m/d para las conductividades horizontales (K_x y K_y). Por otro lado, tanto en la presente como en las otras capas, se ha asumido que la conductividad en el eje “x” es igual a la del eje “y” y que en el eje “z” es 10 veces menor a la de los otros dos.

La sectorización de permeabilidades para la capa superior del acuífero se representa en la Figura 18:

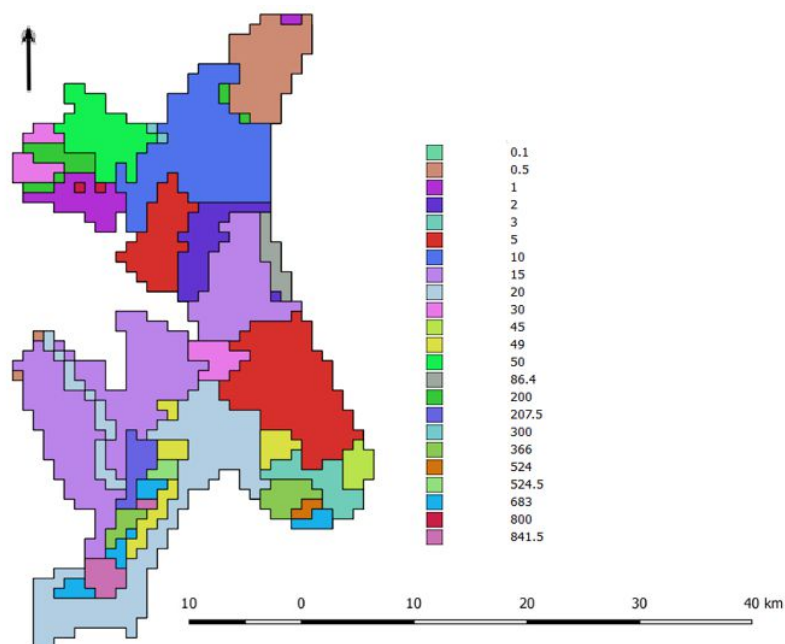


Figura 18. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d consideradas en el modelo numérico para los materiales cuaternarios de la capa superior.

Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento S_s que se ha introducido ha sido de 10^{-5} m^{-1} para toda la capa y el rendimiento específico S_y se ha discretizado como en la Figura 19.

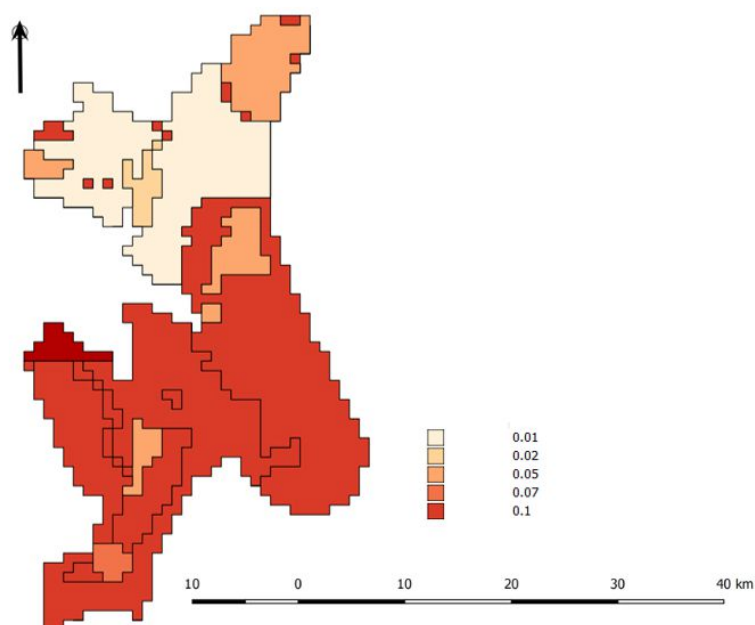


Figura 19. Distribución del rendimiento específico S_y para los materiales cuaternarios de la capa superior.

Capa 2: Materiales terciarios permeables

Como se ha comentado con anterioridad, al alejarnos de la superficie se va tornando más complicado conseguir una descripción detallada de la geología, por lo que en esta capa hay menos zonas diferenciadas en comparación a la capa 1 (Figura 20).

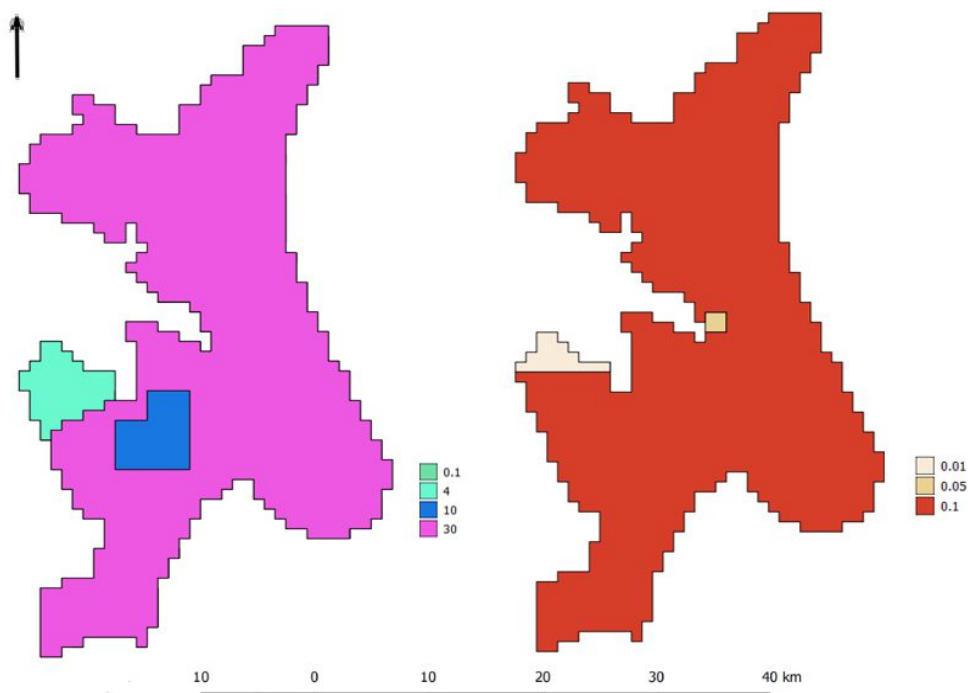


Figura 20. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d (izquierda) y rendimiento específico S_y (derecha) considerados en el modelo numérico para los materiales terciarios de la 2ª capa.

Se ha mantenido el mismo coeficiente de almacenamiento S_s que en la primera capa por tratarse de una distribución de materiales sedimentarios muy similar, es decir 10^{-5} m^{-1} .

Capa 3: Materiales terciarios de baja permeabilidad

Se ha asignado una permeabilidad y rendimiento específico de 0.1 m/d mientras que el coeficiente de almacenamiento se ha supuesto de 10^{-5} m^{-1} como en el modelo de Ballesteros et al. (2012). Los parámetros hidráulicos de la capa 3 se representan en la Figura 21.

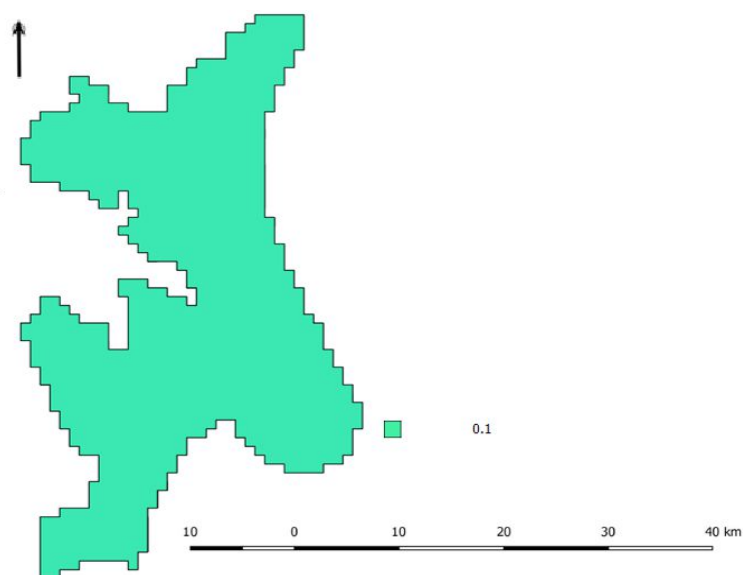


Figura 21. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d y del rendimiento específico S_y considerados en el modelo numérico para los materiales terciarios de la 3ª capa.

Capa 4: Materiales mesozoicos permeables

Anteriores campañas, han registrado valores puntuales de permeabilidades de hasta 500 m/d, sin embargo, siguiendo con lo aceptado en el modelo de Ballesteros et al. (2012), se ha asumido que el valor máximo es de 45 m/d.

Además, debido a falta de información hidrogeológica se ha considerado que esta capa es confinada. De este modo, se ha tomado un valor de 10^{-5} m^{-1} para el coeficiente de almacenamiento, el mismo que para la capa 3. Los parámetros hidráulicos de la capa 4 se muestran en la Figura 22.

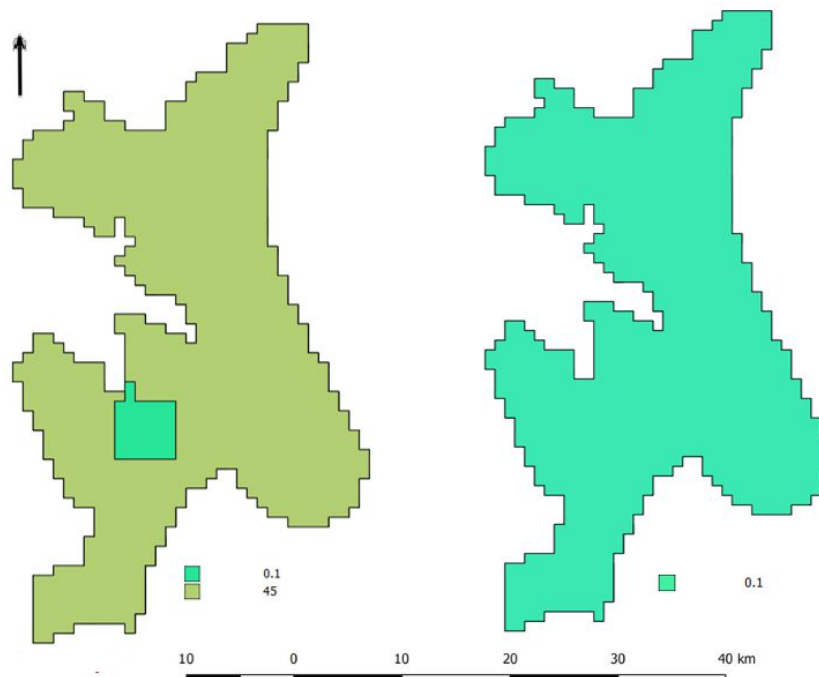


Figura 22. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d (izquierda) y del rendimiento específico S_y (derecha) consideradas en el modelo numérico para los materiales mesozoicos de la última capa..

3.4 Condiciones de borde

Todo modelo numérico necesita una serie de condiciones de borde que puedan representar las relaciones entre un dominio y los sistemas externos a este. Cuando se trata de aguas subterráneas, éstas condiciones de contorno están representando el flujo de agua entre el modelo y sus contornos exteriores.

En el modelo presente se ha utilizado dos tipos de condiciones de contorno:

- Condición de Neumann o de segundo tipo (flujo prescrito): para definir las recargas y los bombeos.
- Condición de Cauchy, de tercer tipo o mixta (flujo dependiente de la altura piezométrica): para definir los drenajes, los ríos y los límites con otras masas de agua colindantes, incluida la costa.

Estas condiciones de borde se describen más detalladamente en los epígrafes inferiores.

3.4.1 Límites laterales

Un límite se considera abierto porque se permite el flujo de agua, es decir, la entradas y salida a través de él, mientras que uno impermeable no permite el paso de agua.

En este modelo, solamente se ha considerado dos bordes impermeables: en la zona este correspondiente al contorno Buñol-Cheste y al sur de las masas subterráneas de Caroch Norte y de la Plana de Valencia Sur, ya que esta zona está constituida por formaciones impermeables del Keuper.

Los límites con otras masas de agua subterránea se han simulado como un contorno tipo 3, se ha fijado una altura piezométrica en el borde (ayudándonos de piezómetros cercanos) y según el nivel piezométrico simulado en nuestro acuífero, por el borde se producirá una entrada o salida de agua, que también dependerá del valor de la conductancia de los materiales del contorno.

Para introducir esta condición de borde en el software, se ha utilizado la opción “*General-Head Boundary (GHB)*”, que simula las condiciones de contorno para los que el flujo depende de la altura piezométrica. Por otro lado, este módulo requiere información sobre la altura de referencia de la fuente o sumidero externo, así como de conductancia de los materiales entre la fuente o sumidero externo y el dominio del modelo.

Este último factor cuantifica la entrada o salida de agua del contorno, y en MODFLOW se describe en unidades de longitud al cuadrado por unidad de tiempo (L^2/T). Su expresión matemática es la siguiente:

$$C = \frac{KLW}{M} \quad (2)$$

donde, K es la conductividad hidráulica de los materiales del contorno (L/T), L la longitud del contorno (L), W el ancho del límite (L) y M el espesor dichos materiales (L), que generalmente se corresponde con el espesor vertical medido en dirección perpendicular al flujo.

ModelMuse permite calcular la conductancia de diferentes formas, sin embargo, para este modelo se ha escogido de entre todos ellos el método “*calculated*”, en el que el valor de la conductancia introducido es el que se corresponde con KW/M , ya que la longitud de celda es calculada directamente por el programa.

Los límites de la plana Norte y Sur con otras masas de agua subterránea son 8: Plana de Sagunto, Liria-Casinos, Buñol-Cheste, La Contienda, Sierra del Ave, Caroch Norte, Sierra de las Agujas y la Plana de Jaraco. También se han considerado como límites laterales los intercambios de agua con el mar Mediterráneo.

3.4.1.1 Reconstrucción de series temporales piezométricas

Para introducir la altura de referencia de los límites laterales no se ha considerado oportuno trabajar con un valor fijo para todo el periodo de simulación, ya que se estaría perdiendo información muy valiosa que se corresponde con el comportamiento real del sistema y nos permitiría una simulación menos veraz.

Por este motivo, se han introducido series piezométricas de pozos cercanos a los bordes definidos anteriormente.

Sin embargo, estas series piezométricas necesitan un tratamiento de datos ya que no están completas y es necesario que lo estén para poder introducirlos en el software y que cubran todo el periodo de simulación.

Para el relleno de las series temporales se ha seguido la misma metodología que la utilizada por Citores (2018), que es la utilizada por la CHJ en la realización del borrador para consulta pública del Plan especial de sequía del año 2017.

Se han aplicado dos técnicas diferentes en función de los datos históricos disponibles en cada piezómetro: la metodología Patrón y la Correlación SPI12. La primera se utiliza en aquellos casos en los que la información piezométrica está medida desde el principio de la serie, pero hay vacíos a lo largo de la misma que deben ser rellenos.

La Figura 23 muestra la reconstrucción de la serie del piezómetro 08.25.009 en el límite del acuífero de la Plana de Sagunto. Como se puede apreciar, hay datos desde el inicio de la serie, pero hay ciertos vacíos a mediados de los años 80 y a final de los 90.

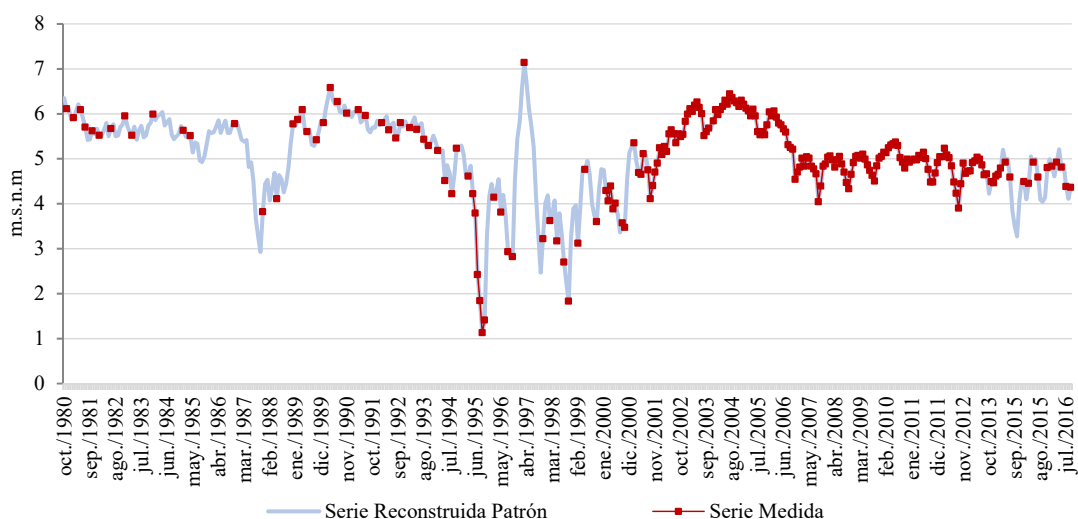


Figura 23. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.25.009 en la Plana de Sagunto.

La segunda se utiliza en casos en los que un tramo importante de la serie medida no tiene valores, bien sea porque los piezómetros se han puesto en funcionamiento recientemente y no hay datos del periodo inicial, o porque los huecos de la serie abarcan muchos años. Este método se basa en la comparación de los datos piezométricos existentes con los datos de precipitación acumulada del área de ubicación del piezómetro. De esta forma, se intenta reproducir la respuesta del piezómetro a la lluvia en los casos en los que exista una correlación significativa que así lo demuestre (CHJ, 2017). Se ha usado el índice de precipitación estandarizada (SPI) y un periodo de acumulación para el cálculo de este índice de 12 meses.

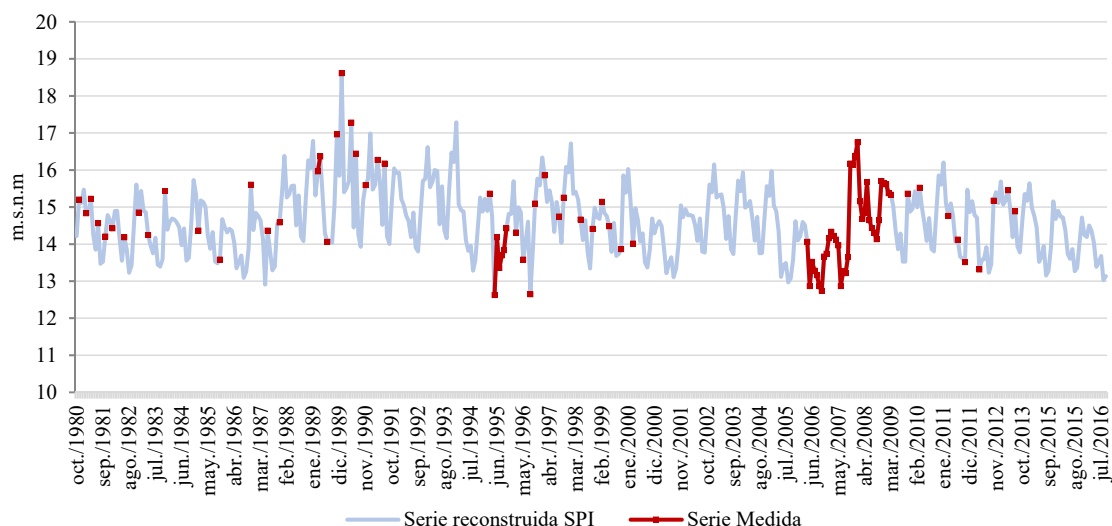


Figura 24. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.26.043 en el contorno de Sierra de las Agujas.

En la Figura 24, se puede ver como a pesar de que hay datos desde los años 80, hay una gran ausencia de datos en los periodos 1980/1995 y 2000/2006.

3.4.2 Cuerpos de agua superficial

Existen varios cauces que atraviesan la Plana de Valencia, y en este modelo se consideran los siguientes: Turia, Rambla del Poyo, Río Magro, Río Verde, Río Júcar, Río Sellent y Río Albaida, de los cuales el Júcar es el que mayor influencia tiene. Cabe destacar, que algunos de ellos funcionan como ríos permanentes, es decir que siempre llevan agua y otros como ramblas, en los que el caudal aparece en ciertas ocasiones con una continuidad espacio-temporal poco definida.

Para ilustrar la relación entre el acuífero y los ríos considerados, se ha recurrido a diversas fuentes de información tales como los balances obtenidos en trabajos anteriores (Citores, 2017 y Ballesteros et al., 2012), y al Plan Hidrológico Nacional correspondiente al ciclo 2015-2021.

En la Figura 25 se muestran los tramos de río clasificándolos en ganadores, perdedores o variables respecto al acuífero, según un estudio que realizó el IGME en el año 2009 sobre identificación y caracterización de la interrelación entre aguas subterráneas con ríos, manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de interés hídrico.

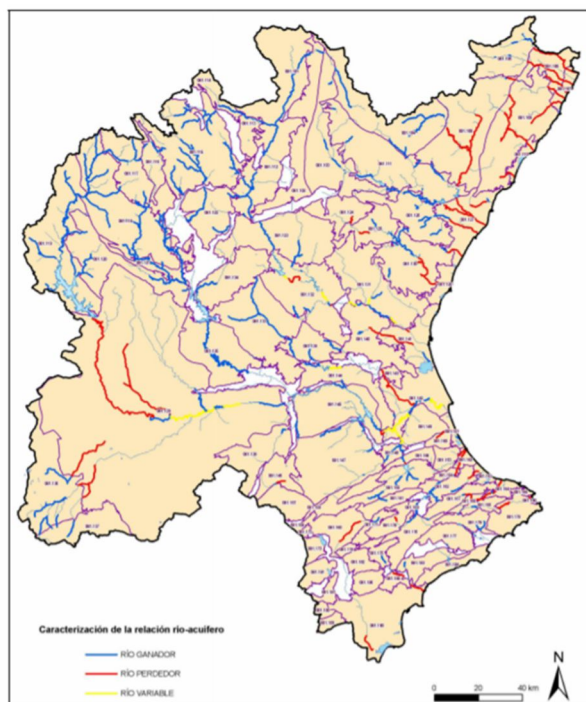


Figura 25. Mapa de la relación río ganador/perdedor/variable con respecto al acuífero de la DHJ. Fuente: IGME (2010).

Para simular la relación río-acuífero se ha optado por escoger el paquete “*River (RIV)*” de MODFLOW, que se utiliza para simular la entrada o salida de flujos del sistema a través de los ríos y simulando los contornos como tipo 3, es decir, con un flujo dependiente de la altura piezométrica. Por otro lado, los ríos han sido importados de un archivo SIG y las cotas de éstos se han estimado a partir de mapas digitales del terreno, definiendo puntos a lo largo del cauce e interpolando sus valores.

Este módulo requiere definir la altura de la lámina de agua en el río, así como la cota del lecho y la conductancia de los materiales del lecho. La conductancia sigue la misma expresión matemática que la definida anteriormente para el paquete “*GHB*” (ecuación 2), y el método escogido para su definición también ha sido en este caso “*calculated*”.

3.4.3 Drenajes

La condición “*Drain*” de MODFLOW trabaja de tal forma que sólo permite la salida de flujos del acuífero, nunca la entrada. A partir de esta condición de borde se ha tratado tanto los principales humedales y manantiales o *ullals* del área de estudio, así como las acequias que interceptan el nivel freático del acuífero y que, mayoritariamente, atraviesan los arrozales próximos a la costa.

Como en el caso de los cuerpos de agua superficial, la localización de los drenajes se ha importado desde un archivo SIG y las cotas de éstos se han obtenido por interpolación a partir de mapas digitales del terreno de alta precisión. Además, se han simulado como contorno tipo 3 (flujo dependiente de la altura piezométrica).

El paquete “*Drain*” requiere para su definición la altura de referencia a la que se sitúa el dren y la conductancia de los materiales entre el dren y el dominio del modelo, definida bajo la ecuación (2).

La ubicación de estos drenajes ha sido importada desde un archivo de SIG (Sistema de Información Geográfica) y sus respectivas cotas se han obtenido de mapas digitales del terreno de alta precisión. La información requerida para activar este paquete es la cota del drenaje y la conductancia de sus materiales. El parámetro de la conductancia se utiliza de la misma manera que con los módulos anteriormente analizados y la expresión matemática utilizada coincide con la ecuación.

3.4.3.1 Canales de riego o acequias

Las acequias introducidas se concentran en la parte este del modelo, en las zonas colindantes al Parque de la Albufera, donde se encuentran mayormente los cultivos de arroz.

Cabe destacar que, en este modelo, con las acequias se están intentando simular los bombeos que se realizan en el entorno del Parque de la Albufera y que detraen agua del sistema subterráneo y la llevan a zonas de interés agrícola. En el modelo, el excedente de esta agua bombeada no retorna al sistema, aunque en la realidad lo haga a través de retornos que sí alimentan al lago superficialmente.

Para cuantificar el agua subterránea que se obtiene en el parque, en el modelo de Citores (2018) se dividieron los canales en zonas coincidentes con unidades de demanda agrícola (UDAs) y en el actual se ha hecho la misma consideración. Estas unidades son las siguientes:

- Regadíos tradicionales del Turia - Séquia de l'Or.
- Regadíos tradicionales del Turia - Vega de Valencia.
- Regadíos tradicionales del Júcar - Comunidad de Regantes de la Acequia Real del Júcar.
- Regadíos tradicionales del Júcar - Comunidad de Regantes de Sueca.
- Regadíos tradicionales del Júcar - Comunidad de Regantes de Cullera.

La distribución de los drenes considerados en el modelo numérico planteado se muestra en la Figura 26, donde los de color azul corresponden a la Plana Norte y los rojos a la Plana Sur.

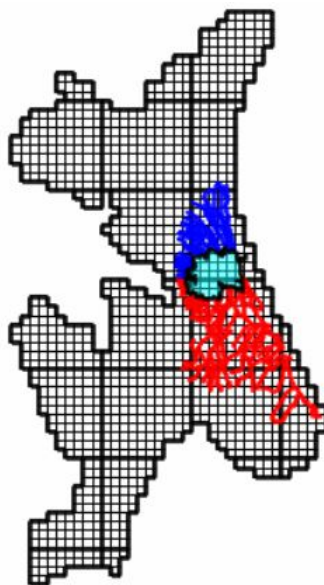


Figura 26. Localización de los canales de riego y el lago de la Albufera en ModelMuse.

3.4.3.2 Humedales y manantiales

En total se han definido 10 celdas bajo la condición “*Drain*” para simular los humedales de mayor importancia en la Plana en los que se encuentra la Marjal de Rafal y Vistabella, la Balsa de San Lorenzo y los *ullals* cercanos al Parque de la Albufera.

Los dos primeros son humedales costeros mediterráneos alimentados por el acuífero mediante flujo vertical, el primero de tipo marjal y el segundo tipo laguna litoral (IGME, 2009b).

Por otro lado, los *ullals* son humedales costeros de agua dulce que tienen su origen en los afloramientos de acuíferos subterráneos y para este caso en concreto, se transporta su agua gracias a los canales de riego.

En la Figura 27 se puede ver la localización de los elementos mencionados anteriormente:

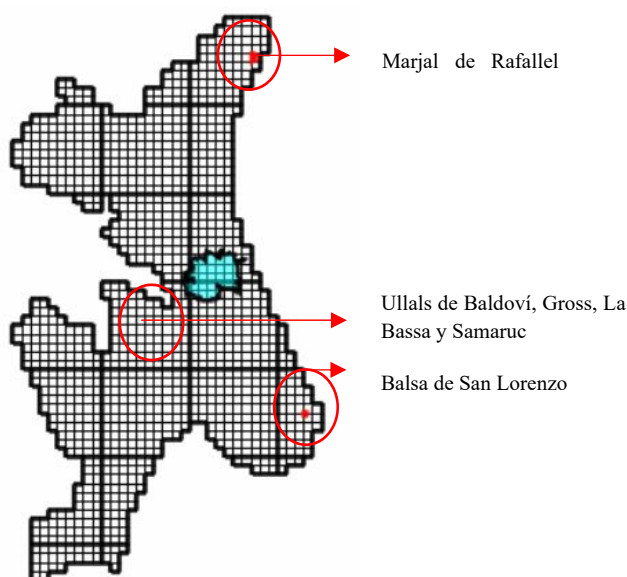


Figura 27. Localización de los humedales, manantiales y del lago de la Albufera en ModelMuse.

3.4.4 Recarga

En este modelo se consideran las fuentes de recarga superficial por precipitación y aquella parte de la demanda bruta agrícola que no es consumida por las plantas (excedente) y que tampoco ha evaporado, volviendo al sistema a través de retornos que se infiltran y recargan el acuífero.

El paquete “*Recharge*” se ha utilizado para introducir en MODFLOW el aporte subterráneo proveniente de la recarga superficial, puesto que permite al usuario especificar una tasa de recarga en una zona determinada que posteriormente multiplicará por el área afectada consiguiendo la recarga total. Por otro lado, sólo se ha considerado recarga en la capa más superficial del acuífero.

En la Figura 28 se representa la evolución anual de las precipitaciones y de los retornos subterráneos de riego agrícola introducidos en el modelo, así como la tendencia de cada serie de datos. Se puede apreciar, como en el periodo de sequía que comenzó en el año hidrológico 2004/2005 disminuyen ambas recargas que posteriormente se recuperan a pesar de tener ambas una tendencia descendente.

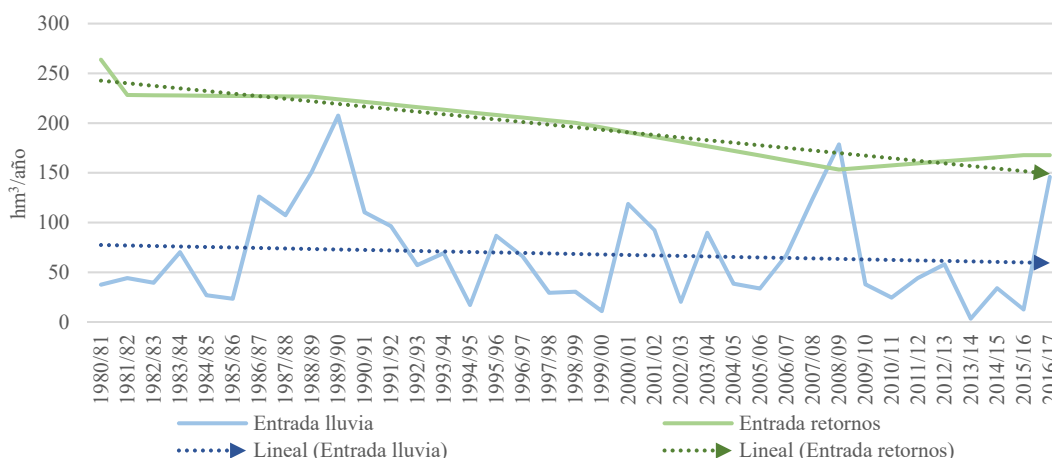


Figura 28. Evolución anual de las recargas consideradas en el modelo. Periodo 1980/1981-1981/2017.

3.4.4.1 Recarga por lluvia

La recarga por precipitación está zonificada y sigue la distribución utilizada en el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005), que permite obtener valores de la recarga representativos y distribuidos en la zona de estudio. La Figura 29 muestra los sectores en los que se ha dividido la superficie para la recarga.

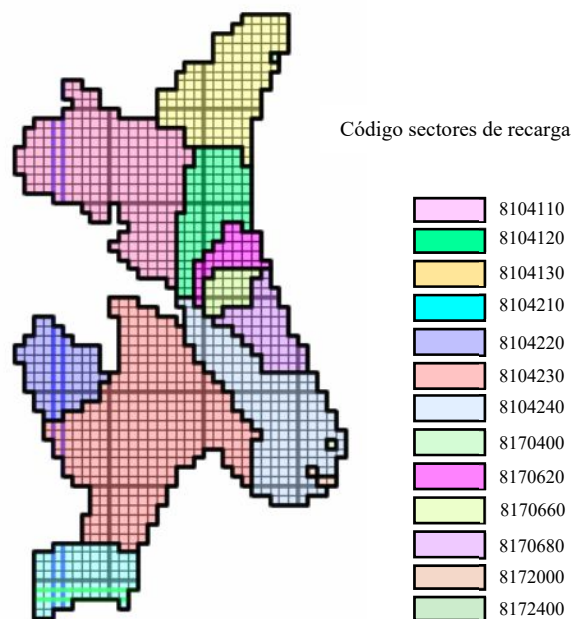


Figura 29. Distribución de la recarga de lluvia definida en ModelMuse según zonas de PATRICAL.

3.4.4.2 Recarga por retornos de riego

Se entiende por UDA a aquellas zonas agrícolas que poseen características comunes tales como localización, comunidades de regantes que la componen, origen del agua, tecnologías utilizadas para el riego, infraestructuras existentes, etc. que permite tratarla de forma separada al resto de unidades (CHJ, 2015a).

La caracterización de la recarga por retornos de riego se ha hecho en base a las distintas unidades de demanda agrícola (UDA) a partir de información facilitada por la CHJ (Figura 30).

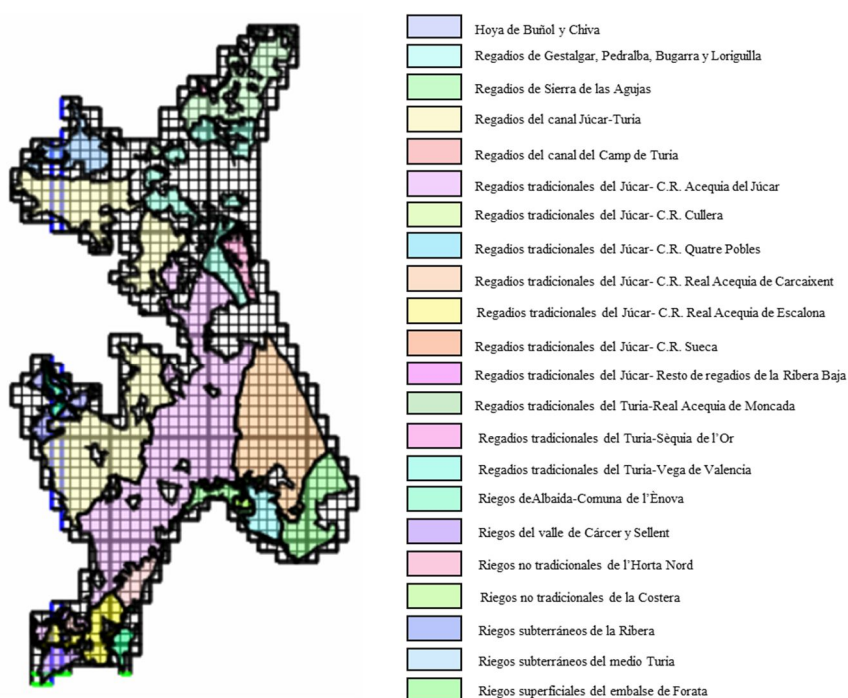


Figura 30. Zonificación de las UDAs definida en ModelMuse para recarga por retorno agrícola.

3.5 Condición inicial

Se entiende como condición inicial aquella que describe los niveles piezométricos para el tiempo t_0 , o sea, establece el estado inicial del sistema previo a la simulación y forma parte de la información necesaria para poder resolver la ecuación del flujo en un medio saturado.

Es necesario que en MODFLOW el modelador introduzca unos niveles iniciales que han de escogerse minuciosamente, pues facilitan los tiempos de cálculo y evitan divergencias en la resolución de la ecuación de flujo, ya que cuanto más cerca se esté inicialmente de la solución, menos tiempo se tardará en llegar a ella.

Para el caso presente, se ha utilizado un mapa de piezometrías que realizó la empresa EPTISA en el año 2005 (Figura 31). A pesar de que el periodo de estudio comienza en octubre del año 1980, debido a la desconocimiento y falta de información de alturas piezométricas, se ha considerado que estas alturas fueron las mismas en los dos periodos al tratarse de épocas de sequía.

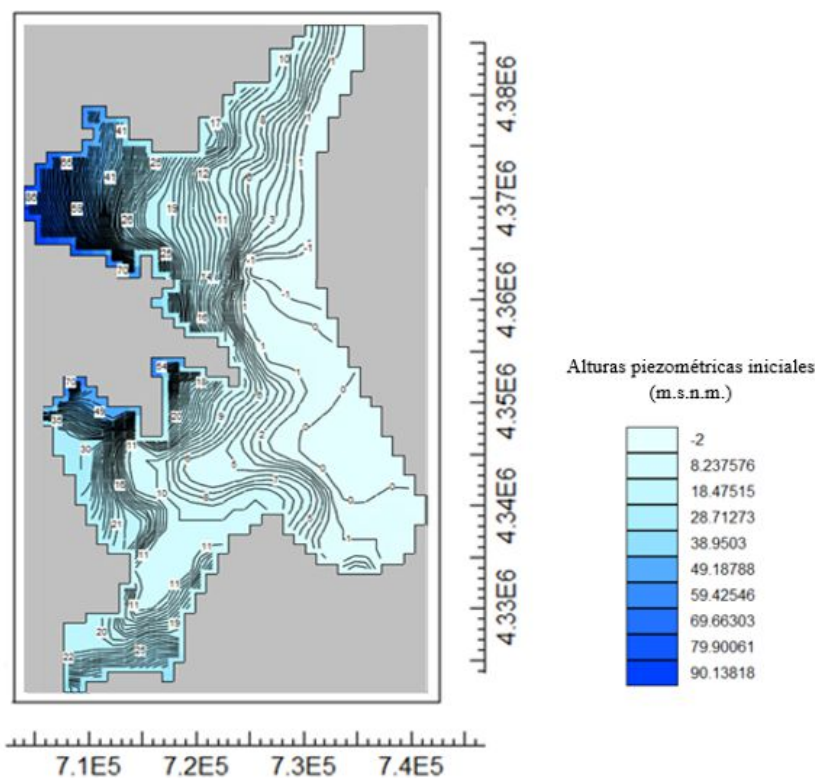


Figura 31. Alturas piezométricas iniciales definidas en ModelMuse. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.

A partir de las alturas piezométricas iniciales, de los parámetros y espesores de capa, se ha calculado el almacenamiento inicial de las primeras dos capas, resultando de 2450 hm^3 para la primera, cuyo funcionamiento es de acuífero libre y de 6400 hm^3 para la segunda, que funciona como confinada en este caso. Solamente se han tenido en cuenta estas dos capas, ya que por motivo de sus espesores son las más rentables en lo que a explotación se refiere.

3.6 Bombeos

La información necesaria utilizada en este apartado para localizar y cuantificar los bombeos procede tanto de la CHJ como de la información facilitada por la empresa Aguas de Valencia.

Por otro lado, se distinguen 4 tipos de bombeos autorizados por la C.H.J.: los bombeos realizados por la empresa Aguas de Valencia para futuro abastecimiento urbano, los de uso agrícola, los de abastecimiento urbano e industrial y los de sequía.

Para la definición de las extracciones de aguas subterráneas en MODFLOW, se ha utilizado el paquete “Well”, para el cual es necesario identificar a cada pozo en nombre y coordenadas y la tasa de extracción (m^3/d) con la correspondiente discretización temporal, en este caso mensual. Para la introducción de estos datos en el modelo, se ha creado previamente con una herramienta GIS una capa en formato shapefile que los contiene.

3.6.1 Bombeos Global Ómnium

El abastecimiento de agua de la ciudad de Valencia procede de agua superficial de los ríos Turia y Júcar (a través del Canal Júcar-Turia), que alimenta las dos Plantas Potabilizadoras o Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP), conocidas como La Presa y El Realón, la primera en el término municipal de Manises, la segunda en el de Picassent, ambas propiedad del Ayuntamiento de Valencia (IIAMA, 2012). En la Figura 32 se representa el esquema general del abastecimiento al área metropolitana de la ciudad de Valencia.

La ETAP de La Presa se halla ubicada en el término municipal de Manises, al noroeste de la ciudad de Valencia, junto al cauce del río Turia, aguas arriba del azud de la acequia de Moncada. Inicialmente, la ETAP fue diseñada para tratar las aguas del Turia, pero a consecuencia de su caudal irregular, de su grado de contaminación en ascenso, y del incremento en las necesidades de abastecimiento, la CHJ optó por la construcción del Canal de Tránsito Júcar-Turia, que nace en el embalse del Júcar en Tous, y llega hasta el Turia en Manises, con el objetivo de garantizar las necesidades de agua de Valencia y su área metropolitana (2300000 habitantes) y Sagunto (100000 habitantes). Posteriormente, a principios de los años 80, se construye la planta potabilizadora El Realón en Picassent, que coge el agua sólo del canal, ampliando la capacidad y garantía de suministro a la ciudad de Valencia y su área metropolitana.

Por otro lado, la ETAP de Manises cuenta con diversos pozos dentro del recinto y un pozo radial aguas arriba de la misma, que captan aguas subterráneas del subálveo del río Turia, donde el nivel estático de agua del pozo coincide con el del río. El agua procedente de los pozos se emplea con carácter complementario al agua superficial, nunca en exclusiva, especialmente en situaciones particulares tales como reparaciones de las instalaciones o trabajos de mantenimiento, (compuertas, bombas, etc.), o cuando ocurren episodios de lluvias intensas, que aumentan la turbidez de las aguas superficiales. Una vez extraída el agua, se filtra en arena y posteriormente se le realiza un tratamiento químico de cloración.

El Ayuntamiento de Valencia dispone de las siguientes concesiones de caudales de agua bruta por parte del Organismo de Cuenca, la CHJ:

- Río Turia (incluye pozos del subálveo): 1 m³/s (31.5 hm³/año).
- Río Júcar (Canal Júcar-Turia): 3 m³/s (94.6 hm³/año).



Figura 32. Esquema general del abastecimiento al área metropolitana de Valencia. Fuente: http://www.benetusser.es/sites/default/files/presentacion_emshi_master_de_gestion_del_agua_mar_2017.pdf.

En la Figura 33 se detalla la situación de los pozos interiores de apoyo de la potabilizadora de La Presa.

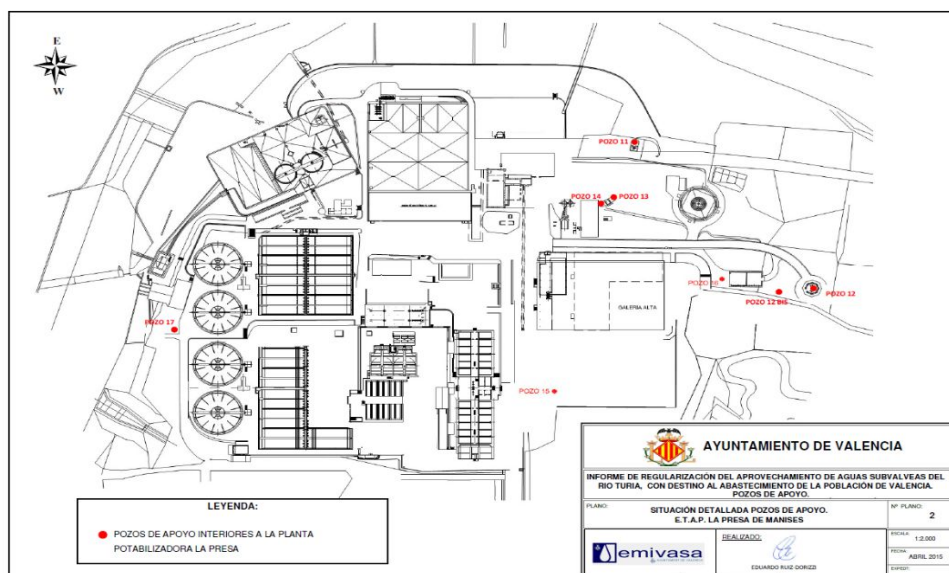


Figura 33. Situación detallada de los pozos de la ETAP de La Presa.

Concretamente, el pozo 17 (Manises III) corresponde a una serie de sondeos que ejecutó la CHJ para trabajos de investigación y no se ha utilizado nunca por insuficiencia de caudal. La Figura 34 corresponde al plano de situación con los 3 sondeos de investigación y cuya nomenclatura es diferente al resto.

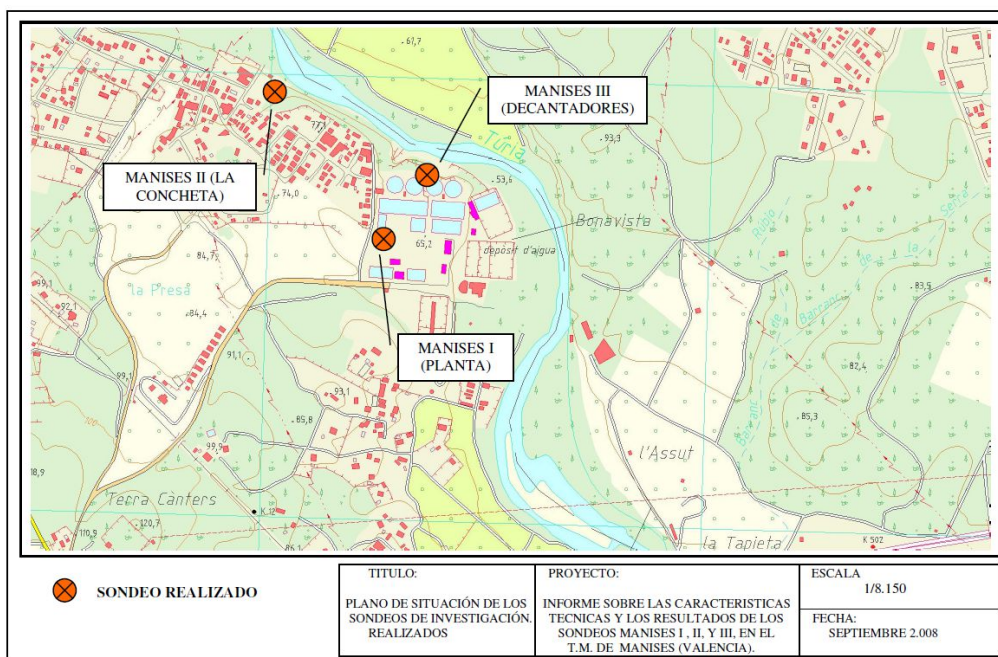


Figura 34. Plano de situación de los sondeos de investigación realizados por la CHJ.

Por otro lado, los pozos interiores pueden funcionar todos a la vez. Evidentemente, cualquiera de ellos puede funcionar como pozo de control.

La Tabla 5 recoge las profundidades de los pozos existentes en la ETAP de La Presa.

Tabla 5. Profundidades de los pozos de la ETAP de La Presa.

	Pozo 11	Pozo 12	Pozo 13	Pozo 14	Pozo 15	Pozo 16	Pozo 12 Bis
Profundidad sondeo (m)	72.2	36	81.5	85	94	93	148

Inicialmente, se había asignado una profundidad de -80 m al pozo modelado, ya que es la profundidad media de los sondeos, descontando el pozo 12. Teóricamente, la capa 1 en ese punto llega a -37 m aproximadamente, de modo que, si se colocaba el bombeo a la profundidad propuesta en primera instancia, la celda estaría inactiva y no bombearía nada. Se trata de una incoherencia del modelo, fruto del desconocimiento de la geología en la zona. Finalmente, se decidió colocarlo a una profundidad de -20 m. En la Figura 35 se puede apreciar que la profundidad del pozo 12 Bis es de 148 m, muy superior a la profundidad modelada máxima a la que llega el acuífero en ese punto.

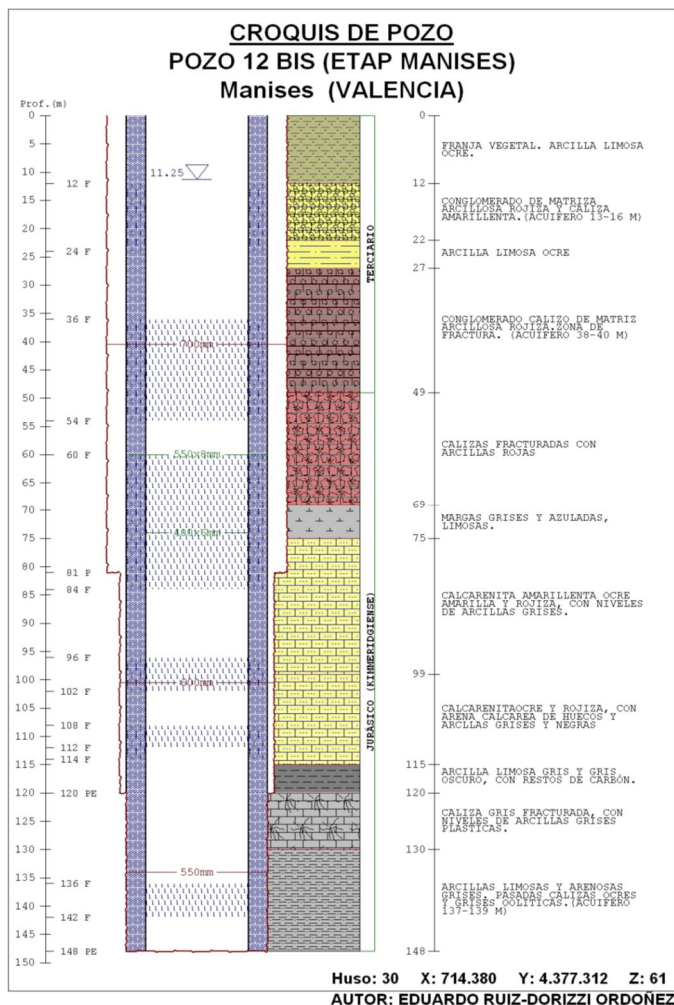


Figura 35. Croquis del pozo interior 12 Bis de la ETAP de La presa.

Para simplificar, en nuestro modelo se ha supuesto todos los pozos de la ETAP de La Presa como uno solo ya que se encuentran muy cerca, más concretamente, se han sumado los caudales de la serie histórica diaria de los pozos interiores, así como del pozo radial. En la Figura 36 se representa la evolución anual de los bombeos realizados en la ETAP de La Presa a partir del año 2004/2005.

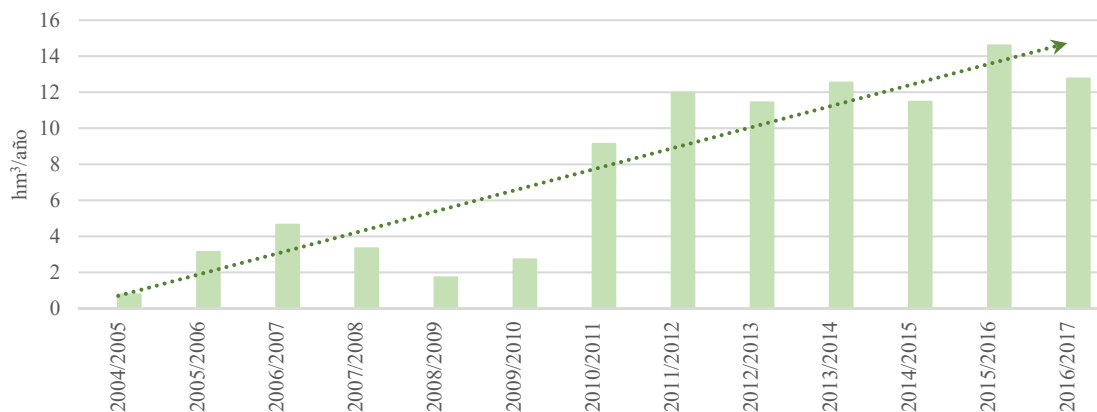


Figura 36. Evolución anual de los bombeos realizados en la ETAP de La Presa por la empresa Global Ómnium.

Además de los bombeos realizados en la propia potabilizadora, también se detrae agua del acuífero de la Plana en otros 13 puntos situados en el área metropolitana para diversos fines. La ubicación correspondiente a tales puntos se representa en la Figura 37 en color azul y la ETAP de Manises en color amarillo.

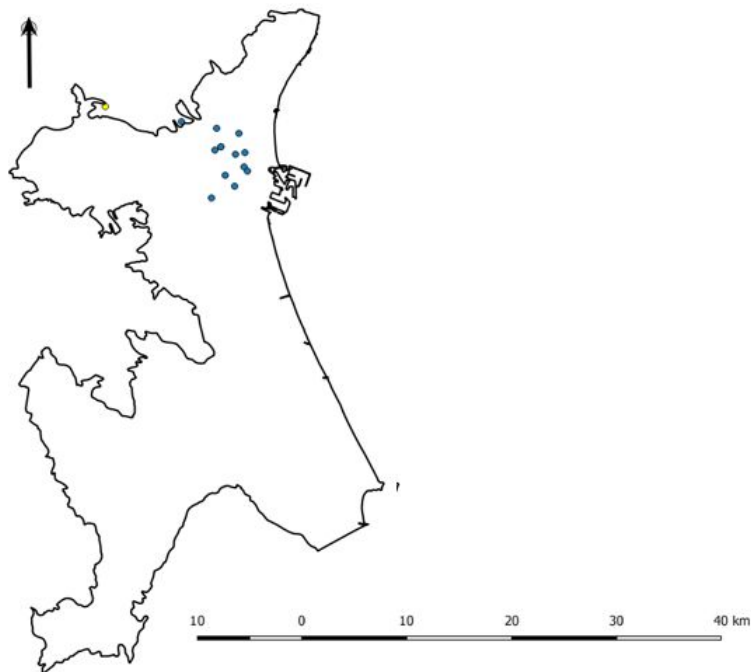


Figura 37. Ubicación de los pozos de bombeo utilizados por la empresa Global Ómnium.

La serie histórica de todos los bombeos realizados por la empresa Global Ómnium desde el año hidrológico 2004/2005 hasta el 2016/2017 se representa en la Figura 38.

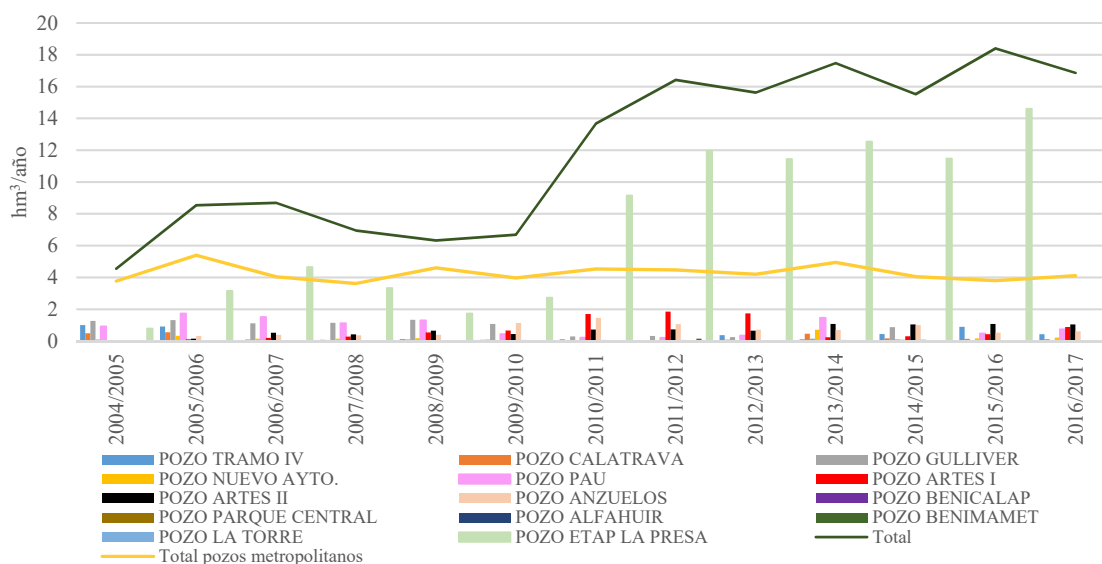


Figura 38. Evolución anual de los bombeos realizados por la empresa Global Ómnium.

A lo largo de toda la serie histórica, el caudal bombeado en la ETAP es el que mayor volumen representa en el total de las detracciones de la empresa. Cabe destacar, que a partir del año 2010/2011 la ETAP de La Presa comenzó a extraer por encima de 9 hm³/año (Figura 36)

manteniéndose la tendencia ascendente hasta el presente y con un valor máximo en el año 2015/2016 de 14.6 hm³/año. Para los 13 pozos metropolitanos, los valores cambian dependiendo del año señalado, aunque el total se mantiene y ronda los 4 hm³/año (línea amarilla, Figura 38).

3.6.2 Bombeos CHJ

Se distinguen tres usos que han sido autorizados por la CHJ para el bombeo de agua subterránea: regadío, abastecimiento urbano e industrial y pozos de sequía. La ubicación de los mencionados pozos se representa en la Figura 39. Es importante mencionar que la mayoría de los pozos de sequía están concentrados en la Plana Sur.

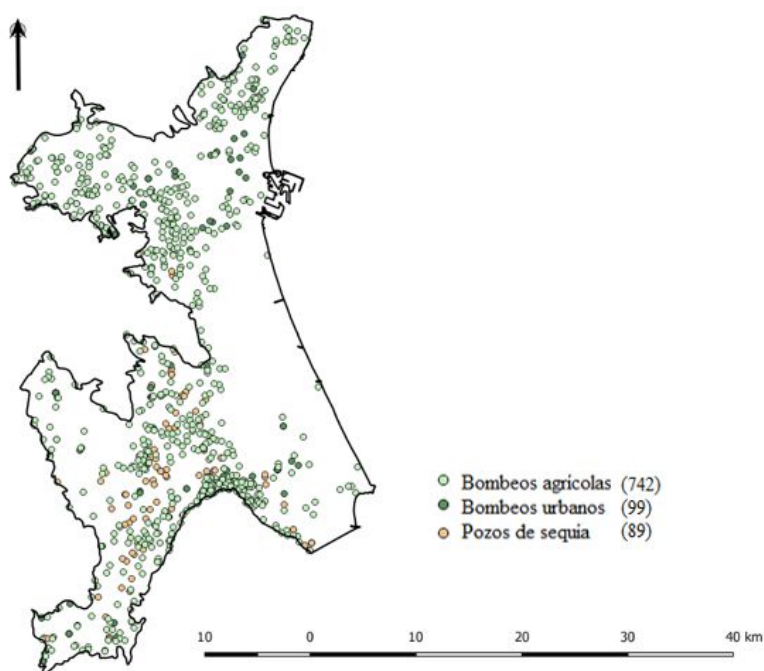


Figura 39. Ubicación de los pozos de bombeo de la CHJ.

Como se observa en la Figura 40, los bombeos se sitúan entre valores de 80-85 hm³/año, pudiendo sobrepasar los 120 hm³/año en periodos en los que se ponen en marcha protocolos de emergencia por motivos de sequía.

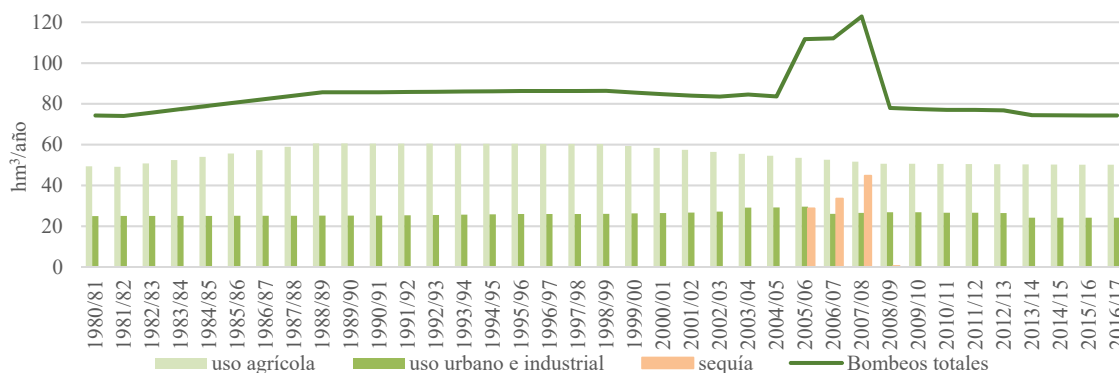


Figura 40. Evolución anual de los bombeos realizados por la CHJ.

Los bombeos para uso agrícola son los más importantes cuantitativamente, extrayendo de media unos 54 hm³/año en 742 pozos repartidos entre la Plana Norte y Sur.

Los bombeos para uso urbano e industrial extraen un volumen medio de 26 hm³/año repartidos en 99 pozos.

En lo que concierne a los pozos de sequía, su utilización se reduce al periodo de sequía prolongada comprendido entre los años 2006/2009, en el que se tuvo que activar una serie de pozos para completar el suministro de agua a los riegos de la ribera del Júcar y tramo final del río Turia como parte de la puesta en marcha de una serie de medidas de emergencia para solventar los problemas de escasez de agua. Como se puede observar en la Figura 40, se llegaron a extraer 126 hm³ en el año 2007/2008, es decir, unos 40 hm³ al año adicionales a los extraídos en condiciones de normalidad.

Se ha considerado que la profundidad a la que se sitúa la totalidad de los pozos es de -20 m, debido a que, a partir de ese valor se conseguía extraer el máximo de agua posible y el espesor de la capa permitía la extracción. Lo correcto sería poner cada pozo con su profundidad de bombeo real, sin embargo, se carece de esa información por lo que se ha tenido en cuenta la practicidad a la hora de modelarlos.

3.6.3 Bombeos duplicados AAVV y CHJ

Existen una serie de puntos en los que para la misma ubicación se tienen valores distintos de extracción tanto de Global Ómnium como de la CHJ, como si de bombeos diferentes se tratase. Este hecho se puede observar en la Figura 41.



Figura 41. Comparación de bombeos en un punto cercano al parque Gulliver.

A partir del año 2004 se tiene información de la empresa relativa a la tasa de extracción, sin embargo, la CHJ tiene datos desde los años 80, o lo que es lo mismo, el inicio de nuestro periodo de simulación.

Lo que sucede es que la CHJ trabaja con valores teóricos que se obtienen a partir de dotaciones y coeficientes de reparto para cada pozo, mientras que la empresa trabaja con mediciones reales. Por este motivo, se han considerado los pozos con los valores de la empresa por ser más fiables, a pesar de no tener datos para todo el periodo de simulación.

3.6.4 Achiques del metro de Valencia

Además de las extracciones mencionadas en los epígrafes 3.6.1 *Bombeos Global Ómnium* y 3.6.2 *Bombeos CHJ*, existen otros bombeos que achican agua de las instalaciones del metro de Valencia, con el fin de evitar inundaciones en los túneles.

Según la información facilitada por el Ayuntamiento de Valencia, los datos iniciales corresponden al año 2011, por lo que se va a suponer que en nuestro modelo los bombeos comienzan ese año. Por otro lado, en Global Ómnium han estimado los caudales bombeados limitando el número de horas de funcionamiento a 7800 h/año debido a errores en los datos iniciales.

Se han ubicado los achiques de forma aproximada ya que no se tiene la localización exacta de todas las estaciones de bombeo (Figura 42). Además, se ha repartido el volumen total bombeado estimado para cada línea de metro entre las estaciones implicadas, asumiendo el mismo caudal bombeado en todas ellas. Los datos referentes a los achiques se recogen en la Tabla 6.

Tabla 6. Achiques líneas de metro 1,3 y 5.

Línea	Volumen (m ³ /año)	nº de estaciones	Volumen (m ³ /año/estación)	Volumen (hm ³ /año/estación)
1	6028113.09	6	1004685.52	1.00
3	6393585.27	13	491814.25	0.49
5	2454707.97	11	223155.27	0.22

Tras la vista de los volúmenes anuales extraídos, queda de manifiesto que en comparación a los bombeos realizados por la empresa o por la CHJ, los valores son pequeños puesto que rozan los 2 hm³/año. Sin embargo, sería útil considerar la utilización de esta agua para algún uso o inclusive almacenarla para posterior tratamiento, en vez de verterla directamente al sistema de saneamiento.

A partir del volumen anual extraído por estación, se ha calculado el caudal diario, dividiendo el caudal total entre los días del año. Estos pozos se han colocado a -20 m de profundidad puesto que no se sabe a qué profundidad están realmente.

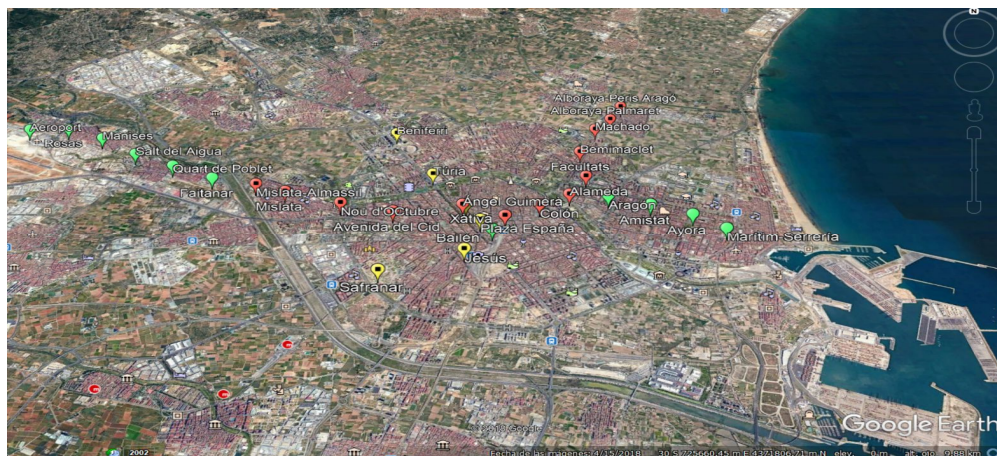


Figura 42. Puntos de achique de las líneas de metro 1,3 y 5.

El aspecto de los achiques realizados en las tres líneas de la red de metro de Valencia en el modelo se representa en la Figura 43.

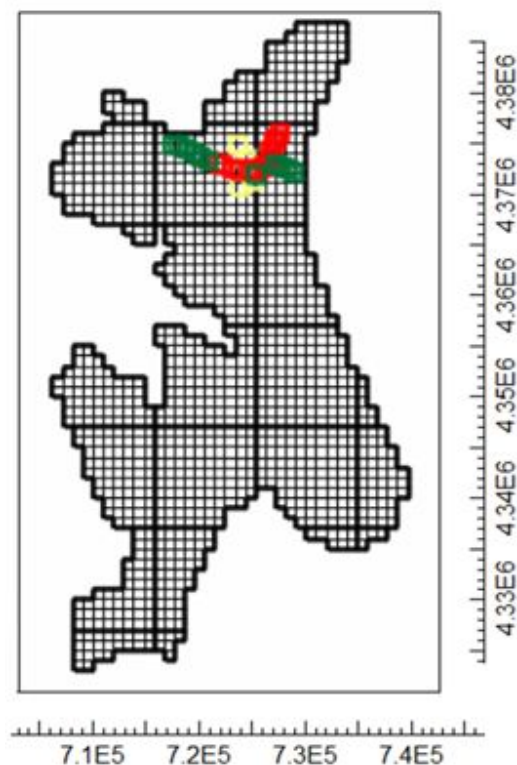


Figura 43. Localización de los puntos de achique de las líneas de metro 1,3 y 5.

3.6.5 Bombeos totales

En la Figura 44 se representa la evolución anual de todos los bombeos que se han realizado sobre el acuífero de la Plana de Valencia diferenciando la entidad que detrae el agua del sistema.

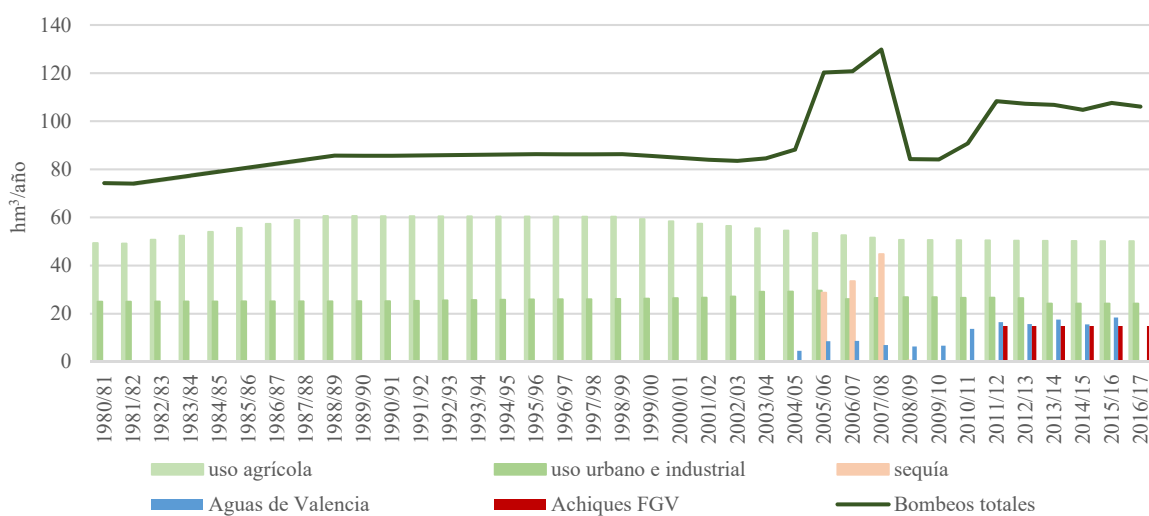


Figura 44. Evolución anual de los bombeos totales realizados sobre la Plana de Valencia



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

4. CALIBRACIÓN DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La calibración es un proceso que tiene como objetivo la reproducción del comportamiento del sistema. Generalmente, no es posible construir un modelo 100% fiel a la realidad debido a que existen errores de diversa índole, como por ejemplo los errores en los datos de origen u observados e incluso errores en el propio modelo conceptual. Por tanto, la calibración consiste en encontrar un conjunto de valores de los parámetros, condiciones de contorno y acciones externas, de tal manera que, los valores de las variables derivados del modelo concuerden con los valores registrados para unas ciertas localizaciones bajo una incertidumbre lo más pequeña posible.

La calibración se suele hacer en régimen estacionario o no influenciado, en el que no se consideran los efectos antrópicos sobre el sistema y en transitorio o influenciado, en el que se simulan los efectos del sistema siendo explotado, es decir, considerando los bombeos. En este caso se ha optado por realizarla sólo en régimen influenciado puesto que sólo se deseaba analizar el impacto de los bombeos en el sistema, que únicamente están presentes en este régimen. Además, la información disponible es mucho más fiable y abundante que para el periodo estacionario, que abarca desde el año hidrológico 1940/1941 hasta el 1979/1980.

Además, la calibración de un modelo se puede realizar de manera manual o automática. En la primera opción, el modelador va modificando los parámetros uno a uno y mediante prueba y error ajustando los resultados. Por otro lado, la calibración automática se basa en el ajuste de parámetros mediante un sistema de optimización, que resulta más rápido y objetivo, pero numéricamente complejo. En este trabajo se ha elegido el método manual, porque a pesar de ser más lento y subjetivo, adopta el criterio del modelador.

4.1 La calibración en régimen influenciado

Como se ha comentado anteriormente, el régimen influenciado corresponde a la situación en la que el acuífero se encuentra en estado de aprovechamiento. En este estado se incluyen los bombeos y por tanto las acequias y canales del parque de la Albufera y los retornos de riego.

En este modelo se trabaja a escala mensual. Se han introducido valores de entrada para cada mes, suficiente para los objetivos del proyecto. El periodo de simulación abarca 37 años hidrológicos, desde octubre de 1980 hasta septiembre de 2017.

Una vez introducida toda la información disponible en el modelo numérico y tras las primeras simulaciones, quedó de manifiesto la necesidad de realizar una calibración más exhaustiva que fuera capaz de reproducir el comportamiento del sistema con una menor incertidumbre.

Para conseguir dicho ajuste, se han tenido que realizar ciertas modificaciones sobre el modelo conceptual desarrollado inicialmente, por lo que se ha tenido que disponer de datos de alturas y/o flujos en función del tiempo. La altura piezométrica es el único tipo de dato que sale directamente de la ecuación del flujo y de la que siempre se dispone de observaciones de campo.

La calibración se lleva a cabo teniendo como objetivo en primer lugar la reproducción de las alturas piezométricas en algunos pozos (llamados piezómetros de control) y la reproducción de

los valores de los flujos laterales de referencia (Pérez-Martín, 2005). Para este fin, se ha modificado las condiciones de contorno y las propiedades físicas de los acuíferos.

4.2 La calibración de las condiciones de contorno

El procedimiento es similar al que se aplicaría en régimen no influenciado, pero sujeto a la condición de que el borde tenga altura variable, es decir, se sustituyen los valores de altura piezométrica constantes en el tiempo por las series históricas medidas disponibles en función del tiempo, en este caso con escala mensual, que dotarán al modelo de la variabilidad real que tienen los datos.

En este caso, el objetivo es imponer series de alturas piezométricas registradas en piezómetros situados sobre los contornos, o lo más cercanamente posible a los mismos. Como se explicó en el apartado *3.4.1.1 Reconstrucción de series temporales piezométricas*, las series piezométricas necesitaban un tratamiento estadístico de datos ya que no cubrían todo el periodo de simulación. En las celdas en las que no había piezómetro, el software realizó interpolaciones lineales a partir de las series piezométricas existentes asociadas a ciertos vértices de los contornos del modelo.

Solamente se ha impuesto la condición de borde impermeable, al contorno que se encuentra en la parte suroeste de la Plana de Valencia Sur, debido a la presencia de facies del Keuper y una parte del contorno de Buñol en la zona este.

Por otro lado, se han dividido los bordes de cada masa de agua en varios tramos para facilitar el proceso de calibración. De este modo, se han ido ajustando de forma iterativa las conductancias de cada tramo para intentar reproducir los volúmenes de referencia (Pérez-Martín, 2005 y Ballesteros et al., 2012), sin desajustar los niveles piezométricos en el resto del acuífero.

4.3 La calibración de las propiedades físicas de los acuíferos

Para intentar reproducir adecuadamente los niveles de agua observados en los piezómetros de control, se han ido modificando las propiedades físicas de la capa superior del acuífero introducidas en el modelo de forma preliminar. Para ello, ha sido necesario un gran número de simulaciones, ya que una modificación de los parámetros produce cambios en los flujos laterales.

Los parámetros hidráulicos finales resultantes tras el proceso de calibración se pueden ver en la Figura 45.

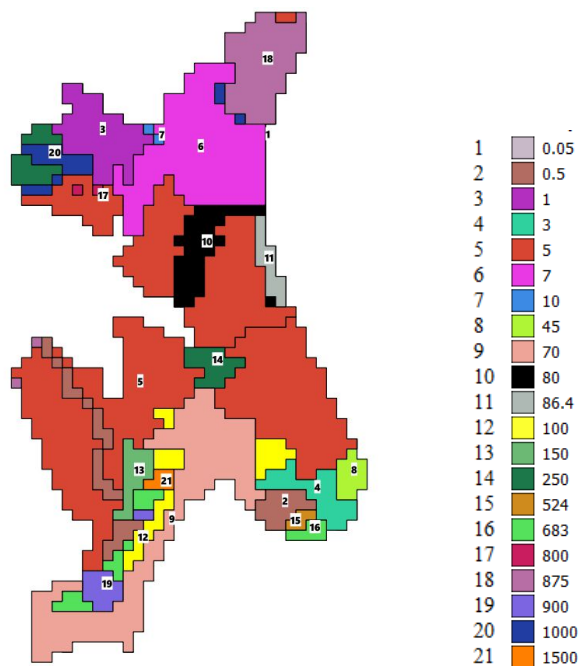


Figura 45. Distribución de las permeabilidades K_x en m/d consideradas en el modelo numérico para los materiales cuaternarios de la capa superior tras la calibración.

En la Tabla 7 se recogen los dominios de permeabilidad obtenidos tras la calibración con los que figuran en el mapa de permeabilidades realizado por el IGME en el año 2006 (Figura 11) con el fin de poder apreciar cómo han variado los dominios respecto a los valores de referencia.

Tabla 7. Dominios de permeabilidad para el modelo calibrado y según IGME (2006).

Zona calibrada	Permeabilidad	Dominio	Dominio IGME
1	0.05	Media	Baja
2	0.5	Media	Muy alta/alta según zonas
3	1	Alta	Muy alta
4	3	Alta	Alta/Muy alta según zona
5	5	Alta	Alta
6	7	Alta	Baja/Alta según zona
7	10	Alta	Alta
8	45	Alta	Alta
9	70	Alta	Muy alta
10	80	Alta	Baja
11	86.4	Alta	Alta
12	100	Alta	Muy alta
13	150	Alta	Baja/Alta según zona
14	250	Alta	Baja
15	524	Muy alta	Alta
16	683	Muy alta	Alta
17	800	Muy alta	Muy alta
18	875	Muy alta	Baja
19	900	Muy alta	Alta/Muy alta según zona
20	1000	Muy alta	Muy alta
21	1500	Muy alta	Muy alta

Una de las mayores diferencias corresponde a la zona 18, modelada con materiales de muy alta permeabilidad, aunque en la realidad está formada por limos, arcillas y materia orgánica que poseen baja permeabilidad.

Con el fin de facilitar la calibración la zona sur ha sido dividida en zonas más pequeñas de alta a muy alta permeabilidad. Además, esta división se corresponde con la litología real de la zona en la que afloran zonas de acusada permeabilidad mezclándose con materiales de diversa permeabilidad.

En cuanto al resto de diferencias entre los dominios calibrados y los definidos por el IGME, puesto que no se conocen los valores exactos de permeabilidad de los materiales que constituyen el mapa del IGME, sería interesante disponer de esa información con el fin de afinar la calibración, ya que quizás las diferencias sean muy pequeñas y no supondrían un cambio en el dominio como está sucediendo ahora.

Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento S_s y el rendimiento específico S_y se han discretizado como en la Figura 46.

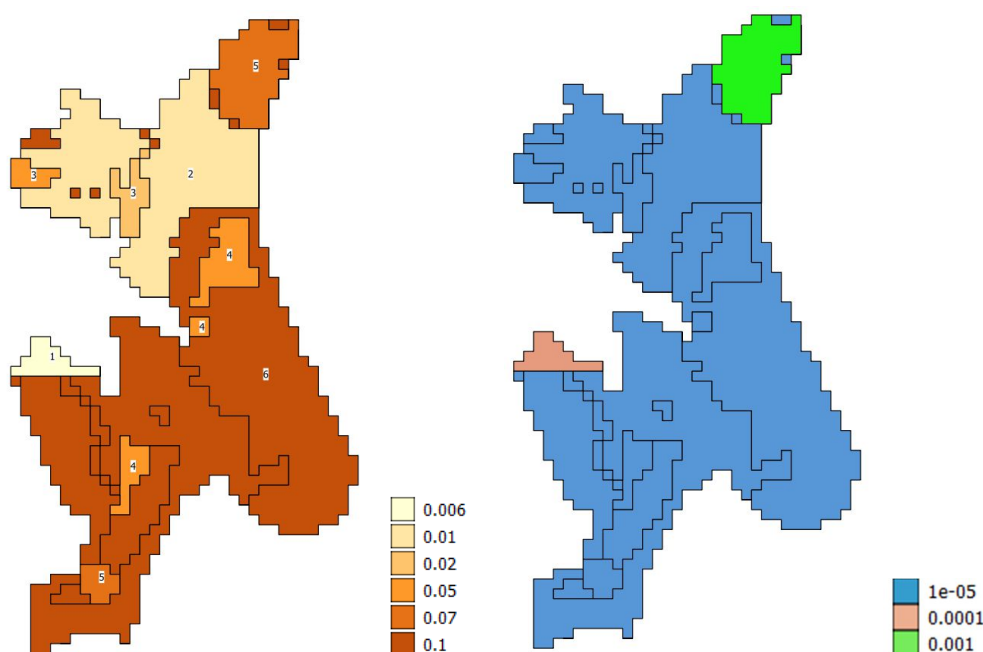


Figura 46. Distribución del rendimiento específico S_y (izquierda) y el almacenamiento específico S_s (derecha) para los materiales cuaternarios de la capa superior tras la calibración.

También se han calibrado las conductancias de los lagos y de los ríos existentes en el modelo. Éstos últimos, se han ido ajustando de acuerdo a los valores de entradas y salidas propuestos por Citores (2017) y a los mapas de tipología de la relación río-acuífero que figuran en el estudio “*Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas*” (IGME, 2010).

4.4 Los piezómetros de control

La calibración del modelo en régimen influenciado se ha basado principalmente en conseguir reproducir las series de niveles piezométricos observadas en algunos piezómetros. ModelMuse permite realizar un análisis de las diferencias entre los valores simulados y observados en todos los pozos de observación para aquellos tiempos en que se dispone de valor observado. Se ha evaluado el ajuste de las series piezométricas simuladas a las reales con el paquete “*HOB (Head Observation Package)*”.

Concretamente, se han seleccionado 18 piezómetros repartidos de forma más o menos homogénea con el objetivo de conocer la piezometría en toda la superficie del acuífero y conocer como fluctúan los niveles piezométricos en cada zona (Figura 47).

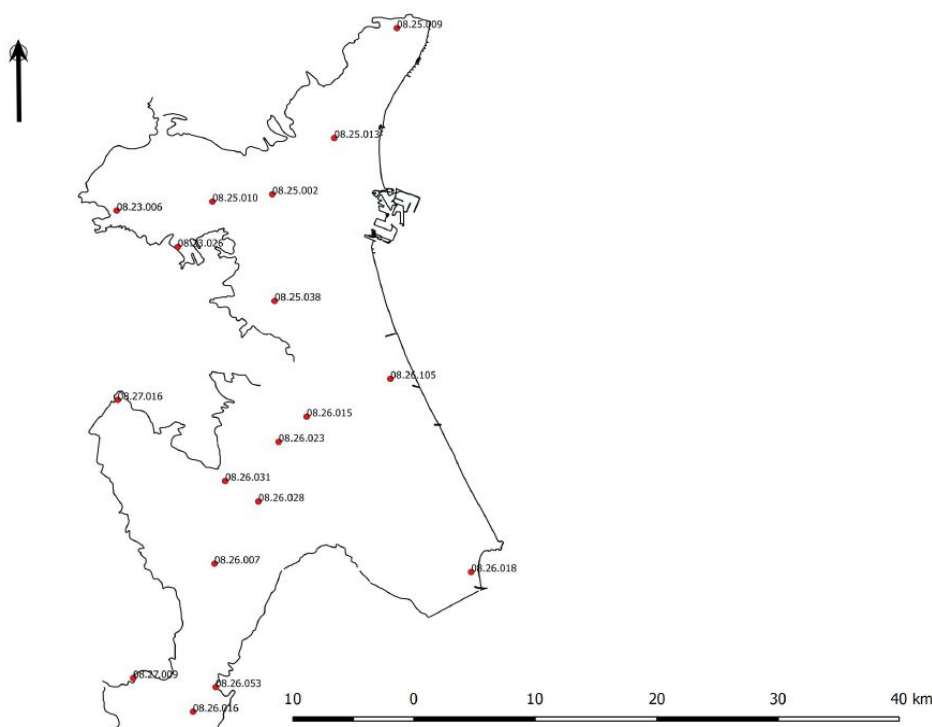


Figura 47. Ubicación de los pozos de observación.

4.5 Balances de masa del sistema

Se ha realizado tanto un balance global de todo el sistema como un balance parcial, para el que ha sido necesario realizar una discretización pormenorizada de elementos de interés de acuerdo a criterios de la CHJ para la gestión de las aguas superficiales y subterráneas, con el fin de conocer sus transferencias de agua con el acuífero. Para ello, se ha utilizado el paquete *ZONEBUDGET* de MODFLOW también desarrollado por el USGS.

4.5.1 Balance global

En la Tabla 8 se resume el balance global del modelo obtenido para régimen transitorio.

Tabla 8. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio. Periodo de simulación 1980/1981-2016/2017.

	Entradas		Salidas		Diferencias
	(hm ³ /año)		(hm ³ /año)		(hm ³ /año)
Recarga	262.83				262.83
Laterales	145.06	Laterales	126.43		18.63
Río-acuífero	52.95	Acuífero-Río	81.19		-28.24
		Bombeos	88.96		-88.96
		Drenes	163.40		-163.40
<i>Total</i>	460.84		459.98		0.86

De acuerdo con los resultados mostrados en el balance global, se puede apreciar que el acuífero se mantiene estable en el tiempo, siendo las entradas prácticamente idénticas a las salidas. Por otro lado, las recargas por precipitación y sobre todo por riego, son una componente muy importante de aporte de agua al acuífero, de modo que si se produjera una disminución de los recursos hídricos (hecho que se planteará en el apartado Aplicación del modelo. Escenarios5.Aplicación del modelo. Escenarios), se podría comprometer la estabilidad del acuífero.

En cuanto a la relación río-acuífero, queda de manifiesto que el acuífero aporta más agua a los ríos que viceversa, aproximadamente 30 hm³/año.

Los drenes también son un elemento clave, debido a que representan en torno al 40% de las salidas totales del sistema.

La Figura 48 representa la evolución a lo largo de los años de simulación de las principales componentes del modelo en régimen alterado.

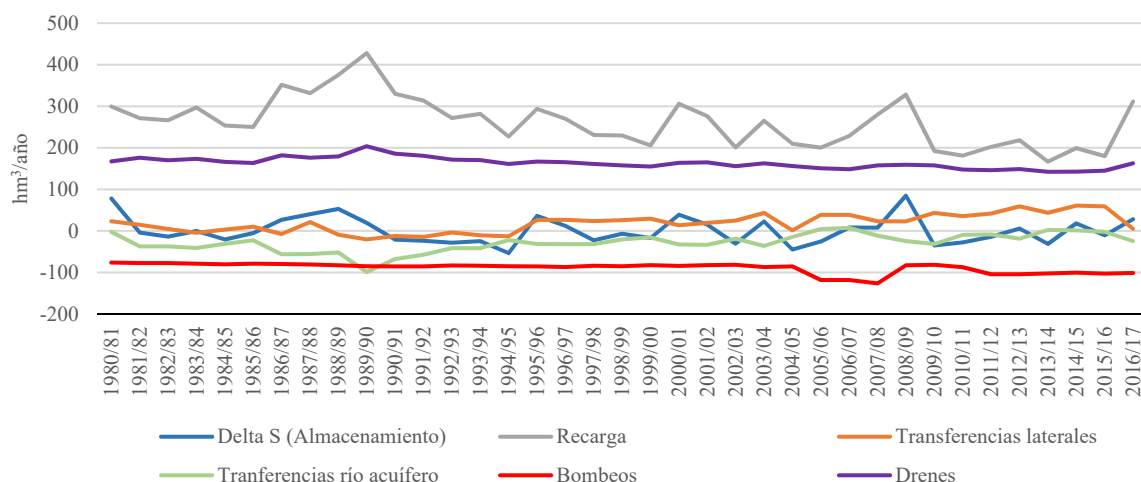


Figura 48. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado. Periodo 1980/1981-2016/2017.

Se puede apreciar que desde el año 1985/1986 hasta el 1990/1991, se produjo una importante recarga debido a importantes episodios de lluvias, lo que se tradujo en aumento del almacenamiento. Por otro lado, la relación río-acuífero toma valores negativos en ese periodo, lo que se traduce en aportes de agua subterránea a los ríos, es decir, los ríos pasaban a ser ganadores. También queda de manifiesto el periodo de sequía entre los años 2005 y 2009, en el aumento de las detracciones a causa de la activación de los pozos de sequía.

Además, el almacenamiento sigue el mismo patrón que la recarga, de modo que aquellos momentos en los que o bien la lluvia o los retornos agrícolas menguan, el acuífero acumula menos agua.

Con el fin de poder visualizar con mayor claridad los cambios en el almacenamiento del acuífero, se ha representado por separado en la Figura 49, la evolución del almacenamiento a lo largo de los 37 años simulados, donde las barras verdes corresponden a las variaciones anuales del volumen almacenado y la línea verde representa el total almacenado para un año en concreto.

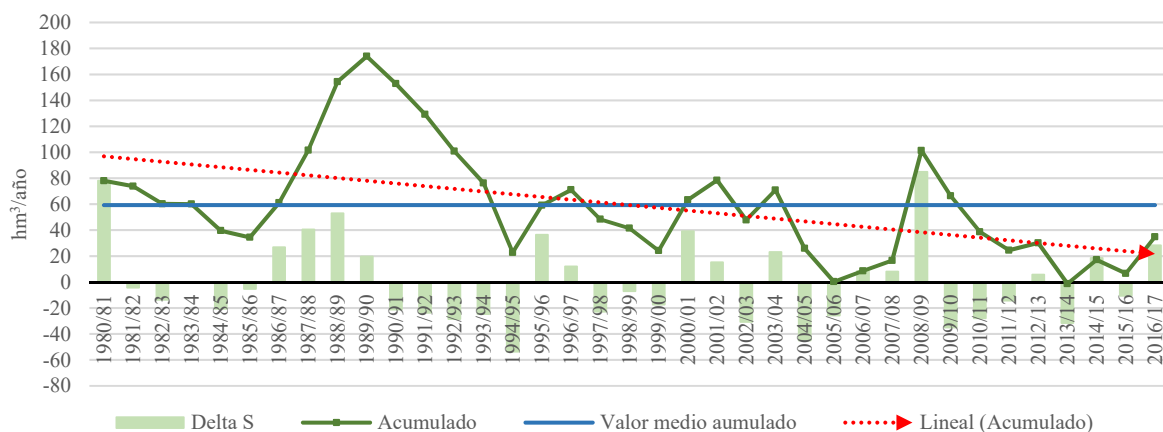


Figura 49. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado. Periodo 1980/1981-2016/2017.

Se aprecia que el comportamiento del cambio en el almacenamiento no tiene un patrón determinado, es decir, hay años en los que se almacena mucha más agua que otros. Solamente hay dos momentos puntuales en los que el acuífero está en niveles mínimos y prácticamente no acumula agua, el año 2005/2006 y el 2013/2014 debido a una bajada sustancial de las precipitaciones. Por tanto, queda de manifiesto que el acuífero por norma general almacena agua en mayor o menor medida, sin embargo, presenta una clara tendencia a la baja (línea roja de la Figura 49) producida por la disminución de las precipitaciones en la zona y de los retornos de riego.

4.5.2 Balance parcial

En la Tabla 9 se recogen las 27 zonas definidas para la realización del balance parcial, y en la Figura 50 se representan éstas según su distribución en filas y columnas.

Tabla 9. Definición de las zonas de interés definidas para la ejecución del balance parcial.

Identificador	Nombre de la zona	Identificador	Nombre de la zona	Identificador	Nombre de la zona
1	Costa 1-Norte superior	10	Contorno de Buñol-Cheste	19	Río Magro
2	Costa 2- Norte inferior	11	Contorno de La Contienda	20	Río Sellent
3	Costa 3- Sur superior	12	Contorno de Sierra del Ave	21	Río Albaida
4	Costa 4- Sur inferior	13	Contorno de Caroch Norte	22	Rambla del Poyo
5	Marjal de Rafal-Vistabella	14	Contorno de Sierra de las Agujas	23	Río Turia
6	Balsa de San Lorenzo	15	Contorno de Jaraco	24	Ullals
7	Albufera	16	Canales	25	Desembocadura del río Júcar
8	Contorno de Sagunto	17	Río Júcar	26	Tramo superior río Turia
9	Contorno de Liria-Casino	18	Río Verde	27	Tramo Rambla del Poyo-Albufera

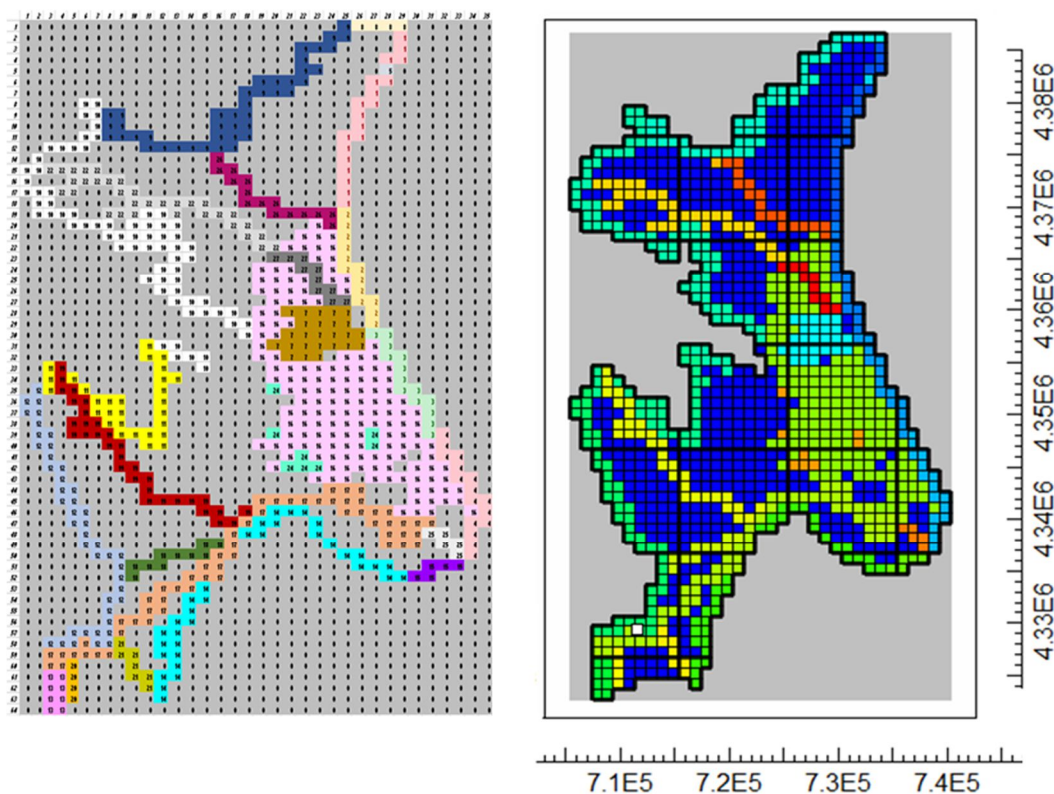


Figura 50. Discretización espacial de las zonas de interés definidas para la ejecución del balance parcial en formato Excel (izquierda) y vista en ModelMuse (derecha).

Cabe mencionar que, cuando en MODFLOW no se le asigna zona a una determinada celda, automáticamente el software lo trata como zona 0. Esta zona se representa en colores azules en la Figura 50 (derecha).

En la Tabla 10 se resume el balance parcial para los elementos de interés del modelo en régimen transitorio.

Tabla 10. Resumen del balance de masa parcial para el modelo en régimen transitorio. Periodo de simulación 1980/1981-2016/2017.

RÍOS	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)	Neto (hm ³ /año)	Tipo	Paquete
Júcar	10.00	62.29	-52.29	Ganador	River
Verde	0.09	9.18	-9.09	Ganador	River
Magro	19.99	0.04	19.95	Perdedor	River
Sellent	0.21	0.00	0.21	Perdedor	River
Albaida	5.68	0.00	5.68	Perdedor	River
Rambla del Poyo	3.84	6.21	-2.37	Ganador	River
Turia	0.02	0.16	-0.14	Ganador	River
	39.83	77.88	-38.05		
ALBUFERA					
Lago (lecho)	10.57	1.56	9.01	Entrada	River
Canales	0.00	106.71	-106.71	Salida	Drain
Ullals	0.00	25.34	-25.34	Salida	Drain
	10.57	133.62	-123.05		
TRANSFERENCIAS LATERALES					
Plana de Sagunto	29.02	11.93	17.10	Entrada	GHB
Liria Casinos	16.06	1.17	14.89	Entrada	GHB
Buñol Chestre	30.81	9.62	21.19	Entrada	GHB
La Contienda	16.71	5.49	11.22	Entrada	GHB
Sierra del Ave	29.74	32.18	-2.44	Salida	GHB
Caroch Norte	6.29	0.10	6.19	Entrada	GHB
Sierra de las Agujas	8.68	3.10	5.58	Entrada	GHB
Plana de Jaraco	0.10	2.93	-2.84	Salida	GHB
	137.40	66.52	70.88		
TRANSFERENCIAS CON EL MAR					
Costa norte superior	0.02	44.69	-44.67	Salida	GHB
Costa norte inferior	0.11	2.70	-2.59	Salida	GHB
Costa sur superior	0.58	8.23	-7.65	Salida	GHB
Costa sur inferior	4.62	0.00	4.62	Entrada	GHB
	5.33	55.62	-50.29		

HUMEDALES

La Marjal de Rafal y Vistabella	0.00	4.51	-4.51	Salida	Drain
Balsa de San Lorenzo	0.00	9.47	-9.47	Salida	Drain
	0.00	13.97	-13.97		

RECARGA

Recarga	263.06	0.00	262.83	Entrada	Recharge
----------------	--------	------	--------	---------	----------

BOMBEO

Bombes	0.00	88.96	-88.96	Salida	Wells
---------------	------	-------	--------	--------	-------

A la vista de la Tabla 10, el río Magro y el Júcar son los que mayor agua aportan al acuífero, 19.99 y 10 hm³/año respectivamente, sin embargo, el Júcar es el que mayor volumen de agua toma del acuífero, alcanzando los 62.29 hm³/año. Según Ballesteros et al. (2012), el río Júcar también es de tipo ganador en la Plana Sur con unas ganancias de 35.5 hm³/año y las entradas/salidas del río Magro son prácticamente nulas.

También es de mencionar que los humedales y ullals extraen una importante cantidad de agua del sistema, aproximadamente 40 hm³/año. El último tramo de costa es el que más agua salada aporta al acuífero, concretamente 4.62 hm³/año, sin embargo, el balance indica que no hay aporte desde la masa subterránea hacia ese tramo, por lo que habría que estudiar con detenimiento si estamos ante un posible caso de intrusión marina.

Para el entorno Albufera, si se comparan los valores del balance parcial actual, con los presentados en Ballesteros et al. (2012), los ullals extraen sobre 11.2 hm³/año respecto a los 25.34 hm³/año del presente modelo, aunque es importante recalcar que el periodo de simulación que se escogió entonces solamente comprendía años de sequía. En lo concerniente a los intercambios de flujo subterráneo a través del lecho del lago, según Ballesteros et al. (2012) solamente habían salidas del acuífero, con un valor de 13.4 hm³/año, mientras que, según el modelo desarrollado para este trabajo, éstas son de 1.56 hm³/año, habiendo también aporte de la Albufera al acuífero, 10.57 hm³/año. Un motivo causante de las discrepancias de entradas y salidas entre los dos modelos citados puede ser el área del lago, ya que Ballesteros et al. trabajaron con la mitad sur de su superficie, mientras que en el modelo actual se tomó toda su superficie.

En la Tabla 11 se hace una comparativa entre los valores obtenidos en el balance parcial en el presente trabajo y el desarrollado por Cítores (2017).

Tabla 11. Comparativa entre resultados del balance parcial del modelo actual (izquierda) y Citores (2017, derecha).

RÍOS	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)	Neto (hm ³ /año)	Tipo	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)	Neto (hm ³ /año)	Tipo
Júcar	10.00	62.29	-52.29	Ganador	12.09	46.38	-34.29	Ganador
Verde	0.09	9.18	-9.09	Ganador	0	11.16	-11.16	Ganador
Magro	19.99	0.04	19.95	Perdedor	2.57	0.01	2.55	Perdedor
Sellent	0.21	0.00	0.21	Perdedor	0.16	0	0.16	Perdedor
Albaida	5.68	0.00	5.68	Perdedor	5.68	0	5.68	Perdedor
Rambla del Poyo	3.84	6.21	-2.37	Ganador	0.32	5.23	-4.91	Ganador
Turia	0.02	0.16	-0.14	Ganador	0.02	0.44	-0.42	Ganador
	39.83	77.88	-38.05		20.84	63.22	-42.39	
ALBUFERA								
Lago (lecho)	10.57	1.56	9.01	Entrada	8.62	0	8.62	Entrada
Canales	0.00	106.71	-106.71	Salida	0	139.14	-139.14	Salida
Ullals	0.00	25.34	-25.34	Salida	0	1.29	-1.29	Salida
	10.57	133.62	-123.05		8.62	140.43	-131.81	
TRANSFERENCIAS LATERALES								
Plana de Sagunto	16.06	1.17	14.89	Entrada	0.03	0.02	0.01	Entrada
Liria Casinos	30.81	9.62	21.19	Entrada	1.29	0.07	1.22	Entrada
Buñol Cheste	16.71	5.49	11.22	Entrada	46.14	0.31	45.83	Entrada
La Contienda	29.74	32.18	-2.44	Entrada	17.59	4.81	12.78	Entrada
Sierra del Ave	6.29	0.10	6.19	Salida	6.56	2.36	4.2	Entrada
Caroch Norte	8.68	3.10	5.58	Entrada	0.41	0	0.41	Entrada
Sierra de las Agujas	0.10	2.93	-2.84	Entrada	7.9	2.21	5.69	Entrada
Plana de Jaraco	137.40	66.52	70.88	Salida	0	4.12	-4.12	Salida
					79.92	13.9	66.02	
TRANSFERENCIAS CON EL MAR								
Costa norte superior	0.11	2.70	-2.59	Salida	0	39.54	-39.54	Salida
Costa norte inferior	0.58	8.23	-7.65	Salida	0	7.65	-7.65	Salida
Costa sur superior	4.62	0.00	4.62	Salida	0	12.09	-12.09	Salida
Costa sur inferior	5.33	55.62	-50.29	Entrada	3	11.49	-8.49	Salida
					3	70.77	-67.77	
HUMEDALES								
La Marjal de Rafal y Vistabella	0.00	9.47	-9.47	Salida	0	0.19	-0.19	Salida
Balsa de San Lorenzo	0.00	13.97	-13.97	Salida	0	5.07	-5.07	Salida
					0	5.26	-5.26	
RECARGA								
Recarga	263.06	0.00	262.83	Entrada	263.8	0	263.8	Entrada
BOMBEO								
Bombes	0.00	88.96	-88.96	Salida	0	82.02	-82.02	Salida

Según los resultados recogidos en la Tabla 11, los ríos Júcar y Magro no cambian su condición de ganador y perdedor, pero el Júcar toma 16 hm³/año más del acuífero y el Magro aporta 17 hm³/año extra a la masa de agua subterránea si se compara con el modelo anterior. Por otro lado, según el modelo actual aflora un mayor volumen de agua a través de los ullals. En lo que respecta a las transferencias laterales con otras masas de agua el volumen neto es muy similar, pero las entradas y salidas han aumentado notoriamente en el modelo actual, sobre todo debido al incremento en los flujos subterráneos través del contorno de Sagunto, Liria-Casinos y Sierra del Ave.

En la Figura 51 y Figura 52, se detalla la interacción entre la Albufera y las zonas que se encuentran a su alrededor. Se ha representado en dos gráficos separados las entradas y salidas del acuífero con el fin de que los datos se pudieran observar con mayor claridad.

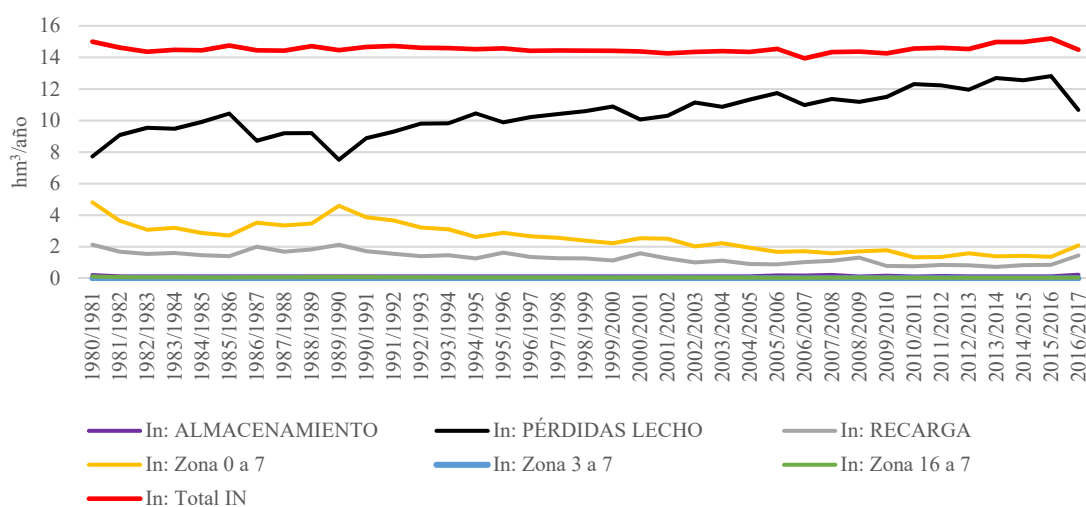


Figura 51. Entradas al acuífero en la zona de la Albufera

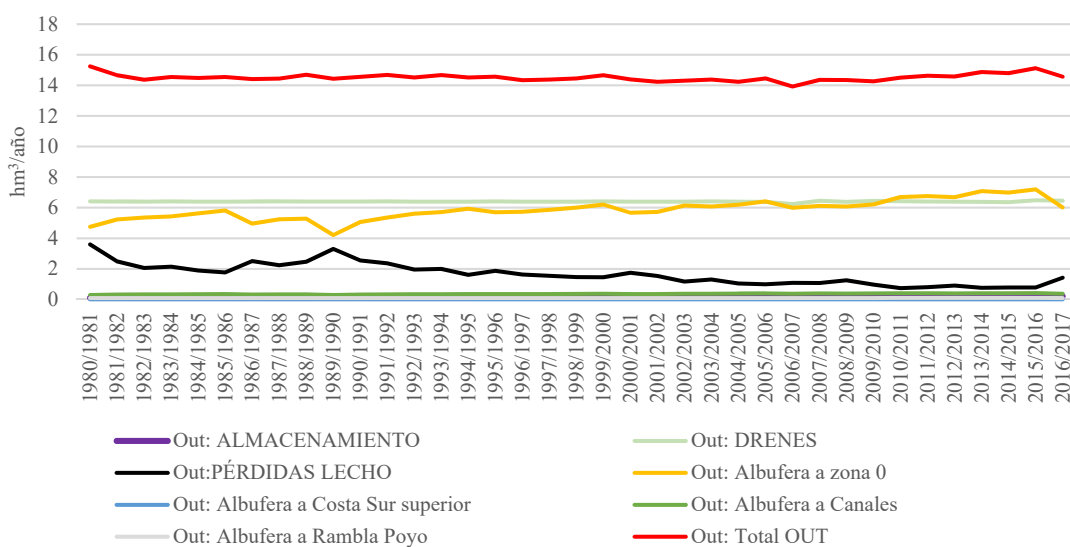


Figura 52. Salidas del acuífero en la zona de la Albufera

Se puede apreciar, que el volumen anual que entra es prácticamente idéntico al que sale, por lo que se podría afirmar que la Albufera se encuentra en estado estacionario en lo que respecta a los intercambios con el acuífero. De modo que, los niveles en el lago se mantienen en gran medida gracias a los aportes superficiales, como se comentó en el apartado 2.4.1 *Lago de la Albufera*. Por otro lado, el mayor volumen de entradas al acuífero corresponde a las pérdidas a través del lecho del río (7.5-12.5 hm³/año según el año), seguido de las interacciones con la zona 0 bien sea a través de las celdas laterales o las de capas inferiores (1.3- 4.8 hm³/año) y por último de la recarga (1.3-2 hm³/año). En lo que concierne a las salidas, los drenes (canales) y la zona 0 representan las mayores salidas del sistema (en torno a 6 hm³/año), seguidos de las aportaciones subterráneas a los ríos a través del lecho (1-3.5 hm³/año).

4.6 Análisis piezométrico

Una parte de la calibración del modelo se ha basado en la reproducción de los niveles piezométricos observados en el área de estudio. Las alturas piezométricas resultantes se recogen en la Figura 53.

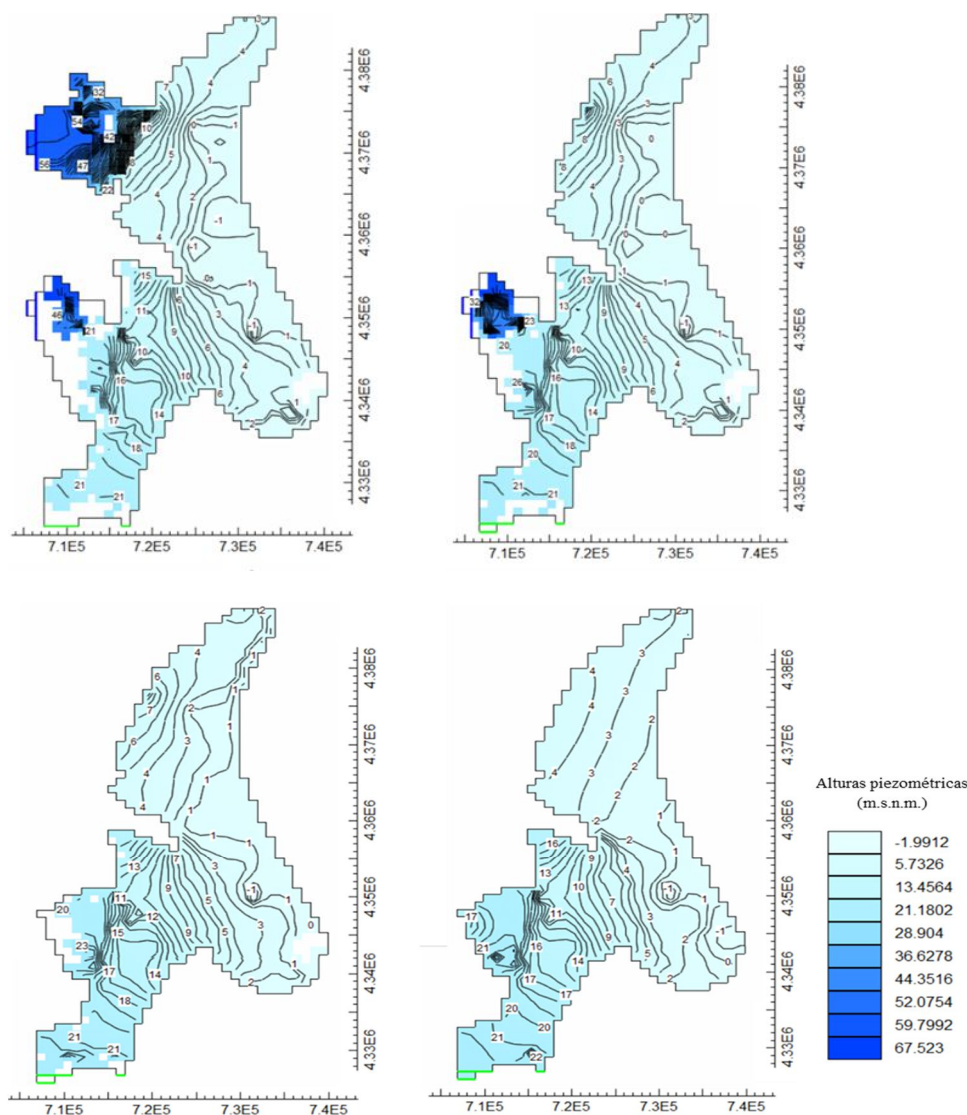


Figura 53. Alturas piezométricas resultantes en régimen influenciado de las 4 capas del acuífero de la Plana.

En la Figura 53 se puede observar que las isopiezas son más o menos paralelas a la línea de costa y marcan un flujo de este a oeste que acaba en el mar Mediterráneo.

Tanto en la parte este como sur del modelo, correspondiente a la zona Catadau y de Sellent-Senyera respectivamente, se aprecia como algunas de las celdas se secan en la capa superior del acuífero, es decir, que las alturas piezométricas están por debajo de esta capa. Este fenómeno es debido a la complejidad en la distribución vertical de las capas de la formación, que se traduce en zonas de pequeño espesor donde confluyen los límites de varias capas del acuífero. Además, en Catadau se produce un gran salto de gradientes piezométricos desde 65 m.s.n.m. a 30 m.s.n.m.

Por otro lado, próximo al límite suroeste aparecen conos de elevación de los niveles piezométricos, en los que la diferencia de alturas puede llegar hasta 5 m.s.n.m. También están producidos por la disminución en el espesor de los estratos, fenómeno acrecentado en los límites de la formación geológica.

Hay zonas en las que la altura piezométrica es mayor a la cota de la superficie del terreno produciéndose afloramientos de agua en superficie. En la Figura 54 se muestran las celdas inundadas para 4 simulaciones: enero/septiembre de 2017 y enero/septiembre de 2006, con el fin de observar la variabilidad estacional de las surgencias y de cómo afectan los periodos de sequía.

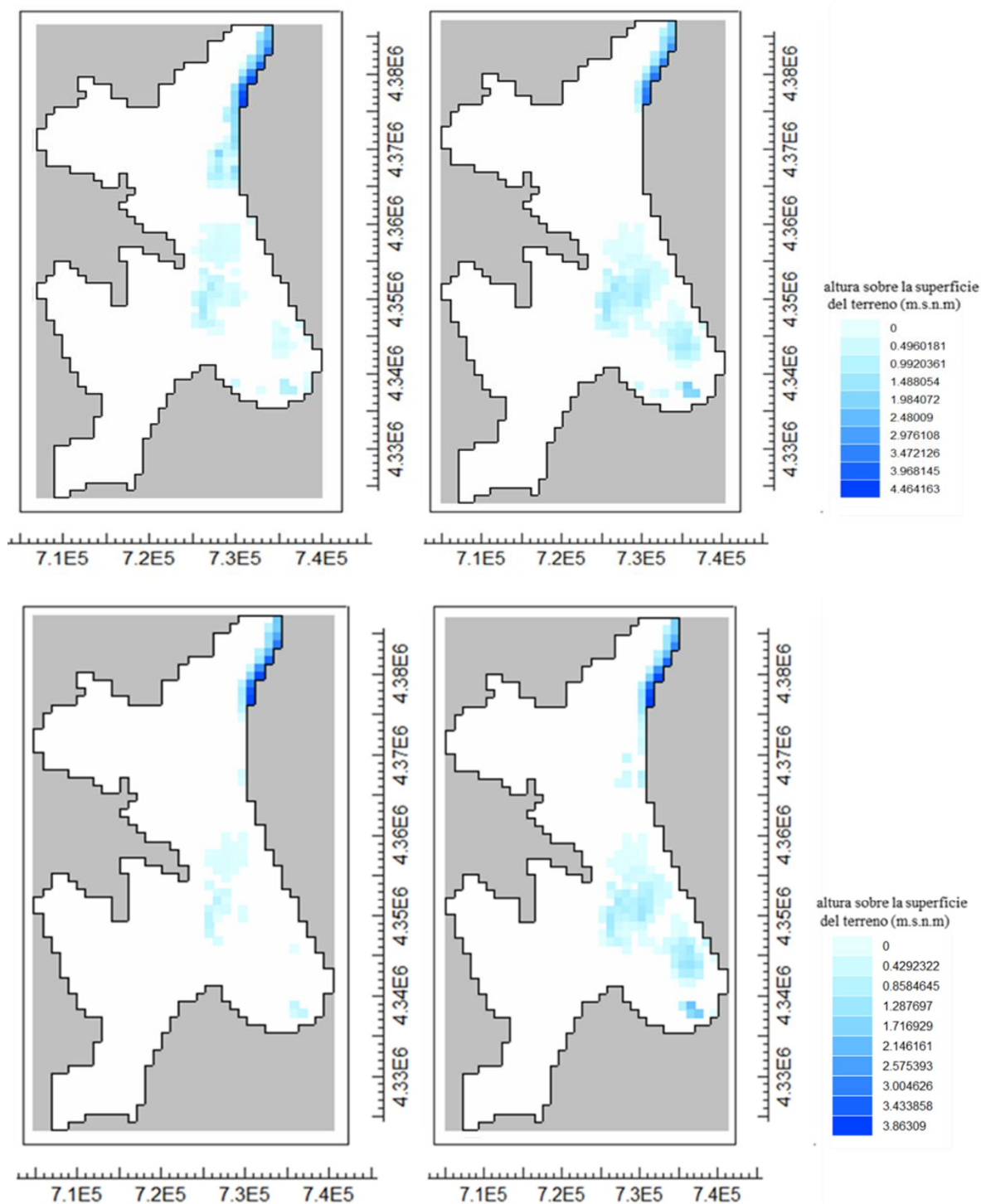


Figura 54. Mapa de celdas inundadas en régimen transitorio. Enero 2017 (arriba izquierda), septiembre 2017 (arriba derecha), enero 2007 (abajo izquierda) y septiembre 2007 (abajo derecha).

Queda de manifiesto que, en invierno disminuye considerablemente el volumen de surgencias en el entorno del lago, sin embargo, en el tramo de costa situado más al norte del modelo las alturas aumentan tanto en el año 2006 como en el 2017. También queda claro que, en periodo de sequía, tanto en verano como en invierno, las alturas son ligeramente inferiores a las que se obtienen en situación de normalidad y en invierno las celdas inundadas son menos.

Se puede apreciar que la mayoría de las celdas inundadas se encuentran en las proximidades de la Albufera. Para aclarar un poco este tema, se ha representado en la Figura 55 el mapa de celdas inundadas para septiembre de 2017 junto a una imagen del entorno del lago en la época medieval (Palop et al., 2015).

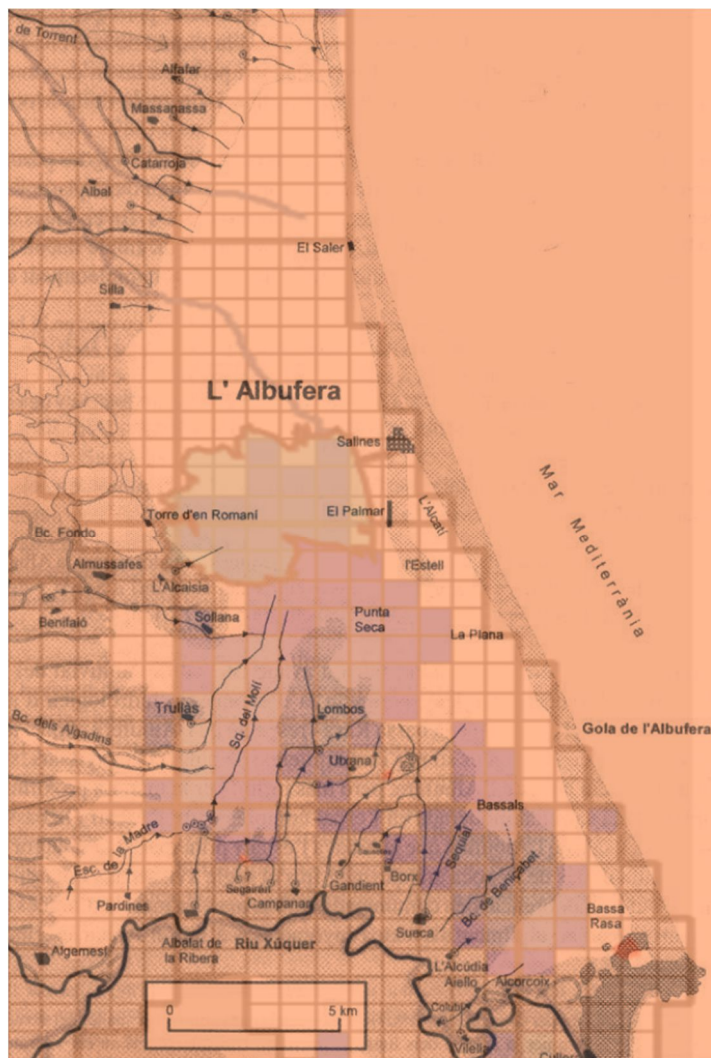
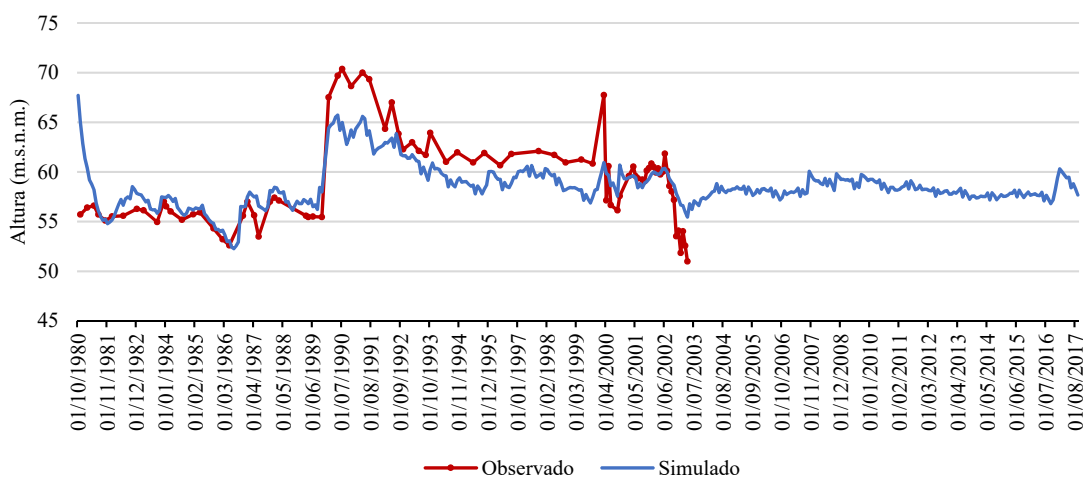


Figura 55. Superposición de la superficie actual del lago y en época medieval. Modificado de Palop et al. (2015).

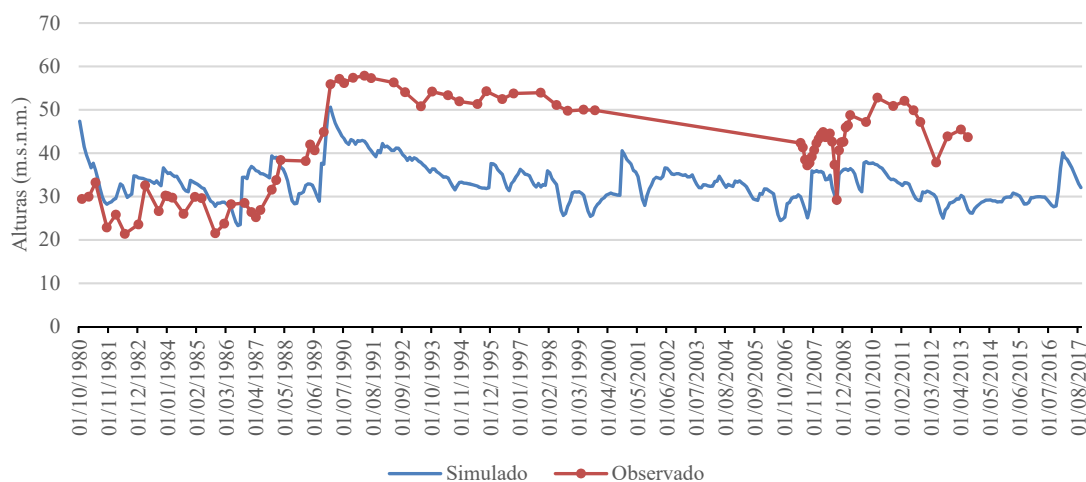
Se puede observar como a pesar de que la superficie actual del lago es mucho más pequeña debido a la antropización que ha sufrido a lo largo de los siglos, las celdas inundadas obtenidas en el modelo encajan con el perímetro antiguo del lago y con los actuales ullals de la zona.

A continuación, se representan las series piezométricas observadas versus las simuladas para cada pozo de observación que se utilizó en el proceso de calibración (Figura 56).

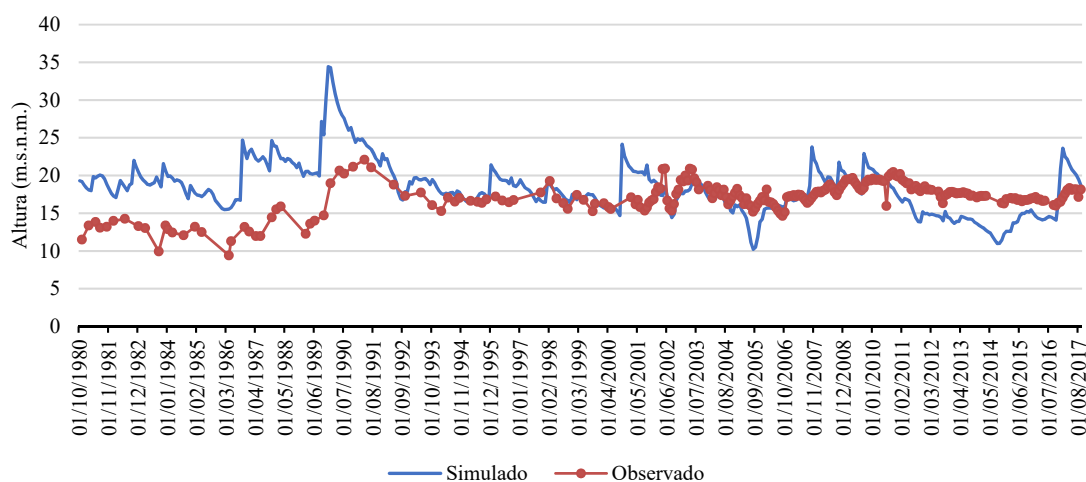
08.23.006



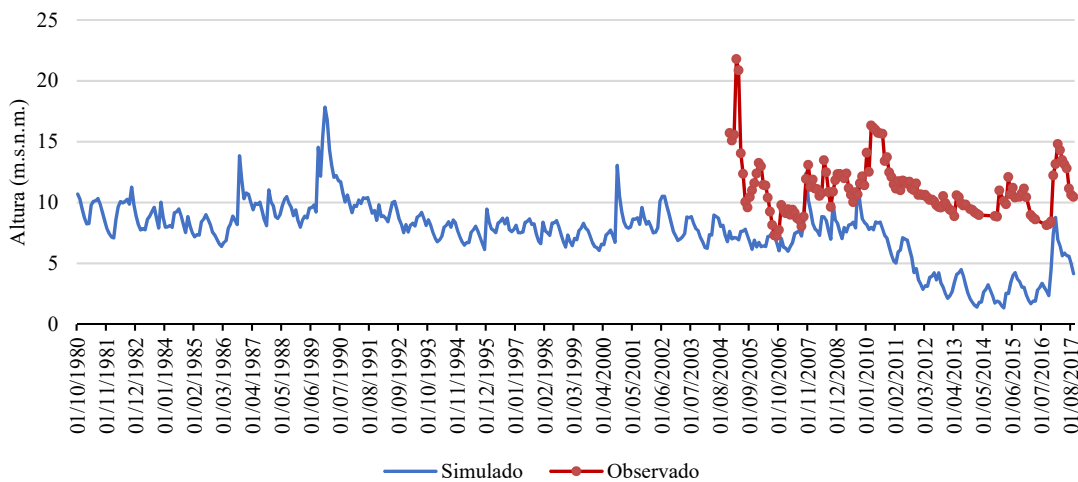
08.23.026



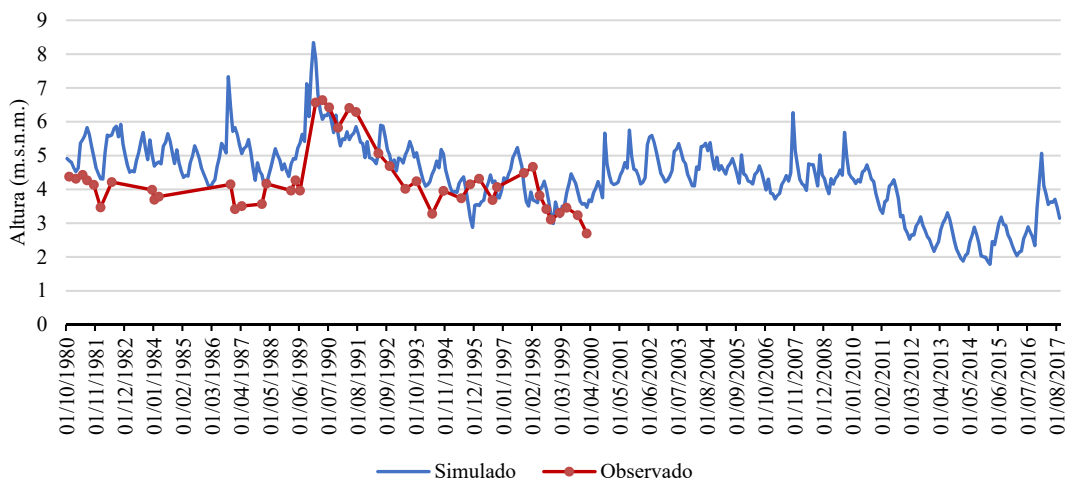
08.25.010



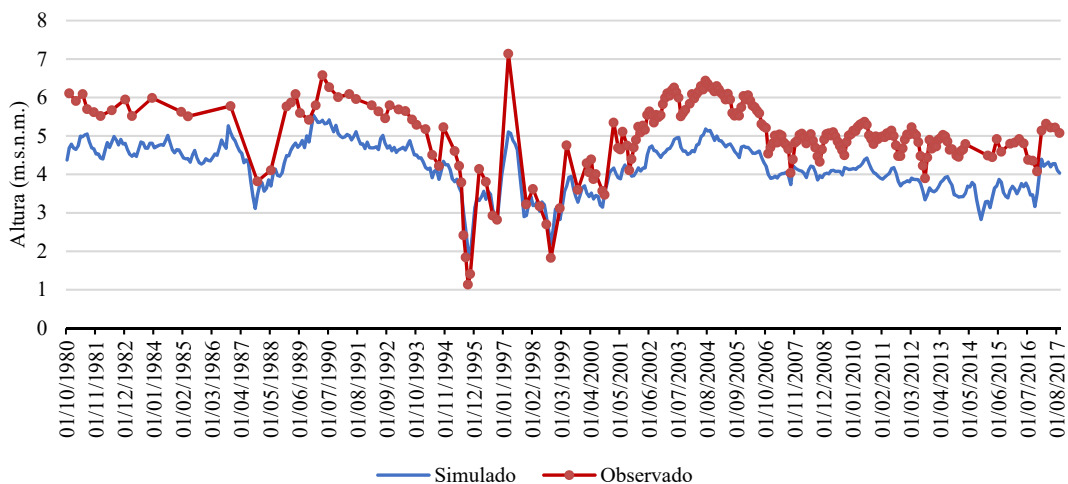
08.25.002



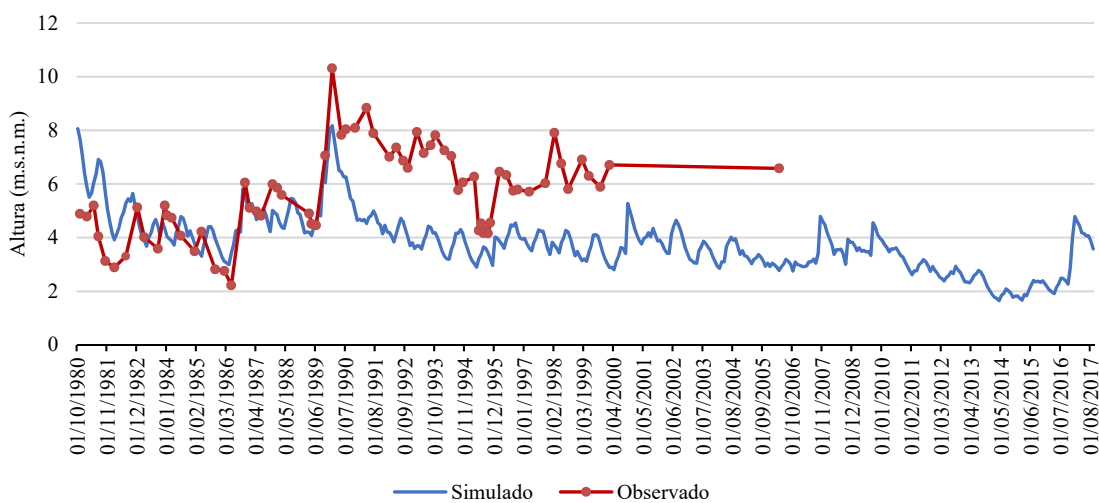
08.25.013



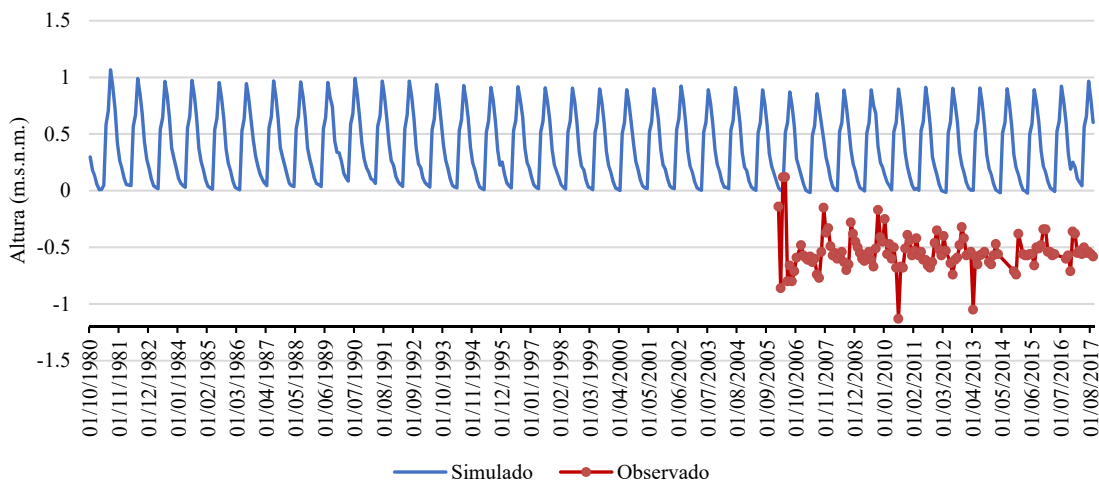
08.25.009



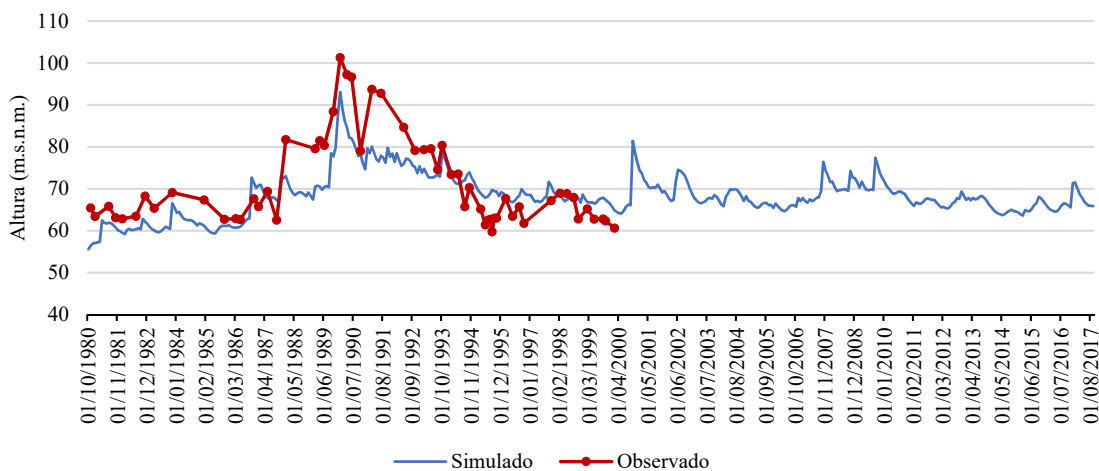
08.25.038



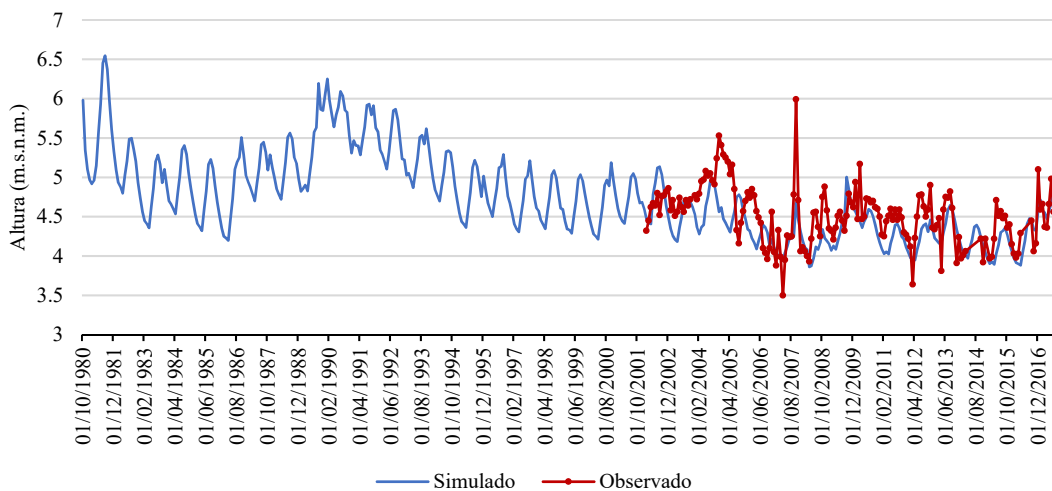
08.26.105



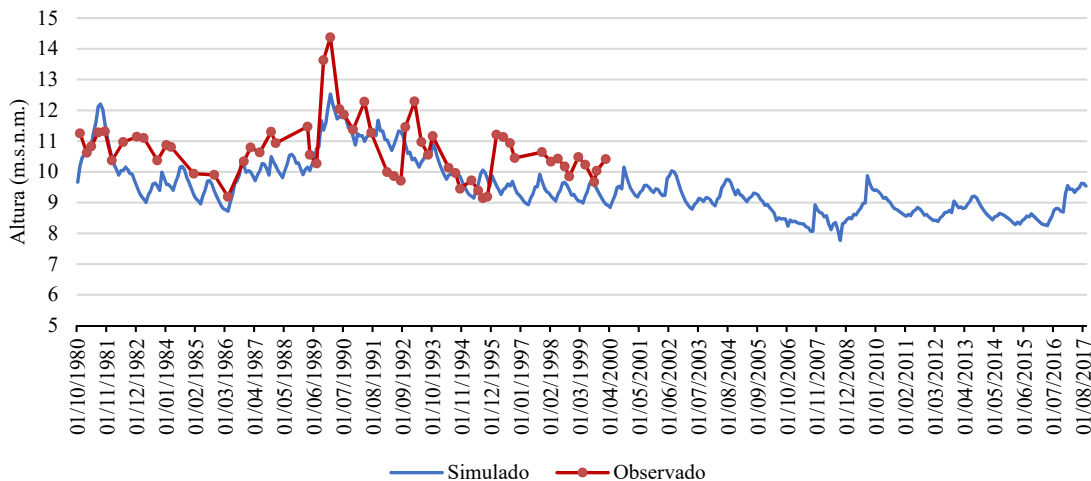
08.27.016



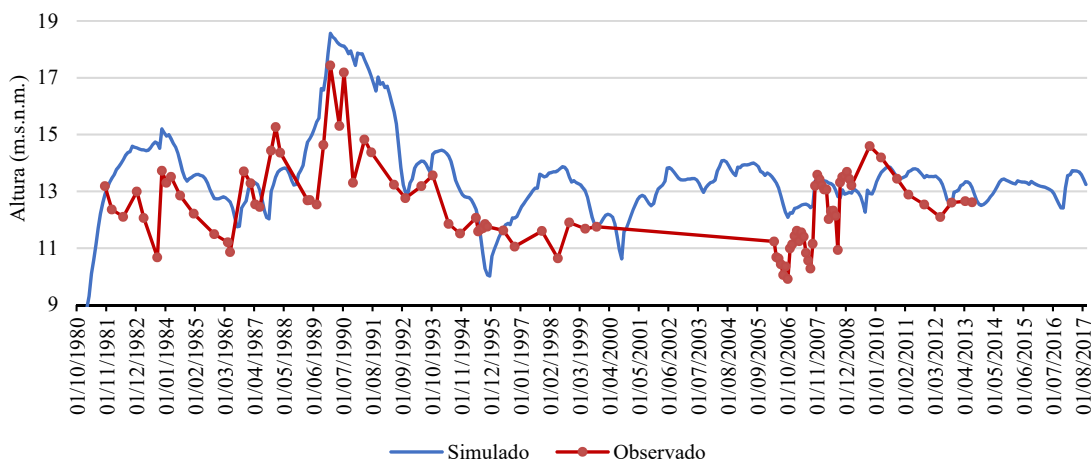
08.26.015



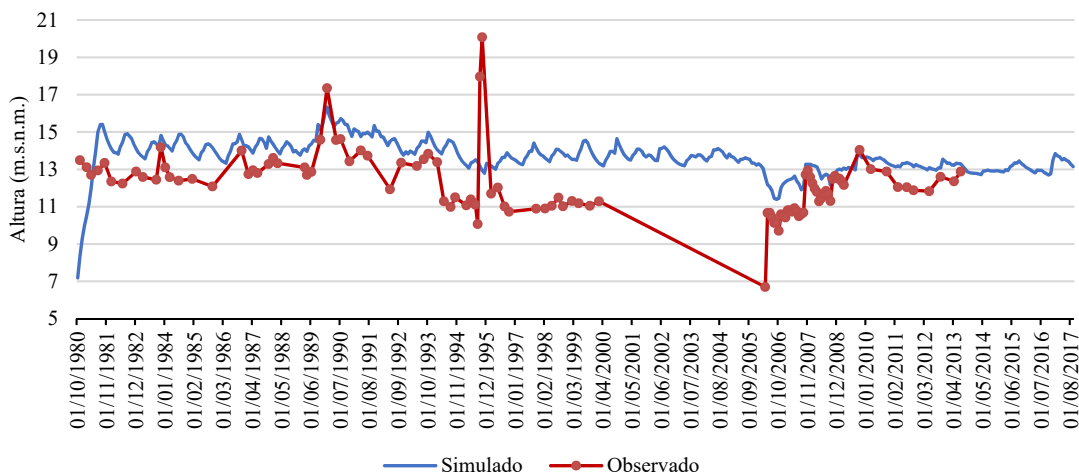
08.26.023



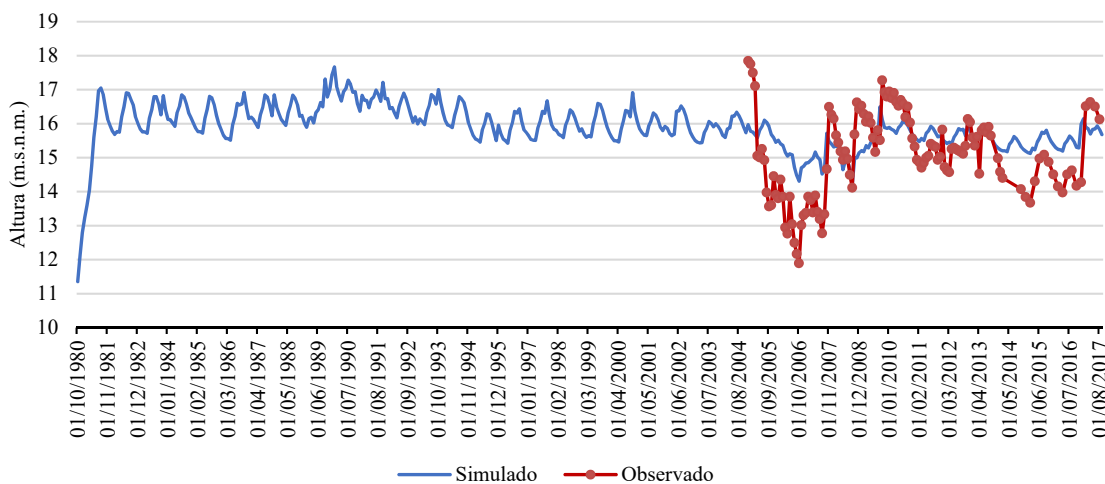
08.26.031



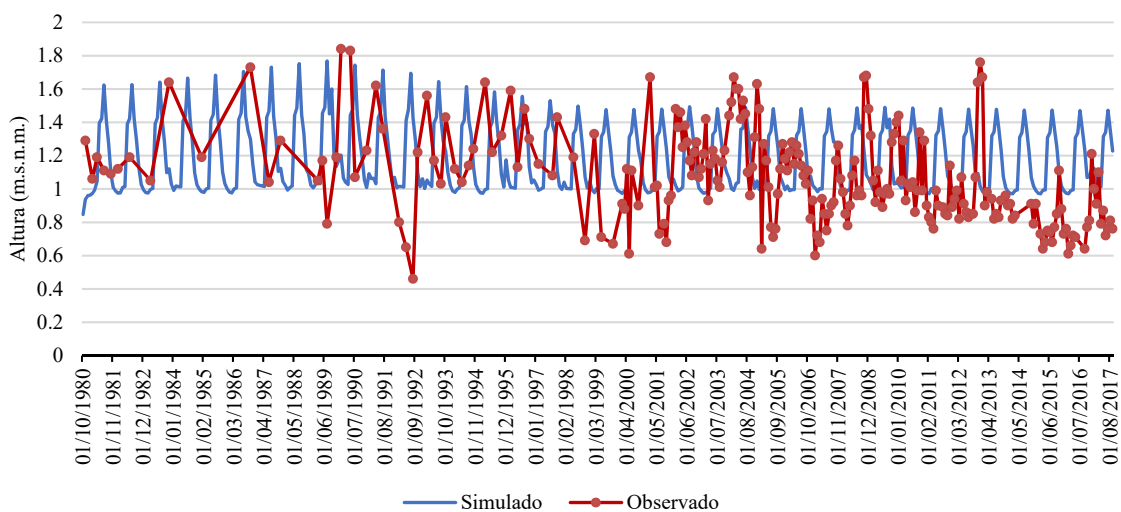
08.26.028



08.26.007



08.26.018



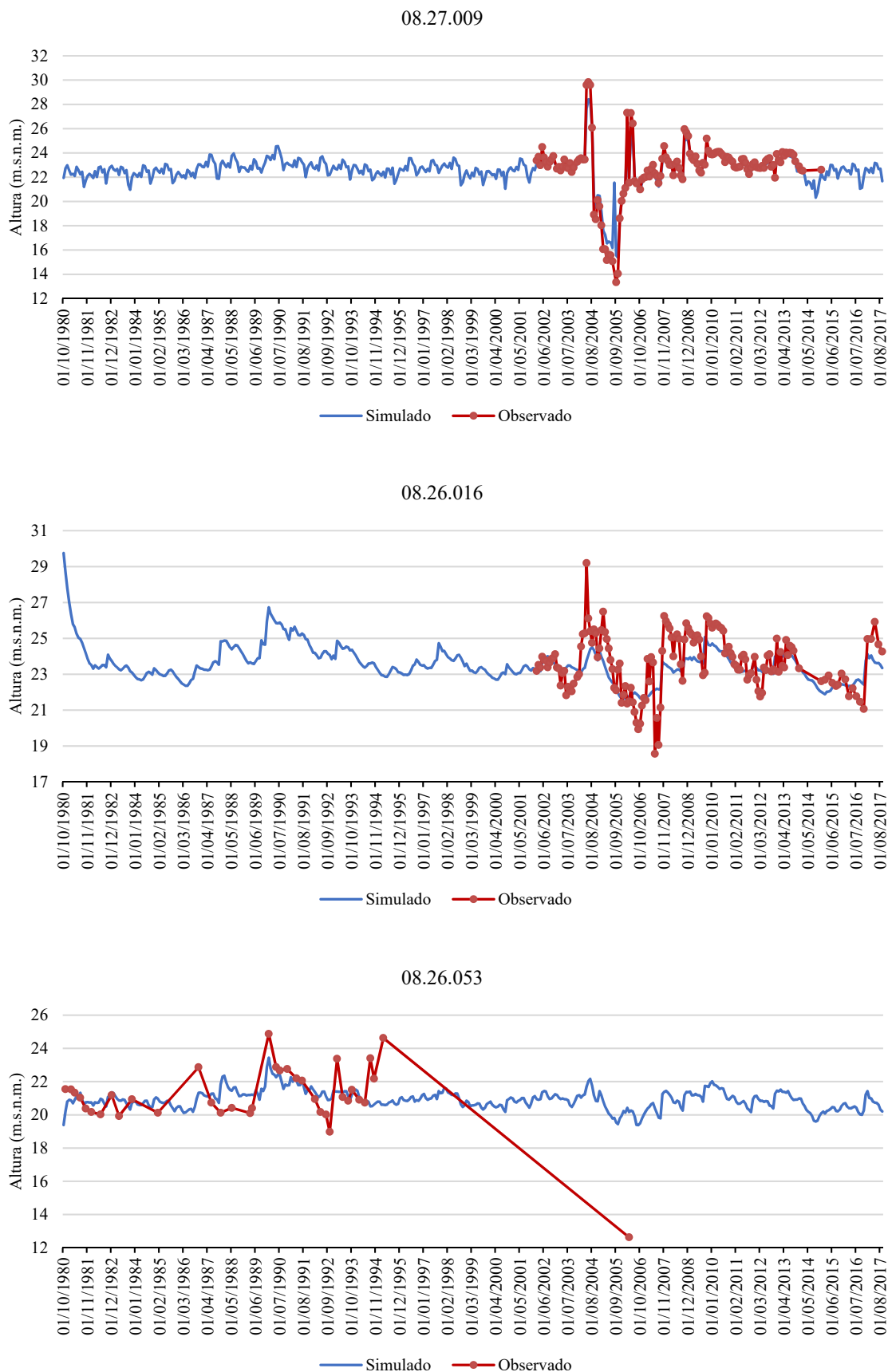


Figura 56. Calibración de los pozos de observación para el régimen transitorio. Periodo 1980/1981-2016/2017.

Según los resultados obtenidos, queda de manifiesto que el modelo es capaz de reproducir la tendencia de las alturas piezométricas para la gran mayoría de pozos de observación.

En el contorno de la Plana de Sagunto se ha conseguido reproducir la forma de la serie histórica completa, así como el rango correcto de las alturas, tal y como muestra el piezómetro 08.25.009.

Conforme nos dirigimos hacia el sur, nos encontramos con el pozo de observación 08.25.010 del que se dispone de la serie casi completa para el periodo simulado. A pesar de que para los primeros diez años hay una diferencia de niveles, a partir de ese momento los valores se ajustan mucho mejor.

En la zona sur, el piezómetro 08.27.009 reproduce casi a la perfección la serie observada, inclusive el periodo de sequía del año 2005 caracterizado por un descenso piezométrico repentino muy acusado. El piezómetro 08.26.016 también es capaz de emular la serie observada a pesar de estar en una zona donde hay secado de celdas por la complejidad de la geometría de las capas.

Como se ha comentado anteriormente en el apartado 4.6 Análisis piezométrico la zona de Catadau es bastante compleja por el gran salto que dan las alturas piezométricas, así como por la presencia de pequeños dominios de elevada permeabilidad. Sin embargo, el piezómetro 08.27.016 ha conseguido simular con gran exactitud la tendencia de la serie observada hasta el año 2000 que es el último año para el que se tienen datos.

A pesar de ello, hay diferencias puntuales entre valores observados-simulados que llegan hasta los 20 m para el pozo 08.23.026, por ejemplo. Este hecho puede ser debido a que las alturas piezométricas que se han tomado como condición inicial son superiores a las simuladas.

En cambio, hay otros pozos en los que los niveles observados y simulados son muy similares, pero no se consigue reproducir el comportamiento de la serie histórica como en el pozo 08.26.105 situado en la zona suroeste de la Albufera. En primer lugar, es muy difícil simular el comportamiento del sistema Albufera debido a su gran complejidad y en segundo lugar a que se tienen datos observados del piezómetro a partir del año 2005, quizás demasiado escasos para poder realizar una calibración más exacta.

En la Figura 57 se representa mediante una recta de regresión la relación entre las alturas piezométricas observadas en los pozos de calibración y las simuladas en el modelo.

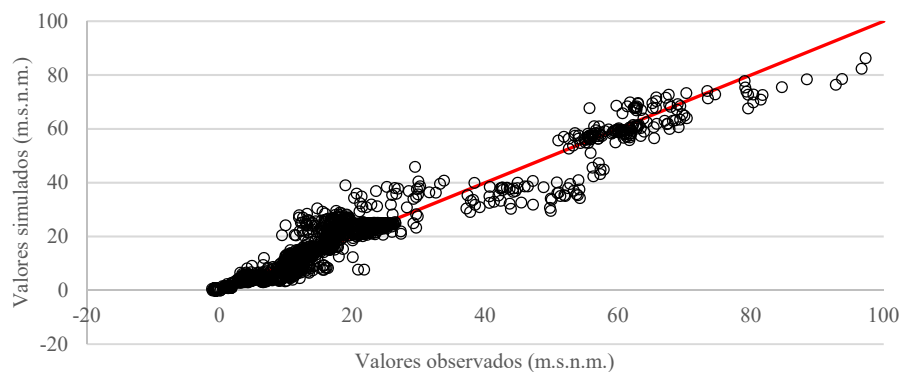


Figura 57. Alturas piezométricas observadas versus las simuladas en régimen transitorio. Periodo 1980/1981-2016/2017.

Se puede apreciar que hay una gran cantidad de puntos agrupados en el tramo inicial de la recta, esto quiere decir, que la mayoría de las alturas piezométricas tienen un valor inferior a 25 m.s.n.m. El resto de la nube de datos se agrupan cerca de la línea de 45°, presentando diferencias de hasta 20 m (residuos).

La calidad del ajuste se puede comprobar a través del coeficiente de correlación de Pearson que figura en la Tabla 12, cuyo valor es de 0.94 y nos indica que hay una relación lineal positiva casi perfecta entre los valores observados y los simulados.

En Figura 58 se representa el histograma de residuos, el cual muestra la distribución de los residuos para las 2228 observaciones.

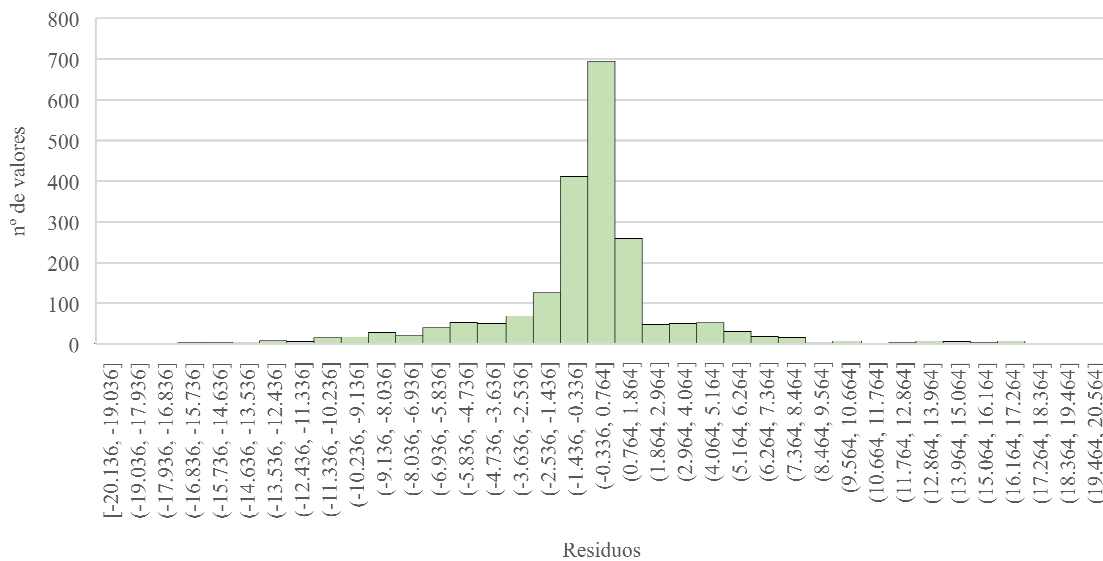


Figura 58. Histograma de residuos para todas las observaciones.

A la vista del gráfico, se puede concluir que los datos son bastante simétricos, concentrándose una tercera parte de ellos en el intervalo $[-0.336; 0.764]$, es decir, en el rango en el que menor diferencia hay entre los valores observados y los simulados.

En la Tabla 12 se muestran los valores estadísticos de la calibración del modelo en régimen transitorio.

Tabla 12. Indicadores estadísticos de los resultados del modelo en régimen transitorio.

nº pozos de observación	18
residual máximo	20.298
residual mínimo	-20.136
promedio absoluto de los residuos	2.204
coeficiente de correlación r^2	0.948
raíz del error cuadrático medio (RMSE)	3.767
índice de Nash - Sutcliffe	0.947

4.7 Relación río-acuífero

Se han comparado los resultados del presente modelo con los estudios: “*Uso sostenible de las masas de agua subterránea en épocas de sequía. Aplicación a la cuenca baja del río Júcar*” (Ballesteros et al., 2012), “*Modelación matemática del flujo de agua subterránea de la plana de Valencia Norte y Sur*” (Citores, 2018) y con el mapa de la relación río ganador/perdedor/variable (Figura 25). No se ha podido calibrar los flujos de los ríos con valores históricos reales de la CHJ por falta de datos, pero habría sido fundamental para realizar una calibración más exacta y ajustada a la realidad.

Los flujos netos de los ríos para los distintos modelos se recogen en la Tabla 13.

Tabla 13. Comparación de la relación río-acuífero para diferentes modelos y estudios.

RÍOS	Modelo actual (hm ³ /año)	Tipo (-)	Ballesteros (abril 2006/abril 2007) (hm ³ /año)	Citores (hm ³ /año)	IGME. (-)
Júcar	-50.46	Ganador	-27.26	-32.52	Variable/ Ganador
Júcar desembocadura	-1.83	Ganador	-236.69	-1.77	-
Verde	-9.09	Ganador	-27.94	-11.16	-
Magro	19.95	Perdedor	0.16	2.55	Perdedor
Sellent	0.21	Perdedor	4.92	0.16	Variable
Albaida	5.68	Perdedor	31.06	5.68	Variable
Rambla del Poyo	3.49	Perdedor	-	-4.91	Perdedor
Tramo Rambla del Poyo- Albufera	-5.86	Ganador	-	-4.93	Ganador
Turia alto	5.00E-04	Perdedor	-	0	Perdedor
Turia desembocadura	-0.14	Ganador	-	-0.42	-



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

5. APLICACIÓN DEL MODELO. ESCENARIOS

Como es bien sabido, los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría suceder en el futuro, convirtiéndose en herramientas de gran utilidad para evaluar el comportamiento de un sistema ante ciertos eventos. En este caso, se utilizarán para el análisis del efecto del cambio climático en el sistema de la Plana de Valencia y en la decisión de que medidas pueden ser las más idóneas para llevar a cabo ante una situación de sequía.

Es de suma importancia considerar la incertidumbre inherente a los escenarios, puesto que no se sabe con precisión que ocurrirá en el futuro. Por ello, en base a los datos disponibles se ha tratado de hacer asunciones con la mayor fidelidad posible al comportamiento del sistema.

En el presente trabajo, se ha optado por analizar el comportamiento de la masa de agua subterránea en 4 supuestos diferentes: los dos primeros en una situación de explotación bajo condiciones normales y en una futura de sequía bajo 2 supuestos escenarios. Para los escenarios 3 y 4 se evalúa tanto la situación de normalidad como de emergencia. En la Tabla 14, se resumen las diferencias entre los 4 escenarios simulados.

Tabla 14. Resumen de los escenarios simulados.

	Periodo de simulación		Reducción precipitación	Reducción retornos riego	Bombes Global Ómnium (situación normal)	Bombes Global Ómnium (situación emergencia)
	(meses)	(años)	(%)	(%)		
Escenario 1: situación actual	444	37	-	-	Bombes de la Figura 44	
Escenario 2: horizonte 2027 sin cambio climático	564	47	-	1	Bombes de la Figura 44 elevando los pozos de Aguas de Valencia 1000 l/s	
Escenario 3: horizonte 2027 con cambio climático	564	47	12%	1	Bombes de la Figura 44 elevando los pozos de Aguas de Valencia 1000 l/s	Bombes de la Figura 44 elevando los pozos de Aguas de Valencia 1000 l/s y activando pozos de emergencia
Escenario 4: horizonte 2027 con cambio climático	564	47	20%	1	Bombes de la Figura 44 elevando los pozos de Aguas de Valencia 1000 l/s	Bombes de la Figura 44 elevando los pozos de Aguas de Valencia 1000 l/s y activando pozos de emergencia

En los siguientes epígrafes se explican con mayor detalle los criterios e hipótesis utilizados para cada escenario. Cabe señalar que, los parámetros del modelo calibrado no se modificarán y serán las acciones externas las que cambiarán según los efectos que se quieran simular para cada escenario.

5.1 Escenario 1: situación actual

Este escenario corresponde al que se desarrolló en el *apartado 4- Calibración del modelo en régimen transitorio y análisis de los resultados* y cuyo periodo abarca desde octubre de 1980 hasta septiembre de 2017.

5.2 Escenario 2: horizonte 2027 sin efecto del cambio climático

Este escenario se ha planteado para conocer el comportamiento del sistema a medio plazo (horizonte 2027) cuando no se considera la disminución de la precipitación fruto del cambio climático. El cambio introducido respecto al anterior escenario se encuentra en un traslado de la extracción de caudales desde La Presa a Valencia, y un aumento de la misma hasta llegar a los 1.000 l/s (31.5 hm³/año).

El periodo de simulación comprende desde el año hidrológico 1980/1981 hasta el 2026/2027, concretamente, 47 años hidrológicos o 564 pasos de tiempo.

5.2.1 Condiciones de borde

En lo que respecta a los límites laterales, se ha asignado la serie histórica 2007/2008-2016/2017 al ciclo 2017/2018-2026/2027. Es decir, se ha asumido que el comportamiento de las alturas piezométricas en los contornos va a ser el mismo de los 10 años anteriores. Para el Lago de la Albufera también se han tomado los niveles de los 10 últimos años, para asignarlos a los 120 pasos de tiempo añadidos hasta 2027.

Tanto para los ríos como para los canales de riego y humedales los niveles se han considerado constantes para todo el periodo de simulación.

5.2.2 Recarga: precipitación y retornos de riego

A pesar de que la precipitación presenta una tendencia descendente, se ha supuesto que el comportamiento es el mismo que en los 10 años anteriores, o sea, las lluvias del ciclo 2007/2008-2016/2017 se utilizan para completar la serie 2017/2018-2026/2027.

En primer lugar, se han considerado la misma superficie regada que para el periodo 1980/1981-2016/2017, puesto que para un escenario a medio/largo plazo se cree que la actividad agrícola se va a mantener en un nivel muy similar al actual porque seguirá siendo un valor económico seguro (CHJ, 2015c).

Según figura en el Anexo 3 del PHN ciclo 2015-2021, a partir del año 2012 se observa una clara disminución en los volúmenes de retornos y pérdidas agrícolas como consecuencia del

aumento en la eficiencia de los regadíos tanto en las conducciones principales, como en las redes de transporte y distribución y los sistemas de aplicación del agua.

Para decidir qué porcentaje de reducción se aplicaría a los retornos de riego en el escenario a medio plazo del presente modelo, se ha supuesto que éste tendrá la misma tendencia que los retornos de riego subterráneos descritos en el Anexo 3 del PHN ciclo 2015-2021. Se va a suponer una disminución en los retornos agrícolas del 15 % entre el año 2012 y el 2027 tras analizar los valores de las 22 UDAs que conforman la recarga de este modelo. Se ha extrapolado lo que dice el PHN a nuestros retornos subterráneos, ya que no son exactamente los mismos. Finalmente, la disminución equivaldría a un 1% anual desde 2012, hecho que coincide con la tendencia que presentan los retornos de riego de la Figura 28 del epígrafe 3.4.4 *Recarga*.

5.2.3 Bombeos

5.2.3.1 Bombeos CHJ

Como se apreciaba en la Figura 37, los bombeos son bastante constantes a lo largo de la serie histórica salvo en época de sequía. Por este motivo, se ha asignado la serie de bombeos agrícolas y urbanos de 2007/2008-2016/2017 al ciclo 2017/2018-2026/2027. No se han considerado extracciones por motivos de sequía.

No se ha querido modificar la tendencia de los bombeos realizados por Confederación, porque en el caso de mejorar las eficiencias del sistema, afectaría al suministro con agua superficial pero se seguiría bombeando lo mismo. Por el contrario, si bajase la demanda urbana como sugiere el PHN del ciclo hidrológico 2015-2021, bajaría el suministro superficial también y no los bombeos urbanos.

5.2.3.2 Bombeos Global Ómnium

Como en el caso anterior, se copia la serie de bombeos del ciclo 2007-2008 a 2016/2017 para 2017/2018 a 2026/2027.

El pozo de La Presa de Manises suponemos que deja de trabajar en esa ubicación y se sustituye por dos nuevos pozos que trabajarán en continuo, bombeando 500 l/s cada uno a partir del año hidrológico 2017/2018. Se trata de los pozos P1 y P2 de la Figura 61 y llevarán asociada una planta de ósmosis inversa, así como un depósito de almacenamiento y un bombeo con inyección directa a red.

El nuevo escenario de bombeo se plantea debido a que, en estos momentos, los pozos interiores y el pozo radial de La Presa están inyectando en la red, entre 12 y 13 hm³/año. La explotación de estos pozos afecta al caudal que rebosa sobre el azud del Río, lo que no permite garantizar, en ocasiones, tanto el caudal ecológico aguas abajo del azud como los caudales destinados para riego. Por otro lado, en períodos de sequía, los caudales desembalsados se reducen considerablemente, con el consiguiente empeoramiento de la calidad del agua bruta y del agua tratada resultante. Finalmente, ante un posible escenario de escasez de recursos de agua superficial, es necesario disponer de un recurso alternativo próximo a los puntos de consumo.

Los otros bombeos en continuo ejecutados por la empresa dentro del área urbana trabajarán con normalidad.

5.2.3.3 Achiques del metro de Valencia

Se va a suponer también constante para los 10 años extra simulados el caudal bombeado desde el año 2012, 14.88 hm³/año en total para las 30 estaciones de metro consideradas.

5.2.4 Balances

En la Tabla 15 se resume el balance global del modelo en régimen transitorio.

Tabla 15. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio. Periodo de simulación 1980/1981-2026/2027.

	Entradas		Salidas		Diferencias
	(hm ³ /año)		(hm ³ /año)		(hm ³ /año)
Recarga	254.51				254.51
Laterales	146.32	Laterales	120.27		26.05
Río-acuífero	54.29	Acuífero-Río	78.99		-24.70
		Bombeos	96.21		-96.21
		Drenes	159.74		-159.74
<i>Total</i>	455.11		455.20		-0.09

De acuerdo con los resultados mostrados en el balance global, se puede apreciar que el acuífero se seguiría manteniendo estable en el tiempo, siendo de hecho las entradas muy similares a las salidas, tal y como ocurría para el periodo 1980-2017. Por otro lado, las recargas han disminuido 7 hm³/año respecto a la recarga media que se venía presentando hasta el año 2017.

Es importante aclarar, que a pesar de que en el balance aparezcan 96.21 hm³/año bombeados, este es un valor promedio para la serie completa. Realmente, al ponerse en marcha los dos nuevos pozos de extracción, se pasa de bombear 101 hm³ en el año hidrológico 2016/2017 a 124.45 hm³ en 2017/2018.

También es importante mencionar que las salidas a través de los contornos laterales son mayores que para el escenario 1, que puede estar provocada por la nueva ubicación de los bombeos próximos a la costa y a la disminución de los retornos agrícolas del 1%.

Las entradas totales han disminuido 5 hm³/año respecto al escenario correspondiente a la situación actual debido a la disminución de la recarga agrícola. Las salidas totales también han disminuido 5 hm³/año respecto a la serie corta como consecuencia la disminución de los flujos laterales.

La Figura 59 representa la evolución a lo largo de los años de simulación de las principales componentes del modelo en régimen alterado para el periodo completo de simulación.

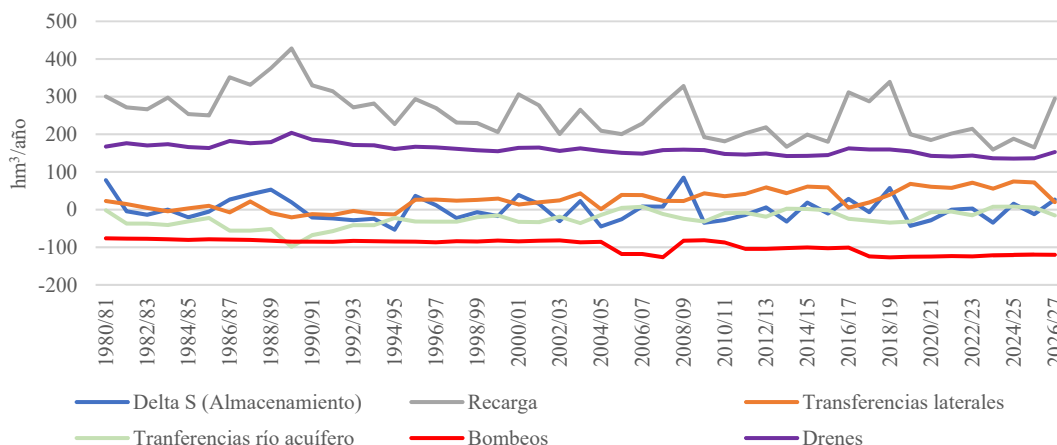


Figura 59. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado sin cambio climático. Periodo 1980/1981-2026/2027.

Por lo general, se puede afirmar que no hay grandes cambios en la evolución de las componentes del balance del escenario 1 y del escenario 2, salvo el aumento en los bombeos debido al incremento de caudal producido por los dos nuevos pozos en continuo de la empresa Global Ómnium que coinciden en valor con los realizados en la época de sequías que comenzó en el año 2004.

Se ha preferido no incluir una tabla con el balance parcial del modelo porque se considera que no ha habido cambios sustanciales en los resultados entre ambos escenarios.

En la Figura 60 se muestra la evolución anual del almacenamiento y el almacenamiento acumulado para el periodo simulado.

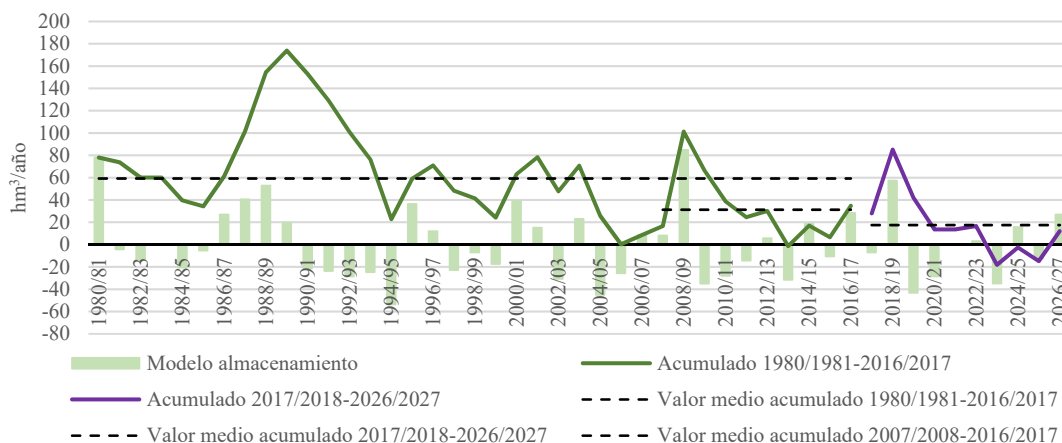


Figura 60. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado. Periodo 1980/1981-2026/2027.

Se aprecia que, dependiendo del año se puede estar en situación de superávit y en otros se alcanzan incluso valores negativos, como en el año 2023/2024. Es importante remarcar, que los últimos 10 años de la serie larga tienen un patrón similar a los últimos 10 años de la serie corta porque se supuso que las precipitaciones de estos dos ciclos serían las mismas y son éstas las que le dan la forma a la línea del gráfico.

En cuanto a los valores medios de las series, se ha pasado de almacenar $60 \text{ hm}^3/\text{año}$ durante 37 años a $31 \text{ hm}^3/\text{año}$ los últimos 10 años de la serie corta. Mientras que, si se comparan los últimos 10 años de la serie corta, con los últimos 10 de la serie larga, el almacenamiento medio ha descendido $17 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Por lo tanto, queda de manifiesto que al disminuir los retornos de riego y aumentar ciertos caudales de bombeo, se sigue almacenando agua, pero un poco menos.

5.2.5 Escenario 3: horizonte 2027 con reducción de la precipitación del 12%

En este escenario se simula el comportamiento del sistema a medio plazo (horizonte 2027) en el que se considera una disminución de la precipitación como consecuencia del cambio climático.

Se han considerado dos subescenarios atendiendo al principio de superposición. En el primero, se ha decidido solamente modificar el input de la precipitación respecto al escenario 2, para así poder identificar qué efectos tiene esa componente sobre el sistema y poder sacar las conclusiones pertinentes. En el segundo subescenario, además del cambio de la precipitación, la empresa Global Ómnium instalaría 5 nuevas estaciones de bombeo (pozos de emergencia) para poder paliar los efectos que la sequía tendría sobre el abastecimiento urbano.

El periodo de simulación comprende desde el año hidrológico 1980/1981 hasta el 2026/2027, como el escenario 2.

5.2.6 Recarga: precipitación y retornos de riego

Se ha considerado una disminución de los recursos hídricos del 12% según indica el Plan Hidrológico Nacional del Ciclo 2015-2021 (CHJ, 2015b) y de acuerdo con los estudios desarrollados por el CEDEX sobre la evaluación de los efectos del Cambio Climático en los recursos hídricos. Los retornos de riego son idénticos a los utilizados para el escenario 2.

5.2.7 Bombeos

Se han utilizado los mismos bombesos de uso urbano e industrial autorizados por la CHJ que en el escenario 2 y los pozos de sequía tampoco se activan.

Por otro lado, la empresa propone además de los considerados en el escenario 2, 5 nuevos pozos de emergencia que pueden complementar este suministro. Los pozos de emergencia P3 y P4 estarían ubicados dentro de la ciudad, y los pozos M1, M2, M3 en las afueras situados junto a depósitos cuyo fin sería el de reforzar el área metropolitana.

Si se pusieran en marcha las 5 estaciones de bombeo, se llegarían a extraer 1600 l/s ($50 \text{ hm}^3/\text{año}$), que, sumados a los extraídos en abastecimiento normal por la empresa, supondría unas extracciones totales de $81.5 \text{ hm}^3/\text{año}$. Se ha simulado con ese valor de extracción total puesto que es la situación más desfavorable, de este modo podremos ver si hay suficiente agua almacenada para satisfacer esa demanda.

En la Figura 61 se muestra la ubicación de los pozos en continuo que sustituyen a la ETAP de La Presa y los pozos de sequía propuestos.

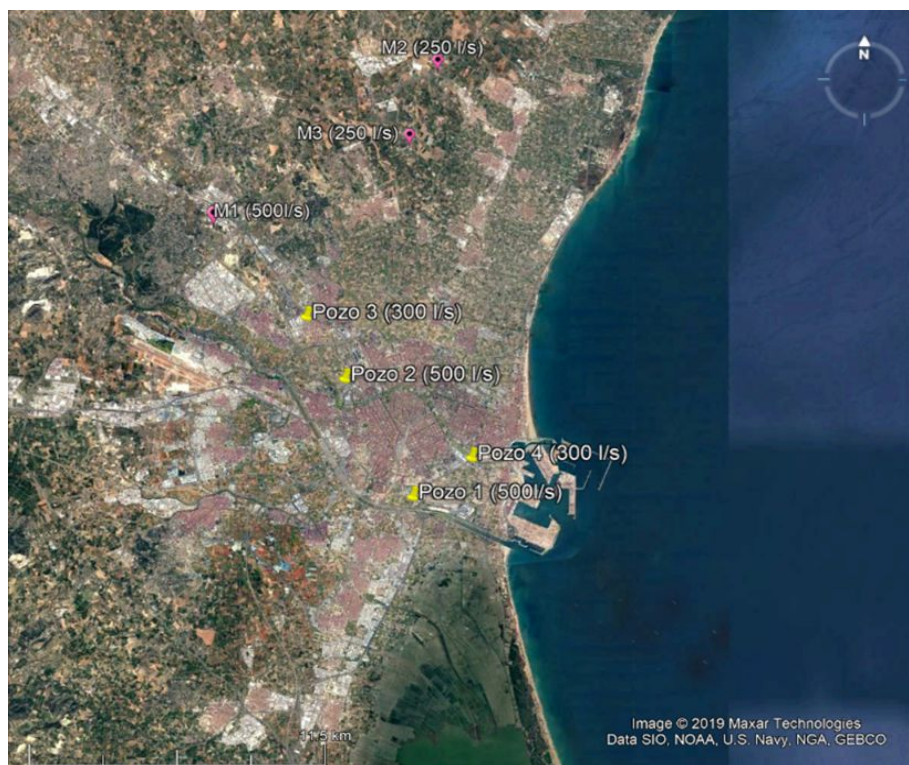


Figura 61. Ubicación de los pozos en continuo y de las estaciones de bombeo propuestas para el escenario 3b y 4b.

5.2.8 Balances

En la Tabla 16 se resume el balance global del modelo en régimen transitorio para el subescenario 1 en el que sólo ha habido reducción de lluvias del 12% y el subescenario 2, en el que además se conectan 5 estaciones adicionales de bombeo.

Tabla 16. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio para subescenario 3a (derecha) y 3b (izquierda). Periodo de simulación 1980/1981-2026/2027.

	Entradas			Salidas			Diferencias		
	$(\text{hm}^3/\text{año})$			$(\text{hm}^3/\text{año})$			$(\text{hm}^3/\text{año})$		
Recarga	252.84						252.84		
Laterales	146.77	Laterales	119.85	26.93	153.31	Laterales	117.18	36.13	
Río-acuífero	54.42	Acuífero-Río	78.72	-24.30	54.84	Acuífero-Río	78.60	-23.76	
		Bombeos	96.21	-96.21		Bombeos	106.95	-106.95	
		Drenes	159.45	-159.45		Drenes	158.75	-158.75	
<i>Total</i>	454.04		454.22	-0.19	460.99		461.49	-0.49	

Aunque pueda parecer curioso que al reducirse la recarga aumenten las entradas laterales, esto es debido a que los pozos de emergencia M1, M2, M3 están muy próximos al contorno de Liria-

Casinos viéndose incrementadas las interacciones con este borde. Por este motivo, se deduce que no toda el agua detraída procede del acuífero de la Plana.

Si se compara el valor de la recarga a medio plazo sin reducción de la recarga (escenario 2) y con una disminución del 12% en la lluvia, se observa que en promedio sólo ha disminuido 2 hm³/año, pero si se compara por ejemplo el último año hidrológico simulado de ambos escenarios, 2026/2027, la disminución sería de 17 hm³/año aproximadamente.

A continuación, se presenta la evolución a lo largo de los 47 años de simulación de las principales componentes del modelo en régimen alterado sin activar los pozos de sequía (Figura 62) y activándolos (Figura 63).

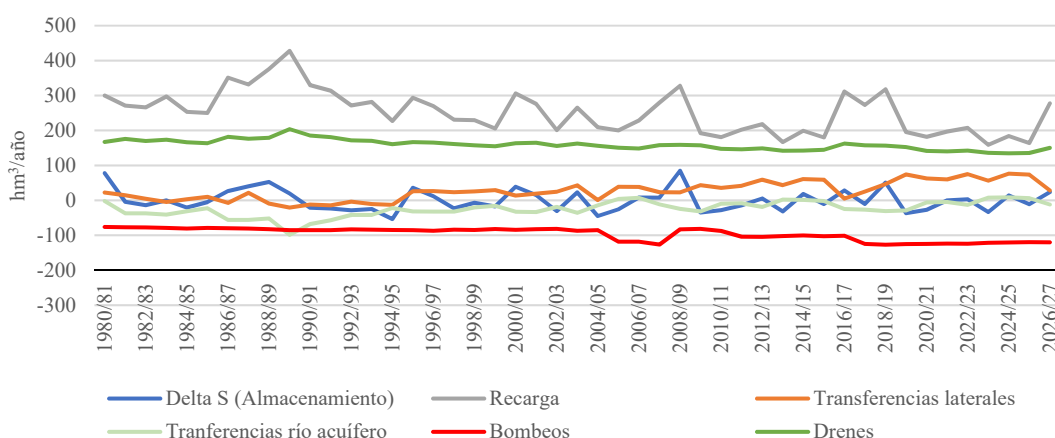


Figura 62. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12%. Periodo 1980/1981-2026/2027.

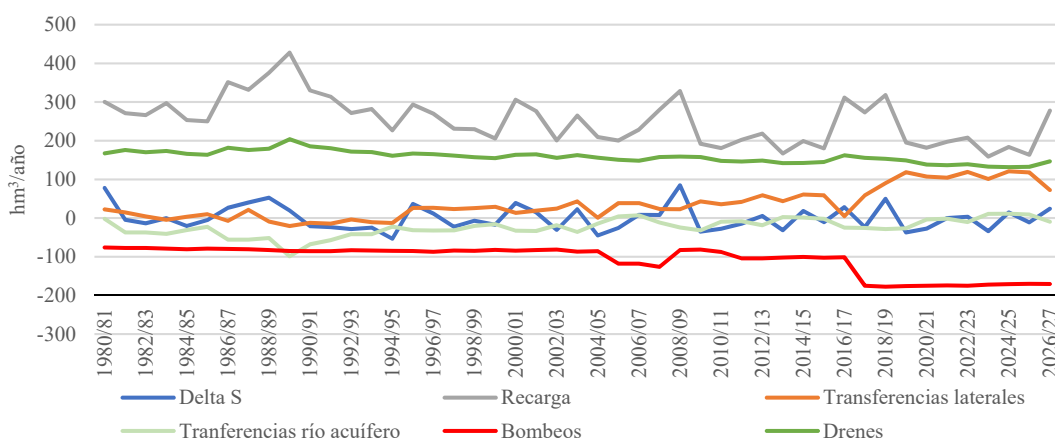


Figura 63. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12% y funcionamiento de pozos de sequía. Periodo 1980/1981-2026/2027.

Como en el epígrafe 5.2.4 *Balances*, tampoco se ha incluido la tabla del balance parcial porque las únicas componentes que se modifican en mayor grado son los bombeos y las entradas laterales.

En la Figura 64 y Figura 65, se muestra la evolución anual del almacenamiento y el almacenamiento acumulado. Para el primer gráfico sólo se tiene en cuenta la reducción del 12% en las precipitaciones y en el segundo, además de tal reducción, la puesta en marcha de los pozos de sequía.

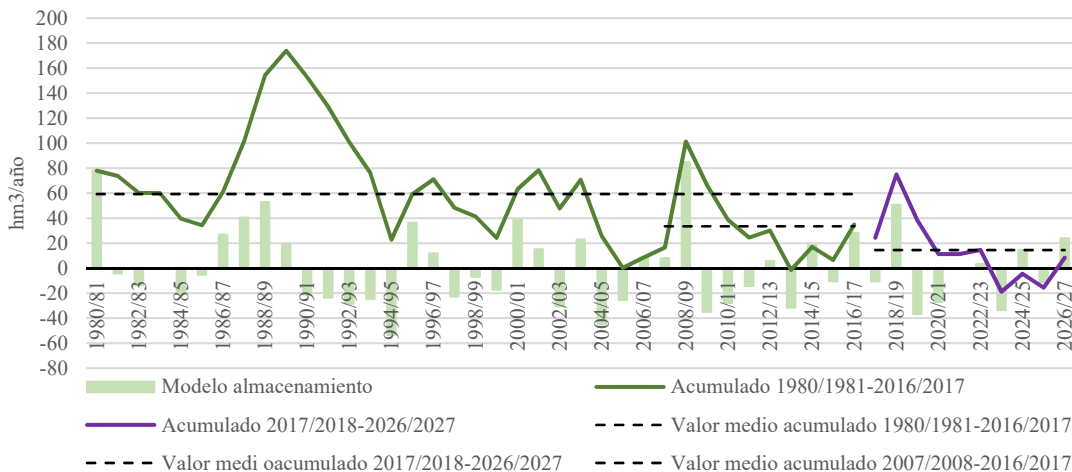


Figura 64. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12%. Período 1980/1981-2026/2027.

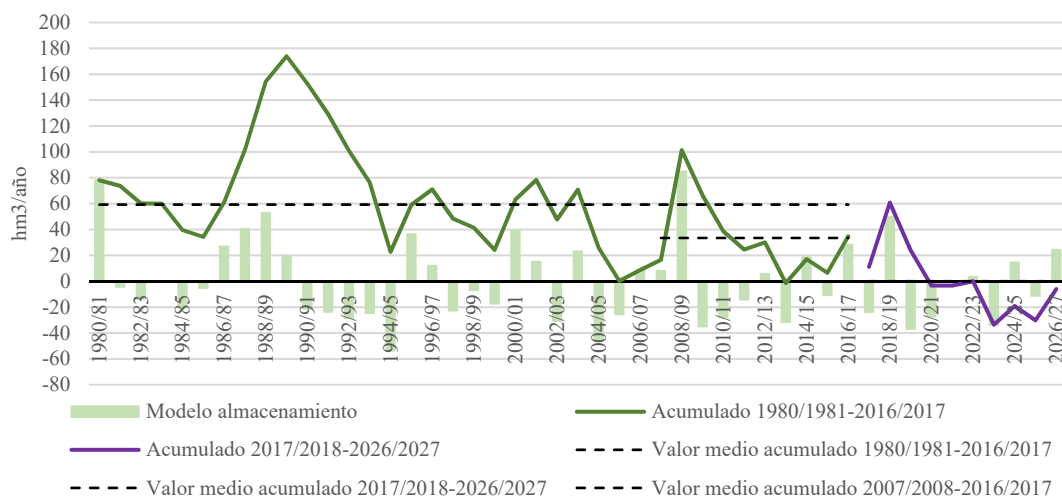


Figura 65. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 12% y funcionamiento de pozos de sequía. Período 1980/1981-2026/2027.

Es notorio que a partir del año hidrológico 2021/2022 se aprecia un consumo de reservas. Existe una variación del almacenamiento de valores positivos a negativos, tanto en el escenario 3a como en el 3b, llegando a máximos de $-18 \text{ hm}^3/\text{año}$ y $-33 \text{ hm}^3/\text{año}$ respectivamente. Este hecho es debido al aumento de los bombeos, y que las recargas no son lo suficientemente elevadas.

Por otro lado, el valor medio acumulado para los últimos 10 años futuros pasaría de $14 \text{ hm}^3/\text{año}$ a prácticamente $0 \text{ hm}^3/\text{año}$ si se activasen los pozos de emergencia.

5.3 Escenario 4: horizonte 2027 con reducción de la precipitación del 20%

Al igual que el escenario 3, este último escenario busca simular el comportamiento del sistema a medio plazo (horizonte 2027) considerando una disminución en las lluvias como consecuencia del cambio climático.

También se han considerado dos subescenarios para estudiar sus efectos por separado. En el primero, se ha modificado solamente el componente de la precipitación y en el segundo subescenario, además de la precipitación se han incorporado 5 nuevas estaciones de bombeo de la empresa Global Ómnium.

El periodo de simulación comprende desde el año hidrológico 1980/1981 hasta el 2026/2027, al igual que el escenario 2.

5.3.1 Recarga: precipitación y retornos de riego

Se ha considerado una disminución de los recursos hídricos del 20% según indica la tesis doctoral “*Caracterización de los futuros escenarios climáticos en la Comunidad Valenciana: propuestas de mejora para la evaluación de la oferta y demanda de recursos hídricos*” (Chirivella, V., 2010) para el medio plazo. Los retornos de riego son idénticos a los utilizados para el escenario 2.

5.3.2 Bombeos

Los bombeos considerados han sido los mismos que los definidos en el apartado 3, es decir, se han utilizado los mismos bombeos autorizados por la CHJ sin activar sus pozos de sequía y los bombeos en continuo y los de las 5 estaciones de emergencia propuestos por la empresa.

5.3.3 Balances

En la Tabla 17, se muestra el balance global del modelo en régimen transitorio para el subescenario 4a, en el que se había considerado una reducción de la precipitación del 20% y el subescenario 4b, en el que además se contemplan 5 estaciones de bombeo para situaciones de emergencia.

Tabla 17. Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio para subescenario 4a (derecha) y 4b (izquierda). Periodo de simulación 1980/1981-2026/2027.

	Entradas		Salidas	Diferencias		Entradas		Salidas	Diferencias
	(hm ³ /año)		(hm ³ /año)	(hm ³ /año)		(hm ³ /año)		(hm ³ /año)	(hm ³ /año)
Recarga	251.74			251.74		251.74			251.74
Laterales	147.08	Laterales	119.57	27.51	153.64	Laterales	116.93	36.71	
Río- acuífero	54.51	Acuífero- Río	78.54	-24.02	54.94	Acuífero- Río	78.42	-23.48	
		Bombeos	96.21	-96.21		Bombeos	106.95	-106.95	
		Drenes	159.26	-159.26		Drenes	158.57	-158.57	
<i>Total</i>	453.33		453.58	-0.25	460.31		460.87	-0.56	

Sucede lo mismo que en el escenario 3, a consecuencia de los bombeos de emergencia situados en la cercanía con el contorno de Liria-Casinos, aumentan las entradas laterales para satisfacer las demandas.

A pesar de disminuir la recarga por lluvias, y tener unos bombeos mucho más elevados que en el escenario 2 donde no se tenía en cuenta ninguna de estas variables, el acuífero sigue en situación de equilibrio para ambos subescenarios.

Nuevamente, si comparamos los 254.51 hm³/año de recarga por precipitación a medio plazo sin considerar los efectos del cambio climático (escenario 2) con los 251.74 hm³/año que se obtienen bajo una reducción de las lluvias del 20%, no se observa una gran disminución del recurso hídrico. Sin embargo, si en vez de movernos en valores promedio, comparamos el año 2026/2027, se pasaría de tener una recarga de 295 hm³ a 266 hm³.

En la Figura 66, se presenta la evolución de las principales componentes del modelo en los 47 años de régimen transitorio sin considerar los pozos de emergencia y en la Figura 67 considerando su activación.

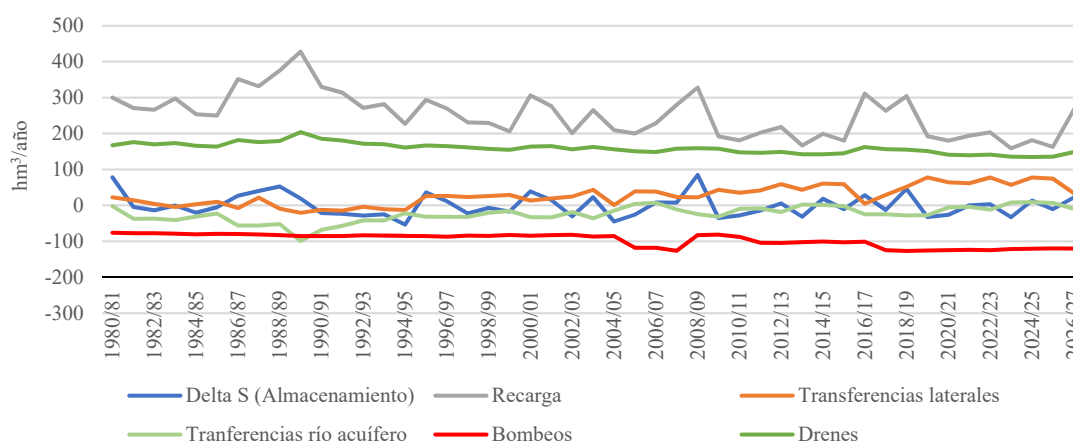


Figura 66. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20%. Periodo 1980/1981-2026/2027.

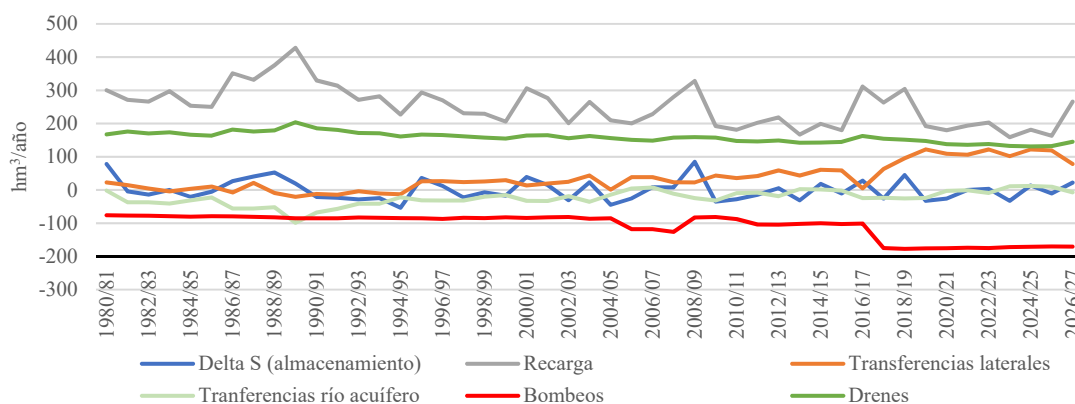


Figura 67. Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20% y funcionamiento de pozos de sequía. Periodo 1980/1981-2026/2027.

En la Figura 68 se representa la evolución anual del almacenamiento considerando una disminución del 20 % en las lluvias, y en la Figura 69, además se ha considerado la activación de los pozos de emergencia.

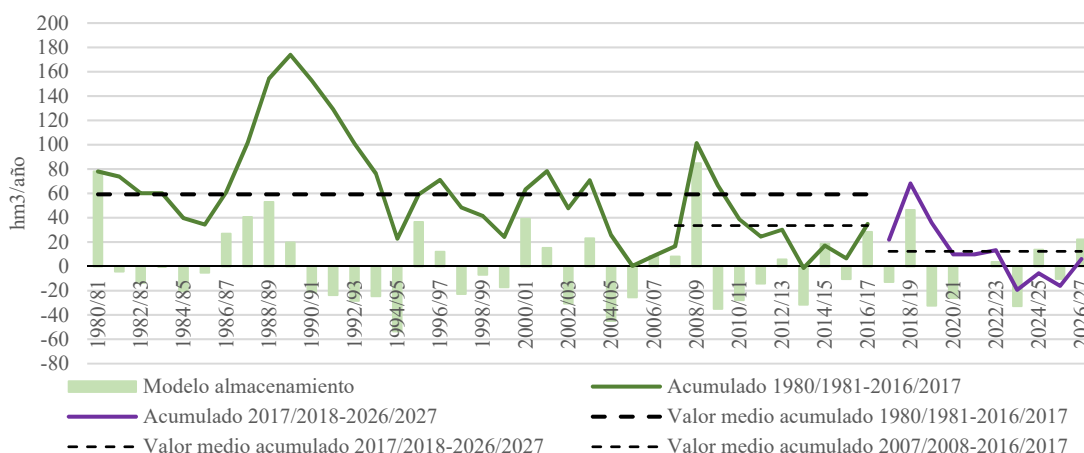


Figura 68. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20%. Período 1980/1981-2026/2027.

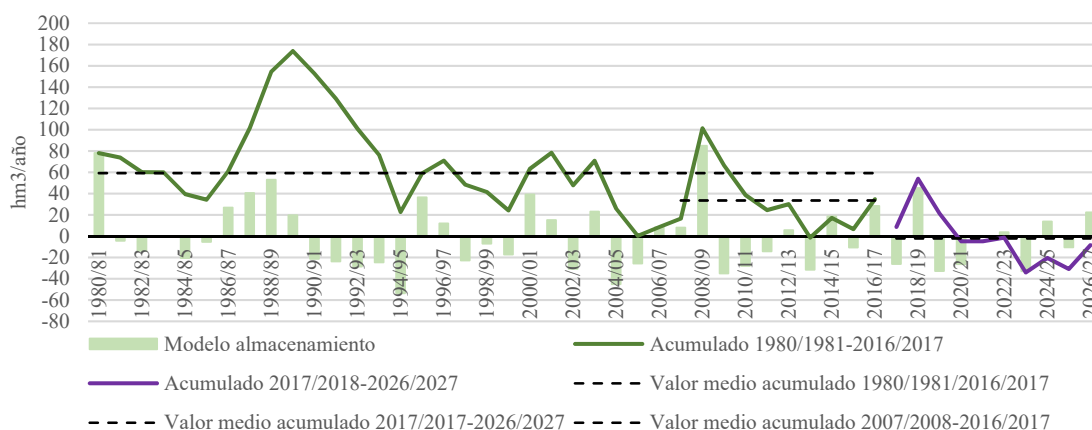


Figura 69. Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen influenciado con disminución de la lluvia del 20% y funcionamiento de pozos de sequía. Período 1980/1981-2026/2027.

Como sucedía en el escenario 3, a partir del año 2022/2023 comienzan a utilizarse las reservas del acuífero porque los bombeos demandan tanta agua que la recarga no es capaz de cubrir. En este caso los máximos para ese año hidrológico son $-19 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el escenario 4a y $-33 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el escenario 3b.

En la Tabla 18 se resume la disminución del almacenamiento acumulado para los tres escenarios a medio plazo, con el fin de poder comparar como afecta la disminución de la lluvia al modelo.

Tabla 18. Comparativa del almacenamiento acumulado para el ciclo 2017/2018-2026/2027.

	Sin reducción	Reducción del 12%	Reducción del 20%	Reducción del 12% con activación de pozos	Reducción del 20% con activación de pozos
2017/18	28.52	24.918630	22.52	11.79	9.38
2018/19	85.23	75.101131	68.25	60.88	54.01
2019/20	42.03	38.328162	35.83	23.87	21.35
2020/21	13.59	11.307709	9.77	-3.29	-4.84
2021/22	13.59	11.307709	9.77	-3.29	-4.84
2022/23	16.59	14.638196	13.31	0.05	-1.30
2023/24	-18.16	-18.865335	-19.35	-33.59	-34.08
2024/25	-2.54	-4.451667	-5.74	-19.14	-20.45
2025/26	-14.79	-15.565353	-16.10	-30.24	-30.79
2026/27	12.01	8.374064	5.97	-6.04	-8.48
<i>Total</i>	176.06	145.09	124.23	0.99	-20.02

En el caso de reducirse la precipitación un 12%, se dejarían de almacenar 34 hm³ en 10 años aproximadamente, pero si la reducción fuera del 20 % se estarían perdiendo 56 hm³. La situación empeora cuando se ponen en marcha las estaciones de bombeo, ya que el almacenamiento se reduce sensiblemente. Por tanto, tiene mucha más influencia en los cambios del almacenamiento, las detracciones de Global Ómnium que las disminuciones de la recarga consideradas.

Sería importante estudiar en un futuro, cómo afectaría al modelo la disminución de los niveles de los ríos, ya que el cambio climático afecta tanto a los recursos hídricos superficiales como a los subterráneos. De modo que, el almacenamiento se podría ver gravemente afectado ante la disminución en los caudales de los ríos.

Otro aspecto fundamental que analizar es la variación de los flujos laterales entre el acuífero y el mar bajo el escenario de cambio climático.

Para los 3 escenarios a futuro planteados, se han representado las entradas y salidas laterales a través del contorno costa con el fin de estudiar la influencia de la disminución de la precipitación y la activación de los pozos de emergencia (desde la Figura 70 hasta la Figura 77 inclusive).

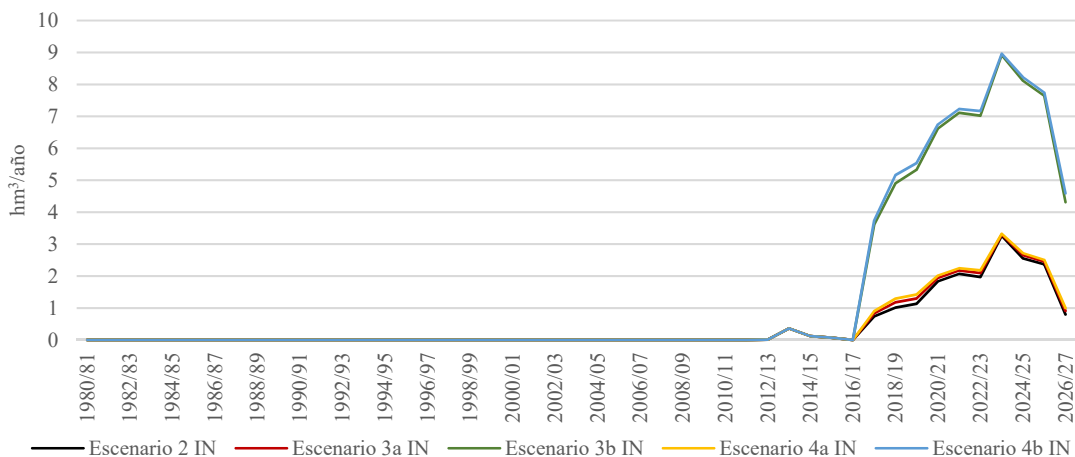


Figura 70. Entradas a través de la línea de costa Norte superior.

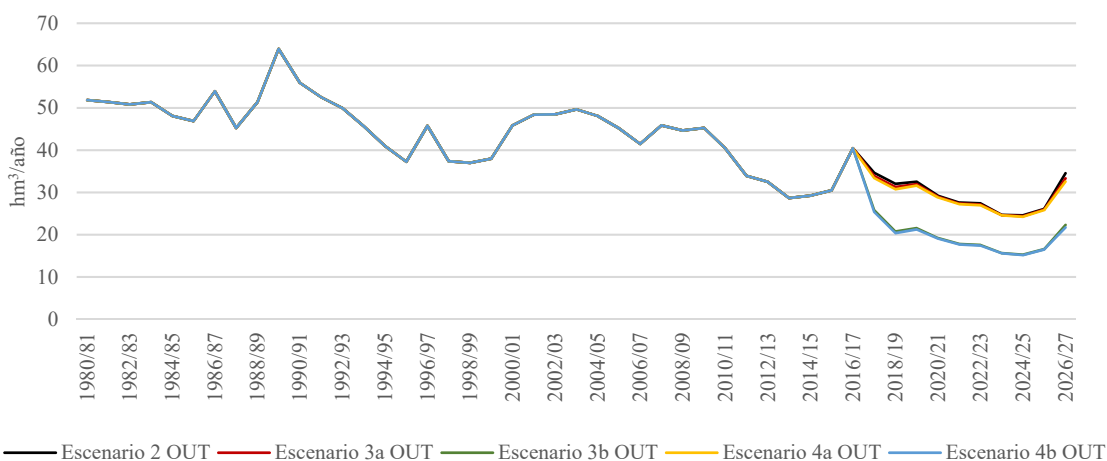


Figura 71. Salidas a través de la línea de costa Norte superior.

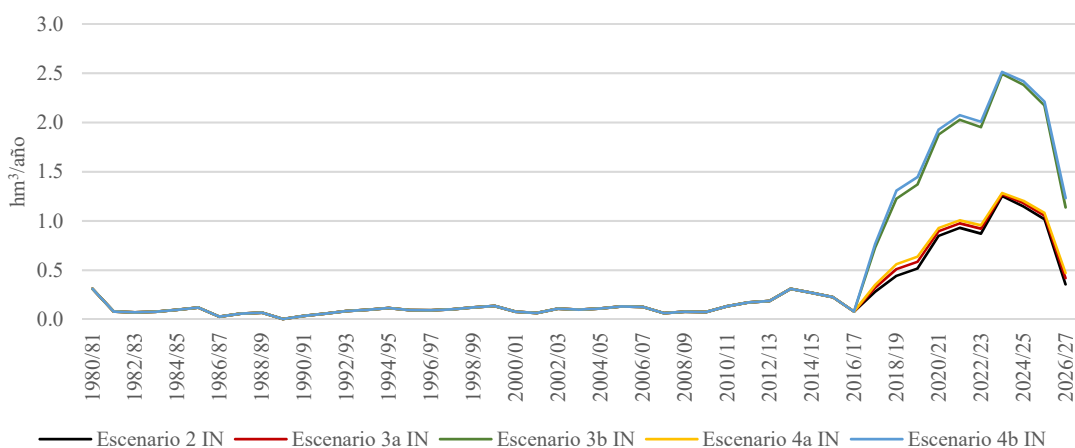


Figura 72. Entradas a través de la línea de costa Norte inferior.

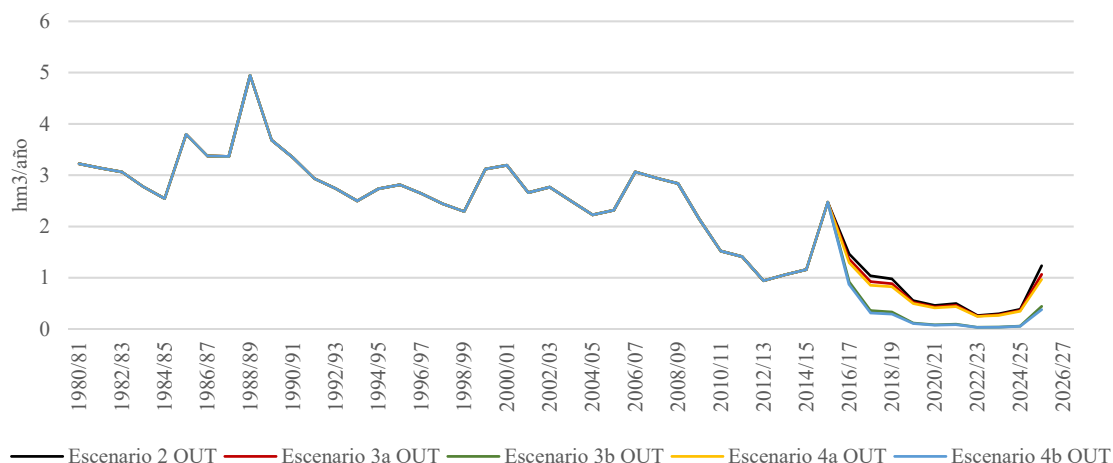


Figura 73. Salidas a través de la línea de costa Norte inferior.

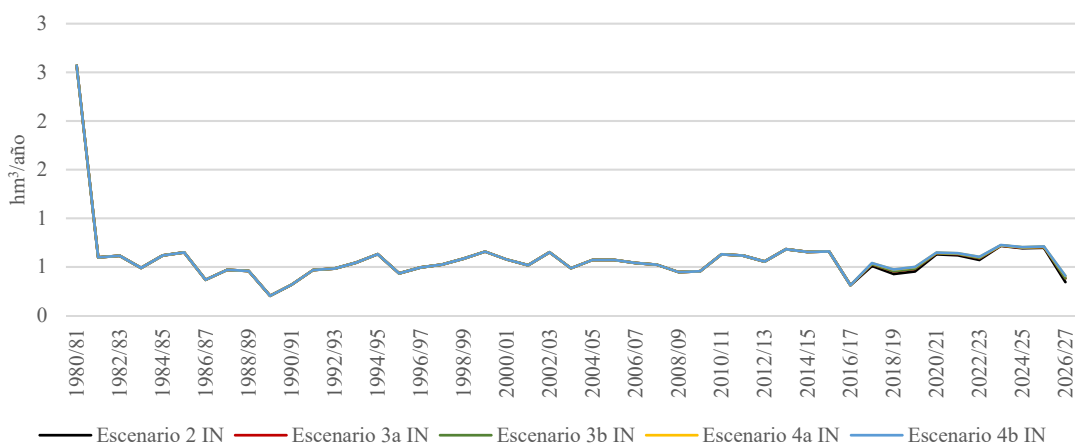


Figura 74. Entradas a través de la línea de costa Sur superior.

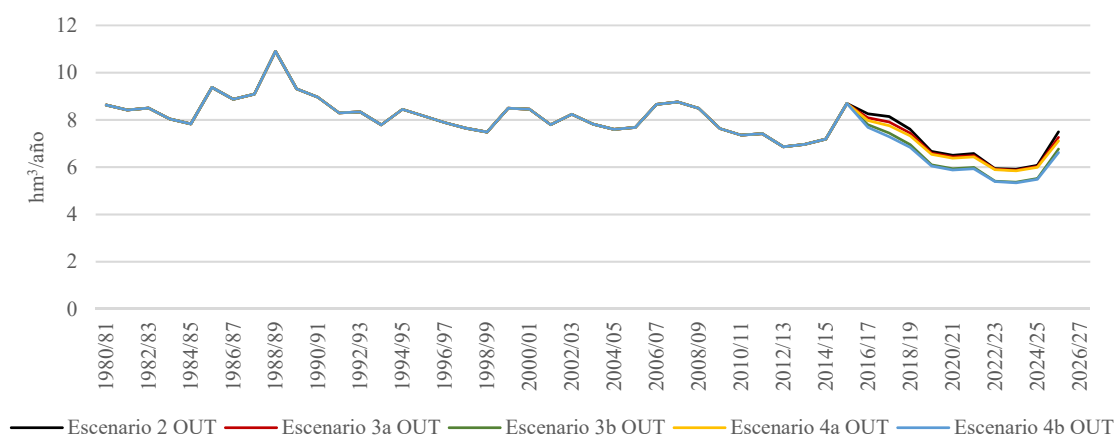


Figura 75. Salidas a través de la línea de costa Sur superior.

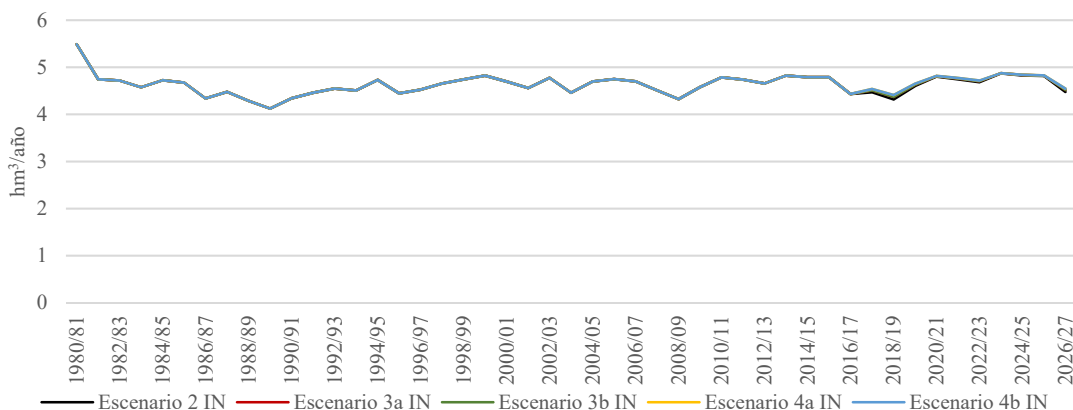


Figura 76. Entradas a través de la línea de costa Sur inferior.

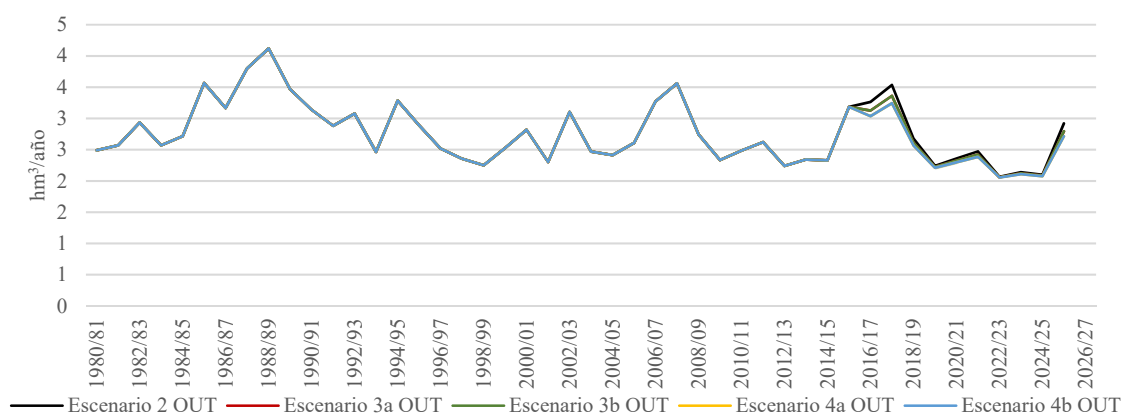


Figura 77. Salidas a través de la línea de costa Sur inferior.

Salta a la vista que los cambios más notorios se producen en la costa norte, mientras que el tramo sur apenas se ve afectado por la reducción de las precipitaciones y las extracciones de emergencia. Estos resultados concuerdan en parte con la información que figura en los documentos iniciales del Plan Hidrológico Nacional del ciclo 2021/2027, donde se afirma que tanto la Plana de Valencia Norte como la Sur están en riesgo de intrusión marina.

En el caso de no ponerse en marcha las estaciones de bombeo de emergencia, para el tramo norte-superior e inferior, las entradas y salidas se mantienen más o menos constantes para los escenarios 2, 3a y 4a. En cambio, si se activasen los pozos de emergencia, las entradas al acuífero aumentarían y las salidas disminuirían. Concretamente, en el año con valores más extremos (2024/2025), se pasaría de tener unas entradas de 3.32 hm³/año a 9 hm³/año y unas salidas de 24 hm³/año a 15 hm³/año en el tramo superior, mientras que para el tramo inferior las entradas pasarían de 2.5 hm³/año a 1 hm³/año y las salidas de 0.3 hm³/año a prácticamente 0 hm³/año.

A falta de estudios complementarios que evalúen la posición de la cuña salina bajo los diferentes escenarios considerados, no se puede afirmar que exista intrusión marina. Sin embargo, sí se puede concluir que la puesta en marcha de las estaciones de bombeo de emergencia afecta a los flujos subterráneos entre el acuífero y la costa, ya que provoca que la diferencia entre entradas y salidas al acuífero sea menor.

Tabla 19. Datos relativos a los piezómetros de la red de calidad cercanos a los pozos de Global Ómnium.

Pozo continuo/emergencia	Piezómetro más próximo de la red de calidad	Masa de agua subterránea	Concentración de nitratos para las masas de agua (mín;máx) (mg/l)	Fecha (mín; máx)	Rango de fechas
P1	08.25.079	Plana de Valencia Norte	[30,650]	03/1989-03/1994	09/1987-09/1997
P2, P4	08.25.083	Plana de Valencia Norte	[15,180]	18/1997-08/1986	02/1985-08/1997
P3	08.25.089	Plana de Valencia Norte	[30,170]	04/1989-10/1998	10/1985-10/2000
M1	08.22.044	Liria-Casinos	[10,75]	09/1988-02/1985	02/1985-02/2001
M2	08.20.066	Medio-Palancia	[15,180]	02/1985-02/1993	02/1985-02/2001
M3	08.20.060	Medio-Palancia	[10,70]	06/1992-10/2000	06/1989-12/2000

Las concentraciones recogidas en la Tabla 19, aunque en ciertas ocasiones alcancen valores inferiores al admisible, llegan a valores máximos excesivamente elevados.

Es importante destacar que, en el acuífero de la Plana de Valencia Norte se da un amplio rango de valores, que en general supera los 100 mg/l. Por otro lado, las zonas de mayor concentración se corresponden con las de menor retorno de riegos, con valores que superan los 300 mg/l.

Puesto que el estudio de calidad anterior se desarrolló con mediciones de nitratos tomadas hasta el año 2000, con el fin de introducir información más reciente, se han utilizado determinaciones analíticas de las masas de agua subterránea consideradas en estado de riesgo pertenecientes a la red de control operativo de la CHJ (Figura 79, Tabla 20).

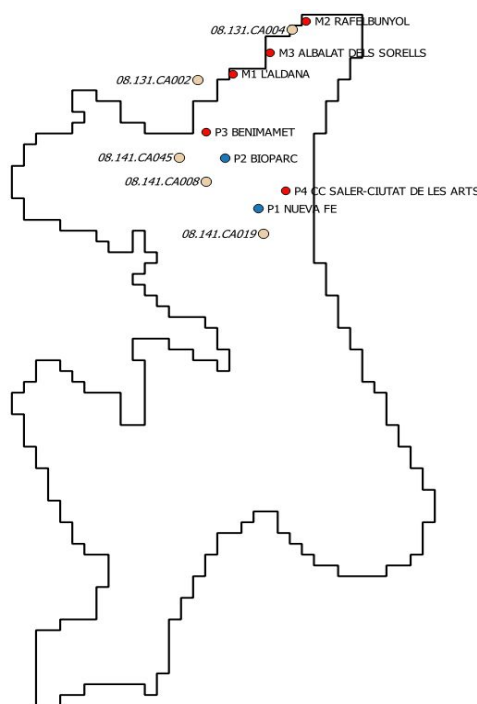


Figura 79. Piezómetros de la red de operativa de masas de agua subterránea escogidos.

Tabla 20. Datos relativos a los piezómetros de la red de operativa cercanos a los pozos de Global Ómnium.

Pozo continuo/emergencia	Piezómetro más próximo de la red operativa	Masa de agua subterránea	Concentración de nitratos para las masas de agua (mín;máx) (mg/l)	Fecha (mín;máx)
M1	08.131.CA002 Pozo Masía Donday	Liria-Casinos	[58;144.30]	11/03/2010 05/03/2007
M2/M3	08.131.CA004 Pozo de San Antonio	Liria-Casinos	[62;252]	11/03/2010 30/03/2017
P1/P4	08.141.CA019 Pozo la Castañera	Plana de Valencia Norte	54.9 (única medición)	07/09/2006
P2	08.141.CA008 Pozo Cervantes	Plana de Valencia Norte	[99;196.4]	17/12/2009 17/04/2008
P3	08.141.045 Pozo de San Onofre	Plana de Valencia Norte	[20.7;82]	20/04/2016 28/03/1988

Las Figuras 80, 81, 82 y 83 recogen las series con las medidas de nitratos relativas a los piezómetros de la red operativa de la CHJ.



Figura 80. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.131.CA002 de la serie operativa.



Figura 81. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.131.CA004 de la serie operativa.

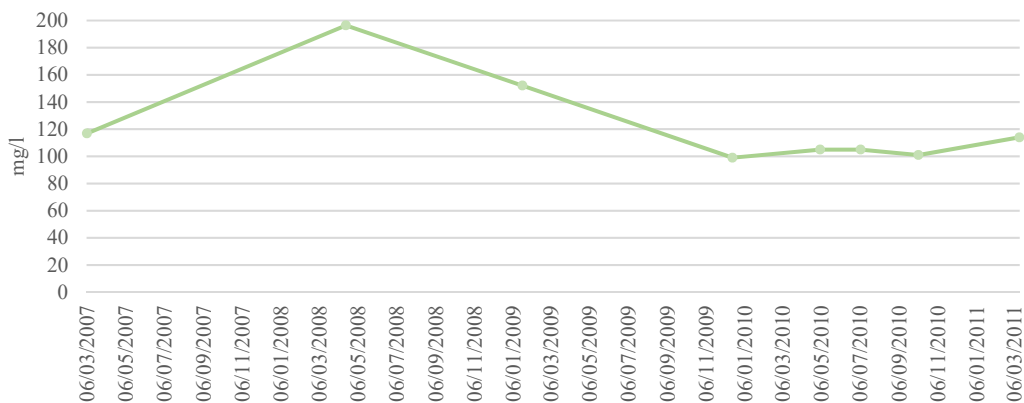


Figura 82. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.141.CA008 de la serie operativa.

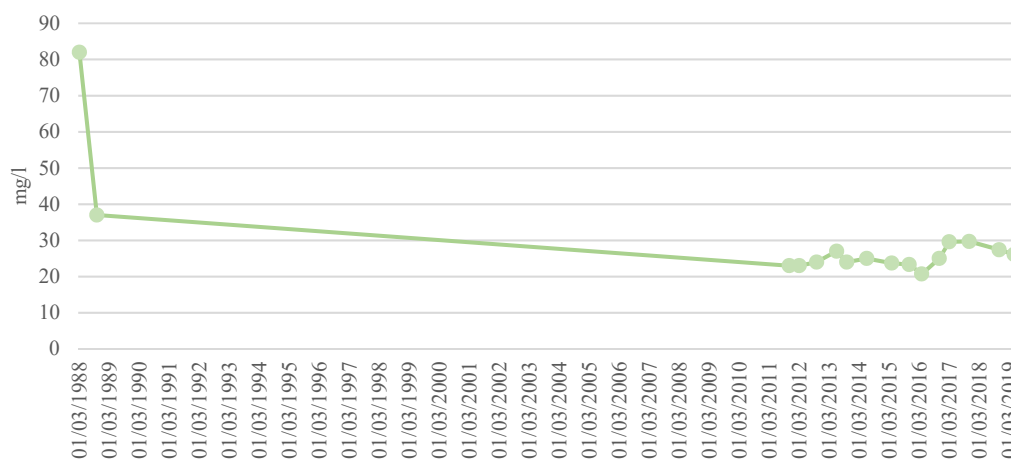


Figura 83. Concentraciones históricas de nitratos para el pozo 08.141.045 de la serie operativa.

A la vista de los datos recogidos en la Tabla 20, tanto las concentraciones de nitratos máximas como las mínimas son mayores a las admisibles, salvo en el pozo 08.141.045 que se encuentra sobre los valores recomendables inclusive hasta fechas recientes.

Por lo tanto, y de acuerdo con el estudio “*Estudio para el análisis, modelación y planificación de la demanda de agua potable de Valencia, área metropolitana y comarcas limítrofes*” (IIAMA, 2012), los recursos hídricos del acuífero permitirían un abastecimiento local que se consideraría aceptable de no ser por el contenido de nitratos, lo que hace necesaria la mezcla o desnitrificación, debido a que en la mayoría de los casos las aguas presentan una concentración menor a 50 mg/l de nitrato.

A partir de la información obtenida del mapa de ocupación del suelo de España, Corine Land Cover del año 2018, se ha determinado que los usos del suelo de las zonas en las que se situarían los pozos de emergencia son fundamentalmente agrícolas (cultivos y frutales), industrial, comercial y urbana. En la Figura 84 se ha representado el mapa Corine de los usos del suelo en la Plana de Valencia, así como la ubicación de los pozos de bombeo de la empresa Global Ómnium.

También es importante destacar que a aproximadamente 3 km de la estación de bombeo P3 hay una zona de extracción minera y que la estación P4 está próxima al puerto.

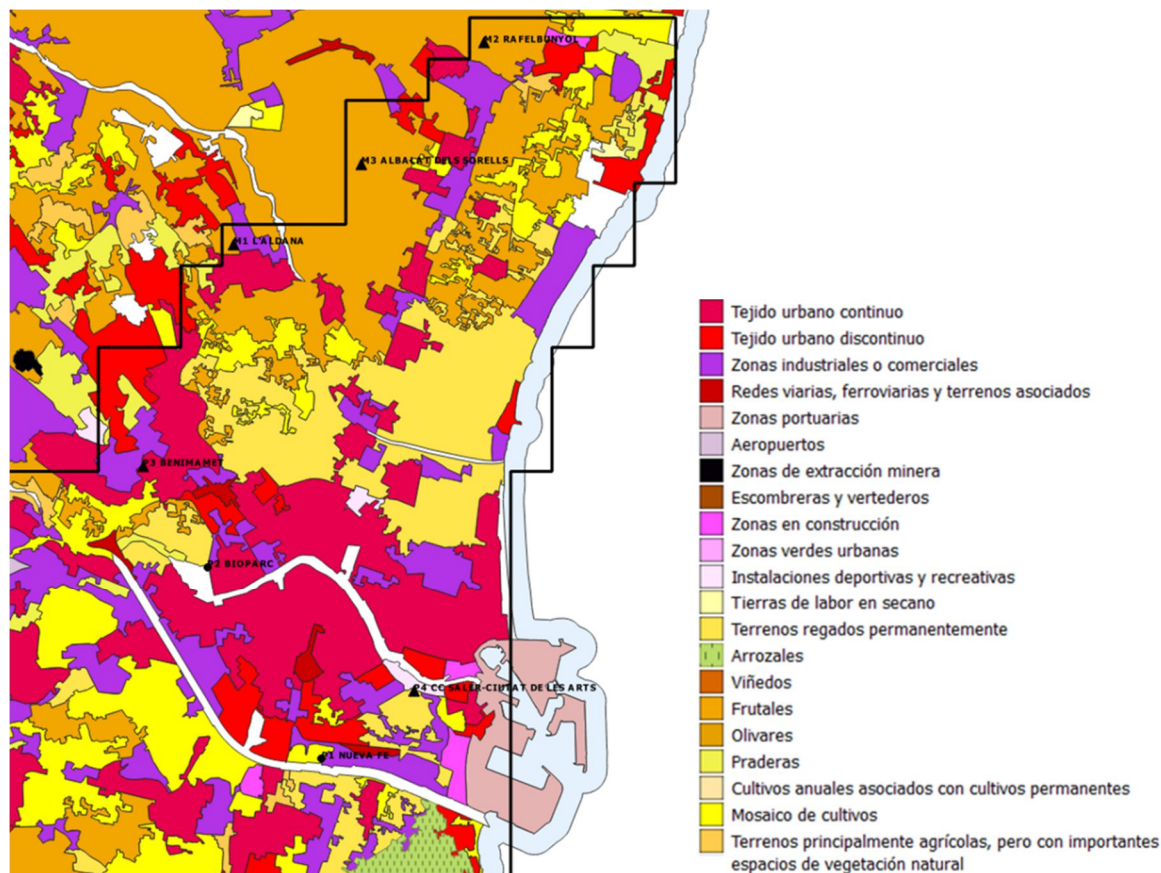


Figura 84. Mapa Corine de usos del suelo y ubicación de los pozos de bombeo continuos y de emergencia de Global Omnium. Fuente: modificado del Centro Nacional de Información Geográfica.

Se desconoce por parte del equipo redactor del proyecto si se han realizado estudios de contaminación de suelo en las localizaciones propuestas para las estaciones de bombeo. Estos estudios son fundamentales para identificar la presencia de metales pesados, combustibles, disolventes, grasas o aceites, etc., provenientes del desarrollo de las actividades económicas anteriormente citadas y para poder llevar a cabo las medidas de remediación adecuadas en el caso de ser necesarias.

Otro aspecto a tener en cuenta es la profundidad de bombeo, ya que en el modelo se ha considerado de -20 m para todos los pozos por cuestiones prácticas, sin embargo, en la realidad se estaría tomando agua de la zona más superficial del acuífero, que es la más susceptible a la contaminación y a la estacionalidad del clima.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

7. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este estudio ha sido evaluar las posibilidades de extracción de agua subterránea para suministro de la ciudad de Valencia. Para ello, se diseñó un modelo numérico de flujo de la Plana de Valencia Norte y Sur. En este documento se han descrito los pasos seguidos para su construcción, calibración y posterior aplicación.

A pesar de que para la condición inicial se utilizó el mapa de la empresa EPTISA correspondiente al año 2005 puesto que no se disponía de información detallada para 1980, es importante mencionar, que las alturas piezométricas simuladas para el año 2005 y las utilizadas como condición inicial, son muy similares, incluso en el entorno del Parque Albufera. Por lo que, a la vista de los resultados obtenidos se puede decir que se trata de un modelo robusto que representa correctamente y de forma fiable el funcionamiento del sistema.

Cabe destacar el estado de equilibrio que mantiene el acuífero incluso en las condiciones más desfavorables planteadas, puesto que las entradas y las salidas están prácticamente compensadas.

El modelo no es muy sensible a la reducción de las precipitaciones debido a que la recarga sólo disminuye alrededor de 2 hm^3 a lo largo de la serie histórica si se compara el escenario 2 con el 3 y el 4, mientras que una reducción de los retornos de riego del 1% supone $10 \text{ hm}^3/\text{año}$ que dejan de entrar al acuífero. Además, habría que tener en cuenta las restricciones de riego que podría plantear el organismo competente en situación de escasez, puesto que como se mencionó anteriormente, la recarga más importante procede de los retornos de riego y de ser un porcentaje importante, el acuífero se vería aún más afectado.

Respecto a las extracciones de emergencia, es cierto que se pueden bombear esos caudales a medio plazo, sin embargo, aunque el acuífero esté estable, a la vista de la clara tendencia decreciente de la precipitación en la zona y del almacenamiento, es posible que estos niveles de extracción no se puedan mantener en el tiempo ya que se estaría explotando el acuífero por encima de su tasa de renovación. Tanto para los escenarios 3 y 4, las reservas del acuífero disminuyen 82 hm^3 en tan sólo 4 años, de modo que, de acuerdo con que el volumen inicial almacenado en la primera capa del acuífero es de 2450 hm^3 , las reservas durarían 120 años. Con las extracciones simuladas, de momento las relaciones entre las componentes consideradas y el acuífero no se ven afectadas porque solamente se ve comprometido el almacenamiento. Sin embargo, este aumento de la presión sobre el recurso hídrico subterráneo se puede traducir a largo plazo en problemas de sostenibilidad para generaciones futuras, afecciones en la calidad de las aguas, subsidencia del terreno, cambios en la relación río acuífero, inclusive avance de la cuña salina tierra adentro. Por ello, se ha de realizar una gestión del recurso hídrico que se pueda mantener en el tiempo y que utilice todas las fuentes de suministro posibles, así como mejore la eficiencia de las ya existentes.

Es de vital importancia apuntar que en este modelo no se han tenido en cuenta los bombeos que realiza la CHJ en periodos de escasez hídrica, que de ser similares a lo extraído en épocas anteriores (años 2005 a 2008) se podrían llegar a superar los 210 hm^3 en años puntuales, lo que aceleraría el proceso de vaciado del acuífero de la Plana de Valencia. Tampoco se han incluido

en el modelo bombeos metropolitanos autorizados por la CHJ de ámbito privado para dotaciones de riego y uso industrial.

Otro punto importante acerca de los bombeos está relacionado con la ubicación de los pozos que se encuentran en las cercanías del contorno Liria-Casinos, ya que para los escenarios simulados toman agua de esta masa de agua, pero en un futuro no sabemos en qué estado se encontrará y de si podrá seguir dando la misma cantidad de agua.

Este trabajo ha arrojado algo de luz en cuanto al funcionamiento hidrodinámico del lago de la Albufera. A partir del análisis de la piezometría en su entorno y de los niveles de la lámina de agua del lago, se ha visto que éste se encuentra desconectado del acuífero salvo en algunas ocasiones en las que existen flujos del acuífero al lecho, pero que han ido disminuyendo paulatinamente a lo largo de los años pasando de $4 \text{ hm}^3/\text{año}$ a menos de $1 \text{ hm}^3/\text{año}$ en la actualidad.

Sin embargo, son de mencionar las surgencias en la parte sur del parque, que coinciden con la antigua superficie del lago y que lo alimentan en forma de escorrentía superficial. Estos aportes superficiales al lago se complementan en la realidad con retornos superficiales del canal Júcar-Turia, con retornos de riego superficial, con los drenajes repartidos por todo el parque que suministran agua a los cultivos de la zona, vertidos sin depurar, etc. En este trabajo únicamente se han simulado los bombeos en los alrededores del parque, que funcionan a modo de dren, pero cuya agua no retorna al sistema como sí ocurre realmente. Por todo lo mencionado anteriormente, se puede concluir que cuando el lago se encontraba bajo un escenario de baja antropización, recibía aportes subterráneos de forma natural que lo recargaban, sin embargo, debido al complejo sistema de riegos y de las extracciones que se realizan en el entorno del parque, se ha producido una desconexión entre la Albufera y el acuífero de la Plana, viendo justificados sus niveles por encima de la piezometría por los aportes superficiales que recibe.

Por último, aunque se hayan analizado los flujos entre el acuífero y la costa, sin un estudio complementario no se puede realizar un diagnóstico del alcance del problema intrusión marina, ni de cómo afectan las detracciones de emergencia propuestos por Global Ómnium. Sí se puede afirmar que la dinámica entradas/salidas en la Plana de Valencia Norte se modifica, siendo la diferencia entre éstas inferior bajo la hipótesis de activación de bombeos de emergencia.

8. LÍNEAS FUTURAS

Hasta el momento, este modelo es la herramienta más actualizada para explicar el funcionamiento del acuífero de la Plana de Valencia Norte y Sur bajo las acciones exteriores a las que está sometido. Sin embargo, durante la realización del presente proyecto, se han identificado algunos aspectos que podrían mejorarse, dotando al modelo de una definición aún más próxima a la realidad. Son los siguientes:

- Mejora de la discretización vertical de la Plana de Valencia Norte a partir de un estudio detallado de la geometría de capas, como ya había realizado con anterioridad el IGME para la Plana Sur. Este trabajo ha utilizado sondeos de diversas fuentes para la discretización de las capas de la zona norte, y como ya se comentó en el apartado 3.6.1 *Bombeos Global Ómnium*, existen incoherencias entre las profundidades reales de bombeo y la profundidad del muro del acuífero modelado.
- Debido al cambio en su funcionamiento hidrogeológico a lo largo de los años y a que forma parte de un complejo sistema de acciones y demandas, la relación de la Albufera con las aguas subterráneas aún no está clara. Por este motivo, es necesaria la colocación de piezómetros que midan con exactitud el entorno del lago y permitan conocer las fluctuaciones de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo, para así poder explicar por qué el lecho del lago está desconectado del nivel freático. Por otro lado, también sería interesante contar con un registro más detallado de las cotas del lago, así como de las recargas y retornos superficiales que la alimentan.
- Debido a la falta de datos, para la calibración del modelo en estado transitorio se han utilizado valores de flujos río-acuífero de otros modelos. Sin embargo, sería necesario contar con registros históricos reales de tales flujos con el fin de emular lo máximo posible la relación real entre las masas superficiales y subterráneas.
- A pesar de estar fuera del alcance de este trabajo, es importante mencionar la mejora que requiere la red operativa de calidad de la CHJ ya que la densidad de piezómetros es baja y las medidas son muy espaciadas en el tiempo, lo que dificulta el estudio de la concentración de los contaminantes.
- Tampoco compete a este proyecto, pero sería conveniente utilizar el agua detráida en la red de metro de Valencia para algún uso productivo, previo tratamiento si lo requiriese, porque a pesar de ser aproximadamente $2 \text{ hm}^3/\text{año}$, es agua virgen que no se está aprovechando puesto que actualmente se vierte directamente a la red de saneamiento o a balsas de vertido.
- La Plana de Valencia Norte se encuentra actualmente en riesgo de intrusión marina, de modo que si se empieza a bombear por encima de la tasa de recarga existe la posibilidad de que el problema se agrave. Por este motivo, se hace necesario analizar el problema con mayor detalle.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

9. BIBLIOGRAFÍA

Asociación de geólogos españoles (1976). Hidrología y Recursos Hidráulicos. Simposio nacional de hidrogeología.

Ayuntamiento de Valencia (2010). Estudio de necesidades hídricas. Revisión simplificada Plan General de Valencia.

Ballesteros Navarro, B. (2012). Uso sostenible de las masas de agua subterránea en épocas de sequía. aplicación a la cuenca baja del río Júcar.

Chirivella, V. (2010). Caracterización de los futuros escenarios climáticos en la Comunidad Valenciana: propuestas de mejora para la evaluación de la oferta y demanda de recursos hídricos.

Comunidad general de usuarios del Canal Júcar-Turia (n.d.). Extraído de: <http://www.canaljucarturia.com/canal.html> [Consulta 10 de junio de 2019].

CHJ. (2002). Estudio de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de las cuencas media y baja de los ríos Júcar y Turia. Modelo matemático distribuido del acuífero de la Plana Sur.

CHJ. (2003). Informe complementario para el Banco Europeo de inversiones sobre la conducción Júcar-Vinalopó.

CHJ. (2015a). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria. Ciclo de planificación hidrológica 2015 – 2021. Confederación Hidrográfica del Júcar. Memoria.

CHJ. (2015b). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria. Ciclo de planificación hidrológica 2015 – 2021. Confederación Hidrográfica del Júcar. Anexo 2: Inventario de recursos hídricos.

CHJ. (2015c). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria. Ciclo de planificación hidrológica 2015 – 2021. Confederación Hidrográfica del Júcar. Anexo 3: Usos y Demandas.

CHJ. (2017). Plan Especial de Sequía. Demarcación Hidrográfica del Júcar.

CHJ. (2018). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria. Ciclo de planificación hidrológica 2021 – 2027. Confederación Hidrográfica del Júcar. Anexo 4: Inventario de presiones sobre las masas de agua.

CHJ. (n.d.). Estudio para el desarrollo sostenible de L'Albufera de Valencia. Fase RII: Recopilación de información y toma de datos. Extraído de: http://www2.chj.gob.es/albufera/01_WEB_ED/01_AV_DSAV/01_GD/RI1_03.htm. [Consulta: 28 de junio de 2019].

Citores Martínez, Í. (2018). Modelación matemática del flujo de agua subterránea de la plana de Valencia Norte y Sur.

Centro Nacional de Información Geográfica (2018). Información geográfica temática. CORINE Land Cover 2018. Extraído de: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=SIOSE#> [Consulta: 21 de agosto de 2019]

Custodio, E., y Llamas, R. (1983). Hidrología Subterránea.

EMSHI. (2017). Máster oficial en gestión de recursos hídricos. Extraído de: http://www.benetusser.es/sites/default/files/presentacion_emshi._master_de_gestion_del_agua_mar_2017.pdf [Consulta: 17 de mayo de 2019].

Gobierno del Principado de Asturias. (n.d.). Escenarios de Emisiones SRES del IPCC. Extraído de: http://movil.asturias.es/medioambiente/articulos/ficheros/EscenariosEmisiones_.pdf [Consulta: 05 de mayo de 2019].

Gómez Hernández, J. (2017). Apuntes de hidrología subterránea. Curso 2017/2018.

Harbaugh, A. W. (1990). A Computer Program for Calculating Subregional Water Budgets Using Results from the U.S. Geological Survey Modular Three-dimensional Finite-difference Ground-water Flow Model.

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. (2012). Estudio para el análisis, modelación y planificación de la demanda de agua potable de Valencia, área metropolitana t comarcas limítrofes. Memoria.

Instituto Geológico y Minero de España. (n.d.). Síntesis histórica hidrogeológica. Extraído de: http://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/sintesis_historica.htm [Consulta: 6 de mayo de 2019].

Instituto Geológico y Minero de España (2010). Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Memoria resumen.

Instituto Geológico y Minero de España (2010). Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Masa de agua subterránea 081.141 Plana de Valencia Norte.

Instituto Geológico y Minero de España (2010). Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Masa de agua subterránea 081.142 Plana de Valencia Sur.

McDonald, M., y Harbaugh, A. (1984). A Modular Three-Dimensional Finite- Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey.

Ministerio para la transición Ecológica. (n.d.). Las masas de agua y las unidades hidrogeológicas icono barra herramientas. Extraído de: <https://www.miteco.gob.es/ca/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-subterranas/masas-agua/>. [Consulta: 20 de junio de 2019].



Palop Guillem, S. F., Gisbert Blanquer, J. M., & Marco Segura, J. B. (2015). Procesos ecológicos, agronómicos, y ambientales en el humedal de L'Albufera de Valencia. Construcción de escenarios de futuro.

Pérez-Martín, M. (2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua.

Sahún Artiga, B. (2006). Síntesis de la información remitida por España para dar cumplimiento a los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua, en materia de aguas subterráneas.

Sahuquillo, A. (2012). Informe sobre las posibilidades de utilizar aguas subterráneas para los usos urbanos en el área metropolitana de Valencia. Anexo 2.

Sánchez, F. (2009). Conceptos fundamentales de hidrogeología. Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrológico., *1*, 35–59.

Servicio de Transparencia y Gobierno Abierto del Ayuntamiento de València (2018). Expediente administrativo número E-00702-2018-000030-00. Información relativa al sistema de aprovechamiento de agua potable en Valencia (Ciclo integral del agua).

Winston, R. B. (2000). Graphical user interface for MODFLOW. Version 4, *430*, 1–9.

Winston, R. B. (2009). ModelMuse - A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Virginia.