

Trabajo Fin de Máster

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE VALENCIA NORTE Y SUR

Intensificación:
ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:
IÑIGO CITORES MARTÍNEZ

Tutor:
EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor:
TEODORO ESTRELA MONREAL

Cotutora externa:
ARANCHA FIDALGO PELARDA

JULIO, 2018



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: Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de la Plana de Valencia Norte y Sur
Título del TFM en inglés: Mathematical modelling of the groundwater flow of the Northern and Southern Plana de Valencia aquifer
Título del TFM en valenciano: Modelació matemàtica del flux d'aigua subterrània de l'aqüífer de la Plana de València Nord y Sud
Alumno: Iñigo Citores Martínez
Tutor: Eduardo Cassiraga
Cotutor/es: Teodoro Estrela Monreal Arancha Fidalgo Pelarda
Fecha de Lectura: Julio, 2018

Resumen
En español
<p>En la zona costera de la demarcación hidrográfica de la cuenca del río Júcar existen diferentes acuíferos con un gran volumen de recursos hídricos, por lo que se consideran sistemas de gran importancia e interés económico y ambiental. Estos acuíferos costeros poseen características hidrogeológicas similares y es habitual la presencia de humedales en la superficie. Dichos elementos geomorfológicos se conocen comúnmente como planas y se distribuyen de forma contigua y paralela a la línea de la costa, siendo el mar Mediterráneo su límite oriental. Este tipo de ubicación lleva a que sobre estas masas de agua subterránea se asiente una importante parte de la población de la zona, con todo lo que ello conlleva. La explotación de estos recursos subterráneos ha contribuido al desarrollo urbano, agrícola e industrial de estas zonas, pero a su vez, estas actividades han generado una antropización acusada de estas masas de agua y ecosistemas que las rodean.</p> <p>El objetivo de este trabajo es realizar un modelo numérico de flujo de las masas de agua subterránea de la Plana de Valencia Norte y Sur. Este acuífero tiene una importancia excepcional ya que sobre él se encuentran las desembocaduras de los ríos Turia y Júcar, la ciudad de Valencia y la Albufera de Valencia, entre otros elementos. Este último es un humedal RAMSAR con gran valor ambiental que presenta relación con las aguas subterráneas de las masas de agua Plana de Valencia Norte y Sur. Con este trabajo se permite analizar la existencia de la componente subterránea de los aportes hídricos de la zona.</p>

Este acuífero está dividido en las masas de agua subterránea Plana de Valencia Norte y Plana de Valencia Sur. Debido a sus características hidrogeológicas similares y su continuidad hidráulica se van a considerar de manera conjunta. Por otra parte, la ubicación de la Albufera entre estas dos masas crea la necesidad de trabajar con la Plana de Valencia en toda su extensión, para intentar comprender mejor su funcionamiento hidrodinámico.

El entorno de estudio de este trabajo se extiende por una superficie aproximada de 953 km² y profundidades variables divididas en cuatro capas geológicas. El funcionamiento de las aguas subterráneas en este sistema se caracteriza por la existencia de un flujo en dirección perpendicular a la línea de la costa, esto significa que el agua avanza del oeste hacia el este y que las isopiezas se distribuyen generalmente de manera paralela a la línea de la costa. Este funcionamiento hidrodinámico genera una transferencia de recursos hídricos a la Plana de Valencia proveniente de los sistemas de agua subterránea adyacentes.

Para esta modelación matemática se ha utilizado el periodo temporal entre los años 1940 y 2017. Se han realizado dos tipos de simulación. La primera pretende representar un régimen relativamente natural y poco influenciado por el ser humano y la segunda simulación intenta reproducir el comportamiento del flujo subterráneo para un entorno influenciado por la actividad humana y acorde con la realidad actual. Por otra parte se plantean una serie de escenarios futuros con la intención de predecir la respuesta del medio a distintos condicionantes.

Los elementos y procesos modelados han sido principalmente la recarga por precipitación, las transferencias laterales con masas de agua contiguas, la conexión con cauces superficiales, diferentes humedales como la Albufera o sus manantiales y presiones generadas por el ser humano como pueden ser las extracciones de agua subterránea mediante pozos y acequias y la recarga por el retorno de riego agrícola.

Este tipo de modelos pueden ser muy útiles en zonas áridas o semiáridas donde hay poca precipitación de lluvia pero si se dispone de acuíferos productivos con gran almacenamiento de agua subterránea. Por una parte pueden servir de apoyo en la toma de decisiones del reparto del agua y por otra, se pueden utilizar para estimar el límite máximo de agua extraíble sin dañar los ecosistemas que se encuentran bajo el radio de afección de la zona de estudio. Este modelo, en concreto, se realiza con la intención de crear un primer modelo de agua subterránea conjunto de la Plana de Valencia Norte y la Plana de Valencia Sur.

Para la realización de este trabajo se han tenido en cuenta modelos y estudios existentes tanto de la Plana de Valencia Norte y Sur como de la Albufera. El diseño y la construcción del modelo numérico se ha realizado utilizando el código MODFLOW (McDonald, M. y Harbaugh, A., 1984) y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, R. B., 2009).

En valenciano

En la zona costanera de la demarcació hidrogràfica de la conca del Xúquer hi ha diferents aqüífers amb un gran volum de recursos hídrics subterranis, per la qual cosa es consideren sistemes de gran interès econòmic i ambiental. Estos aqüífers costaners adquirixen característiques hidrogeològiques semblants i és habitual la presència d'aiguamolls en la superfície. Els dits elements geomorfològics es coneixen comunament com a planes i es distribuïxen de forma contigua i paral·lela a la línia de la costa, sent el mar Mediterrani el seu límit oriental. Este tipus d'ubicació porta a què sobre estes masses d'aigua subterrània s'assentix una important part de la població de la zona, amb tot el que això comporta. L'explotació d'estos recursos subterranis ha contribuït al desenvolupament urbà,

agrícola i industrial d'aquestes zones, però al seu entorn, aquestes activitats han generat una antropització acusada d'estes masses d'aigua i ecosistemes que les rodegen.

L'objectiu d'aquest treball és realitzar un model numèric de flux de les masses d'aigua subterrània de la Plana de València Nord i Sud. Este aquífer té una importància excepcional ja que sobre ell es troben les desembocadures dels rius Túria i Xúquer, la ciutat de València i l'Albufera de València, entre altres elements. Este últim és un aiguamoll RAMSAR amb gran valor ambiental que presenta relació amb les aigües subterrànies de les masses d'aigua Plana de València Nord i Sud. Amb este treball es permet analitzar l'existència de la component subterrània de les aportacions hídriques de la zona.

Este aquífer està dividit en les masses d'aigua subterrània Plana de València Nord i Plana de València Sud. A causa de les seues característiques hidrogeològiques semblants i la seua continuïtat hidràulica es van a considerar de manera conjunta. D'altra banda, la ubicació de l'Albufera entre estes dos masses crea la necessitat de treballar amb la Plana de València en tota la seua extensió, per a intentar comprendre millor el seu funcionament hidrodinàmic.

L'entorn d'estudi d'este treball s'estén per una superfície aproximada de 953 km² i profunditats variables dividides en quatre capes geològiques. El funcionament de les aigües subterrànies en este sistema es caracteritza per l'existència d'un flux d'aigua subterrània en direcció perpendicular a la línia de la costa, açò significa que el flux avança de l'oest cap a l'est i que les isopeces es distribuïxen generalment de manera paral·lela a la línia de la costa. Aquest funcionament hidrodinàmic genera una transferència de recursos hídrics a la Plana de València provinent dels sistemes d'aigua subterrània adjacents.

Per a esta modelació matemàtica s'ha utilitzat el període temporal entre els anys 1940 i 2017. S'han realitzat dos tipus de simulació. La primera pretén representar un règim relativament natural i poc influenciat per l'ésser humà i la segona simulació intenta reproduir el comportament del flux subterrani per a un entorn influenciat per l'activitat humana i d'acord amb la realitat actual. D'altra banda es plantegen una sèrie d'escenaris futurs amb la intenció de predir la resposta del mig a distints condicionants.

Els elements i processos modelatges han sigut principalment la recarrega per precipitació, les transferències laterals amb masses d'aigua contigües, la connexió amb llits superficials, diferents aiguamolls com l'Albufera o els seus brolladors i pressions generades pel ser humà com poden ser les extraccions d'aigua subterrània per mitjà de pous i séquies i la recarrega pel retorn de reg agrícola.

Este tipus de models poden ser molt útils en zones àrides o semiàrides on hi ha poca precipitació de pluja però si es disposa d'aquífers productius amb gran emmagatzemament d'aigua subterrània. D'una banda poden servir de suport en la presa de decisions del repartiment de l'aigua i d'una altra, es poden utilitzar per a estimar el límit màxim d'aigua extraïble sense danyar els ecosistemes que es troben davall el ràdio d'afecció de la zona d'estudi. Este model, en concret, es realitza amb la intenció de crear un primer model d'aigua subterrània conjunt de la Plana de València Nord i la Plana de València Sud.

Per a la realització d'este treball s'han tingut en compte models i estudis existents tant de la Plana de València Nord i Sud com de l'Albufera. El disseny i la construcció del model numèric s'ha realitzat utilitzant el codi MODFLOW (McDonald, M. i Harbaugh, A., 1984) i la interfície gràfica d'usuari ModelMuse (Winston, R. B., 2009).

En inglés

In the coastal area of the hydrographic demarcation of the Júcar river basin, there are different aquifers with a large volume of groundwater resources, and this is why they are considered systems of great economic and environmental importance. These coastal aquifers have similar hydrogeological characteristics and the presence of wetlands on the surface is common. These geomorphological elements are commonly known as flats and are distributed contiguously and parallel to the coastline, with the Mediterranean Sea being its eastern limit. This type of location leads to an important part of the population of the area being settled above these groundwater bodies, with all that this entails. The exploitation of these underground resources has contributed to the urban, agricultural and industrial development of these areas, but in turn, these activities have generated a marked anthropization of these water bodies and ecosystems that surround them.

The objective of this work is to make a groundwater flow numerical model in the the Plana de Valencia North and South groundwater bodies. This aquifer is of exceptional importance since on it are the mouths of the Turia and Júcar rivers, the city of Valencia and the Albufera wetland, among other elements. The latter is a RAMSAR wetland with great environmental value that is related to the groundwater of the Plana de Valencia North and South aquifers. With this work, it is possible to analyze the existence of the underground component of the water contributions to the area.

This aquifer is divided into the groundwater bodies of Plana de Valencia North and Plana de Valencia South. Due to their similar hydrogeological characteristics and their hydraulic continuity they will be considered together. On the other hand, the location of the Albufera between these two groundwater bodies creates the need to work with the Plana de Valencia in all its extension, to try to have a better knowledge of its hydrodynamic functioning.

The study area of this work covers an approximate surface of 953 km² and variable depths divided into four geological layers. The behavior of groundwater in this system is characterized by the existence of a groundwater flow in a direction perpendicular to the coastline, which means the flow progresses from the west to the east and that the isolines are generally distributed in a parallel way to the coastline. This hydrodynamic behavior generates a transfer of water resources to the Plana de Valencia groundwater body from the adjacent groundwater systems.

For this mathematical modelling, the time period between 1940 and 2017 has been used. Two types of simulation have been carried out. The first one tries to represent a relatively natural regime and little influenced by the human being, and the second simulation tries to reproduce the behavior of the underground flow for a situation influenced by human activity, according to the current reality. On the other hand, a series of future scenarios are proposed with the intention of predicting the response of the system to different conditions.

The modelled elements and processes are mainly the recharge by precipitation, lateral transfers with contiguous groundwater bodies, the connection with superficial rivers, different wetlands like the Albufera or its springs and effects generated by the human being such as groundwater extractions through wells and ditches or the recharge by the return of agricultural irrigation.

This type of models can be very useful in arid or semi-arid areas where there is little rainfall but productive aquifers with large underground water storage capacity. On the one hand they can serve as support in the decision making of water distribution and on the other, they can be used to estimate the maximum limit of extractable water without damaging the ecosystems that are under the radius of affection of the study area. This model, in particular, is carried out with the intention of

creating a first combined groundwater model for the Plana de Valencia North and Plana de Valencia South aquifers.

In order to carry out this work, previous models and studies have been taken into account both from the Plana de Valencia North and Plana de Valencia South and also the ones related to the Albufera wetland. The design and construction of the numerical model has been done using the MODFLOW code (McDonald, M. and Harbaugh, A., 1984) and the graphical user interface ModelMuse (Winston, R. B., 2009).

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

Palabras clave valenciano: modelació matemàtica, aigua subterrània, Plana de Valencia, L'Albufera, aqüífers

Palabras clave inglés: mathematical modelling, groundwater, Plana de Valencia, Albufera, aquifers



Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Antecedentes	2
2. Modelo conceptual	4
2.1. Localización del área de estudio	4
2.2. Contexto hidrológico	4
2.3. Contexto hidrogeológico	5
2.3.1. Límites del sistema	6
2.3.2. Unidades hidrogeológicas	6
2.3.3. Dominios hidrogeológicos	8
2.4. Modelo hidrogeológico conceptual	9
3. Selección del código	11
4. Implementación del modelo	12
4.1. Discretización espacial	12
4.1.1. Topografía	13
4.1.2. Estructura geológica	13
4.2. Discretización temporal	15
4.3. Condiciones de contorno	15
4.3.1. Límites laterales	15
4.3.1.1. Reconstrucción de series temporales piezométricas	16
4.3.2. Cauces superficiales	18
4.3.2.1. El lago de la Albufera	20
4.3.3. Drenajes	20
4.3.3.1. Canales de riego o acequias	21
4.3.3.2. Humedales	22
4.3.3.3. Manantiales o “Ullals”	22
4.3.4. Recarga	22
4.3.4.1. Recarga por precipitación	23
4.3.4.2. Recarga por retornos de riego	24
4.4. Bombeos	25
4.4.1. Extracciones de agua para uso de riego	26
4.4.2. Extracciones de agua para uso urbano e industrial	27



4.4.3.	Extracciones de agua de pozos de sequía	27
4.5.	Condición inicial.....	28
4.6.	Parámetros hidrogeológicos.....	29
5.	Proceso de calibración y análisis de los resultados del modelo	31
5.1.	Modelo en régimen no influenciado	31
5.1.1.	Calibración del modelo en régimen no influenciado.....	32
5.1.1.1.	Calibración de las condiciones de contorno.....	32
5.1.1.2.	Calibración de las propiedades físicas de los acuíferos	33
5.1.2.	Resultados del modelo en régimen no influenciado.....	33
5.1.2.1.	Balance de masa del sistema	33
5.1.2.2.	Análisis piezométrico.....	35
5.2.	Modelo en régimen influenciado. 1980/81 – 2016/17.....	37
5.2.1.	Calibración del modelo en régimen influenciado.....	37
5.2.1.1.	Calibración de las condiciones de contorno.....	37
5.2.1.2.	Calibración de las propiedades físicas de los acuíferos	38
5.2.2.	Resultados del modelo en régimen influenciado.....	38
5.2.2.1.	Balance de masa del sistema	38
5.2.2.2.	Análisis piezométrico.....	42
5.2.2.3.	Relación río – acuífero	52
6.	Aplicación del modelo	53
6.1.	Escenario 0: Periodo de sequía sin actuaciones.....	54
6.2.	Escenario 1: Sequía con restricciones de riego.....	58
6.3.	Escenario 2: Sequía con restricciones y pozos de sequía en fase 1	62
6.4.	Escenario 3: Sequía con restricciones y pozos de sequía en fase 2	67
6.5.	Escenario 4: Sequía con restricciones y pozos de sequía en fase 3	72
6.6.	Comparación de resultados de los escenarios.....	77
6.6.1.	Análisis piezométrico.....	77
6.6.2.	Análisis de la afección de la sequía a los volúmenes aportados	85
7.	Conclusiones	87
8.	Recomendaciones.....	89
9.	Referencias bibliográficas	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	4
Figura 2. Evolución de la precipitación y la temperatura para el periodo 1980/81 – 2016/17. Fuente: Elaboración propia con datos del modelo PATRICAL.	5
Figura 3. Delimitación del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia.	5
Figura 4. Corte litoestratigráfico de la Plana de Valencia Sur. Fuente: Modificado de Ballesteros et al., 2012.	7
Figura 5. Mapa de permeabilidades. Fuente: IGME, 2006.	8
Figura 6. Esquema conceptual de las entradas y salidas del sistema. Fuente: Elaboración propia.	10
Figura 7. Mallado de celdas activas de la capa 1. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 8. Elevación de la superficie del terreno. Fuente: Elaboración propia.	14
Figura 9. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.27.010. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 10. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.20.004. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 11. Mapa sinóptico de la relación río acuífero. Fuente: Modificado de IGME, 2009.	19
Figura 12. Ubicación de los canales de riego modelados. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 13. Zonificación de la recarga de lluvia definida en el modelo. Fuente: Elaboración propia con datos del modelo PATRICAL.	23
Figura 14. Zonificación de la recarga por retornos de riego de las unidades de demanda agrícola. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.	24
Figura 15. Evolución anual de los retornos de riego. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.	25
Figura 16. Evolución anual de los bombeos modelados. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 17. Ubicación de los pozos de bombeo. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 18. Evolución anual de los bombeos agrarios. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 19. Evolución anual de los bombeos urbanos e industriales. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 20. Evolución mensual de los pozos de sequía. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 21. Alturas piezométricas de la condición inicial. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.	29

Figura 22. Distribución de las permeabilidades consideradas en el modelo numérico de la Plana de Valencia Sur para los materiales cuaternarios (capa 1 o superior). Fuente: Ballesteros et al., 2012.....	30
Figura 23. Mapa litológico de la zona de estudio. Fuente: IGME, 2006.....	30
Figura 24. a) Mapa piezométrico del modelo en régimen no influenciado. b) Mapa de inundación simulada del modelo en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 25. Comparación de los valores piezométricos observados y simulados del modelo en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 26. Evolución temporal de las componentes del balance del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 27. Evolución temporal del cambio en el almacenamiento del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 28. Ubicación de los piezómetros de calibración. Fuente Elaboración propia con datos de la CHJ.	42
Figura 29. Calibración de las series piezométricas de los piezómetros seleccionados. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 30. Mapas piezométricos del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 31. Calibración de los aportes subterráneos al río Júcar desde el azud de Antella hasta el azud de Sueca. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.	52
Figura 32. Evolución de las componentes del balance para el escenario 0. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 33. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 0. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 34. Evolución del cambio del almacenamiento del modelo para el escenario 0. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 35. Evolución de las componentes del balance para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 36. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 37. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 38. Ubicación de los pozos de sequía de la fase 1. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.	62
Figura 39. Evolución de las componentes del balance para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.	63

Figura 40. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 41. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 42. Ubicación de los pozos de sequía de la fase 2. Fuente Elaboración propia con datos de la CHJ.....	67
Figura 43. Evolución de las componentes del balance para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 44. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 45. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 46. Ubicación de los pozos de la fase 3. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 47. Evolución de las componentes del balance para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 48. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.....	75
Figura 49. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 50. Ubicación de los sectores de seguimiento piezométrico. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 51. Evolución piezométrica de los sectores de seguimiento de sequía para los diferentes escenario modelados. Fuente: Elaboración propia.	83
Figura 52. a) Mapa piezométrico del momento más desfavorable del escenario 4. Septiembre, 2022. b) Mapa piezométrico del último mes simulado. Septiembre, 2027. Fuente: Elaboración propia.....	84
Figura 53. Comparación de los porcentajes de reducción de los volúmenes aportados para las componentes de seguimiento de la sequía. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 54. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para los diferentes escenarios. Fuente: Elaboración propia.	86



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Entradas y salidas del modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: Elaboración propia.....	9
Tabla 2. Balance de masa detallado para el modelo en régimen no influenciado. Periodo 1940/41 – 1979/80. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 3. Indicadores estadísticos de la simulación en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 4. Balance de masa para el modelo en régimen influenciado. Periodo 1980/81 – 2016/17. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 5. Resumen del balance de masa para el modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 6. Indicadores estadísticos de la simulación en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 7. Resumen del balance de masa para el escenario 0. Periodo 1980/81 - 2026/27. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 8. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 0. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 9. Resumen del balance de masa para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 10. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 11. Resumen del balance de masa para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.	63
Tabla 12. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 13. Resumen del balance de masa para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.	68
Tabla 14. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.....	70
Tabla 15. Resumen del balance de masa para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 16. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.....	75
Tabla 17. Afección a los volúmenes aportados al parque de la Albufera. Fuente: Elaboración propia.....	85



Tabla 18. Afección a los volúmenes aportados a las salidas al mar. Fuente: Elaboración propia.....	86
Tabla 19. Afección a los volúmenes aportados al río Júcar. Fuente: Elaboración propia.	86

1. Introducción

La actividad humana ha generado diversos cambios en el funcionamiento de los ecosistemas de nuestro entorno en las últimas décadas. Uno de los elementos más afectados por esta actividad ha sido el agua dulce o continental. Este bien es uno de los factores clave para el desarrollo socioeconómico, y es este desarrollo, junto con una gestión deficiente, el que genera un deterioro tanto cualitativo como cuantitativo del recurso hídrico superficial y subterráneo.

La Comunidad Valenciana es una de las zonas donde mayor uso del agua subterránea se viene haciendo históricamente. Es una comunidad autónoma con importantes núcleos urbanos y extensas superficies de regadío. A todo ello hay que sumarle el hecho de que no cuenta con un gran aporte de agua por precipitación de lluvia ya que forma parte de un clima mediterráneo semiárido.

Por otro lado, es de suma importancia la existencia de diversas formaciones hidrogeológicas capaces de almacenar grandes cantidades de agua subterránea que permiten el aprovechamiento de este recurso para diversas funciones agrarias, urbanas, industriales y medioambientales. Es la explotación intensiva de estos acuíferos una de las principales causas de problemas ambientales como la reducción de caudales circulantes en ríos y manantiales, el descenso de niveles piezométricos y la degradación de la calidad del agua tanto superficial como subterránea.

Es el tema de las aguas subterráneas una preocupación a nivel mundial, ya que de ella depende el desarrollo y la subsistencia de muchas poblaciones alrededor de todo el planeta.

1.1. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es la realización de un modelo matemático de flujo de agua subterránea del acuífero de la Plana de Valencia Norte y Sur. Esta masa de agua subterránea es de gran relevancia debido a que sobre la misma se encuentra la ciudad de Valencia, las desembocaduras de los ríos Júcar y Turia, el Parque Natural de la Albufera de Valencia, importantes superficies agrícolas y una extensa línea de costa cubierta con playas y dunas de arena que dota al acuífero de conexión con el mar.

Primeramente, se recopila toda la información disponible y se elabora un modelo conceptual del funcionamiento del sistema. Con todo ello se diseña y construye el modelo numérico utilizando el código MODFLOW (Mc Donald, M. y Harbaugh, A., 1984) y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, R.B., 2009). El modelo se calibra para conseguir una reproducción del funcionamiento del sistema lo más fiel posible a la realidad. Por último, se plantean diferentes escenarios futuros con una serie de condicionantes y se analiza la respuesta del sistema.

En este caso, debido a la previsión de activación de los pozos de sequía para paliar los efectos de la acusada falta de precipitación, se plantean escenarios futuros de sequía con

restricciones de suministros para riego agrícola y extracciones excepcionales de agua subterránea mediante los pozos de sequía. Después de simular el comportamiento futuro del sistema con diferentes pozos y volúmenes extraídos, se analiza la respuesta del acuífero y la sensibilidad e idoneidad de las medidas propuestas.

Mediante este tipo de modelos se puede analizar la componente subterránea de los aportes hídricos de los diferentes elementos del entorno y puede servir de apoyo a la hora de realizar la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos del acuífero.

Para alcanzar dichos objetivos es necesario un amplio conocimiento de la zona de estudio, propiedades físicas del medio, presiones a las que es sometido el sistema, registros y datos históricos observados, así como el funcionamiento de las formaciones hidrogeológicas y los diferentes elementos con los que interactúan.

Para implementar todos estos aspectos citados se requiere de herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual permite procesar de forma adecuada la cantidad de datos a implementar en el modelo. De esta manera se espera construir una herramienta fiable y útil que sirva de apoyo a la hora de gestionar de forma sostenible el sistema de estudio.

1.2. Antecedentes

Cronológicamente, el primer estudio de la zona que se encuentra es el perteneciente al “Plan nacional de investigación de aguas subterráneas (PIAS). Investigación hidrogeológica de la cuenca media y baja del río Júcar. Informe final (Sistema 55: Javalambre y Maestrazgo. Sistema 54: Alto Turia. Sistema 53: cuenca media del Turia. Sistema 56: Sierra del Espadán y Plana de Castellón. Sistema 51: Plana de Valencia. Sistema 52: el Macizo del Caroch)” (IGME-IRYDA, 1977). El tomo VIII del PIAS trata del acuífero de la Plana de Valencia (Sistema 51). En el apartado de hidrogeología se describe esta masa de agua subterránea que se considera como monocapa. En el modelo hidrogeológico planteado se analiza el periodo desde abril de 1973 hasta mayo de 1974.

El siguiente trabajo es el “Modelo hidrodinámico del Caroch-Plana de Valencia” (IGME, 1982). Este modelo distribuido fue elaborado con el programa de Prickett y Lonquist (Prickett et al., 1971), y se extiende desde el delta del Palancia hasta la desembocadura del río Júcar, considerándose un acuífero bicapa. Los datos utilizados en este modelo son pertenecientes al periodo entre octubre de 1977 y septiembre de 1980.

Más adelante se publica 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). En este estudio, el modelo que se maneja tiene la extensión del acuífero de la Plana de Valencia Sur incluyendo la totalidad del parque de La Albufera. Se plantean diferentes alternativas de gestión y se propone un balance para el periodo de años entre 1980 y 1985.

En el año 1989 la Confederación Hidrográfica del Júcar (en adelante CHJ) publica el estudio “Caracterización estadística de los recursos subterráneos que afluyen al Júcar

aguas abajo de Tous” (CHJ, 1989). Este modelo se ubica en la Plana de Valencia Sur, denominada entonces como unidad hidrogeológica 08.26. En él se plantean posibilidades de trasvase al Vinalopó y diversas reglas de operación del embalse de Tous con las respectivas respuestas del acuífero.

Otro trabajo publicado por la CHJ fue el “Estudio del plan general de adecuación del sistema de explotación de los aprovechamientos tradicionales del Júcar” (CHJ, 1997). Dentro de este estudio se presentó un modelo con la misma superficie que el modelo del IGME de 1986. El periodo escogido en este caso está comprendido entre los años 1969 y 1995 y conlleva algunas modificaciones respecto al modelo del año 1986.

Más recientemente, dentro del “Estudio de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en las cuencas media y baja de los ríos Júcar y Turia” (CHJ, 2002) se presentan dos modelos. El primero es un modelo agregado de los acuíferos del Turia medio, asignando 3 celdas a la unidad de la Plana de Valencia Norte de un total de 7 celdas. La simulación de este modelo ha transcurrido desde octubre de 1970 hasta septiembre de 2001. El segundo es un modelo distribuido de la Plana de Valencia Sur que incorpora la superficie comprendida entre La Albufera y la ciudad de Valencia pertenecientes a la Plana de Valencia Norte. Este modelo se basa en el modelo previo, considera el sistema como un acuífero bicapa y simula el periodo entre los años 1969 y 2000. El modelo utilizado para esta simulación ha sido MODFLOW (Mc Donald, M. y Harbaugh, A., 1984).

Por último, el antecedente más reciente se encuentra dentro del trabajo “Uso sostenible de las masas de agua subterránea en épocas de sequía. Aplicación a la cuenca baja del río Júcar” (Ballesteros et al., 2012). En este estudio encontramos el “Modelo numérico de flujo del acuífero de la Plana de Valencia Sur” y consiste en un modelo construido con el paquete informático VISUAL MODFLOW. El periodo escogido para esta simulación ha sido el comprendido entre el 15 de abril de 2006 y el 30 de septiembre de 2008, periodo de una importante sequía, con el principal objetivo de analizar el funcionamiento hidrodinámico de este sistema bajo condiciones de sequía. Es este modelo el que se ha usado principalmente como apoyo a la hora de construir el modelo del presente trabajo, ya que es el más detallado de todos los anteriores y se asemeja más a los objetivos planteados.

2. Modelo conceptual

Este capítulo trata de describir de forma general el sistema modelizado en este estudio. Se presenta su localización y sus características climáticas, se detallan las características principales del sistema y con todo ello se propone el modelo conceptual utilizado.

2.1. Localización del área de estudio

Como puede verse en la Figura 1, el acuífero de la Plana de Valencia se ubica en el levante de la península ibérica, en la zona central costera de la Demarcación Hidrográfica del Júcar siendo el mar Mediterráneo su límite oriental. Este acuífero costero tiene una superficie total de 953 km², y pertenece en su totalidad a la provincia de Valencia.



Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Contexto hidrológico

El entorno donde se encuentra el sistema de estudio pertenece a un clima mediterráneo semiárido. En la Figura 2 se puede apreciar la distribución anual de la precipitación y la temperatura media obtenidas de los datos utilizados para el modelo PATRICAL (Pérez-Martin, 2005). Este modelo utiliza diferentes estaciones de la zona para obtener dichos valores, que son muy representativos de lo que ocurre dentro de la delimitación del área de estudio. Se observa una tendencia general de aumento de las temperaturas y descenso de la precipitación acorde con la tendencia generada por el cambio climático en la mayor parte del planeta.

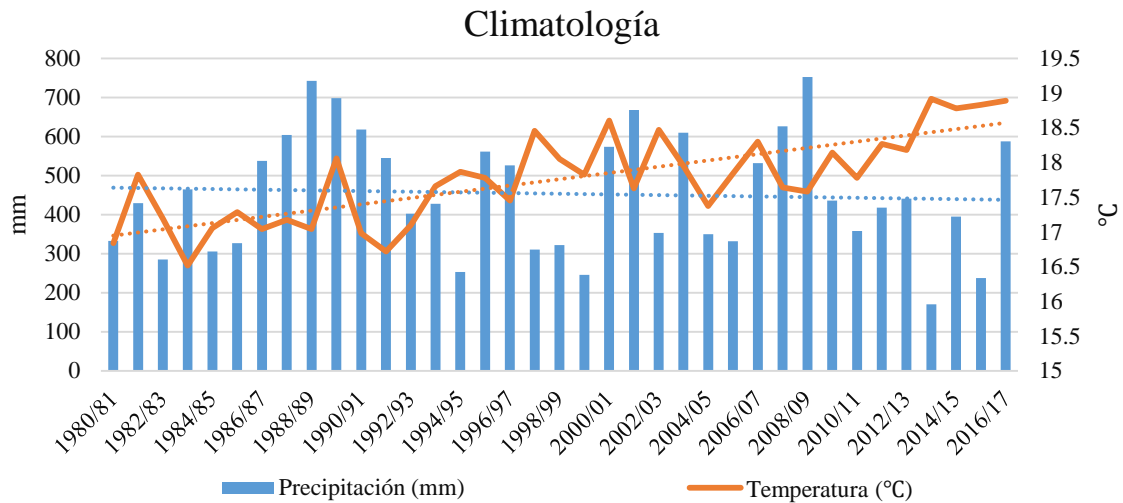


Figura 2. Evolución de la precipitación y la temperatura para el periodo 1980/81 – 2016/17. Fuente: Elaboración propia con datos del modelo PATRICAL.

2.3. Contexto hidrogeológico

El acuífero de la Plana de Valencia queda delimitado por varias masas de agua subterránea y por el Mar Mediterráneo como se observa en la Figura 3.

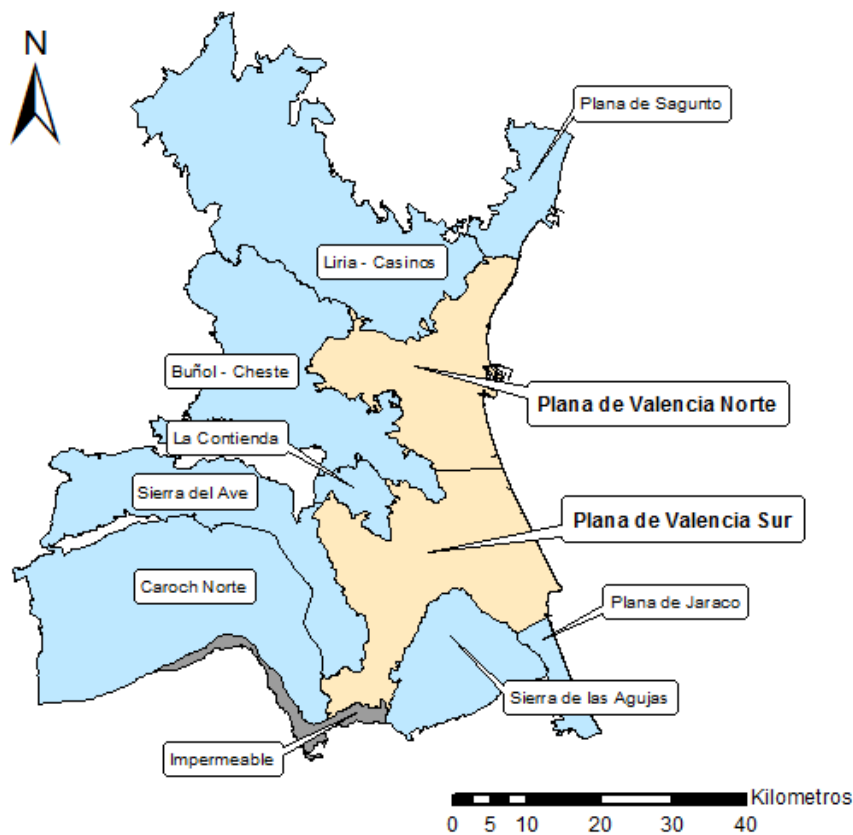


Figura 3. Delimitación del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1. Límites del sistema

Para definir los límites del sistema es necesario conocer los límites hidrogeológicos naturales e intentar hacerlos coincidir con los límites del modelo. En este trabajo se han utilizado los límites definidos en el trabajo “Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterránea” (CHJ, 2009). En dicho documento las masas de agua subterráneas delimitantes son las que se aprecian en la Figura 3. Para enumerarlas se seguirá un orden circular bordeando el acuífero de la Plana de Valencia en sentido contrario a las agujas del reloj. Al norte se encuentra el acuífero costero de la Plana de Sagunto. Al noroeste se ubica la masa de agua subterránea de Liria-Casinos. Ocupando una gran extensión del límite oeste se ubica el sistema de Buñol-Cheste, siendo uno de las más importantes cuantitativamente en cuanto a transferencias laterales. Conectando con Buñol-Cheste por el sur se encuentra la masa de agua subterránea de La Contienda. Al suroeste está el límite con el acuífero de Sierra del Ave. Contiguo a éste, en la parte sur, se observa el contacto con la masa de agua subterránea de Caroch Norte seguido del único tramo impermeable que da comienzo al extenso límite con la masa de agua subterránea de Sierra de las Agujas. El último borde de transferencia lateral es el acuífero costero de la Plana de Jaraco, con una corta extensión que da lugar al límite más extenso que forma la línea costera del mar Mediterráneo ocupando toda la parte este.

Es fundamental mencionar que en este modelo los límites laterales, y las transferencias de borde que generan, son una parte muy importante en el funcionamiento y propuesta del modelo conceptual ya que, exceptuando un reducido tramo impermeable, se han considerado las conexiones laterales con las masas de agua contiguas como permeables, con posibilidad de entrada y salida de agua.

Se han introducido series piezométricas reconstruidas o completadas estadísticamente (ver capítulo 4.3.1.1) para simular de manera más certera las entradas y salidas mediante los límites permeables del sistema, además de establecer la conductividad apropiada que cuantifica el volumen de la transferencia de agua con cada masa.

2.3.2. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas representan formaciones de similares propiedades hidrogeológicas. Es una simplificación que agrupa formaciones acuíferas parecidas para facilitar la simulación de sistemas hidrogeológicos. Para determinar estas unidades se emplean mapas geológicos, geofísica, informes de sondeos, columnas litológicas, estudios hidrogeológicos previos, etc.

La Plana de Valencia se encuentra en una zona de confluencia de las estribaciones de las Cordilleras Ibérica y Bética y se divide en dos subcuencas, Plana de Valencia Norte y Plana de Valencia Sur. Por lo general el flujo del agua subterránea se mueve con dirección oeste a este formando isopiezas paralelas a la línea de costa.

Se considera como un sistema multicapa formado por materiales permeables, como gravas, arenas, areniscas y calizas, y materiales impermeables como son las margas y las arcillas. Según el Instituto Geológico y Minero de España, las edades de los materiales encontrados varían desde el Triásico al Cuaternario. “*El Mesozoico deja una serie de sedimentos marinos y continentales. El Triásico contiene una facies continental de margas, arcillas y areniscas del Buntsandstein, calizas y dolomías gris oscuro del Muschelkalk y la facies evaporítica del Keuper formadas por yesos, margas y arcillas. En el Jurásico se desarrollan depósitos carbonatados de calizas y dolomías. En el Cretácico se depositan la facies germánica continental del Weald de areniscas y arcillas y sedimentos epicontinentales que en el cretácico superior se convierten en régimen marino franco arrecifal*” (IGME, 2009a).

En el presente trabajo, basándose en la definición del esquema tectosedimentario del modelo numérico de flujo del acuífero de la Plana de Valencia Sur (Ballesteros et al., 2012), se han distinguido cuatro unidades con diverso interés hidrogeológico que tienen como base impermeable facies del Keuper, como se aprecia en la Figura 4. La unidad más superficial o primera unidad hidrogeológica es de la que más información se dispone y está formada por materiales detríticos pliocuaternarios de elevada permeabilidad. Las unidades segunda y tercera, están formadas por materiales terciarios, siendo la más profunda de margas miocenas poco permeables y la superior formada por calizas, areniscas y conglomerados pliocenos de permeabilidad media. Por último, se encuentra la unidad hidrogeológica constituida por materiales mesozoicos de formaciones carbonáticas permeables. Las potencias y espesores de estas unidades hidrogeológicas son muy variables, especialmente en la Plana de Valencia Sur, debido al mayor conocimiento de detalle de la geología en esta zona.

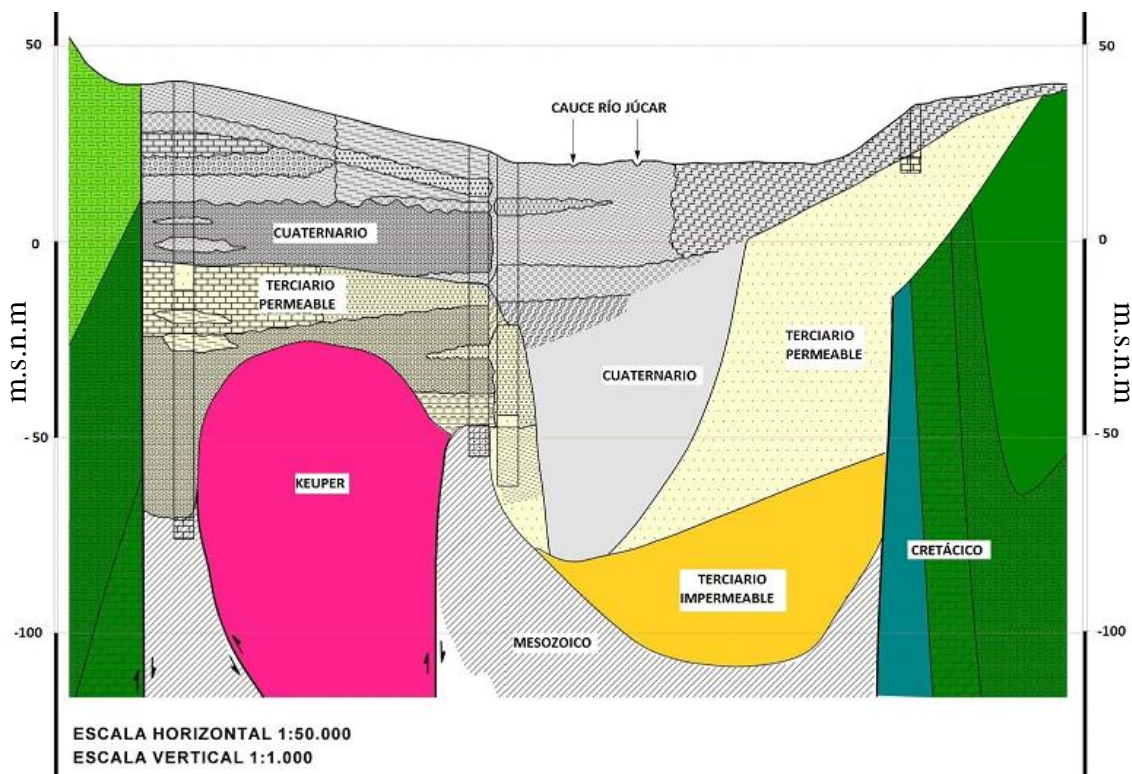


Figura 4. Corte litoestratigráfico de la Plana de Valencia Sur. Fuente: Modificado de Ballesteros et al., 2012.

2.3.3. Dominios hidrogeológicos

Los dominios hidrogeológicos son áreas regionales con características geológicas y comportamiento hidrogeológico comunes. Como se puede ver en la Figura 5, se ha dividido el modelo en cinco diferentes dominios hidrogeológicos, dependiendo de su permeabilidad, desde muy baja hasta muy alta, según el mapa de permeabilidades 1:200.000 (IGME, 2006):

- **Dominio de permeabilidad muy baja:** está constituido por arcillas abigarradas y yesos, pudiendo contener margas y areniscas.
- **Dominio de permeabilidad baja:** se trata de depósitos de estuario, marismas, sedimentos litorales, áreas endorreicas, lacustres y turberas. Contienen limos, arcillas, materia orgánica, sales, yesos, margas, calizas y conglomerados.
- **Dominio de permeabilidad media:** se trata de formaciones compuestas por calizas, dolomías, margas, conglomerados y calizas travertínicas.
- **Dominio de permeabilidad alta:** se forman de materiales provenientes de depósitos de glaciares, piedemonte, terrazas medias y altas, cordones litorales y playas. Por lo general contienen arenas y gravas, con intercalaciones de limos, arcillas, calizas, dolomías y margas.
- **Dominio de permeabilidad muy alta:** estas formaciones se constituyen de depósitos aluviales, de fondos de valle y terrazas bajas de los ríos. Se trata de gravas, arenas, limos y travertinos en su mayoría.

La conexión entre dichos dominios es variable en todo el acuífero y las propiedades hidrogeológicas se han modificado para cada capa. En algunos casos se han dividido estos dominios con el objetivo de mejorar el funcionamiento y la calibración del modelo.

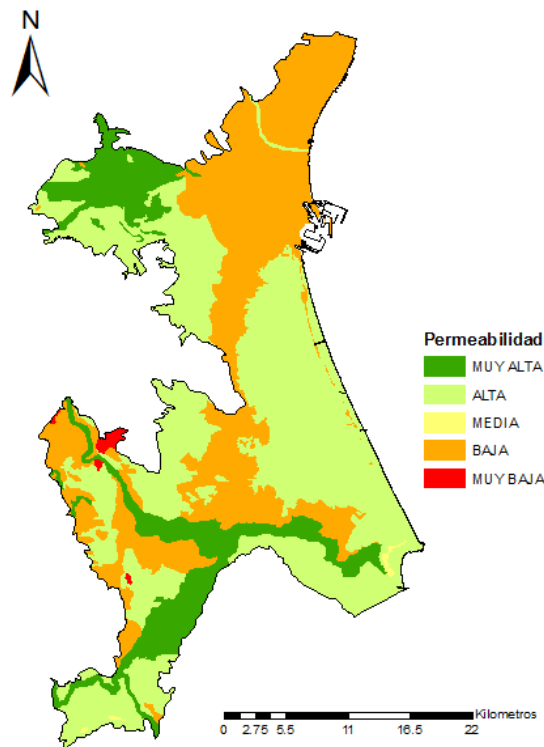


Figura 5. Mapa de permeabilidades. Fuente: IGME, 2006.

2.4. Modelo hidrogeológico conceptual

Una vez se han estudiado los principales componentes del modelo, se debe definir un modelo hidrogeológico conceptual. Este paso es esencial ya que permite conocer el funcionamiento del sistema de forma generalizada y sirve de base a la hora de construir el modelo matemático.

El funcionamiento del acuífero es establecido por las entradas y salidas de agua en el sistema. Las entradas aportan agua al acuífero y son denominadas como fuentes y las salidas suponen una detracción de agua para el sistema y se conocen como sumideros. En la Tabla 1 se aprecian las principales entradas y salidas del sistema incluidas en el modelo hidrogeológico conceptual planteado. Estas interacciones de la masa de agua subterránea deberán asemejarse lo máximo posible con los resultados obtenidos por el modelo matemático pudiendo haber diferencias justificadas con este.

Tabla 1. Entradas y salidas del modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: Elaboración propia.

ENTRADAS AL SISTEMA	SALIDAS DEL SISTEMA
Recarga por infiltración de lluvia	Extracciones por bombeo
Recarga por retornos de riego	Descarga a manantiales y acequias
Pérdidas de los ríos	Aportes subterráneos a los ríos
Transferencias laterales desde masas de agua subterráneas adyacentes	Transferencias laterales a masas de agua subterráneas adyacentes y al mar
Pérdidas del lago de La Albufera	Descargas al lago de La Albufera

La fuente natural de recarga del acuífero es la precipitación de lluvia en forma de infiltración subterránea. No obstante, en régimen influenciado la principal fuente de recarga del acuífero es la infiltración de los retornos de riego, triplicando en volumen la recarga por lluvia.

Por lo general la dirección del flujo de agua subterránea en esta zona se mueve del oeste hacia el este, esto es, desde el interior hacia el mar. Este funcionamiento genera un aporte de las masas de agua subterráneas adyacentes a la Plana de Valencia por diferencia de cotas piezométricas y un volumen de agua de salida al mar. Este comportamiento general se puede ver alterado en zonas concretas pudiéndose invertir dichas relaciones.

Otro aspecto a considerar es la afección de los ríos, ya que su comportamiento puede ser ganador generando salidas del acuífero o puede ser perdedor y recargar el acuífero a través de su lecho. El río principal es el Júcar y según las alturas piezométricas observadas y la bibliografía consultada, su comportamiento en la mayoría de su longitud es ganador. Por otro lado, el río Magro se considera perdedor en toda su extensión a través de la zona estudiada.

En cuanto a las principales salidas de agua del sistema, se generan mediante las descargas de agua subterránea a los manantiales y canales de riego del entorno del parque de La Albufera. Por otro lado, las extracciones por bombeo de agua subterránea suponen un importante volumen de salida del sistema.

Uno de los aspectos más relevantes y con mayor incertidumbre es el conocimiento del funcionamiento hídrico del parque y del propio lago de la Albufera. Como se ha descrito anteriormente, los manantiales o “Ullals” y los canales de riego drenan agua subterránea del acuífero en el área del parque. Además, existe un complejo sistema de bombeos entre los campos de cultivo del arroz que, mediante unas boyas que detectan el nivel del agua, se activan con el objetivo de mantener los niveles de agua acorde con las necesidades agrícolas. Al analizar las series de datos de niveles piezométricos en el entorno más cercano al lago y el nivel de agua en el propio lago, se observa que los niveles piezométricos son claramente inferiores a los niveles de la lámina de agua del lago. Todo esto parece indicar que el lago de la Albufera no recibe aportes subterráneos por su propio lecho, sino que el agua subterránea drenada por manantiales y acequias llega al lago por estos canales de manera superficial. Las diferencias piezométricas encontradas llevan a pensar que, dependiendo del grado de impermeabilidad del lecho del lago de la Albufera, éste podría llegar a tener pérdidas mediante el propio vaso y aportar agua al acuífero. Esta idea sobre el funcionamiento hídrico del sistema de la Albufera tiene gran importancia por diversos motivos, por lo que se le debe dar un trato cuidadoso debido a la incertidumbre de los resultados de este análisis.

La Figura 6 intenta servir de ayuda para entender mejor lo descrito en este apartado. En color verde observamos los elementos que generan entradas al sistema y en color rojo aquellos elementos que generan salidas del sistema. Es importante mencionar que este funcionamiento teórico va a ser comprobado y analizado con más detenimiento, más adelante en este documento, cuando se presenten los resultados de piezometría y los balances de masa.

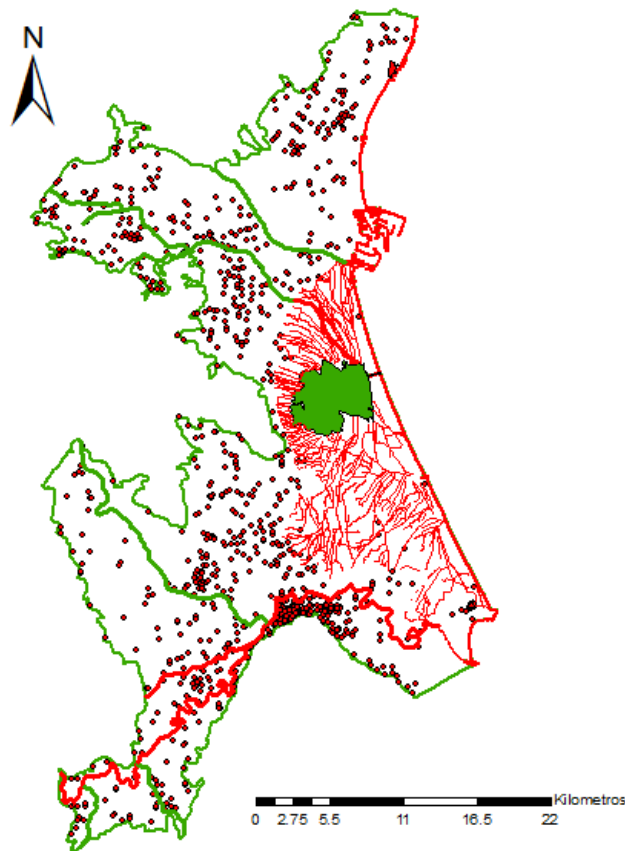


Figura 6. Esquema conceptual de las entradas y salidas del sistema. Fuente: Elaboración propia.

3. Selección del código

Este apartado describe lo relacionado con el código utilizado para la elaboración y diseño del modelo matemático. Una vez propuesto el modelo conceptual se debe proceder a la implementación del mismo para que sea posible realizar la modelación. Para ello, se definirán diferentes condiciones como el diseño de la malla, la discretización temporal de la simulación, las condiciones de contorno e iniciales, la definición de unos valores iniciales de los parámetros del modelo y las interacciones con el exterior.

Para la realización de este modelo de agua subterránea se ha elegido el código MODFLOW (McDonald, M. y Harbaugh, A., 1984), y la interfaz gráfica de usuario utilizada ha sido ModelMuse (Winston, R.B., 2009). Ambos programas son de libre distribución, escritos y desarrollados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

El movimiento tridimensional del agua subterránea en un medio poroso saturado, anisótropo y heterogéneo en régimen transitorio se describe de manera matemática mediante la ecuación del flujo, que se puede escribir:

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

donde x , y , z son las coordenadas cartesianas referidas a un sistema de ejes donde se referencian las componentes de la conductividad hidráulica K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} en unidades de longitud por unidad de tiempo (L/T), h es la altura piezométrica (L), S_s es el coeficiente de almacenamiento o porosidad eficaz (1/L), W es el flujo de agua por unidad de volumen, el cual representa las entradas y salidas de agua en cada celda y se utiliza para introducir los sumideros y las fuentes de agua (1/T) y t es el tiempo (T). MODFLOW resuelve la ecuación del flujo mediante el método numérico de diferencias finitas.

El encargado de modelar discretiza el volumen del entorno de estudio en N celdas, establece unas propiedades en cada una de ellas dependiendo de la naturaleza de la zona que representa y fija unas condiciones de contorno. De esta manera MODFLOW puede resolver la ecuación diferencial para cada celda y conseguir resultados de valores de altura piezométrica o caudal mediante el álgebra matricial y soluciones iterativas. Esto se traduce en la obtención de la altura piezométrica en función del espacio y del tiempo, es decir, $h = h(x, y, z, t)$ y los balances de flujo para cada celda.

En MODFLOW las celdas pueden ser discretizadas verticalmente en capas que pueden ser tratadas como libres, confinadas o una combinación de éstas. Permite simular acciones del exterior como pozos de bombeo, recarga, drenajes, ríos, etc. También es posible crear balances hídricos de subzonas dentro del espacio total del entorno de estudio gracias al programa ZONEBUDGET.

4. Implementación del modelo

Este apartado trata sobre la descripción de los métodos utilizados para llevar a la práctica el modelo conceptual previamente definido. Para ello se explica el funcionamiento de los diferentes paquetes y módulos que nos ofrece MODFLOW para implementar el modelo de la manera más fiel posible al modelo conceptual planteado.

4.1. Discretización espacial

Una vez analizadas las dimensiones espaciales horizontales del entorno de estudio se ha optado por utilizar celdas cuadradas de 1 km x 1 km, obteniendo así un total de 2240 celdas por cada capa, ubicadas a lo largo de 35 columnas y 64 filas. Se considera una resolución de suficiente precisión para los objetivos de este modelo, la cual genera unos tiempos de ejecución asumibles.

El dominio del modelo numérico se establece con la definición de las coordenadas UTM (HUSO 30S) del vértice noroeste del modelo:

$$X = 705353.236 \text{ m}$$

$$Y = 4386682.1309375 \text{ m}$$

En la Figura 7 observamos el mallado horizontal que hemos descrito recientemente. Se distinguen las celdas activas (color azul) de las inactivas (color gris).

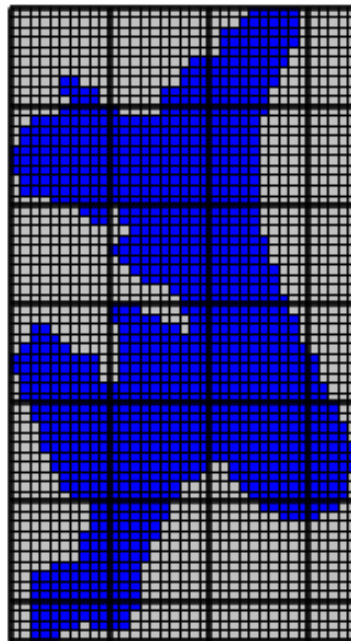


Figura 7. Mallado de celdas activas de la capa 1. Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. Topografía

Los datos de la elevación topográfica del terreno se han introducido de dos formas distintas.

En la parte norte se ha utilizado un modelo digital del terreno (MDT) de 25 metros de precisión. De esta forma en cada celda de 1000 m x 1000 m se encuentran unos 1600 valores de cota y se ha optado por utilizar el valor medio de estos para fijar la altura, sobre el nivel del mar, del terreno en cada celda.

Por otro lado, en la parte sur del modelo los datos de cota de la superficie se han obtenido del modelo numérico de flujo subterráneo realizado por el IGME en el acuífero de la Plana de Valencia Sur (Ballesteros et al., 2012). En este caso se disponen de datos de cota con una precisión de 359 metros, y al igual que en el caso anterior se ha introducido el valor medio de los valores que geográficamente se ubican dentro de cada celda de destino.

4.1.2. Estructura geológica

Verticalmente, el modelo que representa el acuífero de la Plana de Valencia se divide en 4 capas apoyadas sobre un lecho impermeable constituido de facies del Keuper, que son las siguientes:

- Capa 1: Materiales cuaternarios permeables
- Capa 2: Materiales terciarios permeables
- Capa 3: Materiales terciarios de baja permeabilidad
- Capa 4: Materiales mesozoicos permeables

Para introducir correctamente la ubicación y espesor de las capas mencionadas ha sido necesario la definición de las siguientes superficies:

- Topografía del terreno
- Base del cuaternario permeable
- Base del terciario permeable
- Techo del mesozoico
- Base del mesozoico o muro del acuífero

Debido a la falta de continuidad del terciario de baja permeabilidad, la superficie utilizada para la definición de la base de la capa 3 ha sido el techo del mesozoico. Por otro lado, la base del acuífero está constituida por facies del Keuper o materiales mesozoicos de baja permeabilidad (Ballesteros et al., 2012).

Para la Plana de Valencia Sur la información y datos de las superficies han sido extraídos del modelo anterior de la Plana de Valencia Sur realizado por el IGME en el año 2012 (Ballesteros et al., 2012). Para la Plana de Valencia Norte, en cambio, se ha utilizado el mismo número y tipo de capas, pero los datos de las superficies de las cuatro capas se han deducido a partir del análisis de la información existente en la

materia, como son los sondeos realizados en la construcción de los pozos de sequía en el año 1995 por la empresa TEYGE, S.A. y columnas litológicas de diferentes piezómetros de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 1996). A partir de estos datos se ha realizado una interpolación, mediante el método del krigeado, de las cotas de las bases y los techos de las diferentes capas siguiendo la división utilizada en el modelo anterior de la parte sur.

Con todo ello se ha obtenido un modelo conjunto de cuatro capas definidas para toda la superficie del modelo con espesores variables. En la Figura 8 se observa el techo de la primera capa correspondiente con la superficie del terreno y las celdas activas en color azul.

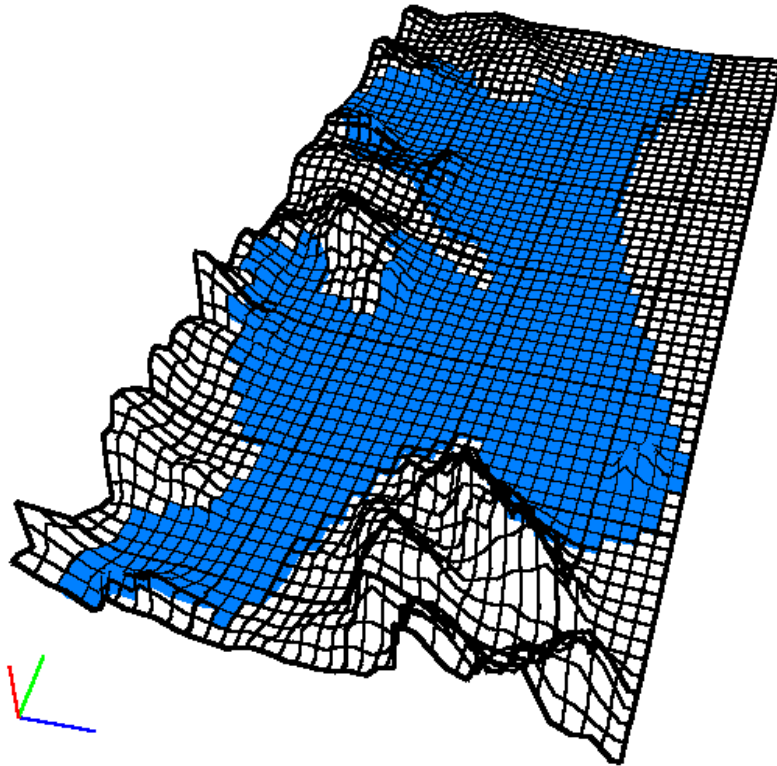


Figura 8. Elevación de la superficie del terreno. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Discretización temporal

En cuanto a la discretización temporal, la unidad del paso de tiempo escogido ha sido el mes y el periodo de estudio ha sido desde octubre de 1940 hasta septiembre de 2017, que a su vez, se ha dividido en dos.

El primer periodo, el cual discurre desde el año hidrológico 1940/1941 hasta 1979/1980, es una representación del régimen no influenciado, ya que no se dispone de datos más antiguos. Para los datos de entrada de esta simulación se han introducido los valores medios de dicho periodo, asumiendo que el medio está menos antropizado y que tiene un comportamiento más natural.

El periodo entre los años hidrológicos 1980/1981 y 2016/2017 ha sido utilizado para simular el régimen influenciado. Para los datos de entrada se han introducido series de datos mensuales con 444 valores cada una de ellas. Esta simulación trata de reproducir el periodo influenciado por el ser humano.

4.3. Condiciones de contorno

Las interacciones del entorno de estudio con el medio exterior que lo rodea se definen mediante las condiciones de contorno. En este caso las interacciones modeladas son límites laterales, las extracciones de agua subterránea mediante bombes, los cauces superficiales, los drenajes, la recarga por precipitación y la causada por los retornos de riego. Distinguimos tres tipos de condiciones de contorno para este tipo de modelos de flujo:

- Condición de Dirichlet o de primer tipo, establece una altura piezométrica prescrita.
- Condición de Neumann o de segundo tipo, prescribe el flujo de entrada o de salida.
- Condición de Cauchy o de tercer tipo, también conocida como mixta ya que la altura piezométrica influye directamente en el flujo.

Cualquiera de las relaciones del modelo con el exterior ha sido modelada con alguna de las anteriores condiciones de contorno, las cuales van a ser explicadas con más detalle a continuación.

4.3.1. Límites laterales

Respecto a las transferencias laterales con masas de agua colindantes no existe un procedimiento exacto para cuantificar dichas transferencias. Por otro lado, al tratarse de un acuífero costero la inercia general del flujo subterráneo indica que la mayor parte de estas relaciones significan una entrada de agua mediante estos contornos y salidas al

mar. No obstante, estas condiciones no han sido impuestas, sino que se ha fijado una altura piezométrica en el borde y dependiendo de las alturas simuladas en el propio acuífero la relación de borde será de entrada o de salida de agua.

Para definir esta condición de borde en MODFLOW se ha utilizado el paquete “*General-Head Boundary (GHB)*”. Mediante este paquete, el flujo de borde que se simula depende directamente de la altura piezométrica introducida y será proporcional a la diferencia de alturas piezométricas con el interior de la masa simulada.

El otro factor determinante en esta interacción es la conductancia que se le asigna a los materiales que forman esta conexión lateral. Este parámetro cuantificará el volumen de entrada o de salida de la masa de agua. La conductancia, en MODFLOW, se introduce en unidades de longitud al cuadrado por unidad de tiempo (L^2/T), que en nuestro caso es de $m^2/día$, utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{K*W*L}{M} \quad [2]$$

donde K es la conductividad hidráulica de los materiales del contorno, W se refiere al ancho del límite, L es la longitud del contorno y M indica el espesor o profundidad de estos materiales. La interfaz de ModelMuse facilita la introducción de estos datos mediante la posibilidad de automatizar el cálculo de los elementos de la ecuación [2] para cada celda, asemejándose, en la medida de lo posible, a la variabilidad espacial que existe en la realidad.

Las masas de agua subterránea que limitan con el acuífero de la Plana de Valencia Norte y Sur son la Plana de Sagunto, Liria-Casinos, Buñol-Cheste, La Contienda, Sierra del Ave, Caroch Norte, Sierra de las Agujas y la Plana de Jaraco. Por otro lado, también se consideran límites laterales las transferencias de agua con el mar.

4.3.1.1. Reconstrucción de series temporales piezométricas

Para introducir las alturas piezométricas en los límites laterales se ha descartado la opción de dejar un valor fijo para cada paso de tiempo ya que esto haría perder mucha información sobre la variabilidad temporal en los resultados y se estaría perdiendo valiosa información de la que se dispone para simular de manera más certera.

Por ello, se ha escogido la opción de introducir series piezométricas de puntos que se encuentran localizados en las cercanías de los bordes modelados. El problema es que las series piezométricas disponibles no están completas. Es por ello por lo que se ha optado por realizar una reconstrucción de las mismas y obtener series completas para nuestro periodo de simulación.

Para generar estas series temporales se ha optado por seguir el método utilizado por la Confederación Hidrográfica del Júcar en la realización del borrador para consulta

pública del Plan especial de Sequía (CHJ, 2017). Se han seguido dos metodologías en función del tipo serie medida en cada piezómetro.

La metodología llamada “Patrón” se ha utilizado en los casos donde sí se dispone de datos desde el inicio de la serie, pero existen huecos que necesariamente se deben rellenar mediante datos estadísticos para obtener una serie completa. La Figura 9 muestra el ejemplo de la reconstrucción del piezómetro 08.27.010 ubicado en el municipio de Picassent, en el límite de la masa de agua subterránea Buñol-Cheste.

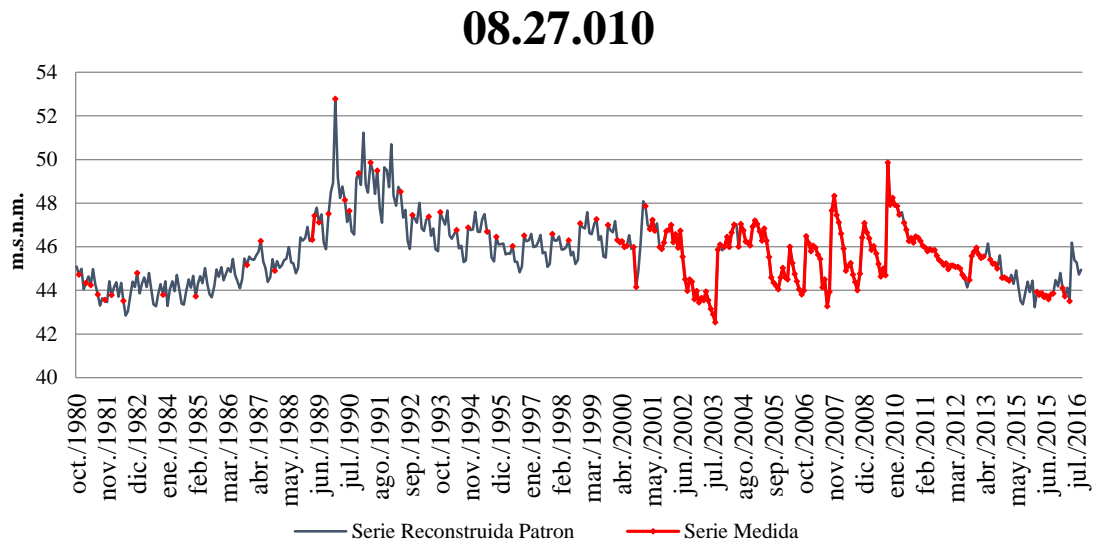


Figura 9. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.27.010. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se ha utilizado la metodología llamada “Correlación SPI12” la cual se usa en casos donde un tramo importante de la serie medida carece de valores. Ésto sucede normalmente en piezómetros que se han puesto en funcionamiento recientemente y por ello, tienen toda la parte inicial del periodo de estudio sin datos o en casos dónde los huecos de las series medidas alcanzan periodos importantes de varios años.

Este método se basa en la comparación de los datos piezométricos existentes con los datos de precipitación acumulada de la zona donde se ubica dicho piezómetro. De esta manera se intenta reproducir la respuesta del piezómetro a la lluvia en los casos en los que exista una correlación significativa que lo indique (CHJ, 2017).

Se ha utilizado el índice de precipitación estandarizada, conocido como SPI por sus siglas en inglés (Standardized Precipitation Index) y el periodo de acumulación para el cálculo de este índice ha sido de 12 meses.

En la Figura 10 observamos el piezómetro 08.20.004 que sirve como ejemplo a la metodología recientemente explicada. Este piezómetro se encuentra en el municipio de Museros, sobre el límite de la masa de agua subterránea Liria-Casinos.

08.20.004

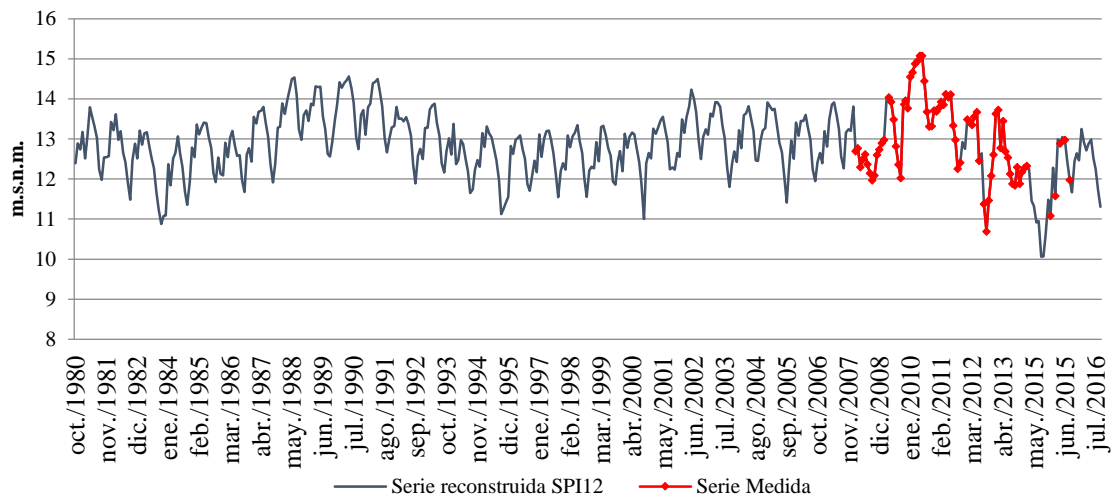


Figura 10. Serie piezométrica reconstruida del piezómetro 08.20.004. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Cauces superficiales

Existen varios cauces que atraviesan la masa de agua subterránea de estudio. Algunos de ellos funcionan como ríos permanentes y otros funcionan como ramblas o barrancos que no siempre tienen caudal y, además, éste puede aparecer en puntos concretos del cauce sin una clara continuidad espacial y temporal. Todos ellos tienen una estrecha relación con el acuífero y uno de los objetivos de este modelo es clarificar que tipo de relación es e intentar cuantificarla. Los cauces superficiales modelados han sido el río Turia y la Rambla del Poyo para la Plana de Valencia Norte y los ríos Magro, Verde, Júcar, Sellent y Albaida para la Plana de Valencia Sur. De todos ellos, el río Júcar es el más extenso y el que mayor influencia tiene.

Con el objetivo de realizar un modelo conceptual del funcionamiento de las conexiones río-acuífero se han analizado diferentes fuentes de información como los estudios realizados por el IGME en el año 2009 sobre “Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica” (IGME-DGA, 2009b). De estos estudios obtenemos una visión general de la relación río-acuífero como podemos observar en la Figura 11.

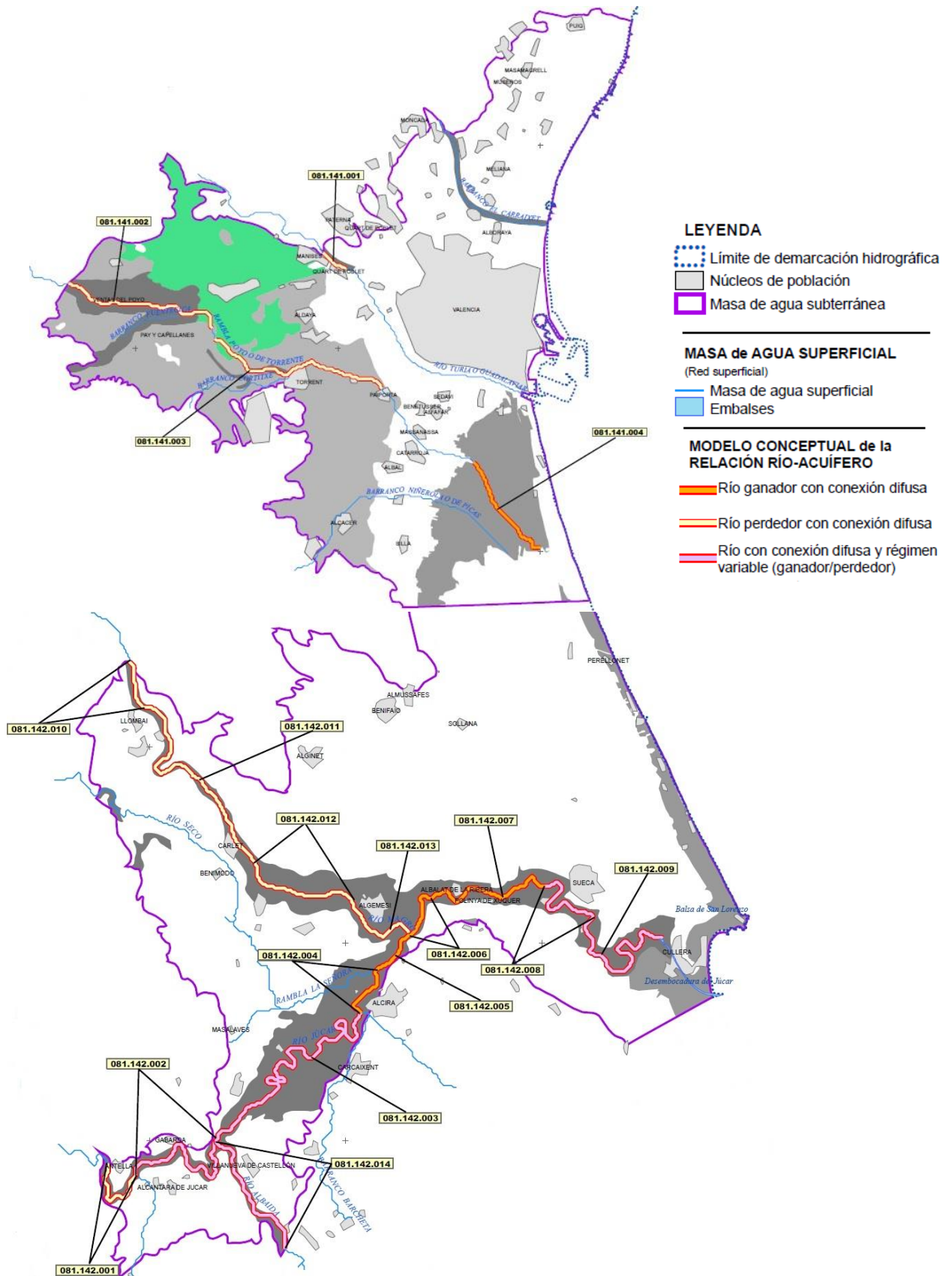


Figura 11. Mapa sinóptico de la relación río-acuífero. Fuente: Modificado de IGME, 2009.

Para introducir este tipo de elementos al modelo matemático se ha optado por utilizar el paquete “*River (RIV)*” de MODFLOW. La ubicación de los cauces ha sido importada desde un archivo de SIG (Sistema de Información Geográfica) y las cotas del cauce se han introducido mediante la interpolación de cotas en puntos concretos obtenidas de mapas digitales del terreno de alta precisión.

La información requerida por este paquete es la cota de la lámina de agua, la cota del lecho y la conductancia de los materiales del lecho. Este último parámetro se utiliza de la misma manera que con el paquete GHB descrito en el apartado 4.3.1 sobre los límites laterales y emplea la misma fórmula (ver ecuación [2]).

El tipo de relación del río con el acuífero lo marcará la diferencia de la cota de la lámina de agua introducida con el nivel piezométrico simulado. Cuando la altura de agua simulada sea menor que la altura de la lámina de agua introducida al río, éste tendrá un comportamiento perdedor aportando agua al acuífero. En cambio, si la altura simulada supera a la cota de la lámina de agua introducida, el río actuará como ganador y parte del agua subterránea pasará a ser superficial del río. Lo que cuantifica los volúmenes transferidos y su velocidad de transferencia es la conductancia asignada a los materiales del lecho en cada celda.

4.3.2.1. El lago de la Albufera

La Albufera de Valencia se ha modelado mediante el paquete “*River (RIV)*”, al igual que los ríos. De esta manera los flujos subterráneos de conexión con la Albufera pueden ser de entrada o de salida de agua, dependiendo de los niveles piezométricos de su entorno (ver capítulo 2.4. *Modelo hidrogeológico conceptual*). El nivel de agua del lago se ha introducido de forma variable con datos observados y valores medios mensuales para aquellos periodos sin medición.

4.3.3. Drenajes

Se ha asignado esta condición de borde mediante el paquete de MODFLOW llamado “*Drain (DRN)*”. Este módulo considera únicamente flujos de salida del acuífero, por ello ha sido utilizado para modelar diferentes surgencias de agua como humedales, manantiales y canales de riego.

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 [2].

4.3.3.1. Canales de riego o acequias

Las acequias o canales de riego modelados se limitan a los ubicados en los arrozales del parque de la Albufera. Estos canales o zanjas, de pocos metros de profundidad, interceptan el nivel freático extrayendo agua del acuífero y transportándola a diferentes puntos de interés agrícola.

Para cuantificar el agua subterránea obtenida en el parque se han dividido los canales en zonas coincidentes con las unidades de demanda agrícola de la zona (Figura 14). Éstas son dichas unidades:

- 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 Figura 12 muestra la ubicación de los principales canales del entorno de los arrozales del parque de la Albufera, modelados como drenajes, respecto del lago.

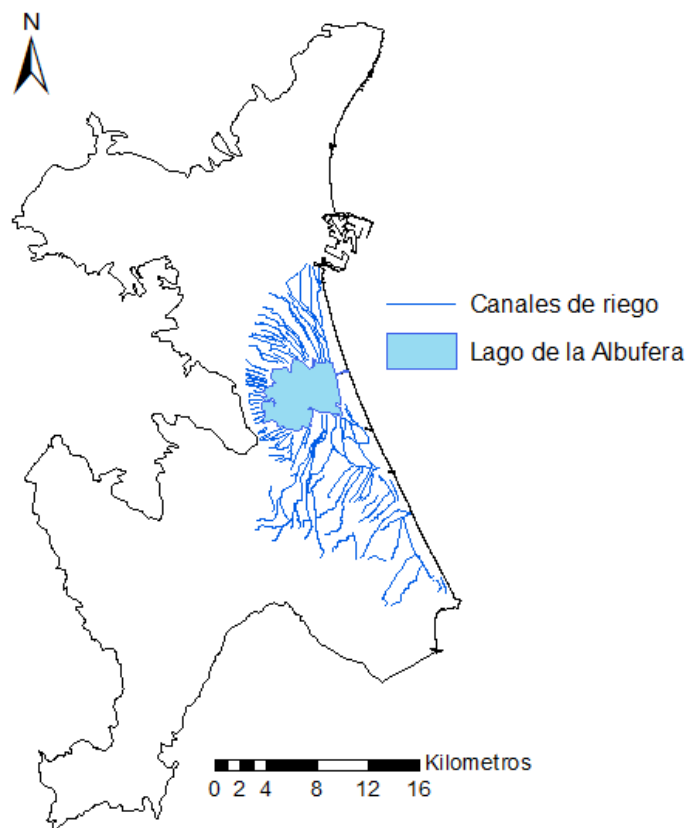


Figura 12. Ubicación de los canales de riego modelados. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.2. *Humedales*

Se han introducido dos humedales con el paquete de drenaje, concretamente, la Marjal de Rafal y Vistabella y la Balsa de San Lorenzo. Ambos son considerados humedales costeros mediterráneos y el modelo conceptual de su funcionamiento hidrogeológico ha sido obtenido del “Estudio de identificación y caracterización de la relación hidrogeológica entre humedales y masas de agua subterránea en la demarcación hidrográfica del Júcar” (IGME, 2009b).

El primero es un humedal costero mediterráneo de tipo marjal que se encuentra en el extremo norte de la masa de agua subterránea de la Plana de Valencia Norte. Su alimentación es mediante flujo vertical por drenaje del acuífero (IGME, 2009b).

La Balsa de San Lorenzo es un humedal costero mediterráneo de tipo laguna litoral y se encuentra sobre la masa de agua subterránea de la Plana de Valencia Sur, y a su vez, dentro de los límites del Parque Natural de la Albufera, en su extremo sur. En este caso también el flujo entre el humedal y el acuífero es vertical (IGME, 2009b).

4.3.3.3. *Manantiales o “Ullals”*

La palabra “Ullal” en valenciano se utiliza comúnmente para referirse a los manantiales o surgencias que existen en el parque de la Albufera. Estos manantiales también han sido modelados como drenajes ya que extraen agua del acuífero y en muchos casos se transporta su agua mediante las acequias de riego.

4.3.4. *Recarga*

El paquete “*Recharge (RCH)*” ha servido para introducir el aporte por infiltración de agua subterránea proveniente de la recarga superficial. Esta recarga puede generarse a causa de la infiltración del agua de precipitación o debido a los retornos de riego. En ambos casos el procedimiento de introducción de datos ha sido el mismo.

La información requerida por este módulo es la definición de la capa a la que se le aplica la recarga y la tasa de recarga. En este caso, la capa a la que se ha asignado la recarga ha sido la capa superior o capa superficial. Por otro lado, la tasa ha sido introducida en unidades de metros al día, acorde con las unidades de los demás datos de entrada. Tanto para la recarga de lluvia como para la recarga de retornos de riego se han definido diferentes zonas dónde se consideran tasas de recarga homogéneas y estas han sido sumadas en las zonas donde están superpuestas. MODFLOW multiplica la tasa de recarga de cada área por la superficie de cada celda que se encuentre bajo su influencia, para conseguir el dato total de recarga.

4.3.4.1. Recarga por precipitación

Los datos para la introducción de la recarga por infiltración de la lluvia han sido obtenidos a partir del modelo de simulación utilizado en la Demarcación Hidrográfica del Júcar para la evaluación de recursos hídricos: PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua), que simula el ciclo hidrológico de forma distribuida en el espacio, con una resolución de 1 km x 1 km, y con un paso de tiempo mensual (Pérez - Martín, 2005).

En este caso la superficie estudiada se ha dividido en los sectores que define el modelo PATRICAL como se puede observar en la Figura 13.

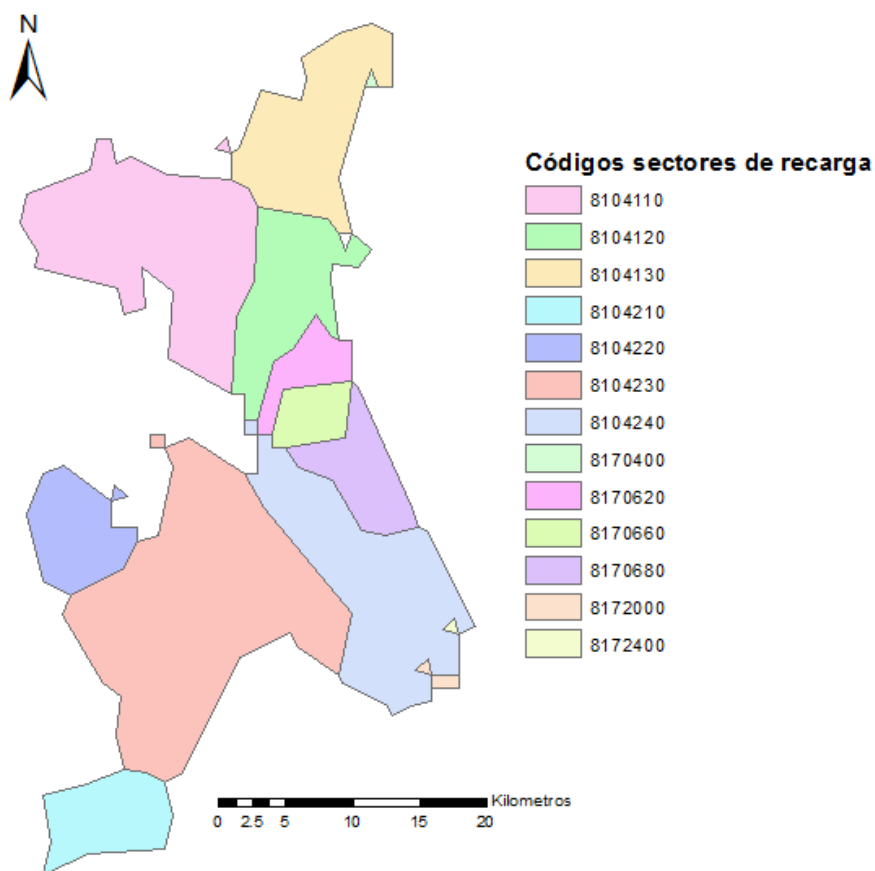


Figura 13. Zonificación de la recarga de lluvia definida en el modelo. Fuente: Elaboración propia con datos del modelo PATRICAL.

4.3.4.2. Recarga por retornos de riego

La tasa de recarga por excedentes o retornos de riego ha sido facilitada por la Confederación Hidrográfica del Júcar. Para su cálculo se ha considerado que el agua regada que no es consumida por las plantas bien puede salir del sistema mediante evaporación o puede reintroducirse en el mediante los retornos. Estos retornos a su vez pueden ser superficiales, en el caso de que vuelvan al sistema por escorrentía superficial, o subterráneos, cuando los retornos se infiltran al acuífero. Es este último componente subterráneo el que se ha introducido con el paquete “*Recharge (RCH)*”.

Como muestra la Figura 14, se han tomado las superficies de las unidades de demanda agrícola como zonas donde se considera una tasa de recarga homogénea.

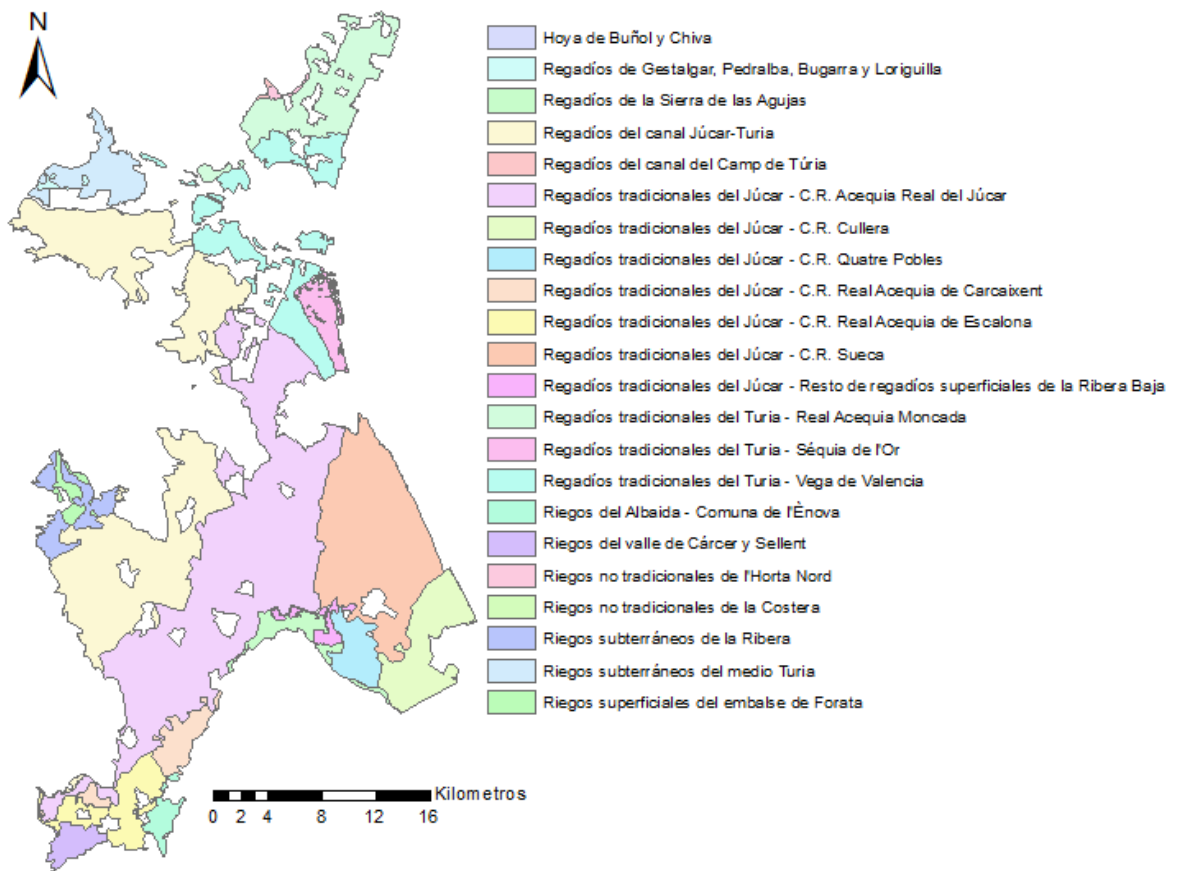


Figura 14. Zonificación de la recarga por retornos de riego de las unidades de demanda agrícola. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.

La evolución del volumen anual de los retornos agrícolas para la Plana de Valencia Norte y la Plana de Valencia Sur es el mostrado en la Figura 15.

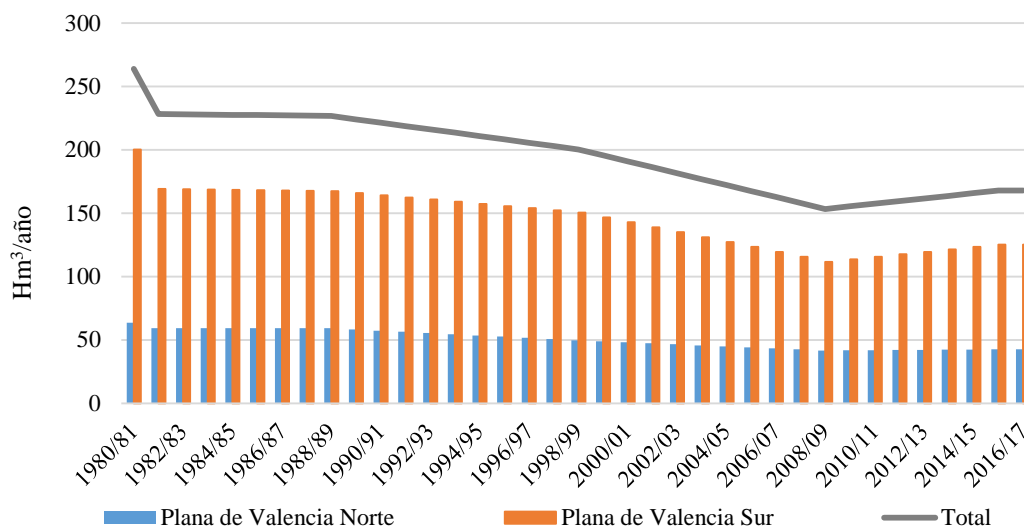


Figura 15. Evolución anual de los retornos de riego. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.

4.4. Bombeos

Para simular las extracciones de agua de los pozos de bombeo se ha utilizado el paquete “Well (WEL)” de MODFLOW. Se distinguen tres tipos de bombes: los bombes para regadío, los bombes para abastecimiento urbano e industrial y los bombes de pozos de sequía. De media, estos bombes se traducen en unos 83 hm³/año, pudiendo llegar a valores de hasta 120 hm³/año en periodos en los que se ponen los pozos de sequía en funcionamiento, como se aprecia en la Figura 16.

La información necesaria para ubicar y cuantificar cada pozo de extracción ha sido facilitada por la Confederación Hidrográfica del Júcar. En la Figura 17 se observa la ubicación de los diferentes pozos que extraen agua subterránea.

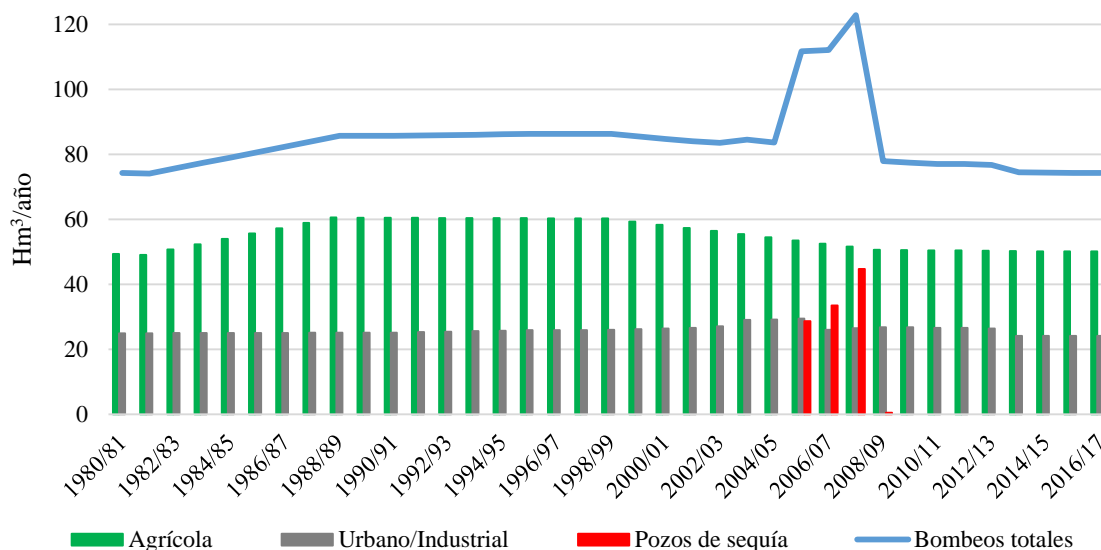


Figura 16. Evolución anual de los bombes modelados. Fuente: Elaboración propia.

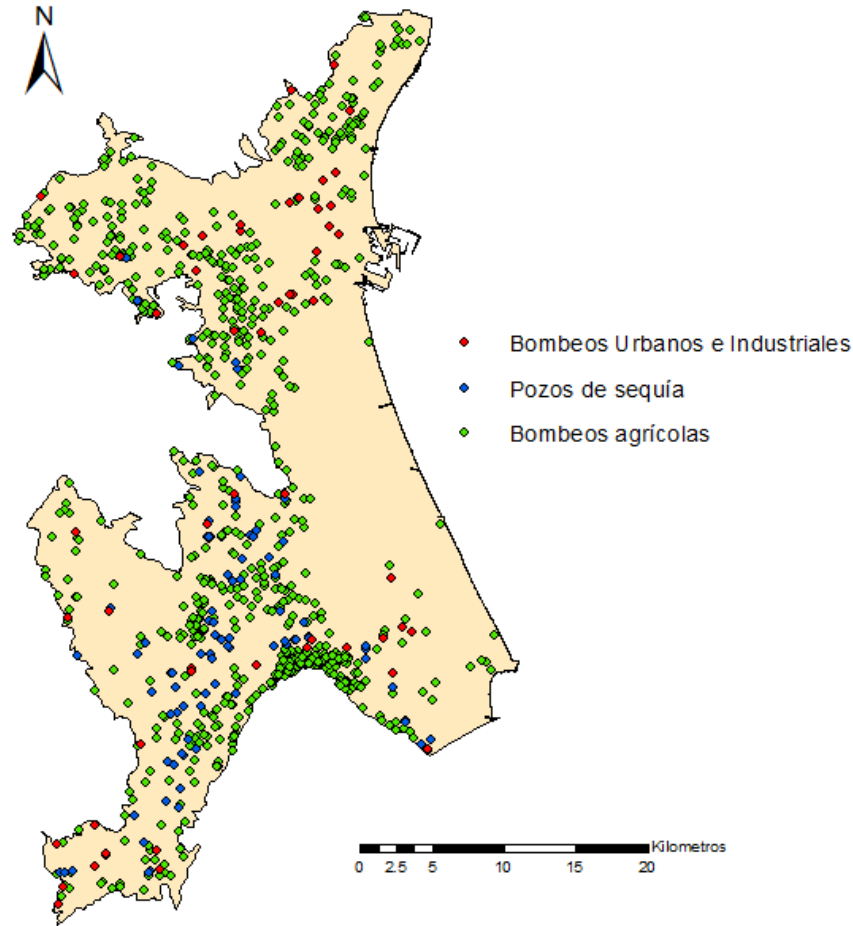


Figura 17. Ubicación de los pozos de bombeo. Fuente: Elaboración propia.

4.4.1. Extracciones de agua para uso de riego

Los bombeos para uso agrario son los más importantes cuantitativamente. En la plana de Valencia Norte se extraen de media $23 \text{ hm}^3/\text{año}$ repartidos en 320 pozos y en la Plana de Valencia Sur $31 \text{ hm}^3/\text{año}$ repartidos en 422 pozos. De manera conjunta se extraen $54 \text{ hm}^3/\text{año}$ en 742 pozos.

Para realizar el cálculo de los volúmenes extraídos se ha contado con la definición de las diferentes unidades de demanda agrícola (UDAs), las superficies y cultivos en regadío con sus respectivas dotaciones netas, los datos de suministro y extracciones, así como las eficiencias de las redes de distribución. En la Figura 18 se aprecia la evolución de los bombeos del sector agrario en el periodo simulado.

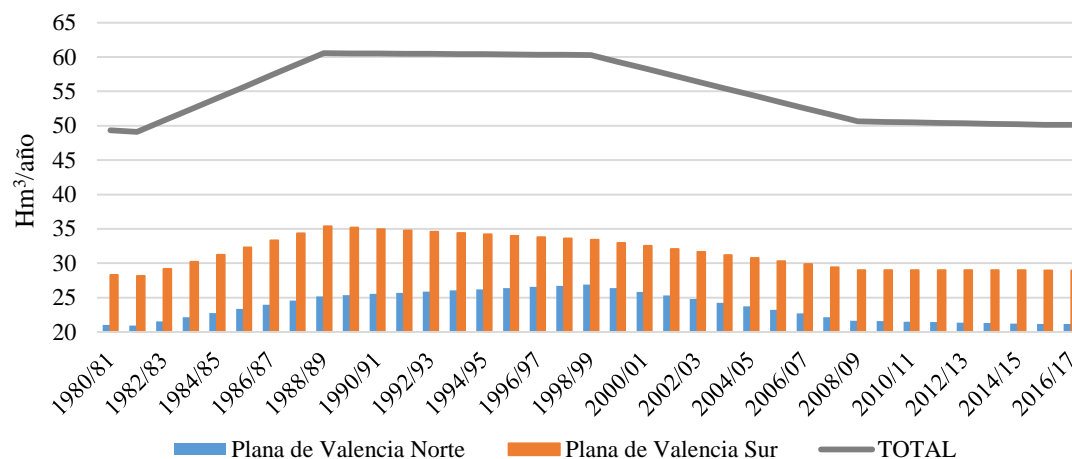


Figura 18. Evolución anual de los bombeos agrarios. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Extracciones de agua para uso urbano e industrial

Los bombeos para uso urbano e industrial extraen un volumen medio de 26 hm³/año repartidos en 99 pozos. En este caso el reparto temporal de las extracciones se muestra en la Figura 19.

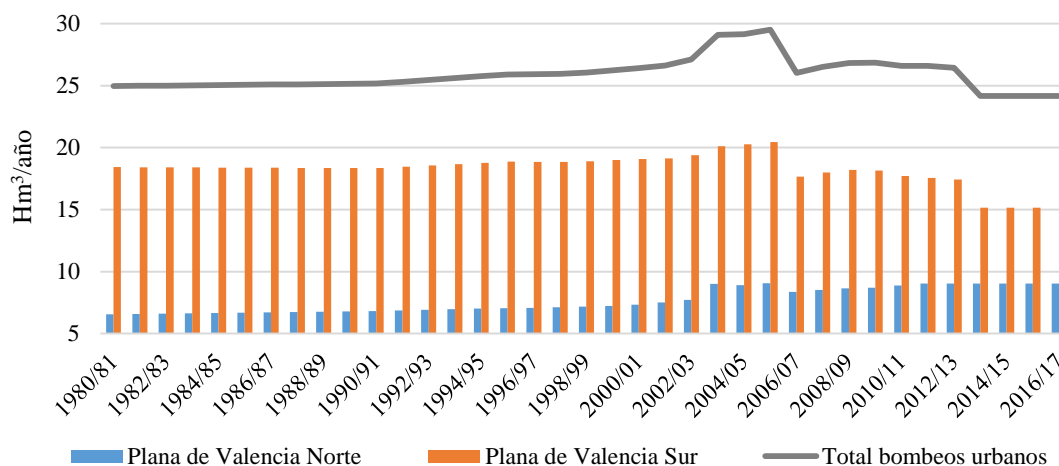


Figura 19. Evolución anual de los bombeos urbanos e industriales. Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Extracciones de agua de pozos de sequía

La extracción de agua subterránea de los pozos de sequía se reduce al periodo de sequía entre los años 2006 y 2009. En este periodo de sequía prolongada e intensa se tuvo que hacer uso de varias actuaciones de urgencia con el objetivo de paliar los efectos de la sequía. Entre estas actuaciones se encuentra la activación de una serie de pozos para complementar el suministro de agua a los riegos de la ribera del Júcar y tramo final del río Turia (CHJ, 2010).

Extraen un total de 107 hm³ lo que supone una media anual de 35 hm³/año durante los tres años mencionados y un volumen nulo durante el resto del periodo simulado. Esta extracción se realiza mediante 89 pozos de sequía.

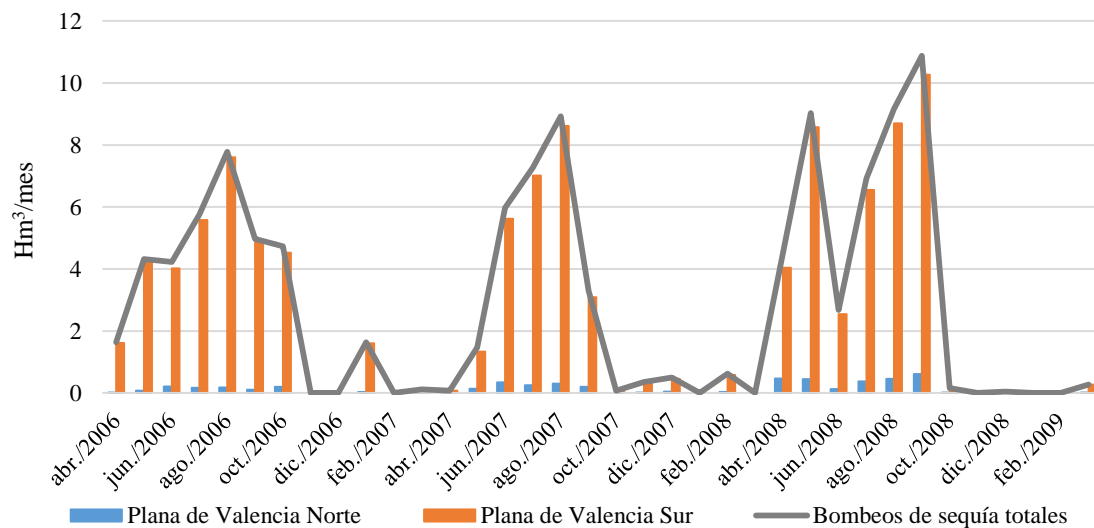


Figura 20. Evolución mensual de los pozos de sequía. Fuente: Elaboración propia.

Como muestra la Figura 20 casi la totalidad del volumen extraído por los pozos de sequía proviene de la Plana de Valencia Sur dónde se concentran la gran mayoría de los pozos de sequía (Figura 17).

4.5. Condición inicial

La condición inicial hace referencia a las alturas piezométricas con las que da inicio el proceso de las simulaciones. Este dato se introduce en el modelo mediante el apartado denominado “*Modflow_Initial_Head*” y requiere de un dato de la altura piezométrica para cada celda en el instante cero. Según avanza la simulación estos niveles cambian y convergen hacia los valores de la solución, pero es conveniente que esta condición inicial esté lo más cerca posible de la solución para reducir, así, el tiempo de simulación y evitar la divergencia del modelo matemático planteado.

En este modelo la condición inicial ha sido definida con un mapa de piezometría realizado por la empresa EPTISA para el año 2005. Debido a la falta de datos se considera una similitud entre este periodo y el inicio de la simulación, ya que ambos se encuentran en un periodo de sequía.

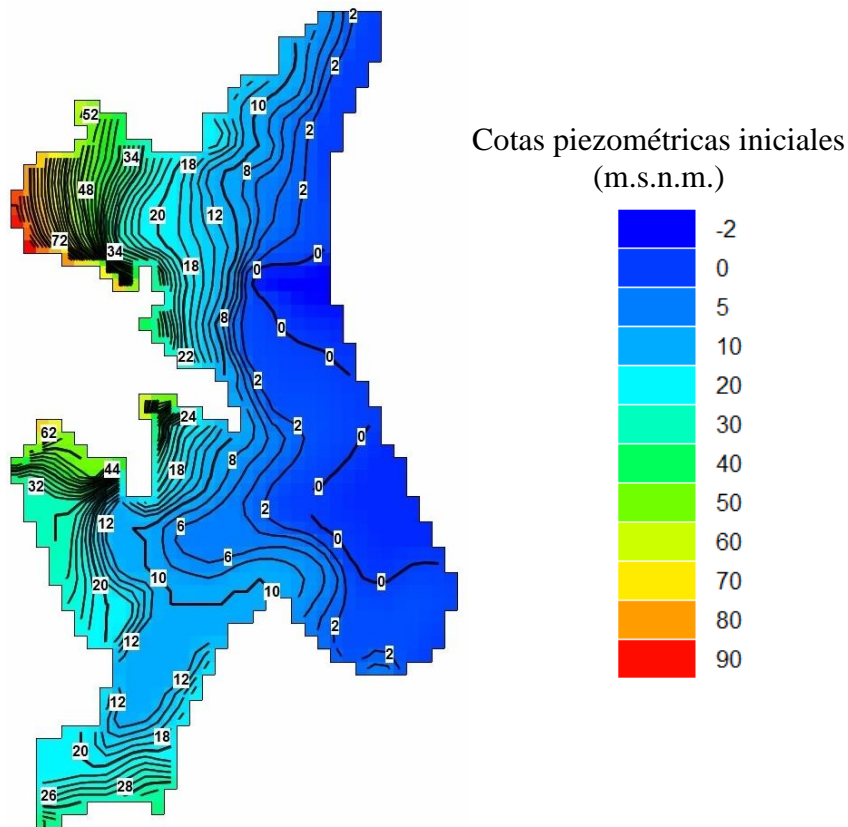


Figura 21. Alturas piezométricas de la condición inicial. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ

4.6. Parámetros hidrogeológicos

MODFLOW necesita tener definidos una serie de parámetros en cada celda activa para poder resolver la ecuación del flujo subterráneo. Estos parámetros deben obtenerse como resultado de trabajos de campo y de análisis bibliográfico. En este caso no se han podido realizar ensayos en campo, por lo que se ha utilizado información bibliográfica. La caracterización de la Plana de Valencia Sur se ha establecido siguiendo el estudio realizado para el modelo de flujo subterráneo de dicha zona (Ballesteros et al., 2012) y para la Plana de Valencia Norte se ha utilizado el mapa de permeabilidades del IGME para la caracterización de la capa más superficial y para las capas más profundas se ha optado por darle una continuidad a las características de las capas definidas en la parte sur, ya que se trata de una misma formación hidrogeológica y no se dispone de información para realizar una nueva caracterización.

Estos parámetros tienen un alto grado de incertidumbre, y por ello se presentan los valores por intervalos. La fuente bibliográfica para definir estos rangos ha sido la de Custodio, E. et al. (1983), Freeze, R.A., et al. (1979). Estos valores iniciales han ido cambiando durante la calibración del modelo, con el objetivo de reproducir lo mejor posible las series de alturas piezométricas observadas intentando no alejarse de los rangos de valores establecidos en la bibliografía.

Los parámetros utilizados para calibrar el modelo han sido la conductividad hidráulica (K), el almacenamiento específico (S_s) y el rendimiento específico (S_y).

La Figura 23 y la Figura 22 muestran la zonificación utilizada en la capa superior para asignar los valores de los parámetros mencionados para la Plana de Valencia Norte y la Plana de Valencia Sur, respectivamente.

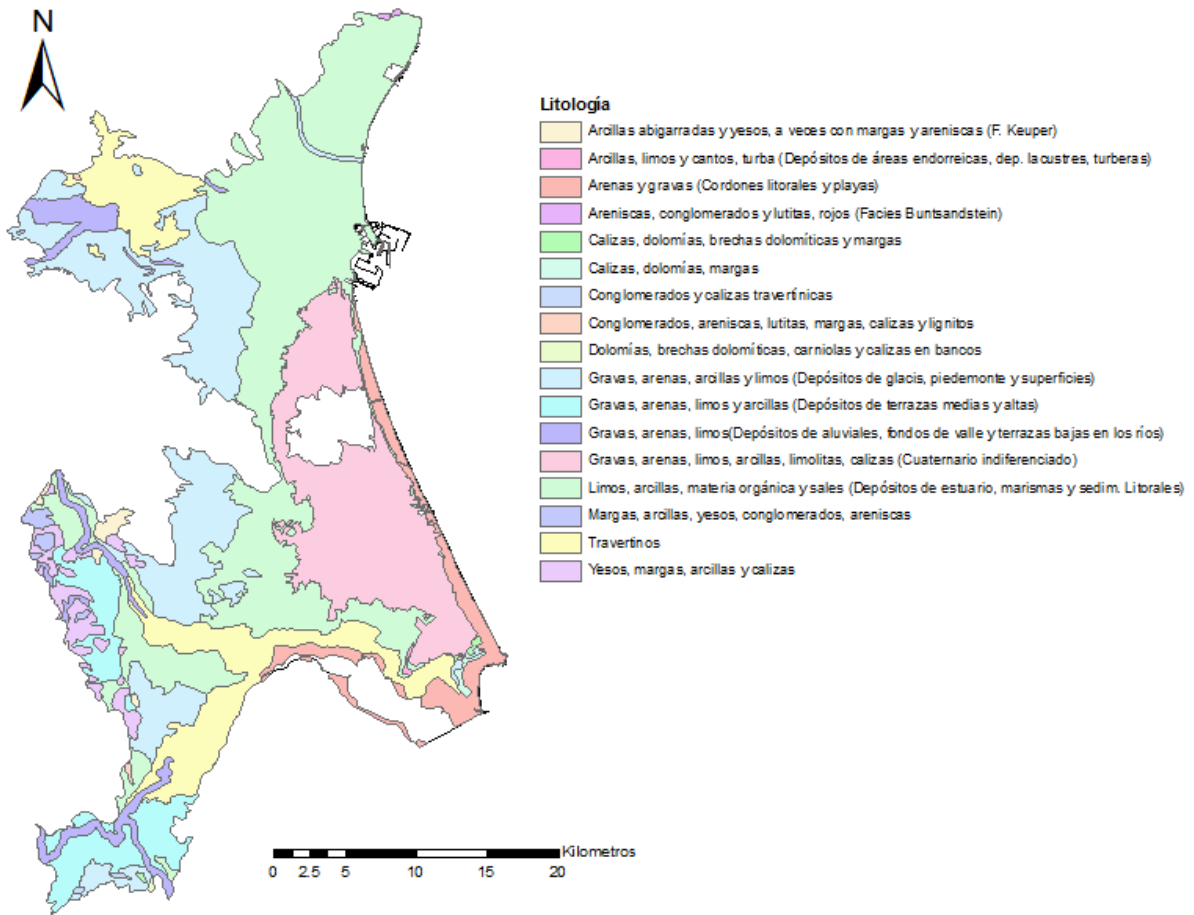


Figura 23. Mapa litológico de la zona de estudio. Fuente: IGME, 2006.

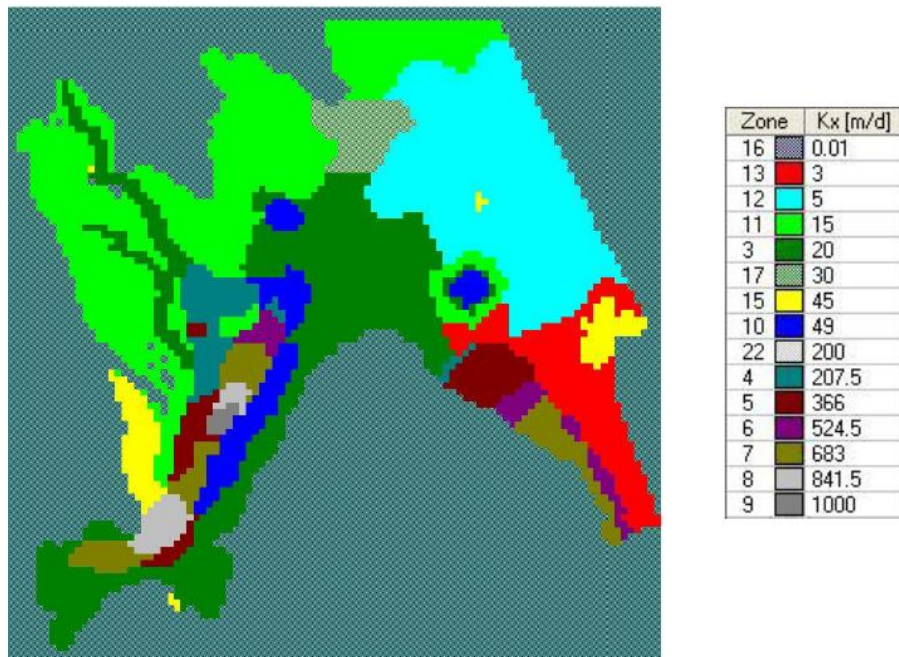


Figura 22. Distribución de las permeabilidades consideradas en el modelo numérico de la Plana de Valencia Sur para los materiales cuaternarios (capa I o superior). Fuente: Ballesteros et al., 2012.

5. Proceso de calibración y análisis de los resultados del modelo

El objetivo del proceso de la calibración es conseguir que los resultados del modelo se asemejen al máximo a los datos de campo.

En general, no es posible simular perfectamente todos los procesos del ciclo hidrológico mediante un modelo de estas características, ya que existen errores de diverso origen como pueden ser errores de medición en datos observados, asignación de valores no óptimos a diferentes parámetros o errores en el propio modelo conceptual. Mediante la calibración se procura minimizar la afección negativa de esta incertidumbre en los resultados obtenidos.

En este trabajo se ha optado por realizar la calibración de forma manual. Esto significa que se ha seguido un proceso de prueba y error, modificando los parámetros individualmente y analizando su efecto. Es una metodología lenta y subjetiva, que adopta el criterio del usuario.

A la hora de comenzar a realizar la calibración del modelo es importante disponer de un modelo conceptual sólido y bien fundamentado. Por otro lado, se debe decidir con qué algoritmo trabajará MODFLOW para encontrar la solución de la ecuación del flujo subterráneo. En este caso se ha decidido utilizar el llamado PCGN (*Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control*).

Se ha calibrado el régimen no influenciado y el régimen influenciado para conseguir un correcto funcionamiento de ambos periodos. Para ello, el proceso de calibración ha sido llevado a cabo de una forma iterativa, comprobando los efectos de modificaciones de parámetros en ambos casos y recalibrando hasta comprobar que el funcionamiento de los mismos es el correcto.

5.1. Modelo en régimen no influenciado

En primer lugar, se ha trabajado con un modelo en régimen no influenciado. Se trata de reproducir el sistema en condiciones relativamente naturales, donde la influencia del ser humano no es de importancia. Para ello, se ha optado por elegir el periodo entre los años hidrológicos 1940/41 y 1979/80, ya que son los más antiguos disponibles. No se ha considerado ningún tipo de bombeo, y tampoco se han simulado las acequias y canales del parque de la Albufera ni la recarga por los retornos de riego, con el objetivo de ver cuál es el funcionamiento original de este sistema. Se ha tenido mayor dificultad a la hora de obtener datos de entrada para esta época ya que la cantidad de datos observados para estos años es escasa. El funcionamiento del sistema para esta época se ha considerado estacionario y se han introducido los valores medios de los datos disponibles.

5.1.1. Calibración del modelo en régimen no influenciado

Para la calibración en régimen no influenciado se han utilizado como referencia principalmente los resultados obtenidos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005) y del modelo de flujo de agua subterránea de la Plana de Valencia Sur (Ballesteros et al., 2012). Por otro lado, se ha calibrado los niveles piezométricos simulados en el modelo con valores observados de piezometría que se han considerado estacionarios por su antigüedad y su comportamiento. Los registros más antiguos de los que se disponen en esta zona datan de principios de la década de los setenta.

Es de mencionar que, debido a la escasez de datos fiables para este periodo, la principal calibración se ha realizado en el modelo en régimen influenciado, ya que en este periodo se tienen muchos más datos y de más fiabilidad. Con esta calibración se ha pasado a reproducir el régimen no influenciado manteniendo la estructura del modelo influenciado y cambiando aquellos elementos y datos observados que se consideran la base del modelo. Estos elementos pueden ser las alturas piezométricas observadas, la eliminación de las acequias del parque de la Albufera y de los bombeos subterráneos junto con la recarga por los retornos de riego. Todo este proceso se realiza de forma iterativa hasta conseguir la correcta reproducción de ambos regímenes.

5.1.1.1. Calibración de las condiciones de contorno

Para calibrar las condiciones de contorno y reproducir correctamente los flujos existentes entre el sistema y las masas de agua subterránea adyacentes se han seguido diferentes procedimientos.

Para empezar, se han fijado valores piezométricos observados en los piezómetros situados en los límites laterales del acuífero, interpolando los valores entre las celdas con medidas observadas. Por otro lado, se ha impuesto la condición de impermeable al único tramo que hace contacto con un borde impermeable en la parte suroeste de la Plana de Valencia Sur, entre los límites laterales con las masas de agua subterránea de Caroch Norte y Sierra de las Agujas.

Una vez implementado esto, se ha procedido a calibrar la conductancia de cada tramo de borde para reproducir las transferencias de acuerdo con los volúmenes marcados con los modelos de referencia. No se han impuesto comportamientos de entrada o de salida del sistema, sino que, simplemente, fijando las alturas piezométricas y calibrando la conductancia se ha conseguido reproducir el comportamiento de entrada y salida de las condiciones de contorno de los límites laterales. Todo ello se ha realizado de una forma iterativa e intentando no alejarse de los valores piezométricos observados en el resto de la superficie del acuífero.

5.1.1.2. Calibración de las propiedades físicas de los acuíferos

Para calibrar las propiedades físicas del sistema de estudio, al igual que en el apartado anterior, se ha procedido a implementar los datos conocidos como pueden ser los niveles de agua de cauces superficiales o las propiedades hidrogeológicas de las diferentes unidades del sistema. Una vez asignados estos valores se han ido modificando paralelamente con el modelo en régimen influenciado para reproducir correctamente los niveles de agua observados en los diferentes piezómetros repartidos por toda la superficie con datos de años dónde el sistema se considera que tiene un funcionamiento no influenciado.

La realización de esta calibración de forma iterativa es de suma importancia ya que las modificaciones en las propiedades físicas del acuífero generan cambios en los flujos de las condiciones de contorno y viceversa, por lo que ha sido necesaria una gran cantidad de simulaciones para llegar a reproducir todos los aspectos del modelo correctamente. Los resultados de flujos y piezometría de esta calibración se muestran a continuación.

5.1.2. Resultados del modelo en régimen no influenciado

Los datos de entrada para este modelo en régimen no influenciado han sido los valores medios de las series de los años hidrológicos 1940/41 – 1979/80. En los siguientes apartados se presentan los resultados tanto de balances de masa como de niveles piezométricos resultantes de la calibración realizada para el modelo en régimen no influenciado, el cual presenta el funcionamiento del acuífero de la Plana de Valencia en condiciones relativamente naturales y con una baja influencia del ser humano en el entorno.

5.1.2.1. Balance de masa del sistema

Para la presentación de datos del balance de masa en el periodo considerado como no influenciado, se ha realizado una discretización espacial muy compleja, que representa diferentes y muy variadas zonas de interés para conocer las transferencias y aportes subterráneos en cada una de ellas con más detalle. Esta tarea se puede realizar con el paquete *ZONE BUDGET* que viene implementado junto con el *MODFLOW*. También fue desarrollado por el *USGS* y permite conocer balances en las zonas definidas por el usuario.

Esta discretización se ha realizado a partir de la definición de diferentes zonas que realiza la Confederación Hidrográfica del Júcar para gestionar mejor tanto las aguas subterráneas como las superficiales en este entorno. Esta zonificación es acorde con las diferentes masas de agua definidas por la CHJ e incluso, en algunos casos, se han subdividido en zonas más pequeñas para conocer mejor el funcionamiento de éstas.

RIOS	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Tipo
Júcar	7.72	43.72	-36.00	Ganador
Desembocadura	0.22	0.33	-0.11	Ganador
Cullera Marquesa	1.42	3.43	-2.01	Ganador
Sueca Cullera	1.19	3.08	-1.89	Ganador
Albalat Sueca	1.43	3.37	-1.94	Ganador
Magro Albalat	0.00	4.30	-4.30	Ganador
Verde Magro	0.64	1.83	-1.18	Ganador
Casella Verde	0.04	5.66	-5.62	Ganador
Albaida Casella	0.02	20.84	-20.82	Ganador
Sellent Albaida	0.91	0.90	0.01	Perdedor
Antella Sellent	1.85	0.00	1.85	Perdedor
Verde	0.00	11.07	-11.07	Ganador
Alzira Júcar	0.00	9.07	-9.07	Ganador
Cabecera Alzira	0.00	2.00	-2.00	Ganador
Magro	2.57	0.01	2.56	Perdedor
Algemés Júcar	0.70	0.01	0.69	Perdedor
Carlet Algemesí	0.28	0.00	0.28	Perdedor
Alfarp Carlet	0.47	0.00	0.47	Perdedor
Buñol Alfarp	1.12	0.00	1.12	Perdedor
Sellent	0.24	0.00	0.24	Perdedor
Albaida	5.68	0.00	5.68	Perdedor
Rambla Poyo	0.03	13.48	-13.45	Ganador
Albufera	0.00	13.24	-13.24	Ganador
Paiporta Albufera	0.00	0.04	-0.03	Ganador
Cavalls Paiporta	0.03	0.20	-0.17	Ganador
Cabecera Paiporta	0.76	0.00	0.76	Perdedor
Turia	0.02	0.82	-0.80	Ganador
Desembocadura	0.00	0.07	-0.07	Ganador
Alto	0.02	0.75	-0.73	Ganador

ALBUFERA	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Total	Afección
Lago	1.67	12.82	-11.15	Salida
Norte	1.03	3.68	-2.65	Salida
Sur	0.64	9.14	-8.50	Salida
Ullals Baldoví	0.00	6.95	-6.95	Salida
Ullals La Bassa	0.00	3.86	-3.86	Salida
Ullals Gros	0.00	5.62	-5.62	Salida

TRANSFERENCIAS LATERALES	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Afección
Plana de Sagunto	0.07	0.01	0.06	Entrada
Liria - Casinos	1.45	0.13	1.32	Entrada
Bajo	1.19	0.00	1.19	Entrada
Alto	0.25	0.13	0.12	Entrada
Buñol - Cheste	43.27	0.39	42.88	Entrada
Cheste	27.73	0.34	27.39	Entrada
Picassent	1.21	0.05	1.16	Entrada
Alzira	14.33	0.00	14.33	Entrada
La Contienda	17.21	7.11	10.10	Entrada
Catadau	0.23	0.00	0.22	Entrada
Alzira	16.98	7.11	9.88	Entrada
Sierra del Ave	29.05	0.28	28.77	Entrada
Sur	6.42	0.00	6.42	Entrada
Centro	20.93	0.28	20.65	Entrada
Norte	1.70	0.00	1.70	Entrada
Caroch Norte	0.64	0.00	0.64	Entrada
Sierra de las Agujas	9.31	0.27	9.03	Entrada
Bajo	4.93	0.06	4.87	Entrada
Medio bajo	2.79	0.11	2.67	Entrada
Medio alto	0.12	0.11	0.01	Entrada
Alto	1.48	0.00	1.48	Entrada
Plana de Jaraco	0.00	4.23	-4.23	Salida

SALIDAS AL MAR	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Total	Afección
Plana de Valencia Norte	0.00	41.13	-41.13	Salida
Norte	0.00	31.84	-31.84	Salida
Sur	0.00	9.30	-9.30	Salida
Plana de Valencia Sur	3.11	29.18	-26.07	Salida
Norte	0.00	20.67	-20.67	Salida
Sur	3.11	8.51	-5.39	Salida

HUMEDALES	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Total	Afección
Marjal Rafalel	0.00	0.04	-0.04	Salida
Balsa Sant Llorenç	0.00	4.64	-4.64	Salida

	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Afección
RECARGA	62.90	0.00	62.90	Entrada

Tabla 2. Balance de masa detallado para el modelo en régimen no influenciado. Periodo 1940/41 – 1979/80. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos y la condición de estacionariedad que se le ha impuesto a este modelo, el cambio en el almacenamiento en esta simulación es nulo. Esto significa que las entradas son las mismas que las salidas. Por otro lado, es de mencionar que a pesar de no formar parte del balance generado se puede contabilizar el volumen de agua de las celdas inundadas como aporte subterráneo y su valor para el parque de la Albufera es de 110 hm³/año.

5.1.2.2. Análisis piezométrico

Una de las principales formas de comprobar la bondad del modelo y conocer la dirección del flujo subterráneo del acuífero es mediante el análisis de los niveles piezométricos del sistema.

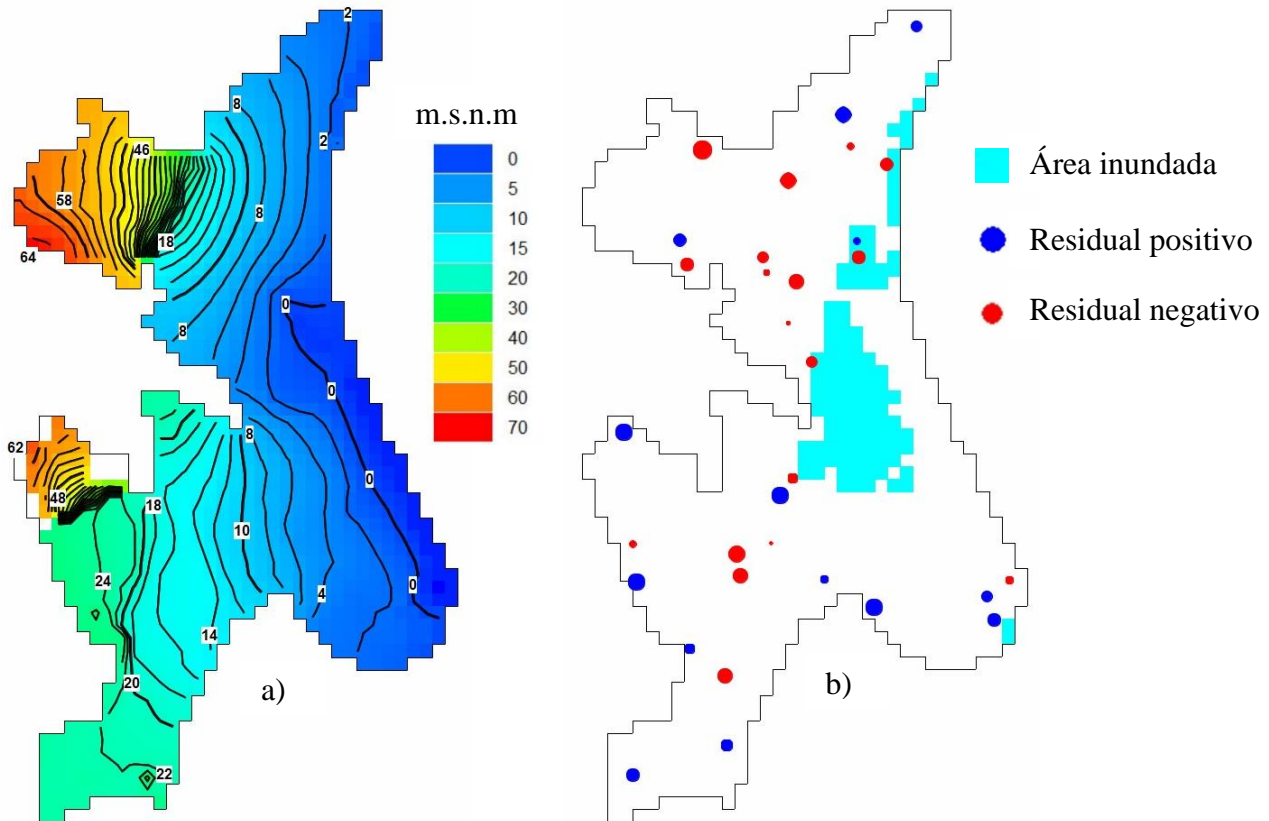


Figura 24. a) Mapa piezométrico del modelo en régimen no influenciado. b) Mapa de inundación simulada del modelo en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24a observamos las alturas piezométricas para el modelo en régimen no influenciado. Por otro lado, se observa que las isopiezas marcan el flujo subterráneo del oeste hacia el este, siendo mayoritariamente paralelas a la línea de costa. Este funcionamiento también concuerda con los datos observados y la información recopilada, que se exponen en el apartado 2.4. *Modelo Hidrogeológico conceptual*.

Por otro lado, la Figura 24b presenta las celdas inundadas con color azul claro, esto significa que la altura piezométrica simulada en esa celda es superior a la cota del terreno, llegando hasta dos metros en la parte del lago y decreciendo hasta unos pocos centímetros en las zonas más alejadas de éste. Esto concuerda con la información sobre el hecho de que antiguamente la superficie del lago era superior a la actual y sobre que el lago recibía aportes subterráneos a través de su lecho, como podemos comprobar en el balance del modelo en régimen no influenciado. También se muestra de manera gráfica la diferencia entre el valor simulado y el valor observado por diferentes piezómetros. Se han utilizado 34 piezómetros, repartidos uniformemente por toda la

superficie y con valores medidos antiguos considerados como representativos para un periodo estacionario, para calibrar y ver la bondad y el ajuste del modelo en régimen no influenciado. Los círculos de color azul muestran los piezómetros donde el valor simulado está por debajo del valor observado y los círculos de color rojo indican que el valor simulado en ese punto es superior al observado.

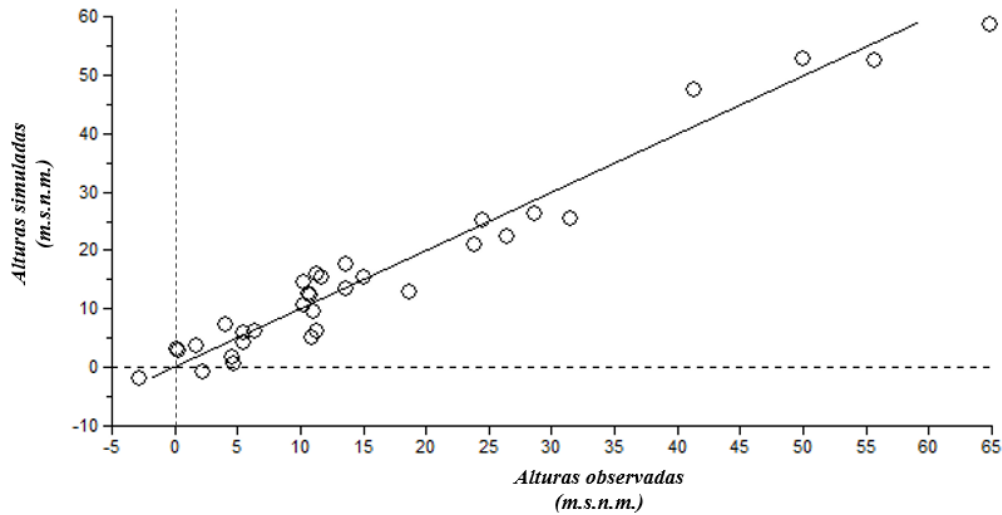


Figura 25. Comparación de los valores piezométricos observados y simulados del modelo en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.

Como podemos ver en la Figura 25 el gráfico nos muestra una comparación entre los valores observados y simulados para todos los piezómetros de calibración del régimen no influenciado. En la Tabla 3 se muestran los valores estadísticos de esta calibración.

Tabla 3. Indicadores estadísticos de la simulación en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro estadístico	Valor	Unidades
Número de puntos de control	34	piezómetros
Residual máximo	6	metros
Residual mínimo	0.1	metros
Valor residual medio absoluto	3.09	metros
Coefficiente de correlación	0.98	-
NRMSE	20.8	%
Criterio de Nash - Sutcliffe	0.96	-

5.2. Modelo en régimen influenciado. 1980/81 – 2016/17.

Para construir el modelo en régimen influenciado se han introducido las extracciones de agua subterránea mediante bombeos y la recarga del acuífero por retornos de riego. En este caso, se trata de reproducir el funcionamiento del sistema bajo condiciones de antropización. Este régimen simula las presiones generadas al acuífero por las acciones del ser humano y el modelo debe reflejar el efecto de éstas. Se ha optado por simular el periodo entre los años hidrológicos 1980/81 y 2016/2017. Ya que el funcionamiento para este periodo se ha considerado transitorio, se han introducido valores de entrada para cada mes, obteniendo de esta manera, resultados mensuales a lo largo de los 37 años simulados. En este caso la cantidad y la fiabilidad de los datos observados es mayor que en el periodo considerado como estacionario.

5.2.1. Calibración del modelo en régimen influenciado

Para la calibración en régimen influenciado se han utilizado como referencia principalmente los resultados obtenidos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005) y del modelo de flujo de agua subterránea de la Plana de Valencia Sur (Ballesteros et al., 2012). Por otro lado, se ha calibrado el resultado piezométrico del modelo con las series de valores observados de piezometría en los años de estudio.

Este periodo cuenta con una mayor cantidad de datos y de mayor fiabilidad. Se considera esta calibración como referencia ya que los datos disponibles para este periodo permiten realizar una calibración más exhaustiva y certera. Este proceso se realiza de forma paralela e iterativa con el modelo en el régimen no influenciado hasta conseguir la correcta reproducción de ambos.

5.2.1.1. Calibración de las condiciones de contorno

En este caso se ha decidido implementar la condición de borde con altura variable ya que se considera muy importante dotar al modelo de la variabilidad que aportan las series mensuales de valores piezométricos observados en los piezómetros situados en los límites laterales del acuífero, interpolando los valores entre las celdas con medidas observadas. Como se menciona en el apartado 4.3.1.1., ha sido necesaria la reconstrucción de las series temporales mediante procedimientos estadísticos, ya que no estaban completas. Por otro lado, se ha impuesto la condición de impermeable al único tramo que hace contacto con un acuífero impermeable en la parte suroeste de la Plana de Valencia Sur, entre los límites laterales con las masas de agua subterránea de Caroch Norte y Sierra de las Agujas.

Al igual que en el modelo en régimen no influenciado, se ha procedido a calibrar la conductancia de cada tramo de borde para reproducir las transferencias de acuerdo con los volúmenes marcados con los modelos de referencia, sin imponer el comportamiento de entrada o de salida del sistema y de una forma iterativa.

5.2.1.2. Calibración de las propiedades físicas de los acuíferos

Para calibrar las propiedades físicas del sistema de estudio, al igual que en el modelo en régimen no influenciado, se ha procedido a implementar los datos conocidos como pueden ser los niveles de agua de cauces superficiales o las propiedades hidrogeológicas de las diferentes unidades del sistema. Una vez asignados estos valores se han ido modificando paralelamente con el modelo en régimen no influenciado para reproducir correctamente los niveles de agua observados en los diferentes piezómetros repartidos por toda la superficie con datos de años del periodo considerado como influenciado entre los años 1980/81 y 2016/17. La realización de esta calibración de forma iterativa es de suma importancia ya que las modificaciones en las propiedades físicas del acuífero generan cambios en los flujos de las condiciones de contorno y viceversa, por lo que ha sido necesaria una gran cantidad de simulaciones para llegar a reproducir todos los aspectos del modelo correctamente. Los resultados de flujos y piezometría de esta calibración se muestran a continuación.

5.2.2. Resultados del modelo en régimen influenciado

Los datos de entrada para este modelo en régimen influenciado han sido los valores mensuales de las series de los años hidrológicos 1980/81 – 2016/17. En los siguientes apartados se presentan los resultados tanto de balances de masa como de niveles piezométricos resultantes de la calibración realizada para el modelo en régimen transitorio o influenciado, el cual presenta el funcionamiento del acuífero de la Plana de Valencia en condiciones antropizadas y con una importante influencia del ser humano en el entorno.

5.2.2.1. Balance de masa del sistema

Para la presentación de datos del balance de masa en el periodo considerado como influenciado, se ha realizado una discretización espacial muy compleja, que representa diferentes y muy variadas zonas de interés para conocer las transferencias y aportes subterráneos en cada una de ellas con más detalle.

Esta discretización se ha realizado a partir de la definición de diferentes zonas que realiza la Confederación Hidrográfica del Júcar para gestionar mejor tanto las aguas subterráneas como las superficiales en este entorno. Esta zonificación es acorde con las diferentes masas de agua definidas por la CHJ e incluso, en algunos casos, se han subdividido en zonas más pequeñas para conocer mejor el funcionamiento de éstas.

Respecto al balance del régimen no influenciado, se añaden los valores para bombeos, recarga por precipitación y retornos de riego y extracción de agua de las acequias o canales del parque de la Albufera. Estos últimos divididos en las zonas correspondientes a las diferentes unidades de demanda agrícola como se puede observar en la Tabla 4.

RIOS	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Tipo
Júcar	12.09	46.38	-34.29	Ganador
Desembocadura	0.08	1.84	-1.77	Ganador
Cullera Marquesa	1.03	9.15	-8.12	Ganador
Sueca Cullera	2.21	3.32	-1.10	Ganador
Albalat Sueca	1.95	2.59	-0.64	Ganador
Magro Albalat	1.53	2.02	-0.49	Ganador
Verde Magro	1.26	2.02	-0.76	Ganador
Casella Verde	0.06	5.93	-5.87	Ganador
Albaida Casella	0.33	19.19	-18.86	Ganador
Sellent Albaida	1.78	0.32	1.46	Perdedor
Antella Sellent	1.85	0.00	1.85	Perdedor
Verde	0.00	11.16	-11.16	Ganador
Alzira Júcar	0.00	9.07	-9.06	Ganador
Cabecera Alzira	0.00	2.10	-2.10	Ganador
Magro	2.57	0.01	2.55	Perdedor
Algemesí Júcar	0.70	0.01	0.68	Perdedor
Carlet Algemesí	0.28	0.00	0.28	Perdedor
Alfarp Carlet	0.47	0.00	0.47	Perdedor
Buñol Alfarp	1.12	0.00	1.12	Perdedor
Sellent	0.16	0.00	0.16	Perdedor
Albaida	5.68	0.00	5.68	Perdedor
Rambra Poyo	0.32	5.23	-4.91	Ganador
Albufera	0.29	5.21	-4.93	Ganador
Paiporta Albufera	0.00	0.00	0.00	Perdedor
Cavalls Paiporta	0.03	0.02	0.01	Perdedor
Cabecera Paiporta	0.76	0.00	0.76	Perdedor
Turia	0.02	0.44	-0.42	Ganador
Desembocadura	0.00	0.01	0.00	Ganador
Alto	0.02	0.43	-0.42	Ganador

TRANSFERENCIAS LATERALES	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Afección
Plana de Sagunto	0.03	0.02	0.02	Entrada
Liria - Casinos	1.29	0.07	1.22	Entrada
Bajo	1.02	0.00	1.02	Entrada
Alto	0.26	0.07	0.19	Entrada
Buñol - Cheste	46.14	0.31	45.83	Entrada
Cheste	31.70	0.28	31.42	Entrada
Picassent	1.19	0.03	1.16	Entrada
Alzira	13.25	0.00	13.25	Entrada
La Contienda	17.59	4.81	12.78	Entrada
Catadau	0.20	0.00	0.20	Entrada
Alzira	17.39	4.81	12.58	Entrada
Sierra del Ave	6.56	2.36	4.20	Entrada
Sur	1.07	0.84	0.23	Entrada
Centro	4.15	1.51	2.65	Entrada
Norte	1.34	0.02	1.32	Entrada
Caroch Norte	0.41	0.00	0.41	Entrada
Sierra de las Agujas	7.90	2.21	5.69	Entrada
Bajo	6.16	1.01	5.15	Entrada
Medio Bajo	1.40	0.74	0.66	Entrada
Medio Alto	0.06	0.26	-0.20	Salida
Alto	0.27	0.21	0.07	Entrada
Plana de Jaraco	0.00	4.12	-4.12	Salida

SALIDAS AL MAR	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Afección
Plana de Valencia Norte	0.00	47.19	-47.19	Salida
Norte	0.00	39.54	-39.54	Salida
Sur	0.00	7.65	-7.65	Salida
Plana de Valencia Sur	3.00	23.58	-20.58	Salida
Norte	0.00	12.09	-12.09	Salida
Sur	3.00	11.49	-8.49	Salida

HUMEDALES	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Afección
Marjal Rafallel	0.00	0.19	-0.19	Salida
Balsa Sant Llorenç	0.00	5.07	-5.07	Salida

	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Afección
RECARGA	263.80	0.00	263.80	Entrada
BOMBEOS	0.00	82.02	-82.02	Salida

ALBUFERA	Entradas (Hm ³ /año)	Salidas (Hm ³ /año)	Neto	Afección
Lago	8.62	0.00	8.62	Entrada
Norte	3.94	0.00	3.94	Entrada
Sur	4.68	0.00	4.68	Entrada
Canales	0.00	139.14	-139.14	Salida
Acequia del oro	0.00	6.18	-6.18	Salida
Vega de Valencia	0.00	8.06	-8.06	Salida
Acequia real	0.00	81.04	-81.04	Salida
Sueca	0.00	40.39	-40.39	Salida
Cullera	0.00	3.47	-3.47	Salida
Ullals Baldoví	0.00	0.28	-0.28	Salida
Ullals La Bassa	0.00	0.12	-0.12	Salida
Ullals Gros	0.00	0.89	-0.89	Salida

Tabla 4. Balance de masa para el modelo en régimen influenciado. Periodo 1980/81 – 2016/17. Fuente: Elaboración propia.

De forma más simplificada y agrupada observamos en la Tabla 5 el balance neto completo para el modelo en régimen influenciado.

Tabla 5. Resumen del balance de masa para el modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.

<u>ENTRADAS</u>	Hm ³ /año	<u>SALIDAS</u>	Hm ³ /año
Laterales	70.13	Laterales	4.12
Plana de Sagunto	0.02	Plana de Jaraco	4.12
Liria Casinos	1.22	Extracción Bombeo	82.02
Buñol Cheste	45.83	Emergencias	145.69
La Contienda	12.78	Canales	139.14
Sierra del Ave	4.20	Ullals	1.29
Caroch Norte	0.41	Humedales	5.26
Sierra de las Agujas	5.69	Salidas al Mar	67.77
Infiltración Riego	195.86	Norte	47.19
Infiltración Lluvia	67.94	Sur	20.58
Perdidas lago Albufera	8.62	Salidas Ríos	50.02
Perdidas Ríos	8.39	Júcar	34.29
Magro	2.55	Turia	0.42
Sellent	0.16	Verde	11.16
Albaida	5.68	Rambla del Poyo	4.15
TOTAL	350.94	TOTAL	349.63

Observamos como el acuífero de la Plana de Valencia se mantiene muy estable en el tiempo, incluso se puede observar cómo se llega a recargar ligeramente. Esto es debido a la gran cantidad de retornos de riego, y es acorde con la tendencia piezométrica general, con subidas y bajadas de acuerdo a la climatología y a los condicionantes externos, pero sin una tendencia global ascendente ni descendente, como se aprecia en el apartado 5.2.2.2 de análisis piezométrico.

La Figura 26 muestra la evolución temporal de las diferentes componentes principales del balance anual del modelo en régimen influenciado. Como se puede apreciar en dicho gráfico, a finales de la década de los años ochenta hay una recarga de lluvia considerablemente alta lo que causa un aumento del almacenamiento y mayor aporte a los ríos, al parque de la Albufera y al mar. Por otro lado, se aprecia claramente que en el periodo de sequía entre los años 2006 y 2009 la extracción de agua subterránea por bombeo aumenta debido a la activación de los pozos de sequía previamente descritos.

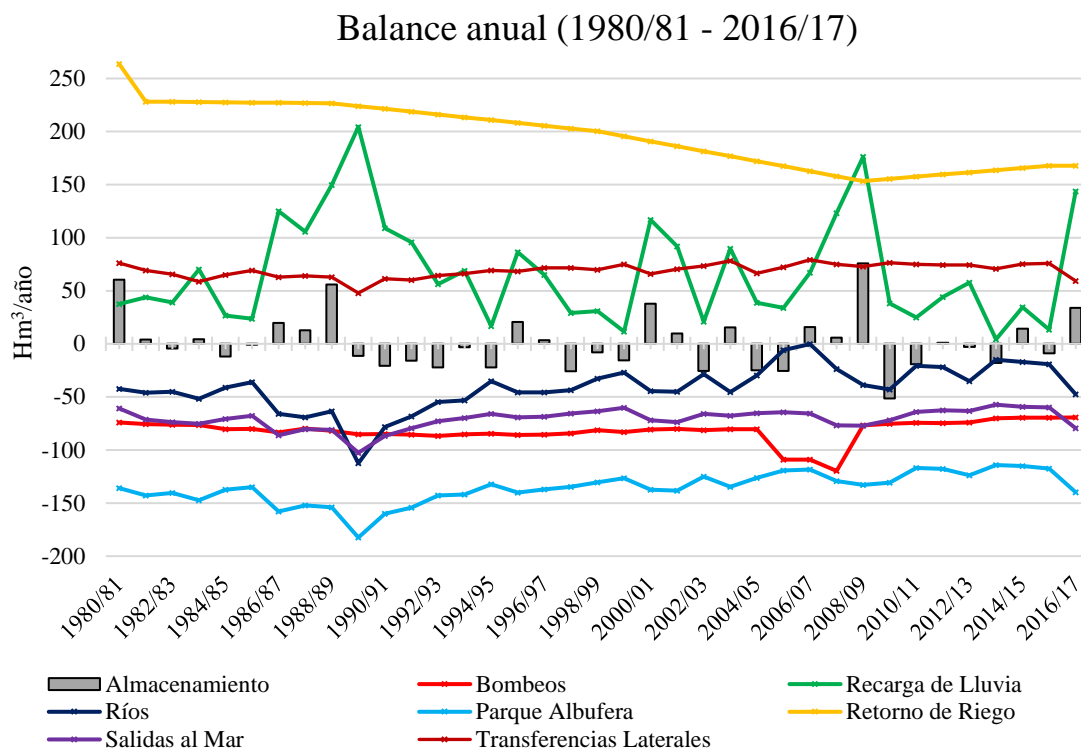


Figura 26. Evolución temporal de las componentes del balance del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 27 el cambio en el almacenamiento es variable cada año, pasando de ser positivo a negativo alternamente. El promedio del cambio anual del almacenamiento es muy bajo, ligeramente positivo, por lo que se puede afirmar que el acuífero de la Plana de Valencia no está sufriendo un vaciado ni llenado considerable. Respecto al volumen total del almacenamiento del acuífero se calcula que esta alrededor de 10000 hm³ de capacidad.

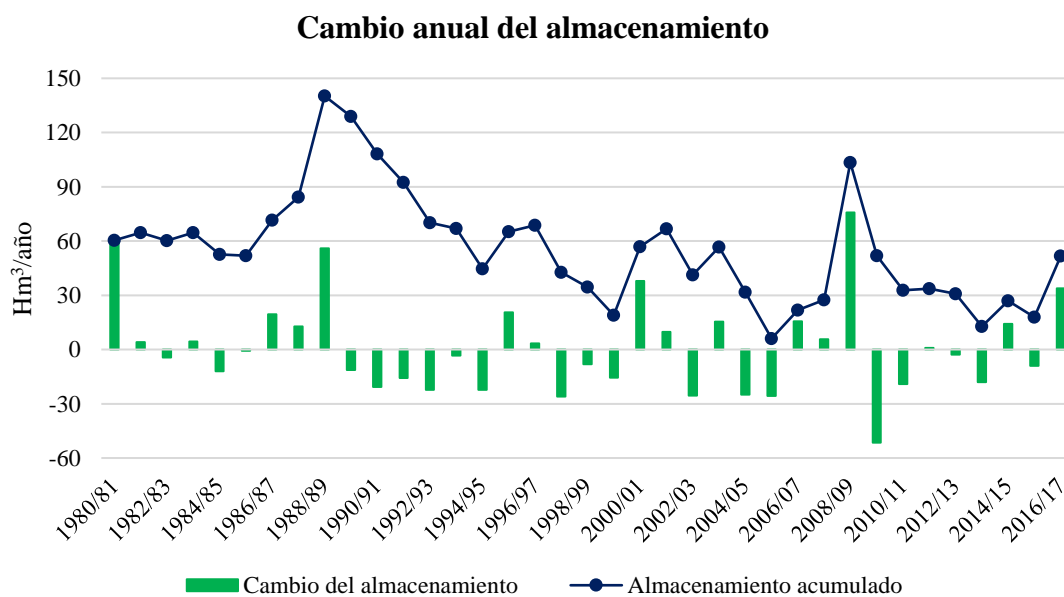


Figura 27. Evolución temporal del cambio en el almacenamiento del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.2. Análisis piezométrico

La calibración del modelo en régimen influenciado se ha basado principalmente en intentar reproducir correctamente las series de niveles piezométricos observados en los diferentes piezómetros elegidos.

Se ha decidido seleccionar una cantidad de 18 piezómetros considerados como representativos del funcionamiento general de los niveles piezométricos del acuífero y que en mayor o menor medida se han conseguido reproducir.

En la Figura 28 se aprecia el emplazamiento de dichos piezómetros.

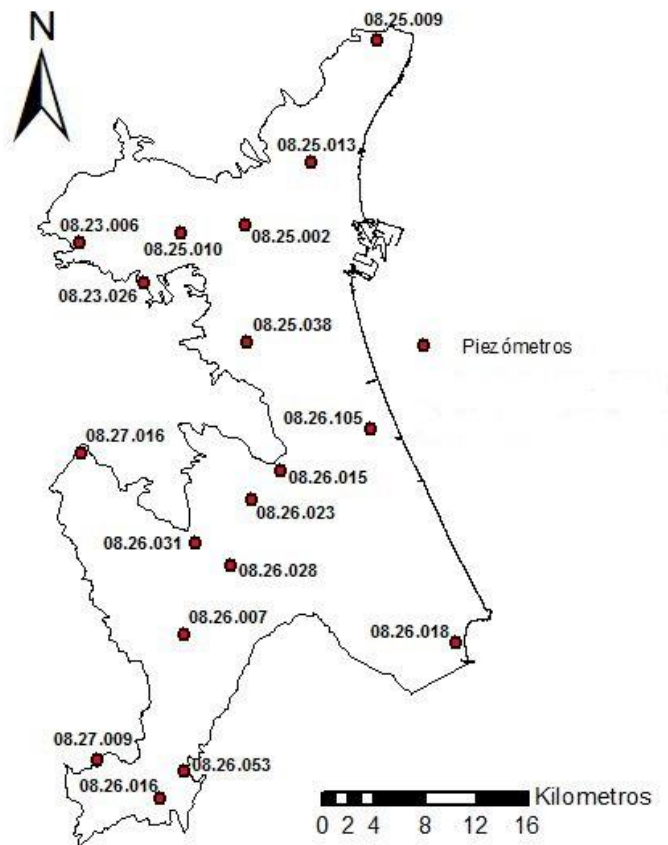
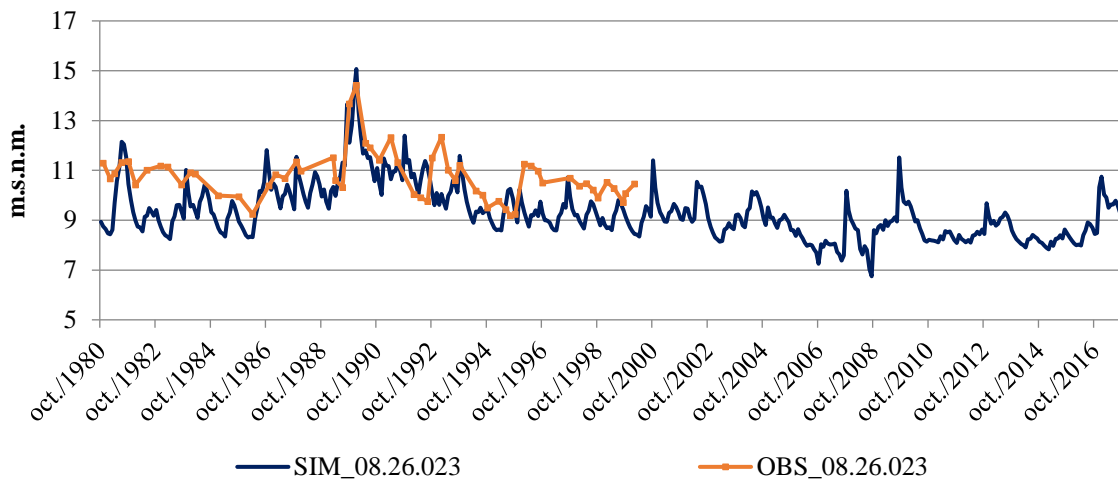


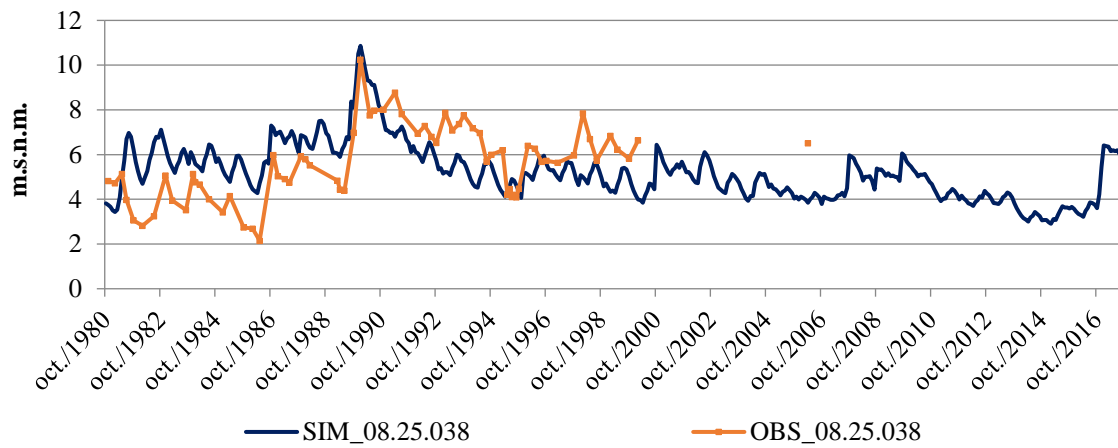
Figura 28. Ubicación de los piezómetros de calibración. Fuente Elaboración propia con datos de la CHJ.

Esta selección ha tenido, también, como criterio principal el reparto homogéneo por toda la superficie del acuífero con el objetivo de conocer la piezometría en toda la extensión de la masa de agua subterránea y así poder diferenciar el ajuste del modelo en diferentes zonas y analizar el porqué de su funcionamiento. A continuación, se muestra la calibración de estos piezómetros, Figura 29.

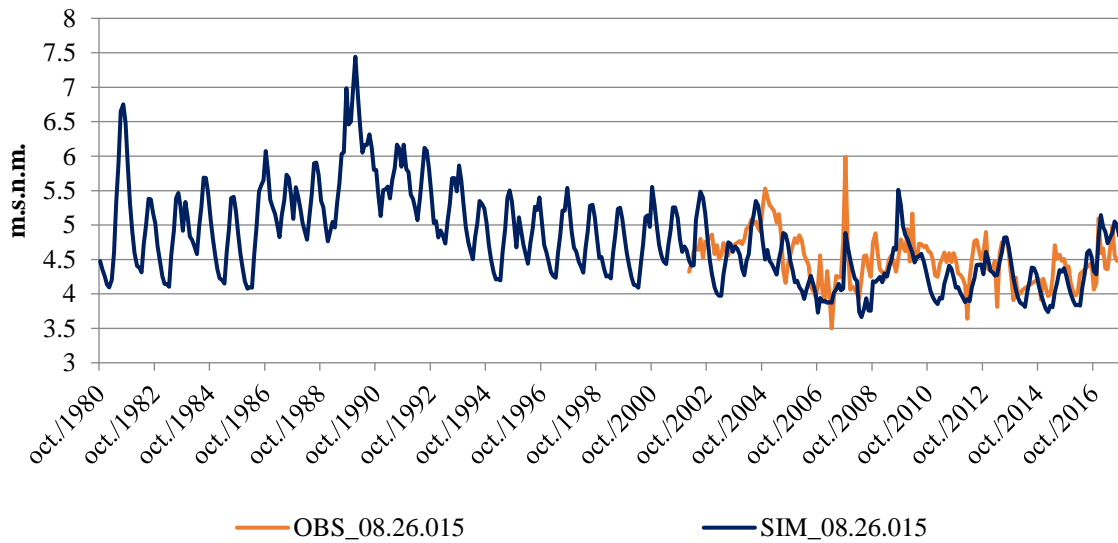
08.26.023

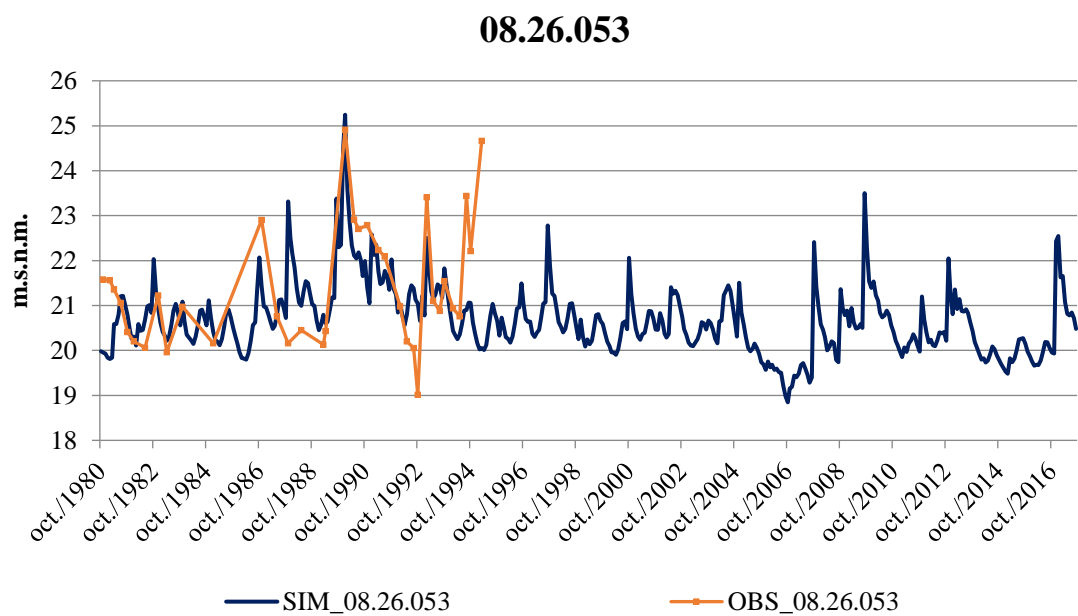
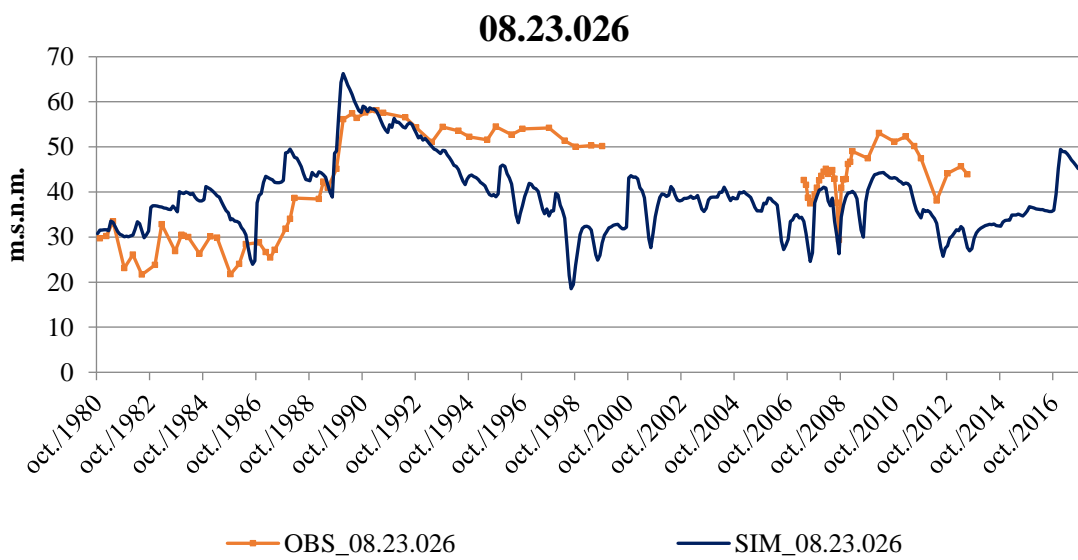
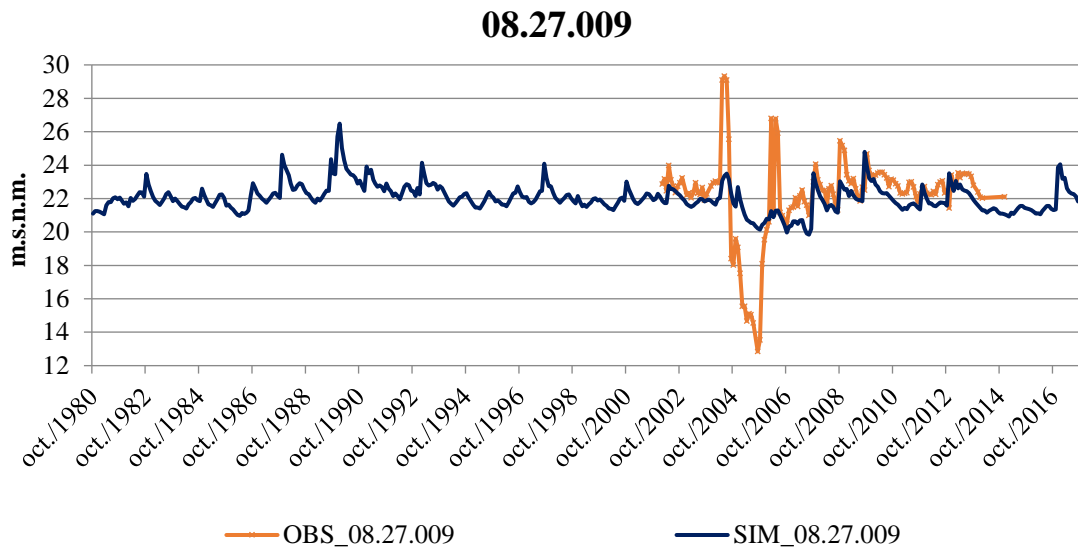


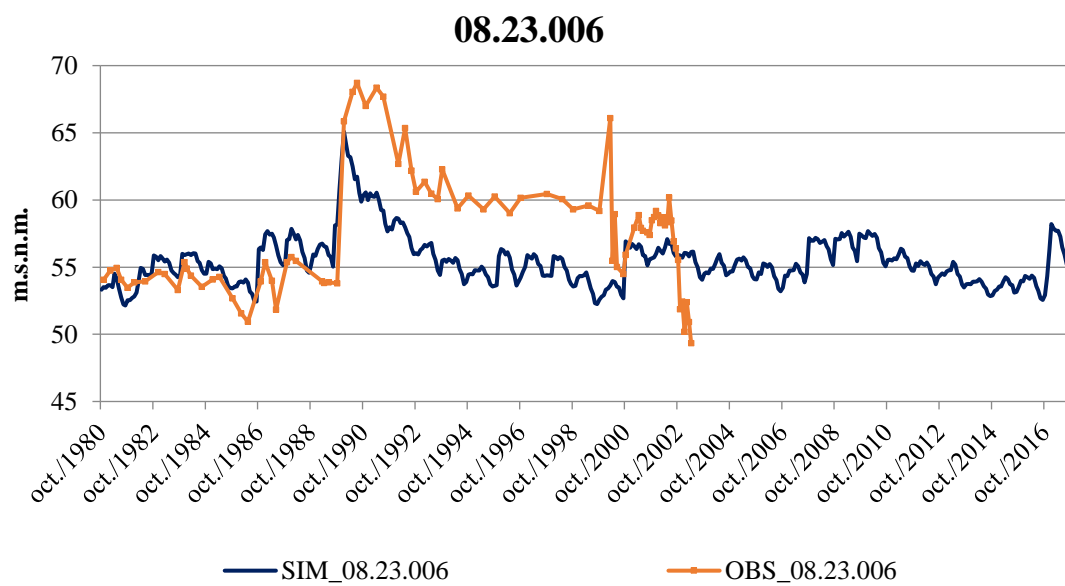
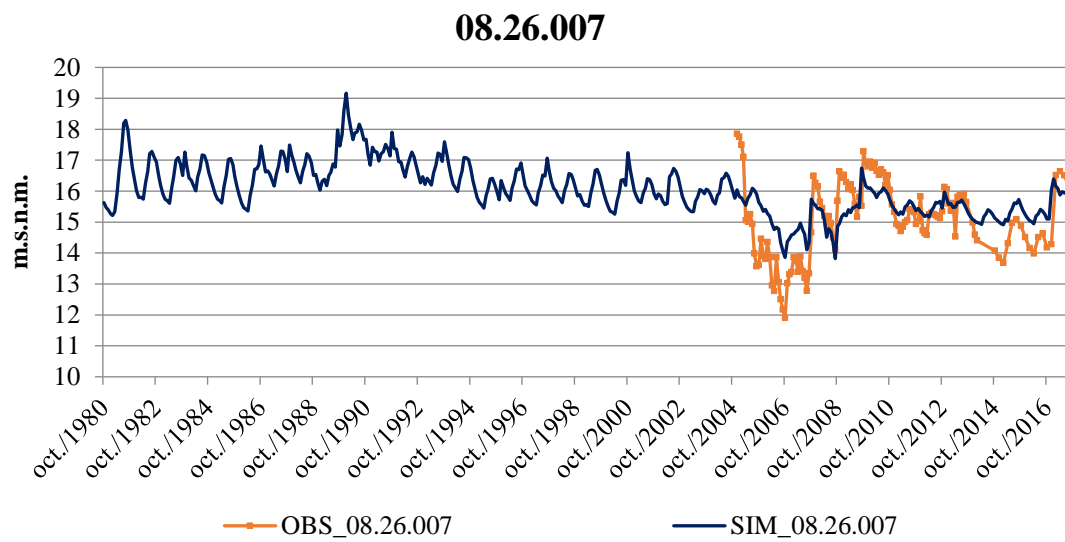
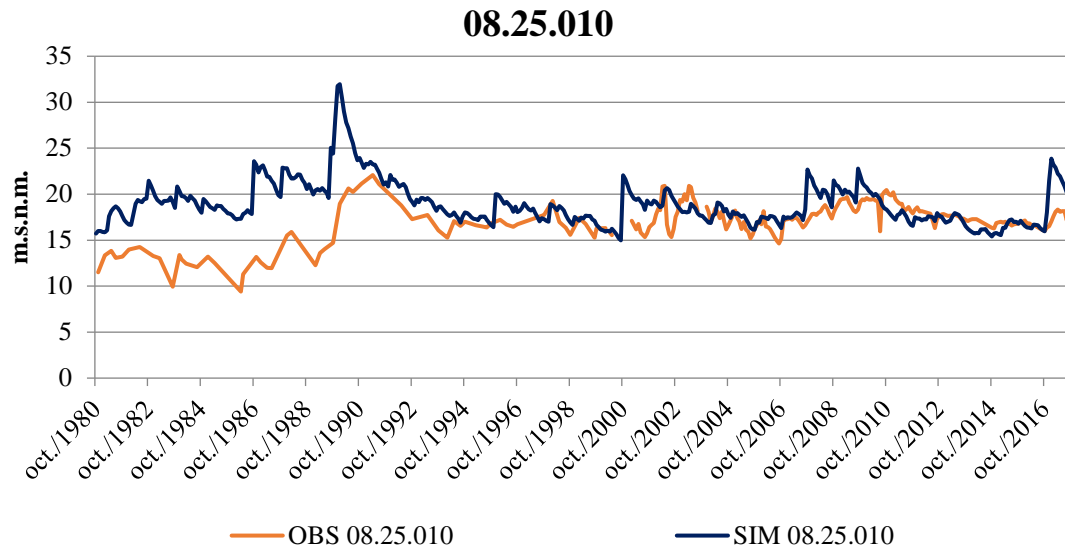
08.25.038



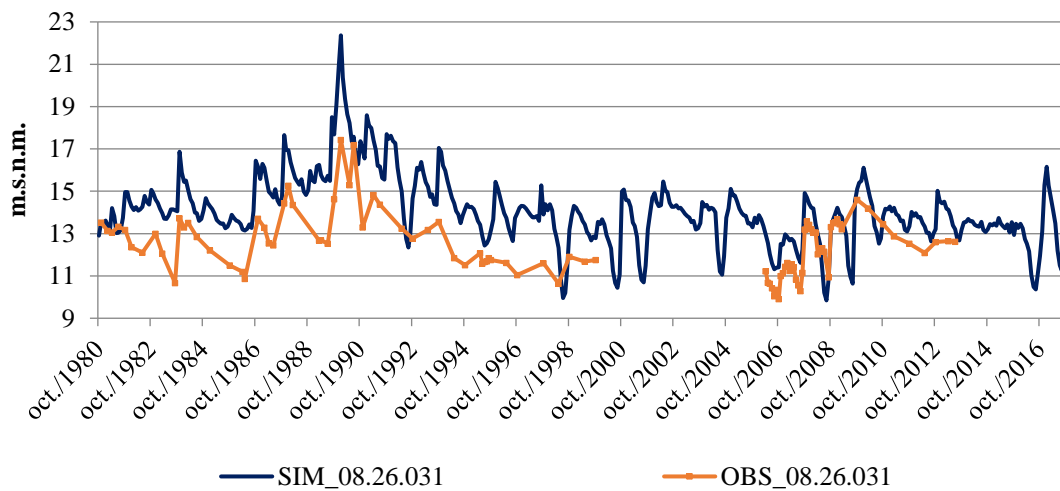
08.26.015



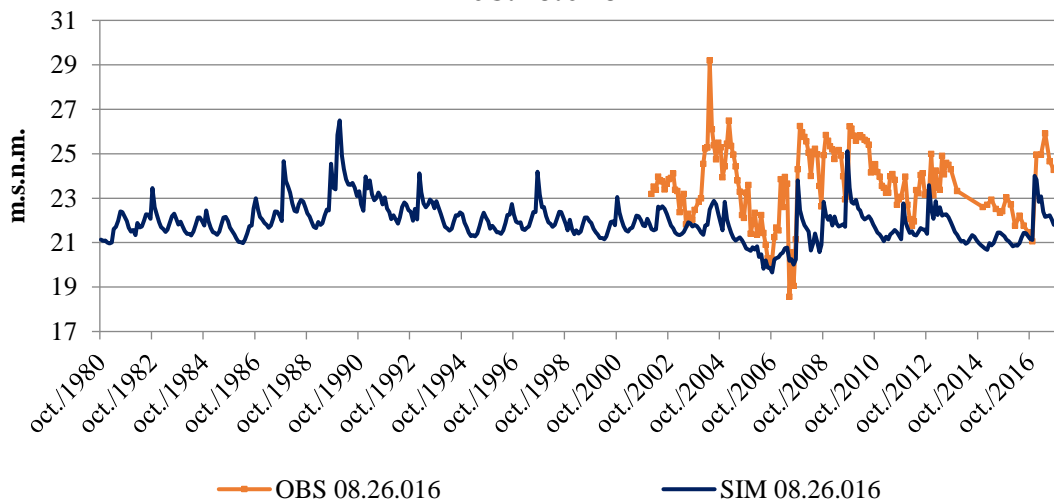




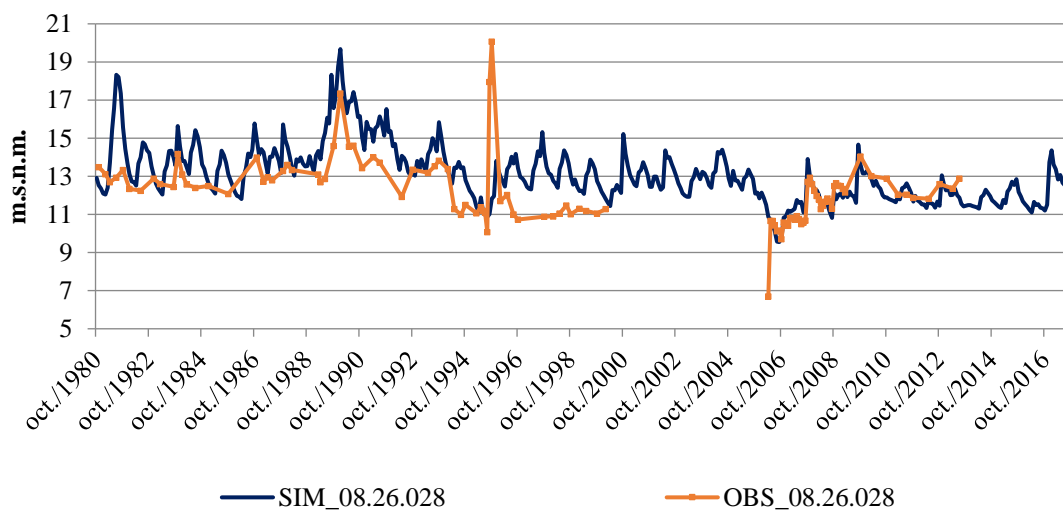
08.26.031

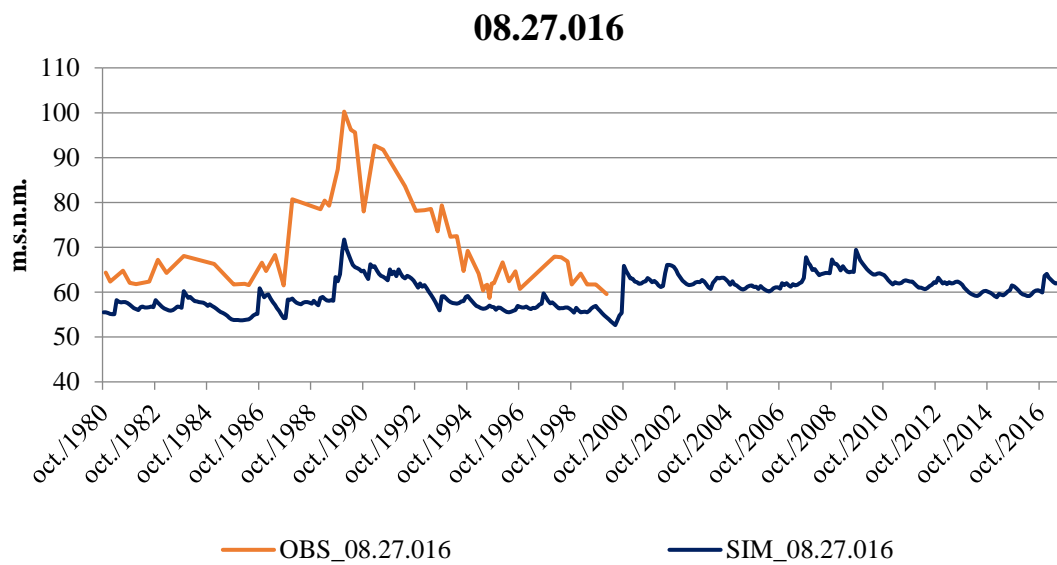
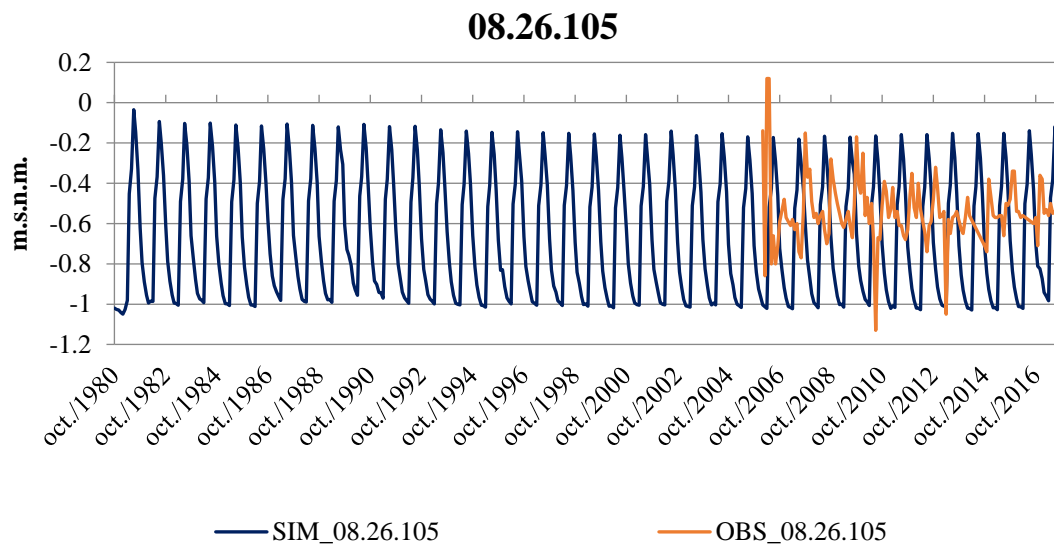
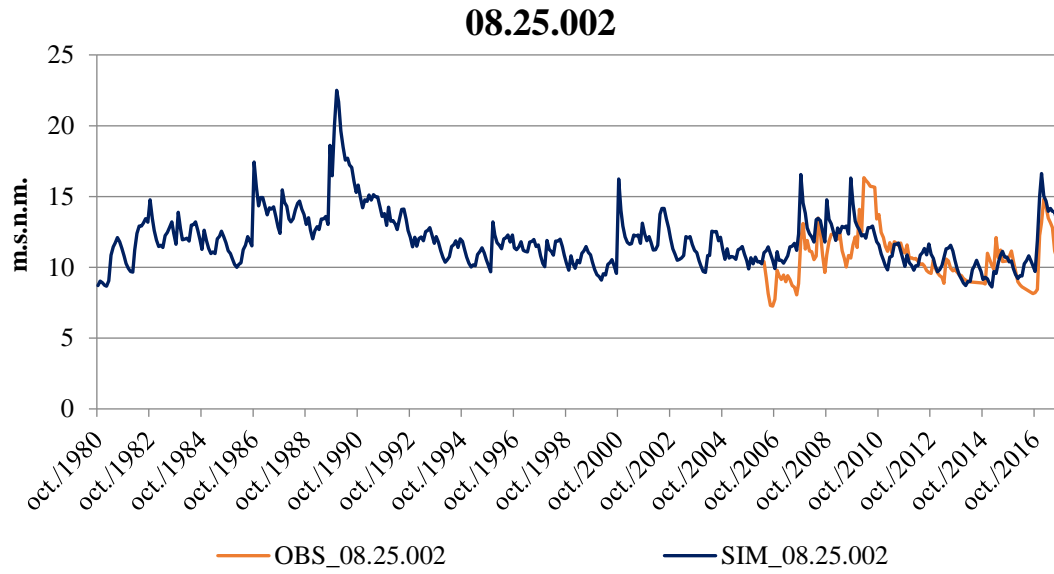


08.26.016



08.26.028





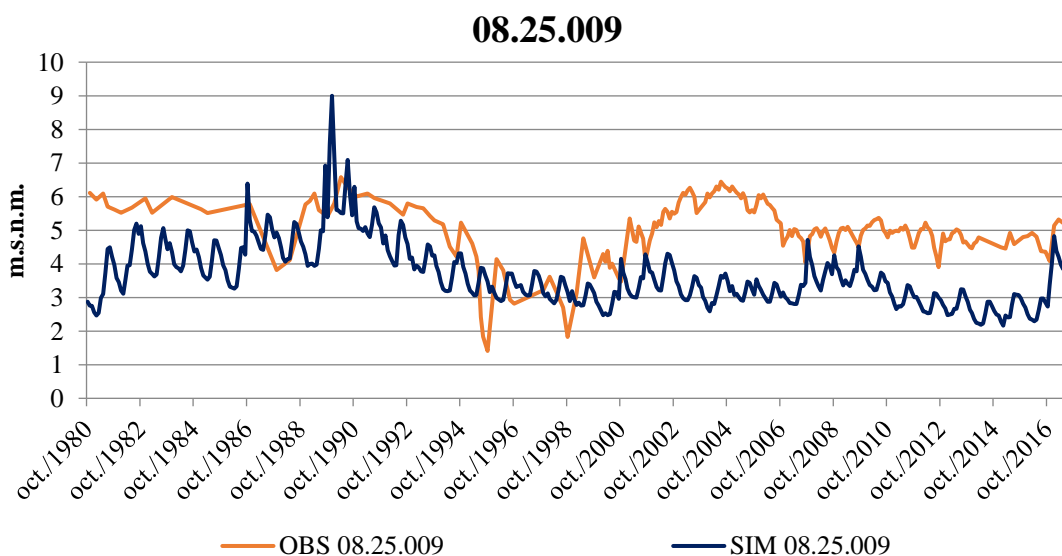
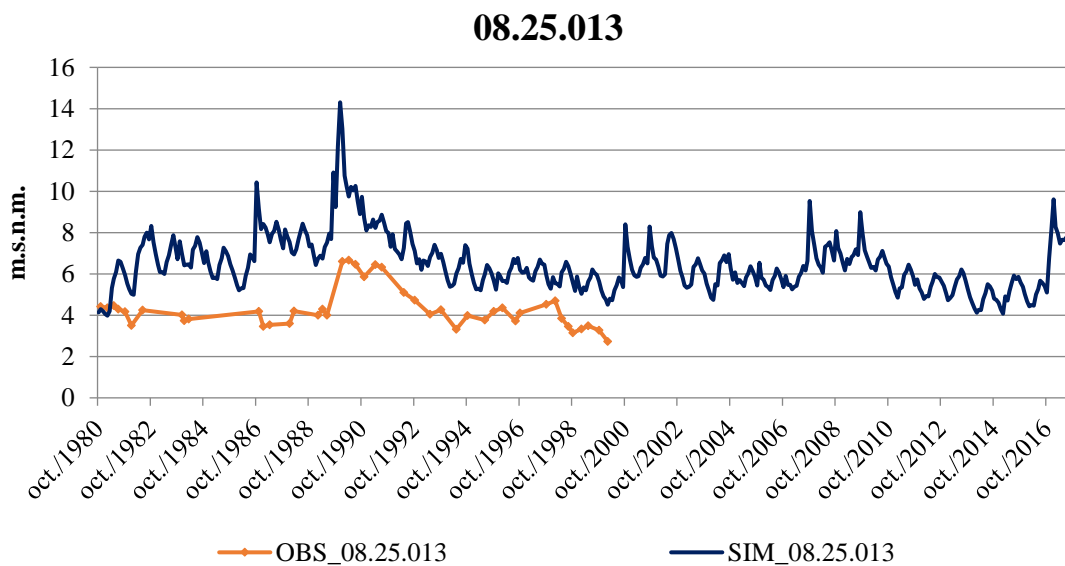
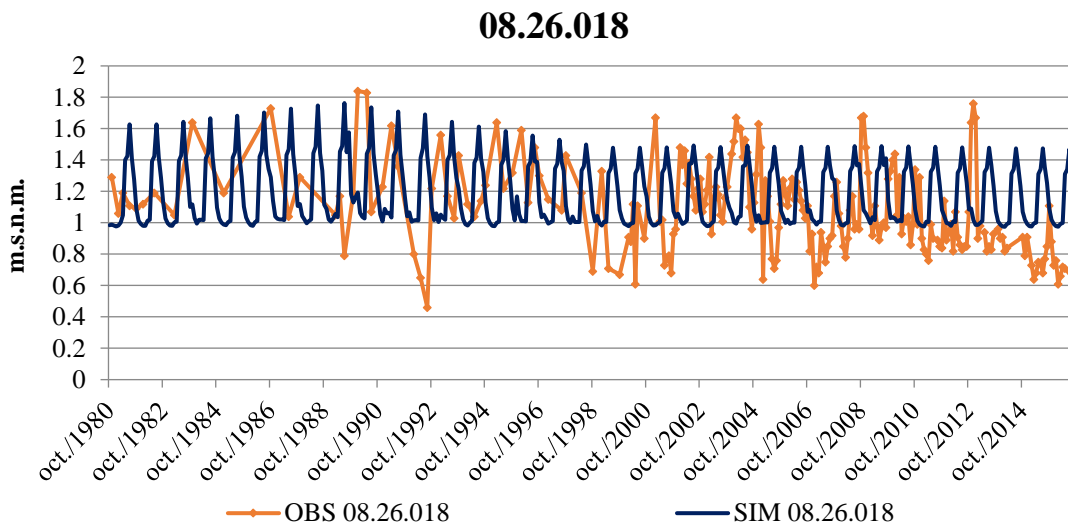


Figura 29. Calibración de las series piezométricas de los piezómetros seleccionados. Fuente: Elaboración propia.

Mediante el análisis visual de los piezómetros se puede valorar el ajuste de la calibración. No todos los piezómetros se ajustan de la misma manera, algunos reproducen bien la altura de agua en ese punto, pero no consiguen reproducir correctamente la tendencia de la serie piezométrica y viceversa. Otros no disponen de serie observada completa o solamente reproducen una parte de la serie correctamente.

El piezómetro 08.27.009 reproduce muy bien la serie observada, exceptuando el periodo de sequía del año 2005 que sufre un descenso piezométrico muy significativo. El modelo no consigue reproducir este descenso debido a que este punto se encuentra en el borde permeable con la masa de agua subterránea Sierra del Ave y la cercana ubicación de pozos de sequía pertenecientes a esta masa contigua ha podido causar esta bajada tan acusada.

En el caso del piezómetro 08.25.010 disponemos de la serie casi completa para el periodo de estudio. En este caso los primeros diez años presentan una ligera diferencia de niveles que a partir del año 1990 se reproducen correctamente.

Al observar el piezómetro 08.23.006 vemos como reproduce bien los niveles de agua de los primeros años y simula perfectamente la subida brusca de la piezometría del año 1999. La bajada de estos niveles, en cambio, se reproduce demasiado pronto, cuando en la realidad el agua es retenida más tiempo creando una bajada ligeramente desfasada a la simulada.

Se ha seleccionado el piezómetro 08.27.016 debido a su ubicación. Se encuentra en un punto crítico ya que en esta zona los niveles son muy altos en comparación con los niveles observados pocos kilómetros al sur del mismo. Aunque no se ha conseguido simular perfectamente la serie observada se considera de suma importancia el hecho de que el modelo reproduzca este brusco cambio de niveles piezométricos, ya que inmediatamente al sur de dicha zona los niveles son inferiores a 25 m.s.n.m.

Para los piezómetros 08.26.018 y 08.25.009 el modelo consigue simular la altura de agua en el rango correcto pero la tendencia no es bien reproducida. Este cambio puede ser debido a procesos que no se han podido introducir al modelo y que son habituales en la realidad. Observando la tendencia general de los demás piezómetros, éstos no siguen el mismo patrón y es por eso por lo que las series no tienen el mismo comportamiento.

El piezómetro 08.25.013, en cambio, reproduce bien la tendencia de los niveles piezométricos pero está desplazado hacia niveles ligeramente superiores que los observados.

Todas estas diferencias pueden ser causadas por procesos no introducidos al modelo, por errores de calibración, por errores en los datos de entrada o por errores de medición en la cota de los piezómetros, entre otros motivos. Analizados estos piezómetros, se considera un ajuste razonable de la calibración ya que en la mayoría de los casos se reproducen las series observadas con mucha exactitud.

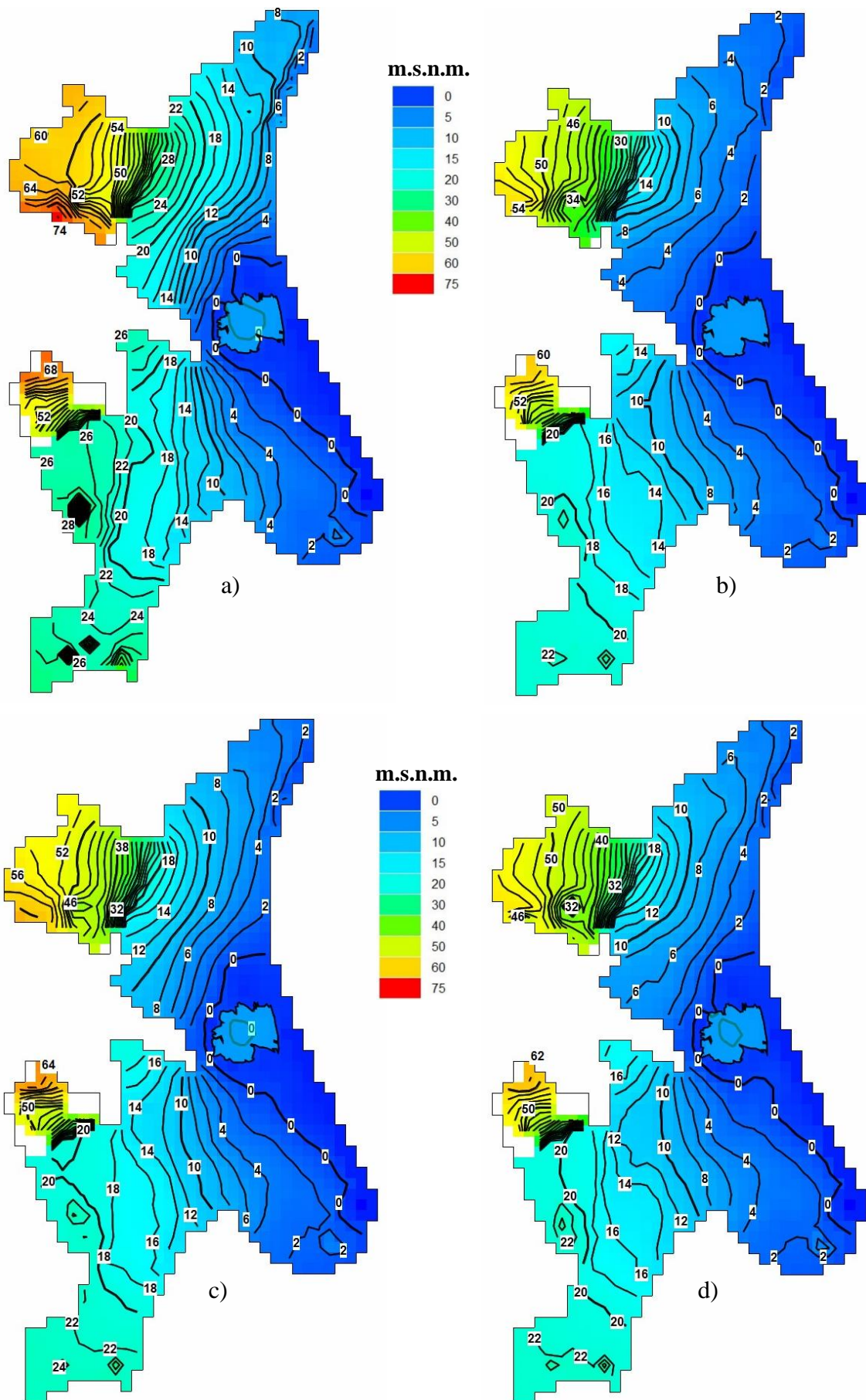


Figura 30. Mapas piezométricos del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30 se presentan los mapas piezométricos para cuatro momentos considerados clave en el periodo de simulación. El momento de aguas altas (a) corresponde al del mes de diciembre del año 1989 y el de aguas bajas (b) a mayo de 2015. Se ha considerado como valor medio representativo (c) el paso de tiempo correspondiente a noviembre del año 2000 y el último paso de tiempo simulado (d) es en el mes de septiembre del año 2017.

Como se describe en el apartado del modelo conceptual las isopiezas son, generalmente, paralelas a la línea de costa avanzando en dirección este. En comparación con la piezometría del modelo en régimen no influenciado se aprecia un ligero descenso piezométrico con mayor importancia en el área del parque de la Albufera, debido a la extracción de agua mediante las acequias o canales de riego y los bombeos. Es este cambio en la piezometría, el que causa el cambio de funcionamiento hidrodinámico del lago de la Albufera, pasando de ser ganador a ser perdedor.

En la parte noroeste del acuífero se aprecia como hay un ascenso significativo en la piezometría hacia el interior. También se observa una depresión piezométrica causada por las extracciones de agua subterránea mediante bombeos.

En la parte sur del sistema, en la zona de Catadau observamos como algunas celdas se secan en los límites del acuífero. Este resultado del modelo se genera debido a la compleja distribución vertical de las capas, ya que en los límites su grosor disminuye considerablemente hasta ser casi nulo. Es por ello, por lo que las celdas aparecen como secas, porque el nivel del agua simulado está por debajo de la base del acuífero.

Como se menciona anteriormente en este documento, en esta zona de Catadau existe un gradiente piezométrico muy importante pasando inmediatamente de valores superiores a 50 m.s.n.m. a valores por debajo de los 25 m.s.n.m. Este fenómeno se ha conseguido reproducir como se aprecia claramente en los mapas piezométricos de la Figura 30.

En la parte suroeste del modelo se aprecian algunos conos de elevación de los niveles piezométricos. En este caso, también son a causa de la compleja geometría de las capas, ya que cerca de los límites del acuífero disminuyen de grosor con más frecuencia que en el resto de la superficie.

A continuación en la Tabla 6 se muestran los parámetros estadísticos de la calibración de la piezometría para el modelo en régimen influenciado.

Tabla 6. Indicadores estadísticos de la simulación en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro estadístico	Valor	Unidades
Número de puntos de control	18	piezómetros
Valor residual medio absoluto	2.13	metros
Coefficiente de correlación	0.975	-
NRMSE	23.95	%
Criterio de Nash - Sutcliffe	0.946	-

5.2.2.3. Relación río – acuífero

La relación entre el principal río de la demarcación, el río Júcar y el acuífero es un aspecto de una complejidad importante debido a la gran cantidad de interacciones que tiene el río en su tramo bajo. Unido a la extensa actividad agrícola existe una gran cantidad de detracciones y aportes al río, de origen tanto superficial como subterráneo.

Debido a la complejidad de análisis de esta cantidad de datos, se ha optado por utilizar como referencia el trabajo realizado dentro del “Estudio de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en las cuencas media y baja de los ríos Júcar y Turia” (CHJ, 2002) denominado como “Contraste del modelo de retornos de aguas superficiales y la modelación distribuida del acuífero de la Plana Sur” en el cual obtienen una serie mensual de los retornos de riego subterráneos al río Júcar desde el azud de Antella hasta el Azud de Sueca.

Con estos datos, se ha optado por analizar el origen de los aportes subterráneos al río Júcar en el modelo MODFLOW, objeto de este estudio. Se quiere conocer el efecto de los retornos sobre el volumen subterráneo aportado al río. Para ello se ha simulado el modelo en régimen influenciado sin la recarga producida por los retornos de riego y se ha observado el cambio de río ganador a río perdedor. Asumiendo que el comportamiento del acuífero es lineal junto con el conocimiento de que los retornos de riego son más del 75% de la recarga total del acuífero, se ha llegado a la conclusión de que los aportes subterráneos al río Júcar en este tramo son producidos mayormente por los retornos de riego. Por eso, se ha procedido a calibrar el funcionamiento del río Júcar con estos valores de referencia del modelo de retornos de riego de la CHJ. El resultado de dicha calibración se puede ver en la Figura 31.

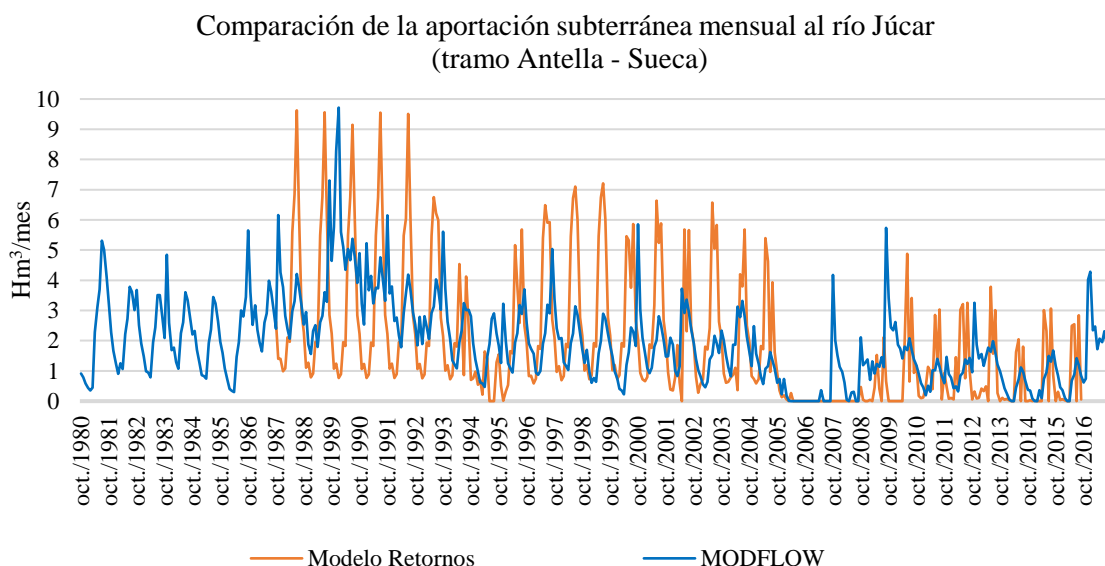


Figura 31. Calibración de los aportes subterráneos al río Júcar desde el azud de Antella hasta el azud de Sueca. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.

6. Aplicación del modelo

Una de las aplicaciones más útiles los modelos es la de predecir el funcionamiento futuro del sistema bajo condiciones hipotéticas. Este tipo de condiciones impuestas, llamadas escenarios, suelen ser de carácter extraordinario y normalmente desfavorable, ya que se pretende conocer la respuesta del sistema cuando es sometido a fuertes presiones de diverso origen.

Los parámetros del modelo calibrado se mantienen y son las acciones externas las que cambian para simular las condiciones futuras, cuyos efectos se quieren evaluar.

En este caso se ha optado por analizar el comportamiento de la masa de agua subterránea frente a una situación futura de sequía. Se considera de especial interés debido a la posible puesta en marcha de pozos de sequía y de restricciones superficiales para regadío por la Confederación Hidrográfica del Júcar con el objetivo de paliar los efectos de la sequía. Puede llegar a ser una herramienta muy valiosa a la hora de actuar frente a la sequía y gestionar el funcionamiento de los pozos o de otras posibles medidas, ya que permite comparar la respuesta del acuífero para cada actuación propuesta.

Se plantean diversos escenarios partiendo de la simulación del modelo en régimen influenciado y añadiendo diez años. Esto es, el periodo simulado en los escenarios comienza en octubre del 2017 con el resultado final del régimen influenciado como precedente y termina en septiembre del 2027, año hasta el que se plantearon las actuaciones sobre el sistema en el Plan Hidrológico del Júcar (CHJ, 2015).

Se plantean cinco años de sequía en los cuales los datos de entrada se obtienen del periodo seco entre los años 1980/81 y 1884/85. Una vez finalizada la sequía se plantean otros cinco años de recuperación dónde se ha utilizado un año medio para representar este periodo de mejoría.

A la hora de analizar la afección de los escenarios en el entorno se ha optado por elegir tres elementos importantes en el funcionamiento del acuífero: los aportes subterráneos al Parque Natural de la Albufera, las salidas al mar y el aporte subterráneo al río Júcar. Además de esto, se muestra el balance simplificado y la evolución piezométrica de los diferentes sectores de sequía.

Es necesario considerar que estos escenarios están sujetos a una gran incertidumbre debido al desconocimiento de las condiciones futuras, pero sirven de gran ayuda para disponer de una aproximación de la respuesta del sistema bajo estas condiciones tan desfavorables.

Los escenarios elegidos son los siguientes:

- Escenario 0: Periodo de sequía sin actuaciones
- Escenario 1: Sequía con restricciones de riego
- Escenario 2: Sequía con restricciones de riego y pozos de sequía en fase 1
- Escenario 3: Sequía con restricciones de riego y pozos de sequía en fase 2
- Escenario 4: Sequía con restricciones de riego y pozos de sequía en fase 3

6.1. Escenario 0: Periodo de sequía sin actuaciones

Este escenario sirve para conocer el comportamiento del sistema cuando la sequía solo es meteorológica y no se toma ninguna medida para combatirla. Los bombeos y los retornos se mantienen constantes y no se lleva a cabo la puesta en marcha de ningún pozo de sequía. Es una buena referencia para comparar los efectos de las medidas propuestas posteriormente.

En la Tabla 7 se muestra el balance de masa para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

Tabla 7. Resumen del balance de masa para el escenario 0. Periodo 1980/81 - 2026/27. Fuente: Elaboración propia.

ENTRADAS		Hm ³ /año	SALIDAS		Hm ³ /año
Laterales		66.45	Laterales		4.23
	Plana de Sagunto	0.02		Plana de Jaraco	4.23
	Liria Casinos	1.22	Extracción Bombeo		79.10
	Buñol Cheste	46.37	Emergencias		141.09
	La Contienda	8.02		Canales	134.79
	Sierra del Ave	4.95		Ullales	1.08
	Caroch Norte	0.41		Humedales	5.21
	Sierra de las Agujas	5.45	Salidas al Mar		66.90
Infiltración Riego		189.88		Norte	46.45
Infiltración Lluvia		65.20		Sur	20.45
Perdidas lago Albufera		8.71	Salidas Ríos		46.51
Perdidas Ríos		8.41		Júcar	31.67
	Magro	2.57		Turia	0.38
	Sellent	0.16		Verde	10.43
	Albaida	5.68		Rambla del Poyo	4.03
TOTAL		338.66	TOTAL		337.82

Se puede apreciar, en relación al balance del modelo en régimen influenciado, que no hay un cambio significativo en los diferentes elementos del balance. Los valores medios varían ligeramente, pero puede ser debido a que se ha asumido como constante el año 2015/16 para bombeos y retornos. En la Figura 32 se puede apreciar la evolución temporal de dicho balance para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

Balance anual (1980/81 - 2026/27)

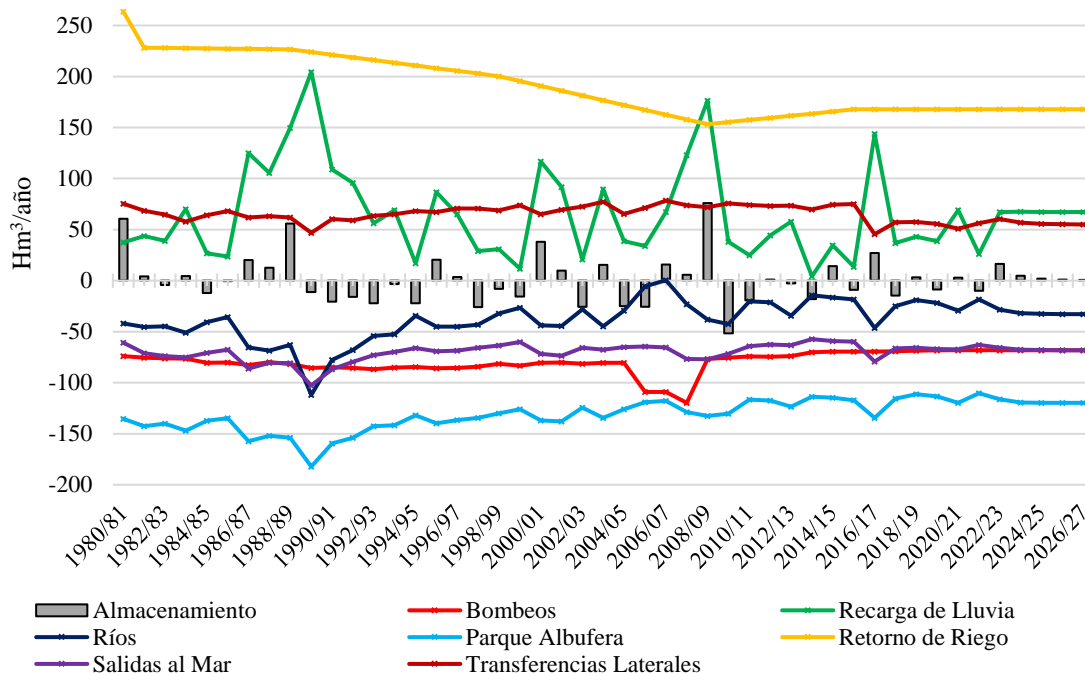
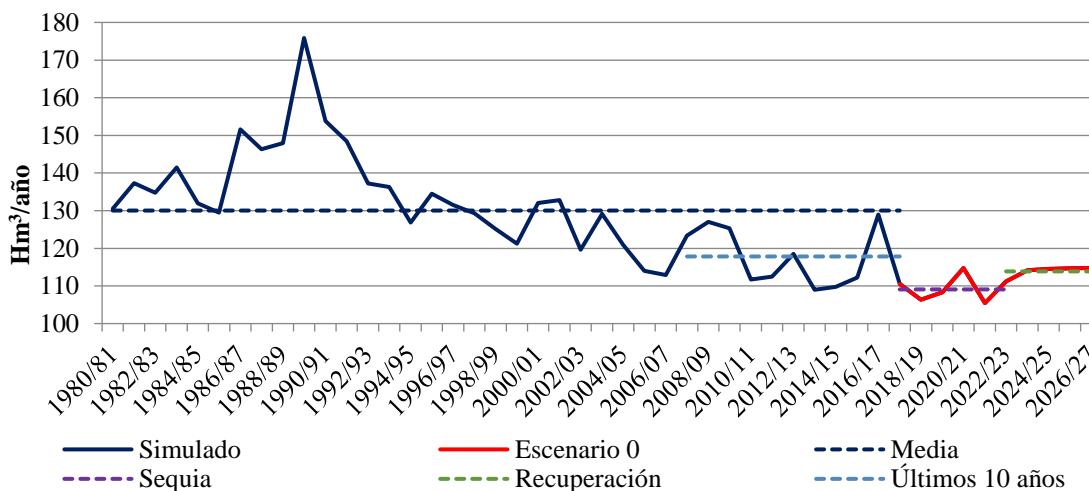


Figura 32. Evolución de las componentes del balance para el escenario 0. Fuente: Elaboración propia.

Como se ha comentado anteriormente se aprecia cómo los años de recuperación adoptan los valores medios asignados y por lo general se puede afirmar que la sequía meteorológica no genera grandes cambios en el funcionamiento general del sistema.

A continuación, en la Figura 33 se muestra la evolución temporal de los aportes a los 3 elementos seleccionados para analizar la afección y seguimiento de la sequía. Se muestran en conjunto los valores medios de los aportes para el periodo del modelo en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17), para el periodo de los últimos 10 años (2007/08 – 2016/17), para el periodo de sequía (2017/18 – 2021/22) y para el periodo de recuperación (2022/23 – 2026/27).

Aportes subterráneos a la Albufera



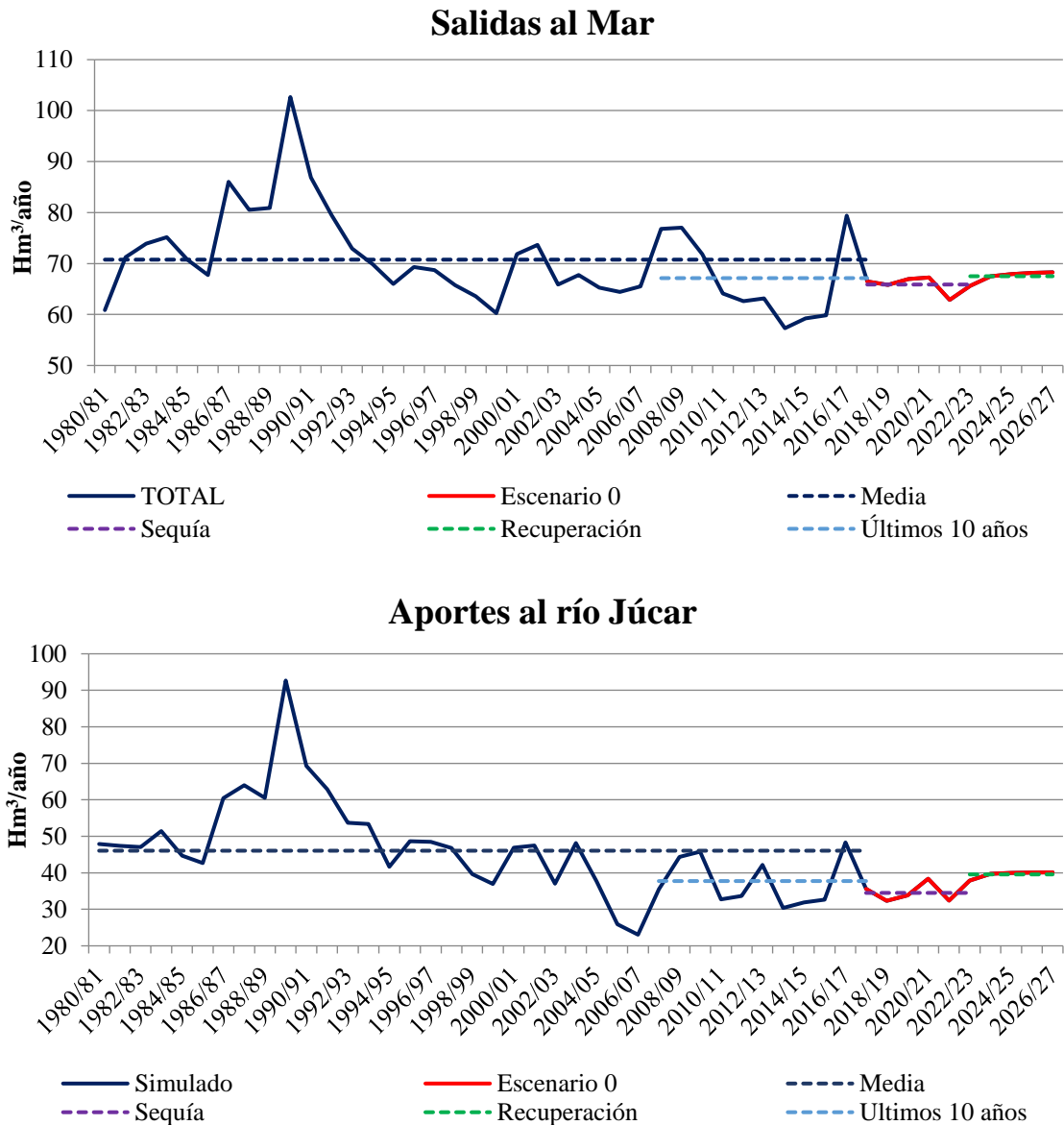


Figura 33. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 0.
Fuente: Elaboración propia.

Para poder evaluar numéricamente los anteriores gráficos se presenta la Tabla 8 con los porcentajes de reducción de los aportes. Se muestran los porcentajes de reducción en el periodo de sequía y en el periodo de recuperación respecto del valor medio de los volúmenes del periodo completo de la simulación en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17) y respecto del valor medio de los volúmenes del periodo de los últimos 10 años simulados (2007/08 – 2016/17).

Tabla 8. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 0. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 0	Afección a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo analizado	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Albufera	-16%	-7%	-12%	-3%
Salidas al Mar	-7%	-2%	-5%	1%
Norte	-8%	-1%	-6%	1%
Sur	-4%	-3%	-1%	0%
Río Júcar	-25%	-9%	-14%	5%

Los valores mostrados indican que el río Júcar ha sufrido el mayor porcentaje de reducción con un 25% respecto de la media del periodo completo del modelo en régimen influenciado y han sido las salidas al mar las menos afectadas. Es importante analizar, también, el porcentaje de reducción respecto a los últimos 10 años ya que este valor se puede considerar como más próximo al efecto directo de la sequía simulada en este escenario.

La Figura 34 muestra la evolución en el cambio del almacenamiento y el valor acumulado de dicho cambio.

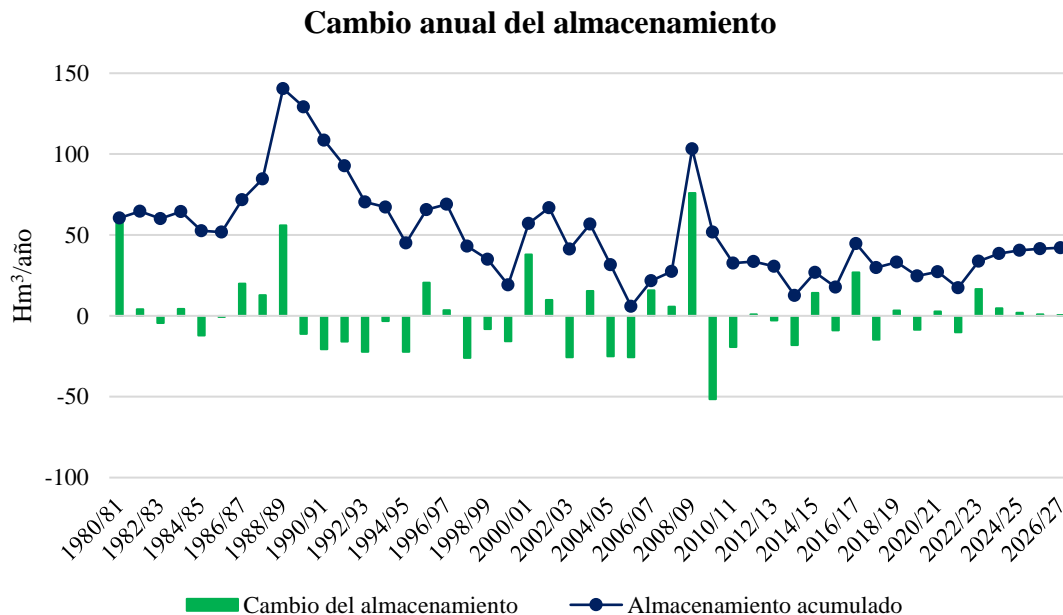


Figura 34. Evolución del cambio del almacenamiento del modelo para el escenario 0. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Escenario 1: Sequía con restricciones de riego

En este escenario se simula una situación en la que durante el periodo de sequía fijado (2017/18 – 2021/22) se aplican restricciones en la demanda bruta de las unidades de demanda agrícola de la zona. Las reducciones son las fijadas para este tipo de actuaciones que vienen recogidas en el Plan Especial de Sequía de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2017) y son las siguientes:

- 25% de reducción para las unidades de demanda agrícola pertenecientes al sistema de explotación Turia.
- 15% de reducción para las unidades de demanda agrícola pertenecientes al sistema de explotación Júcar.
- No se aplica reducción a la unidad de demanda agrícola Acequia del Oro.
- La unidad de demanda agrícola Hoya de Buñol y Chiva está situada en un 77% en el sistema de explotación Júcar y en un 23% en el sistema de explotación Turia, por ello la reducción que se aplica en esta superficie es del 22,7%.

Se calculan los retornos de riego teniendo en cuenta estas reducciones en la demanda bruta y se introducen al modelo. Una vez finalizado el periodo de sequía se retira esta medida y se vuelve a simular los retornos de riego de la misma manera que anteriormente para el periodo de recuperación. A continuación se observa el balance simplificado para este escenario en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen del balance de masa para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

ENTRADAS	Hm ³ /año	SALIDAS	Hm ³ /año
Laterales	67.05	Laterales	4.21
Plana de Sagunto	0.02	Plana de Jaraco	4.21
Liria Casinos	1.24	Extracción Bombeo	79.07
Buñol Cheste	46.59	Emergencias	139.92
La Contienda	8.12	Canales	133.67
Sierra del Ave	5.17	Ullales	1.06
Caroch Norte	0.41	Humedales	5.20
Sierra de las Agujas	5.49	Salidas al Mar	66.25
Infiltración Riego	186.29	Norte	45.98
Infiltración Lluvia	65.20	Sur	20.27
Perdidas lago Albufera	8.76	Salidas Ríos	45.50
Perdidas Ríos	8.41	Júcar	30.90
Magro	2.57	Turia	0.37
Sellent	0.16	Verde	10.30
Albaida	5.68	Rambla del Poyo	3.94
TOTAL	335.76	TOTAL	334.94

Se puede apreciar respecto del balance del Escenario 0 como no hay un cambio significativo en los diferentes elementos, pero si se aprecia un descenso en la infiltración por retornos de riego. Los valores medios varían poco debido a que son valores medios de una serie larga en la que las medidas se aplican únicamente durante los 5 años de sequía. Para ver mejor los efectos de dichas medidas en el periodo deseado se presenta la Figura 35 en la que se puede apreciar la evolución temporal de dicho balance para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

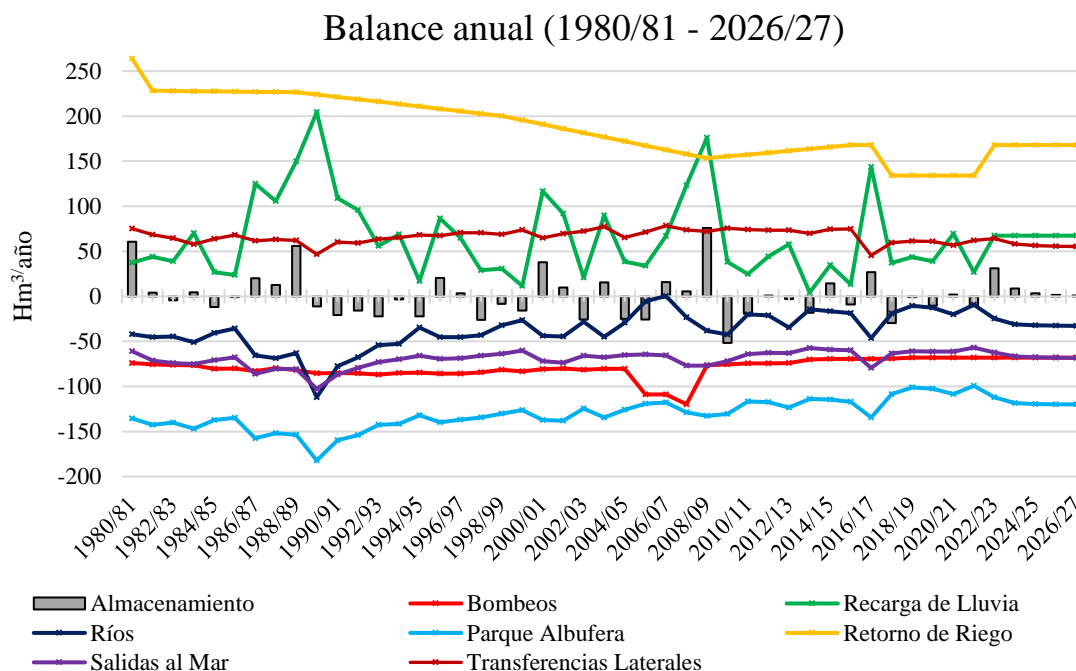


Figura 35. Evolución de las componentes del balance para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico del balance del escenario 1 destaca la reducción de los retornos de riego para los años correspondientes al periodo de sequía. Esta reducción tiene afección en los demás elementos del balance como puede ser la reducción de salidas al mar, al parque de la Albufera o a los ríos. Por lo demás, no se aprecia ningún bombeo excepcional y los valores en el periodo de recuperación se mantienen constantes. Por lo tanto se puede afirmar que esta medida genera efectos en el funcionamiento del sistema pero su afección no es muy importante.

A continuación, en la Figura 36 se muestra la evolución temporal de los aportes a los 3 elementos seleccionados para analizar la afección y seguimiento de la sequía. Se muestran en conjunto los valores medios de los aportes para el periodo en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17), para el periodo de los últimos 10 años (2007/08 – 2016/17), para el periodo de sequía (2017/18 – 2021/22) y para el periodo de recuperación (2022/23 – 2026/27).

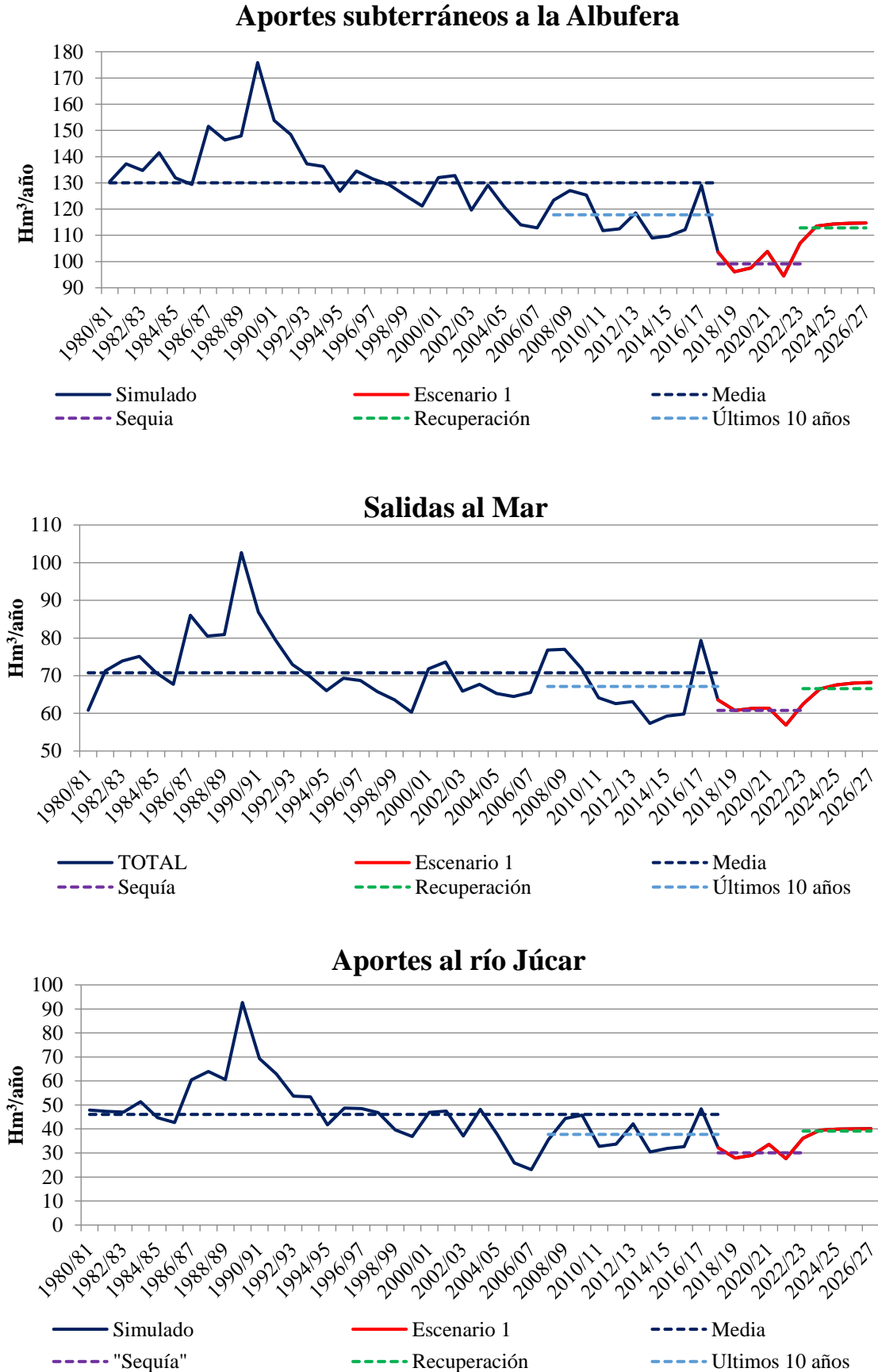


Figura 36. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

Para poder evaluar numéricamente los anteriores gráficos se presenta la Tabla 10 con los porcentajes de reducción de los aportes. Se muestran los porcentajes de reducción en el periodo de sequía y en el periodo de recuperación respecto del valor medio de los volúmenes del periodo completo de la simulación en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17) y respecto del valor medio de los volúmenes del periodo de los últimos 10 años simulados (2007/08 – 2016/17).

Tabla 10. AfECCIÓN de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 1	Afección a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo analizado	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Albufera	-24%	-16%	-13%	-4%
Salidas al Mar	-14%	-9%	-6%	-1%
Norte	-16%	-9%	-8%	-1%
Sur	-11%	-10%	-1%	0%
Río Júcar	-35%	-20%	-15%	4%

Los valores mostrados indican que el río Júcar ha sufrido el mayor porcentaje de reducción con un 35% respecto de la media del periodo completo del modelo en régimen influenciado y han sido las salidas al mar las menos afectadas al igual que en el escenario anterior. En este caso los aportes subterráneos al parque de la Albufera sufren un descenso más acusado llegando al 24 % respecto de la media del periodo completo simulado.

La Figura 37 muestra la evolución en el cambio del almacenamiento y el valor acumulado de dicho cambio.

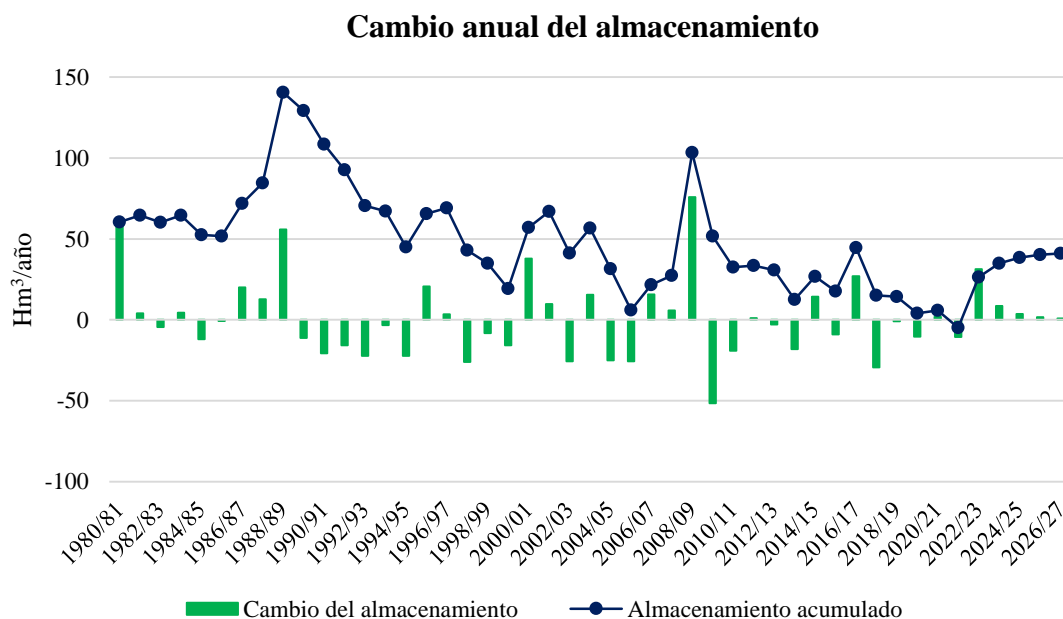


Figura 37. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

6.3. Escenario 2: Sequía con restricciones y pozos de sequía en fase 1

Mediante la simulación de este escenario se analiza la posibilidad de emplear agua subterránea proveniente de la extracción de pozos de sequía con el objetivo de disponer de un recurso extraordinario durante el periodo de sequía.

Este escenario parte con la base del escenario 1, esto es, se mantienen las restricciones en el riego de cultivos agrícolas durante la sequía y, además, se extrae agua mediante pozos de sequía.

En esta simulación se introducen al modelo los pozos de sequía recogidos en el Plan Especial de Sequía (CHJ, 2017) ubicados como muestra la Figura 38 y con una extracción de 23 hm³/año repartidos en 33 pozos. Dicha extracción se realiza únicamente durante 5 meses al año, desde mayo hasta septiembre. Esta medida se encuentra dentro de la fase 1 de activación de pozos de sequía de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

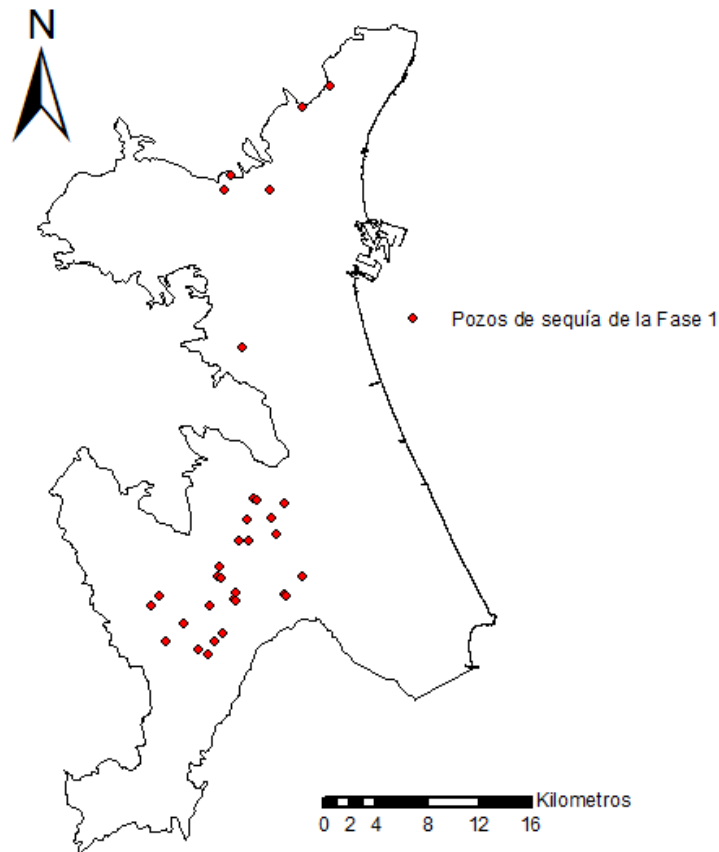


Figura 38. Ubicación de los pozos de sequía de la fase 1. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ.

En la Tabla 11, se muestra el balance de masa para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

Tabla 11. Resumen del balance de masa para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

ENTRADAS		Hm ³ /año	SALIDAS		Hm ³ /año
Laterales		67.15	Laterales		4.20
	Plana de Sagunto	0.02		Plana de Jaraco	4.20
	Liria Casinos	1.26	Extracción Bombeo		81.18
	Buñol Cheste	46.52	Emergencias		139.41
	La Contienda	8.20		Canales	133.16
	Sierra del Ave	5.24		Ullales	1.05
	Caroch Norte	0.41		Humedales	5.19
	Sierra de las Agujas	5.51	Salidas al Mar		65.61
Infiltración Riego		186.29		Norte	45.37
Infiltración Lluvia		65.20		Sur	20.24
Perdidas lago Albufera		8.77	Salidas Ríos		44.66
Perdidas Ríos		8.41		Júcar	30.27
	Magro	2.57		Turia	0.36
	Sellent	0.16		Verde	10.15
	Albaida	5.68		Rambla del Poyo	3.89
TOTAL		335.88	TOTAL		335.07

Para ver mejor los efectos de dichas medidas en el periodo deseado se presenta la Figura 39 en la que se puede apreciar la evolución temporal de dicho balance para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

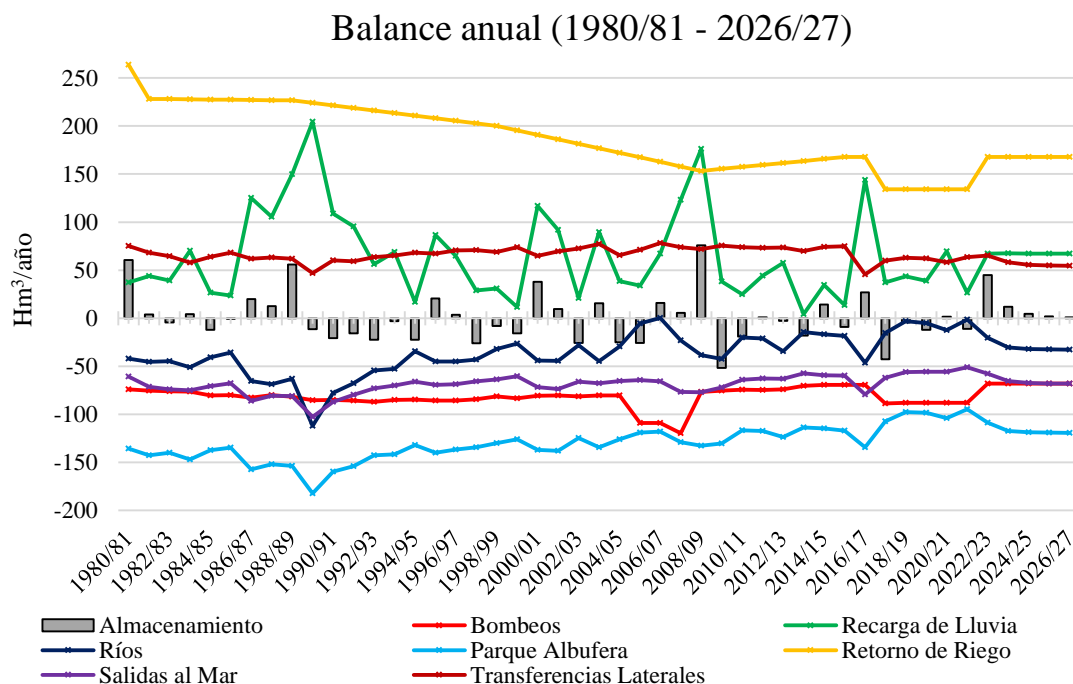
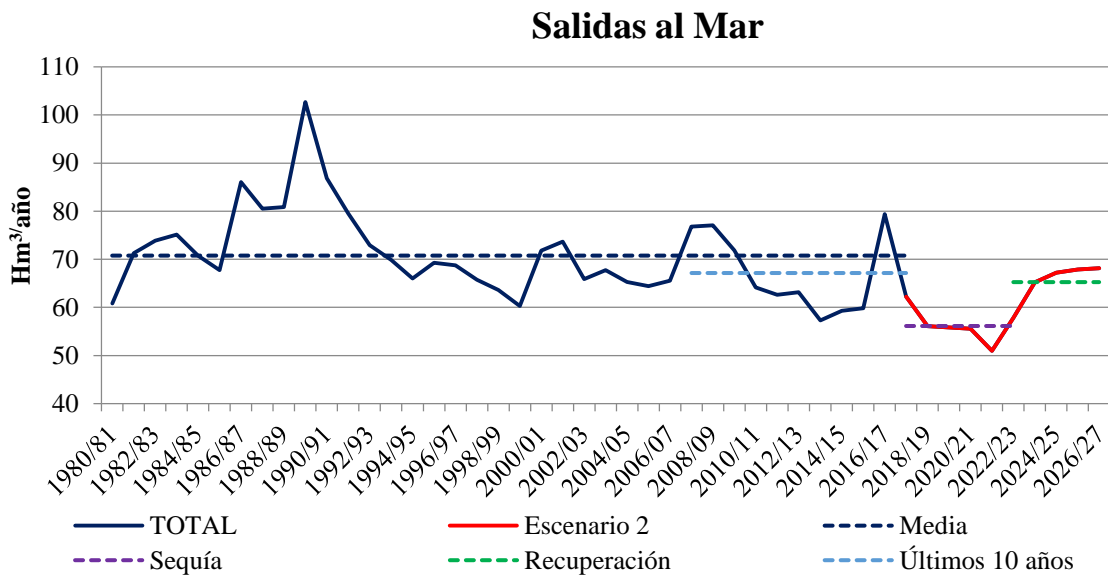
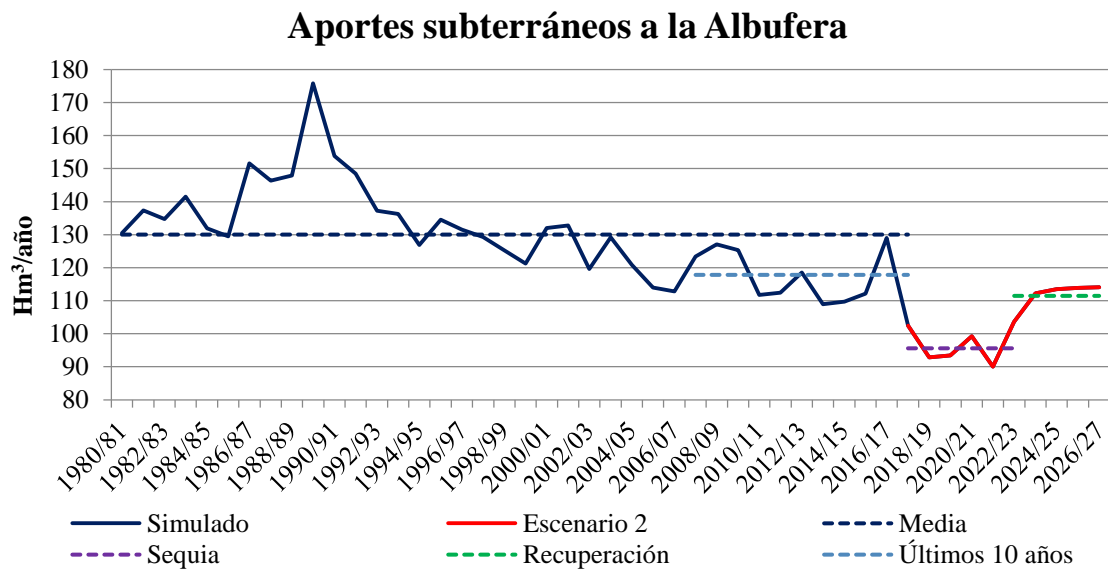


Figura 39. Evolución de las componentes del balance para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, el mayor cambio respecto al escenario 1 se aprecia en la extracción de agua subterránea por bombeo. Esta extracción aumenta en los años de sequía debido a la puesta en funcionamiento de los pozos de sequía de la fase 1. Este aumento en el volumen bombeado genera disminuciones en los demás elementos del balance como puede ser la reducción de salidas al mar, al parque de la Albufera o a los ríos. Vista la afección de esta medida se observan efectos considerables en el funcionamiento del sistema, aunque la recuperación es buena manteniendo sus valores constantes.

A continuación, en la Figura 40 se muestra la evolución temporal de los aportes a los 3 elementos seleccionados para analizar la afección y seguimiento de la sequía. Se muestran en conjunto los valores medios de los aportes para el periodo del modelo en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17), para el periodo de los últimos 10 años (2007/08 – 2016/17), para el periodo de sequía (2017/18 – 2021/22) y para el periodo de recuperación (2022/23 – 2026/27).



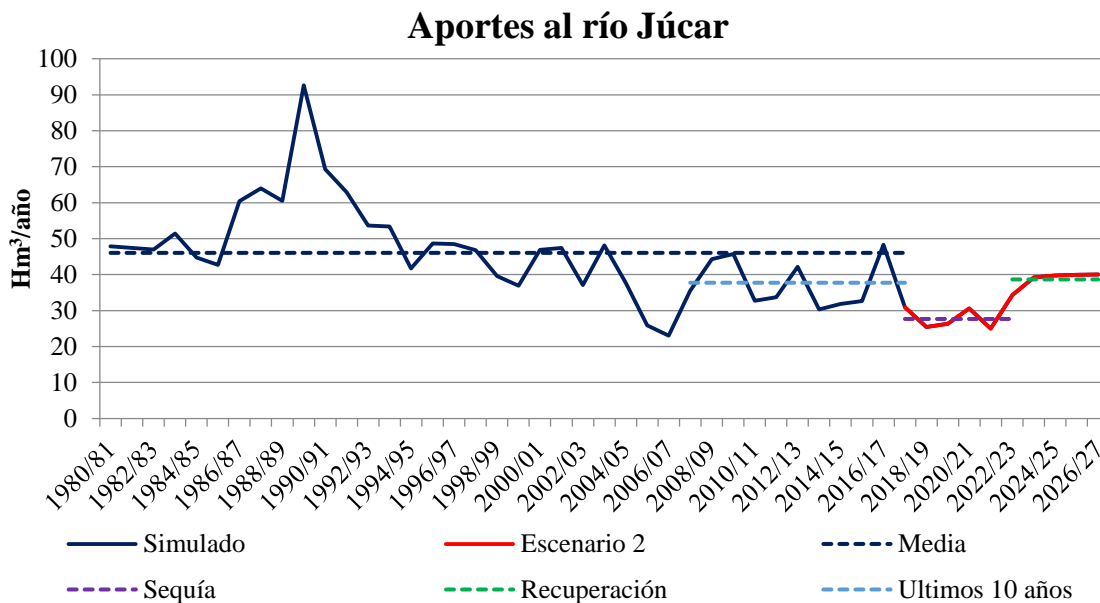


Figura 40. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

Para poder evaluar numéricamente los anteriores gráficos se presenta la Tabla 12 con los porcentajes de reducción de los aportes. Se muestran los porcentajes de reducción en el periodo de sequía y en el periodo de recuperación respecto del valor medio de los volúmenes del periodo completo de la simulación en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17) y respecto del valor medio de los volúmenes del periodo de los últimos 10 años simulados (2007/08 – 2016/17).

Tabla 12. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 2	Afección de los escenarios a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
Periodo analizado	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Albufera	-26%	-19%	-14%	-5%
Salidas al Mar	-21%	-16%	-8%	-3%
Norte	-25%	-20%	-11%	-4%
Sur	-12%	-10%	-1%	0%
Río Júcar	-40%	-27%	-16%	2%

Los valores mostrados indican que el río Júcar ha sufrido el mayor porcentaje de reducción con un 40% respecto de la media del periodo completo del modelo en régimen influenciado y han sido las salidas al mar las menos afectadas al igual que en el escenario anterior. En este caso los aportes subterráneos al Parque Natural de la Albufera sufren un descenso similar al escenario 1 llegando al 26 % respecto de la media del periodo completo simulado.

La Figura 41 muestra la evolución en el cambio del almacenamiento y el valor acumulado de dicho cambio.

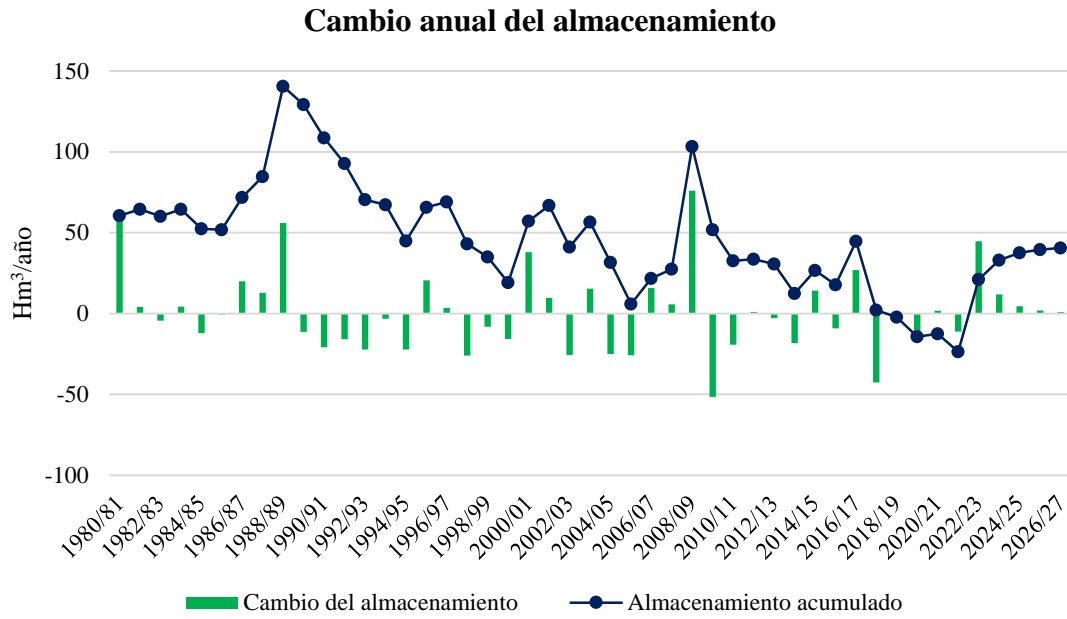


Figura 41. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

6.4. Escenario 3: Sequía con restricciones y pozos de sequía en fase 2

Este escenario parte de la base del escenario 1, esto es, se mantienen las restricciones en el riego de cultivos agrícolas durante la sequía y, además, se extrae agua mediante pozos de sequía.

En esta simulación se introducen al modelo los pozos de sequía previstos para ponerlos en funcionamiento por la Confederación Hidrográfica del Júcar correspondientes a la Fase 2, ubicados como muestra la Figura 42 y con una extracción de 34 Hm³/año (11 Hm³/año más que en la fase 1) repartidos en 51 pozos (18 pozos más que en la fase 1). Dicha extracción se realiza únicamente durante 5 meses al año, desde mayo hasta septiembre.

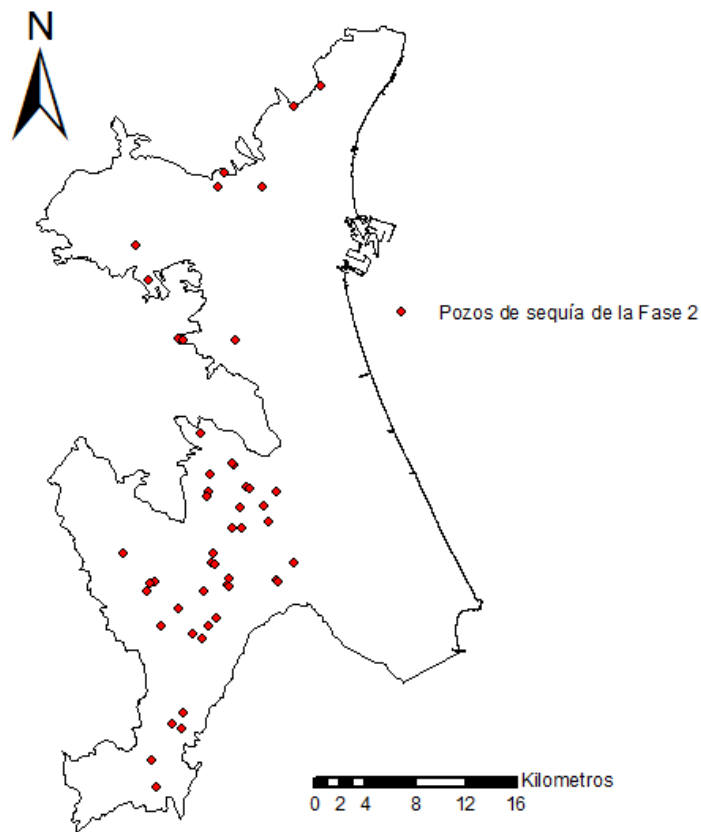


Figura 42. Ubicación de los pozos de sequía de la fase 2. Fuente Elaboración propia con datos de la CHJ.

En la Tabla 13 se muestra el balance de masa para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

Tabla 13. Resumen del balance de masa para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.

ENTRADAS		Hm ³ /año	SALIDAS		Hm ³ /año
Laterales		67.40	Laterales		4.20
Plana de Sagunto	0.02		Plana de Jaraco	4.20	
Liria Casinos	1.26		Extracción Bombeo		82.01
Buñol Cheste	46.56		Emergencias		139.30
La Contienda	8.23		Canales	133.06	
Sierra del Ave	5.40		Ullales	1.05	
Caroch Norte	0.41		Humadales	5.19	
Sierra de las Agujas	5.52		Salidas al Mar		65.57
Infiltración Riego		186.29	Norte	45.34	
Infiltración Lluvia		65.20	Sur	20.24	
Perdidas lago Albufera		8.77	Salidas Ríos		44.25
Perdidas Ríos		8.41	Júcar	29.92	
Magro	2.57		Turia	0.36	
Sellent	0.16		Verde	10.09	
Albaida	5.68		Rambla del Poyo	3.88	
TOTAL		336.14	TOTAL		335.34

Para ver mejor los efectos de dichas medidas en el periodo deseado se presenta la Figura 43, en la que se puede apreciar la evolución temporal de dicho balance para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

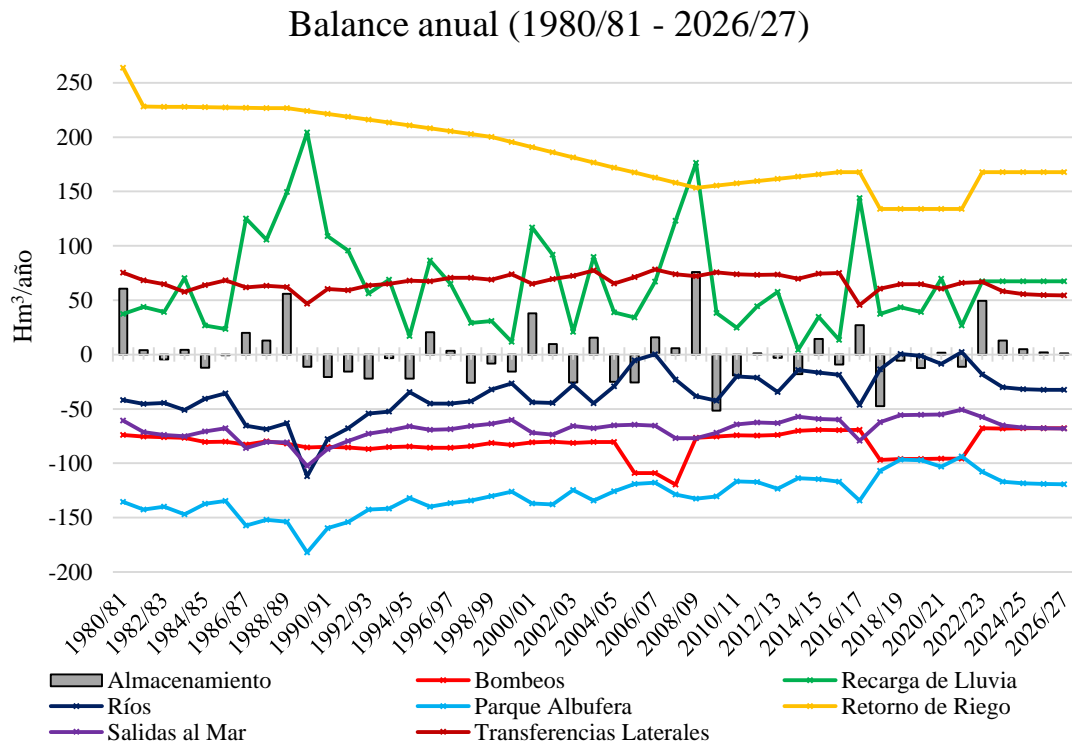
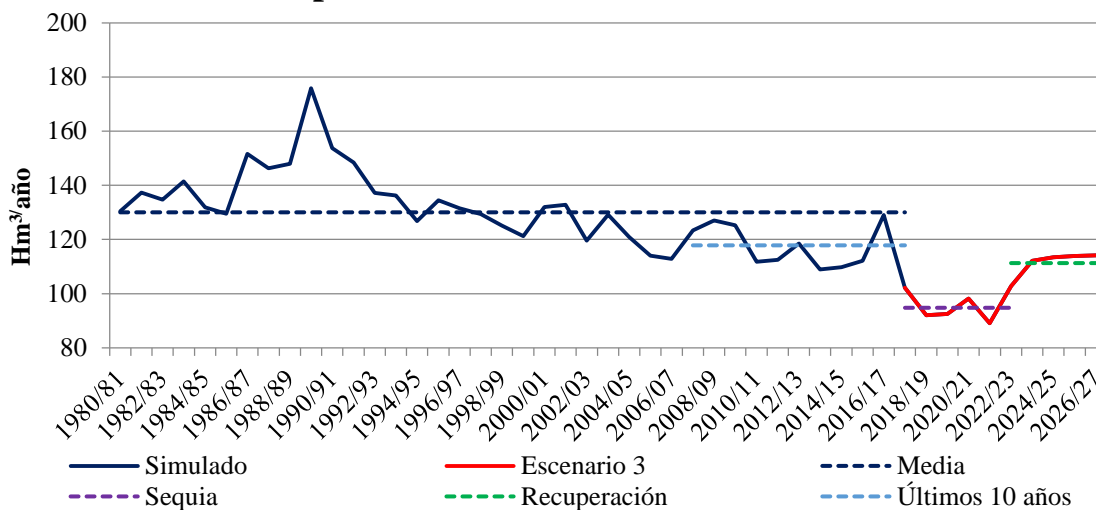


Figura 43. Evolución de las componentes del balance para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.

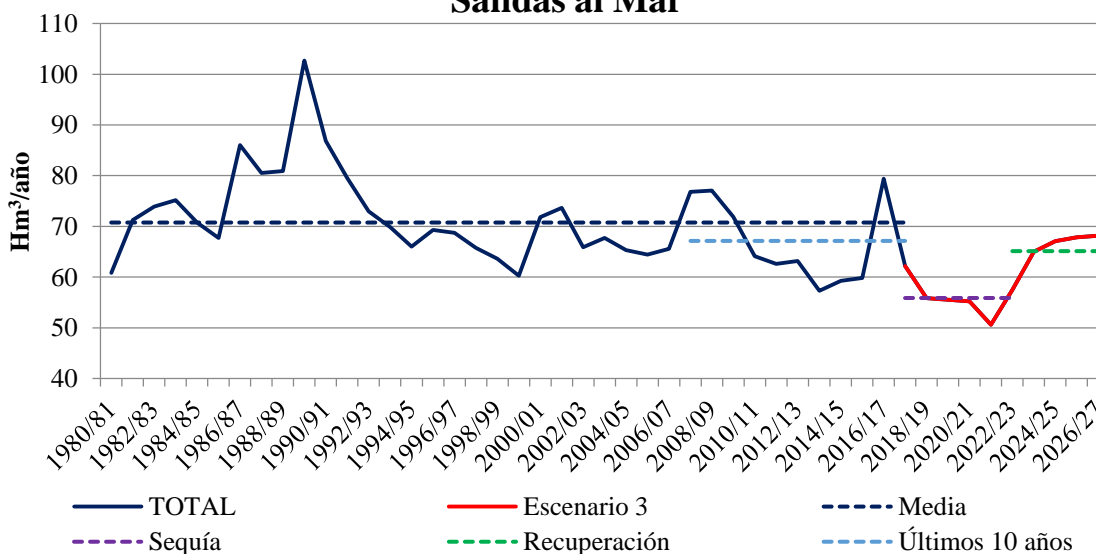
En este caso, el mayor cambio respecto al escenario 2 se aprecia en la extracción de agua subterránea por bombeo. Esta extracción aumenta en los años de sequía debido a la puesta en funcionamiento de los pozos de sequía de la fase 2. Este aumento en el volumen bombeado genera disminuciones en los demás elementos del balance como puede ser la reducción de salidas al mar, al parque de la Albufera o a los ríos. Vista la afección de esta medida se observan efectos importantes en el funcionamiento del sistema, aunque la recuperación es buena manteniendo sus valores constantes.

A continuación, en la Figura 44 se muestra la evolución temporal de los aportes a los 3 elementos seleccionados para analizar la afección de la sequía. Se muestran en conjunto los valores medios de los aportes para el periodo en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17), para el periodo de los últimos 10 años (2007/08 – 2016/17), para el periodo de sequía (2017/18 – 2021/22) y para el periodo de recuperación (2022/23 – 2026/27).

Aportes subterráneos a la Albufera



Salidas al Mar



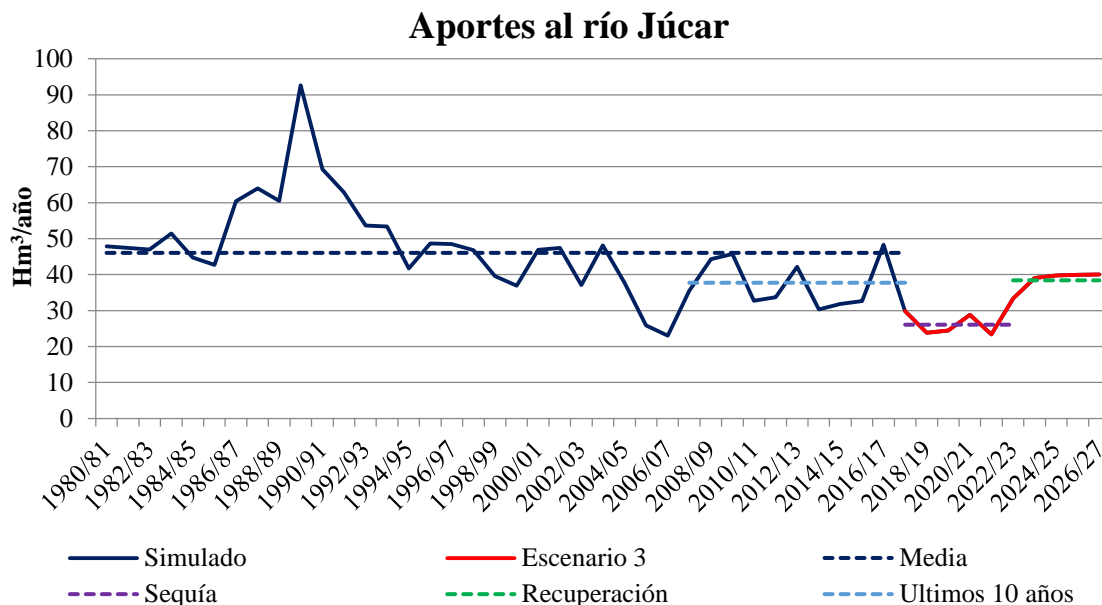


Figura 44. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia

Para poder evaluar numéricamente los anteriores gráficos se presenta la Tabla 14 con los porcentajes de reducción de los aportes. Se muestran los porcentajes de reducción en el periodo de sequía y en el periodo de recuperación respecto del valor medio de los volúmenes del periodo completo de la simulación en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17) y respecto del valor medio de los volúmenes del periodo de los últimos 10 años simulados (2007/08 – 2016/17).

Tabla 14. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 3	Afección de los escenarios a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
Periodo analizado	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Albufera	-27%	-20%	-14%	-6%
Salidas al Mar	-21%	-17%	-8%	-3%
Norte	-26%	-20%	-11%	-4%
Sur	-12%	-11%	-2%	0%
Río Júcar	-43%	-31%	-17%	2%

Los valores mostrados indican que el río Júcar ha sufrido el mayor porcentaje de reducción con un 43% respecto de la media del periodo completo del modelo en régimen influenciado y han sido las salidas al mar las menos afectadas al igual que en el escenario anterior. En este caso los aportes subterráneos al parque de la Albufera sufren un descenso similar al escenario 2 llegando al 27 % respecto de la media del periodo completo simulado.

La Figura 45 muestra la evolución en el cambio del almacenamiento y el valor acumulado de dicho cambio.

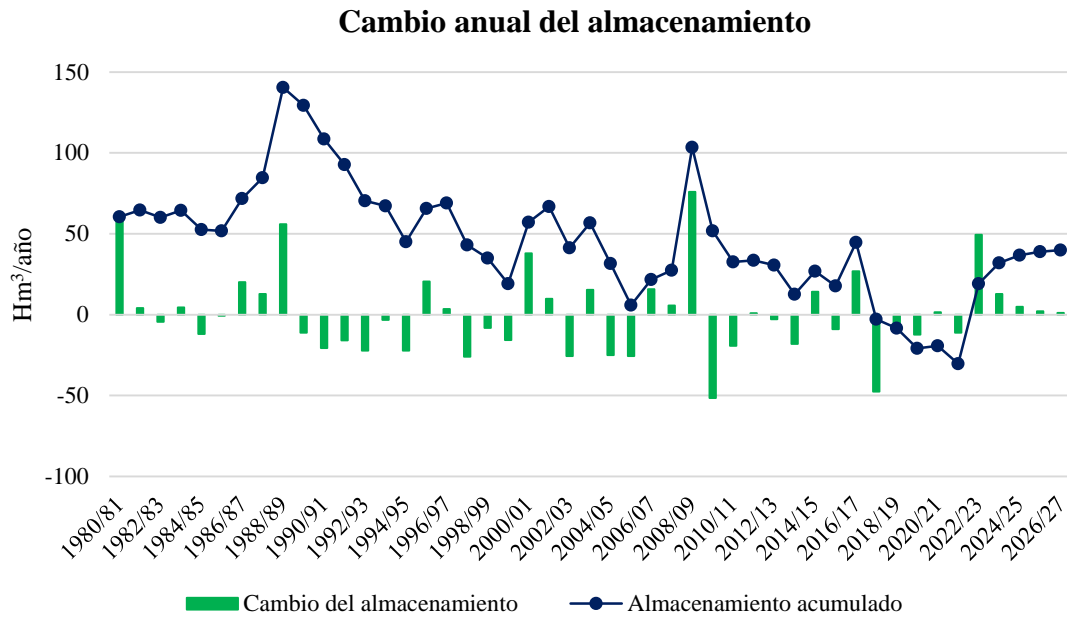


Figura 45. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.

6.5. Escenario 4: Sequía con restricciones y pozos de sequía en fase 3

Este escenario parte de la base del escenario 1, esto es, se mantienen las restricciones en el riego de cultivos agrícolas durante la sequía y, además, se extrae agua mediante pozos de sequía. Es el escenario más extremo y desfavorable.

En esta simulación se introducen al modelo los pozos de sequía previstos para ponerlos en funcionamiento por la Confederación Hidrográfica del Júcar correspondientes a la Fase 3, ubicados como muestra Figura 46 y con una extracción de 61 Hm³/año (27 Hm³/año más que en la fase 2) repartidos en 91 pozos (40 pozos más que en la fase 2). Dicha extracción se realiza únicamente durante 5 meses al año, desde mayo hasta septiembre.

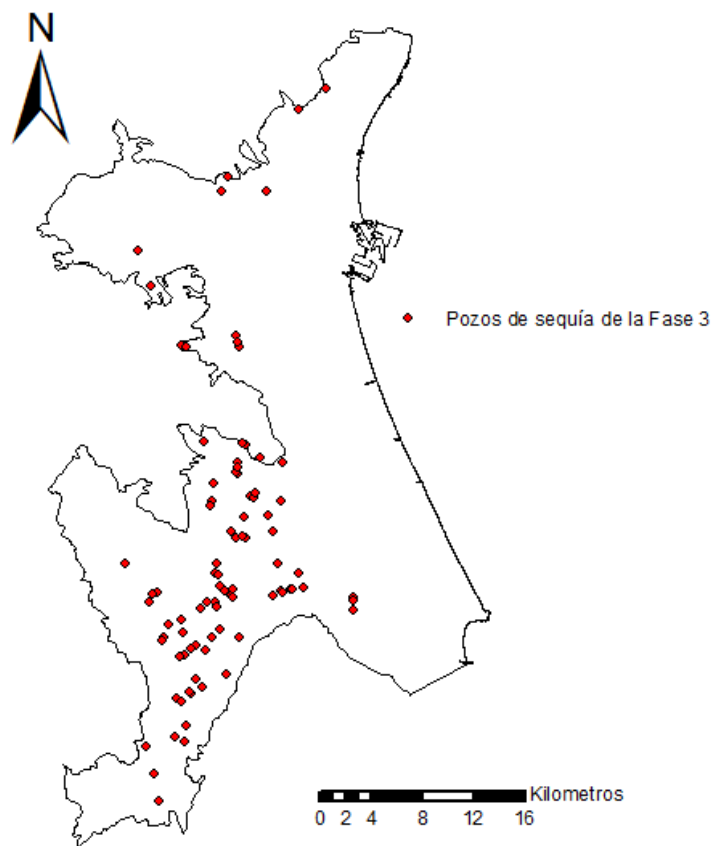


Figura 46. Ubicación de los pozos de la fase 3. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15 se muestra el balance de masa para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

Tabla 15. Resumen del balance de masa para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.

ENTRADAS		Hm ³ /año	SALIDAS		Hm ³ /año
Laterales		67.79	Laterales		4.20
Plana de Sagunto	0.02		Plana de Jaraco		4.20
Liria Casinos	1.26		Extracción Bombeo		85.36
Buñol Cheste	46.60		Emergencias		138.60
La Contienda	8.33		Canales	132.36	
Sierra del Ave	5.61		Ullales	1.05	
Caroch Norte	0.41		Humedales	5.19	
Sierra de las Agujas	5.56		Salidas al Mar		65.53
Infiltración Riego		186.29	Norte		45.30
Infiltración Lluvia		65.20	Sur		20.23
Perdidas lago Albufera		8.79	Salidas Ríos		42.05
Perdidas Ríos		8.41	Júcar	28.25	
Magro	2.57		Turia	0.36	
Sellent	0.16		Verde	9.57	
Albaida	5.68		Rambra del Poyo	3.87	
TOTAL		336.54	TOTAL		335.74

Para ver mejor los efectos de dichas medidas en el periodo deseado se presenta la Figura 47 en la que se puede apreciar la evolución temporal de dicho balance para el periodo completo de simulación entre los años 1980/81 y 2026/27.

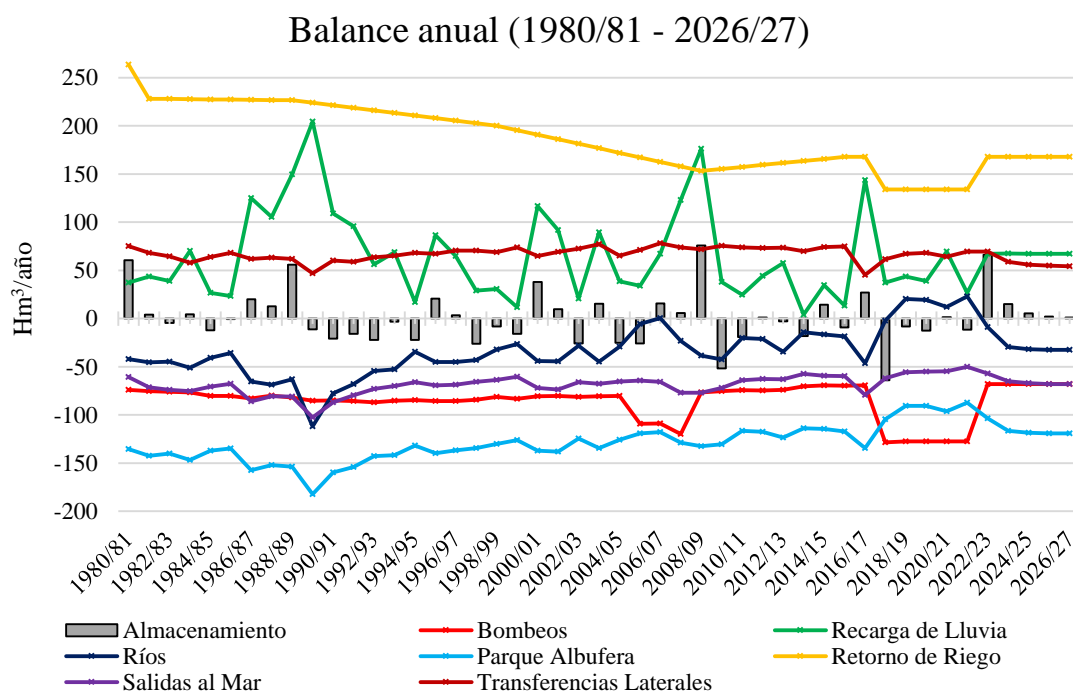
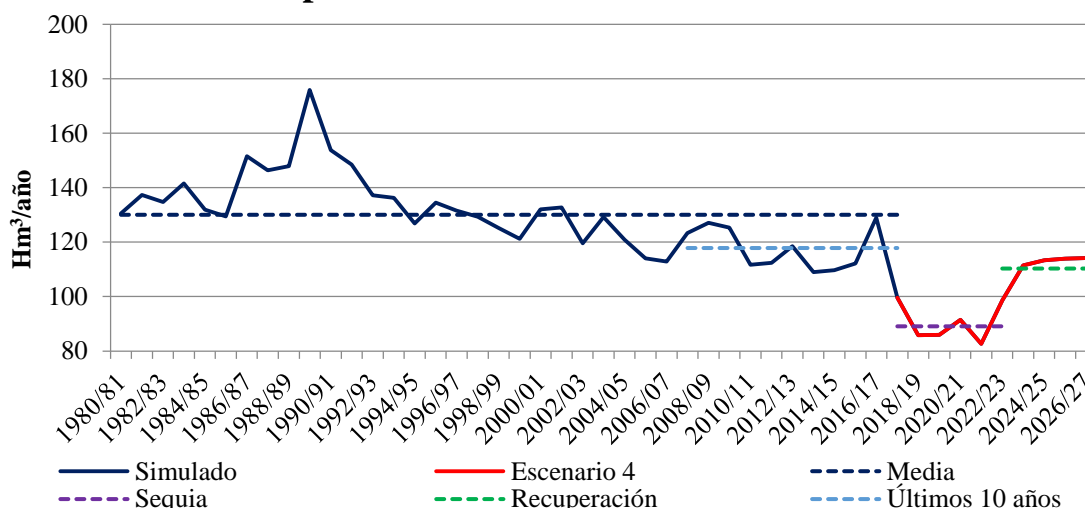


Figura 47. Evolución de las componentes del balance para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.

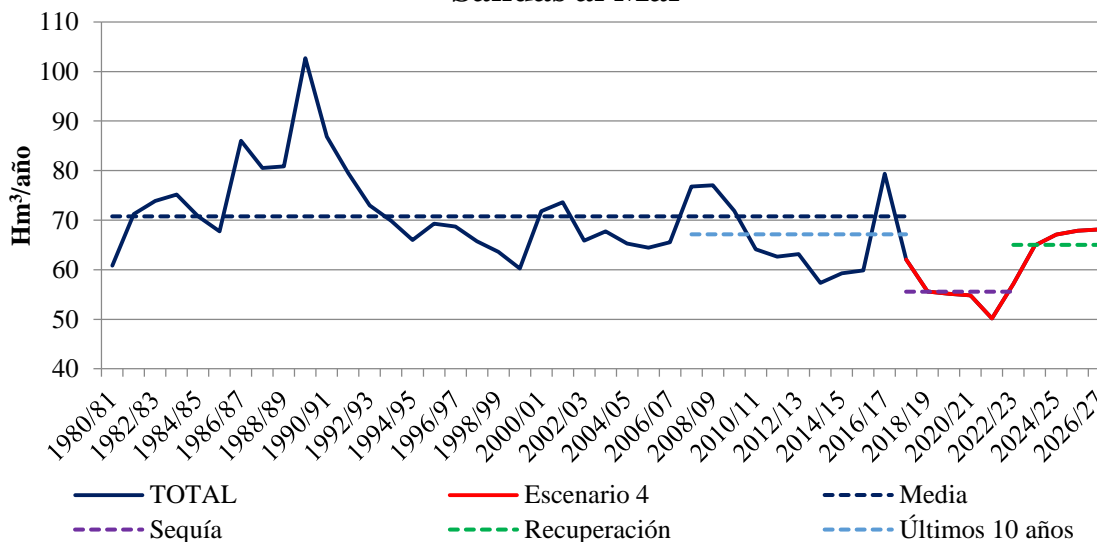
En este caso, el mayor cambio respecto al escenario 3 se aprecia en la extracción de agua subterránea por bombeo. Esta extracción aumenta considerablemente en los años de sequía debido a la puesta en funcionamiento de los pozos de sequía de la fase 3. Este aumento en el volumen bombeado genera grandes disminuciones en los demás elementos del balance como puede ser la reducción de salidas al mar, al parque de la Albufera o a los ríos. Vista la afección de esta medida se observan efectos muy importantes en el funcionamiento del sistema, aunque la recuperación es buena manteniendo sus valores constantes.

A continuación, en la Figura 48 se muestra la evolución temporal de los aportes a los 3 elementos seleccionados para analizar la afección y seguimiento de la sequía. Se muestran en conjunto los valores medios de los aportes para el periodo en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17), para el periodo de los últimos 10 años (2007/08 – 2016/17), para el periodo de sequía (2017/18 – 2021/22) y para el periodo de recuperación (2022/23 – 2026/27).

Aportes subterráneos a la Albufera



Salidas al Mar



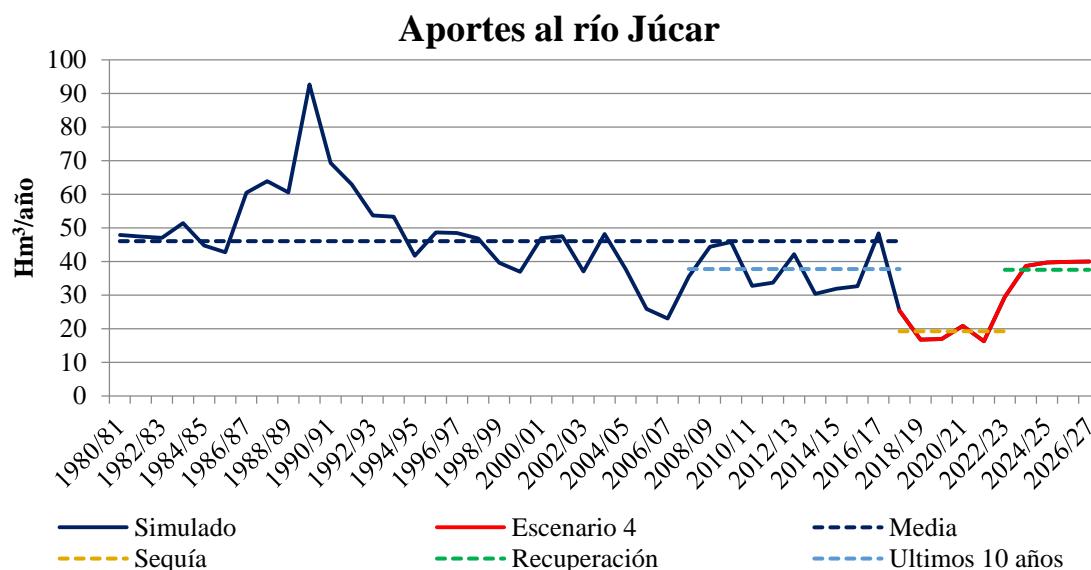


Figura 48. Evolución de los aportes a las componentes de seguimiento de la sequía para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.

Para poder evaluar numéricamente los anteriores gráficos se presenta la Tabla 16 con los porcentajes de reducción de los aportes. Se muestran los porcentajes de reducción en el periodo de sequía y en el periodo de recuperación respecto del valor medio de los volúmenes del periodo completo de la simulación en régimen influenciado (1980/81 – 2016/17) y respecto del valor medio de los volúmenes del periodo de los últimos 10 años simulados (2007/08 – 2016/17).

Tabla 16. Afección de la sequía a los volúmenes aportados para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 4	Afección de los escenarios a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
Periodo analizado	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Albufera	-31%	-24%	-15%	-6%
Salidas al Mar	-21%	-17%	-8%	-3%
Norte	-26%	-21%	-11%	-5%
Sur	-12%	-11%	-2%	0%
Río Júcar	-58%	-49%	-19%	-1%

Los valores mostrados indican que el río Júcar ha sufrido el mayor porcentaje de reducción con un 58% respecto de la media del periodo completo del modelo en régimen influenciado y han sido las salidas al mar las menos afectadas al igual que en el escenario anterior. En este caso los aportes subterráneos al parque de la Albufera sufren un mayor descenso llegando al 31 % respecto de la media del periodo completo simulado.

La Figura 49 muestra la evolución en el cambio del almacenamiento y el valor acumulado de dicho cambio.

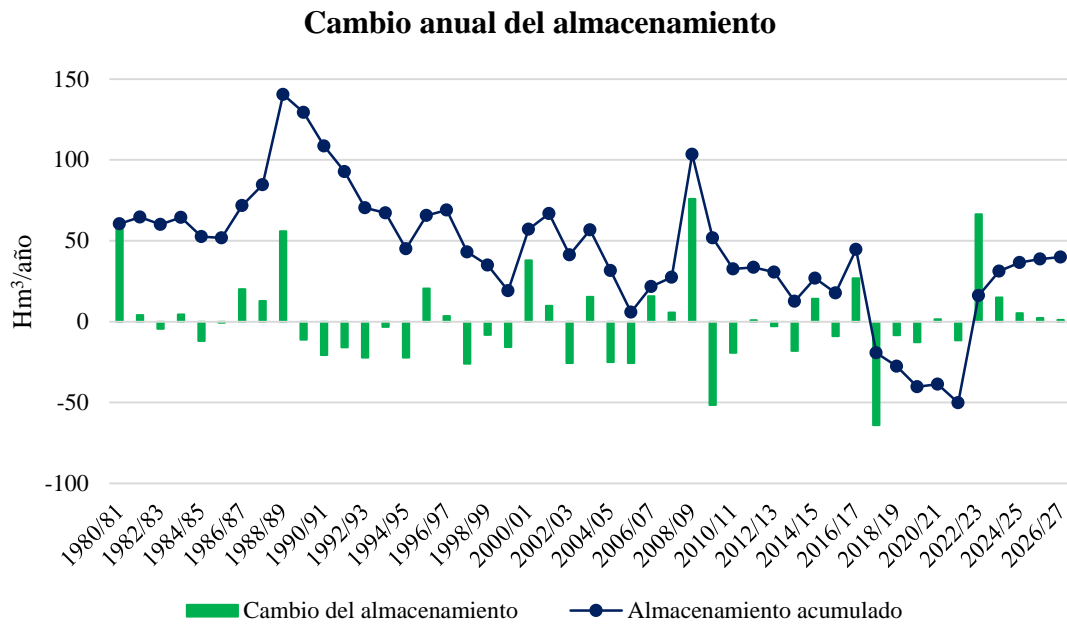


Figura 49. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.

6.6. Comparación de resultados de los escenarios

Una vez obtenidos los resultados para los cinco escenarios es conveniente analizarlos de manera conjunta para poder apreciar mejor los diferentes efectos que generan en el sistema. En los siguientes apartados se van a estudiar los resultados de piezometría y de flujos para las diferentes hipótesis propuestas.

6.6.1. Análisis piezométrico

Para analizar la afección de las medidas propuestas en los niveles de agua, se ha seguido el mismo procedimiento que en sequías anteriores. El Plan Especial de Sequía (CHJ, 2017) propone analizar la piezometría para diferentes sectores territoriales en función de la ubicación de los pozos de sequía. Como se muestra en la Figura 50 se genera un área circular de un kilómetro de diámetro en cada punto de extracción extraordinaria y se agrupan por su proximidad generando los mencionados sectores. En cada sector se elige un punto representativo de la piezometría del entorno generando un piezómetro ficticio para visualizar la afección de los pozos de sequía a los niveles de agua subterránea. En la Figura 51 se muestra la evolución piezométrica para cada sector y cada escenario.

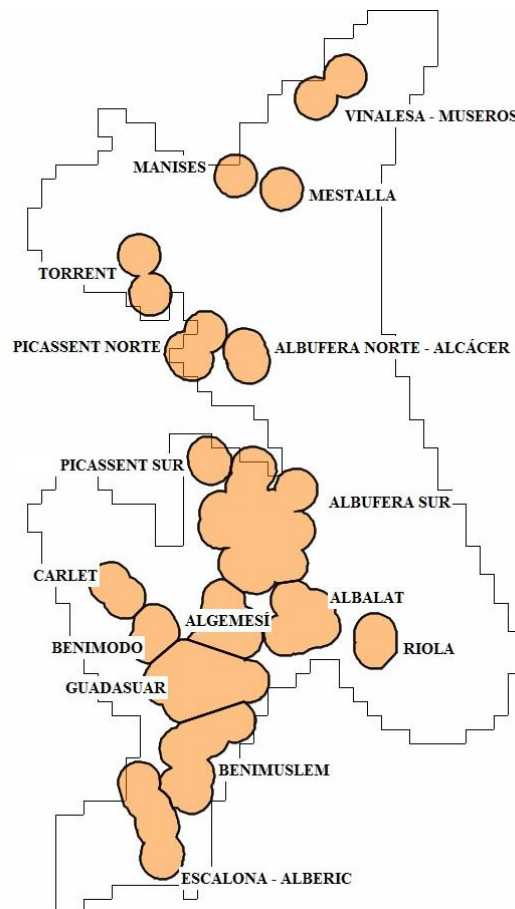
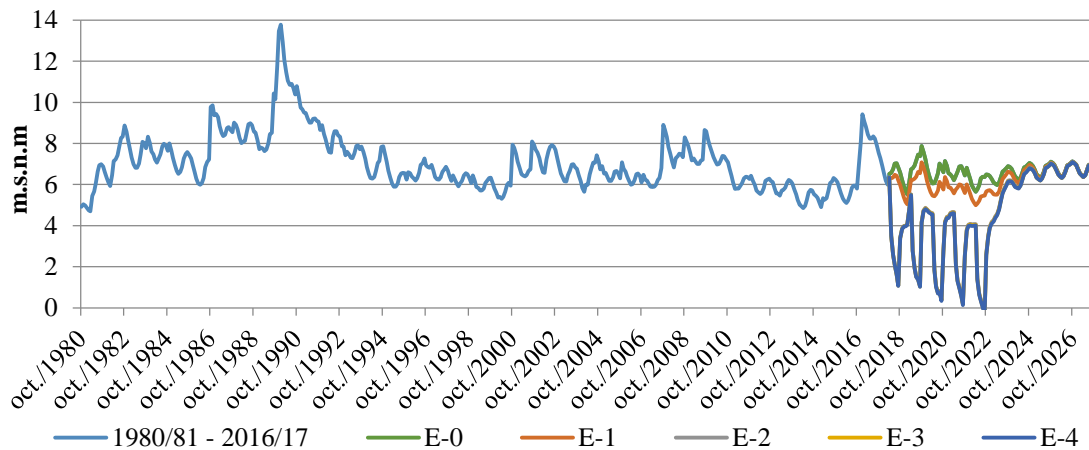
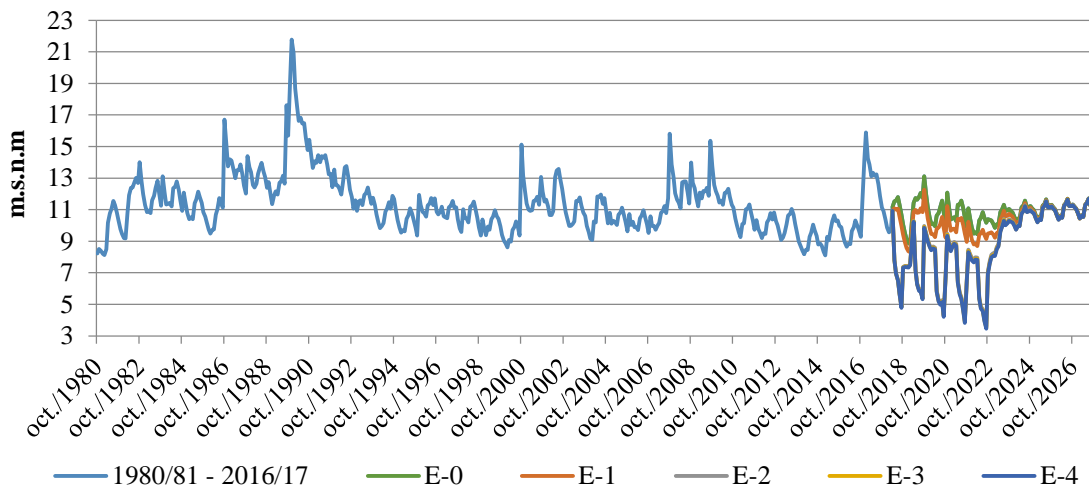


Figura 50. Ubicación de los sectores de seguimiento piezométrico. Fuente: Elaboración propia.

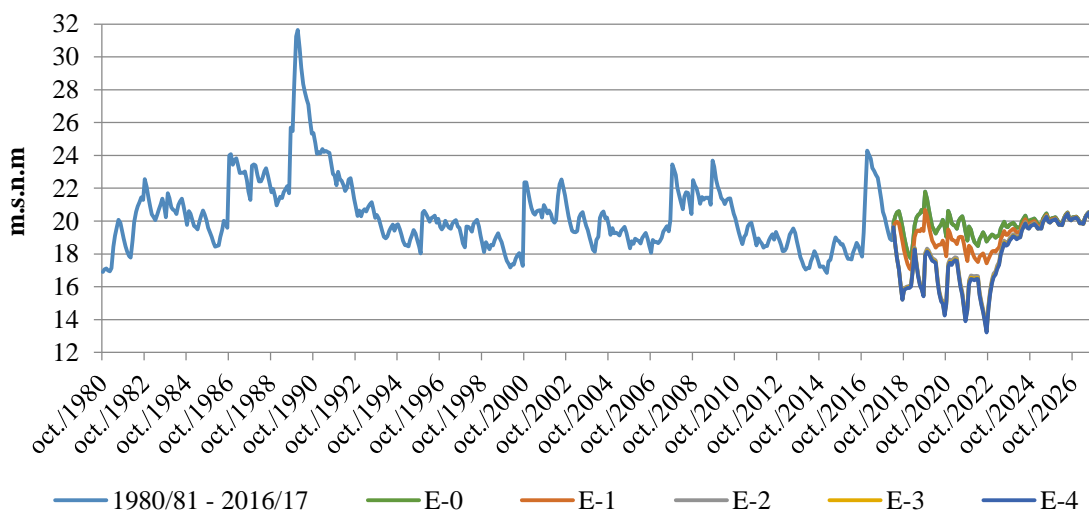
SECTOR VINALESA - MUSEROS



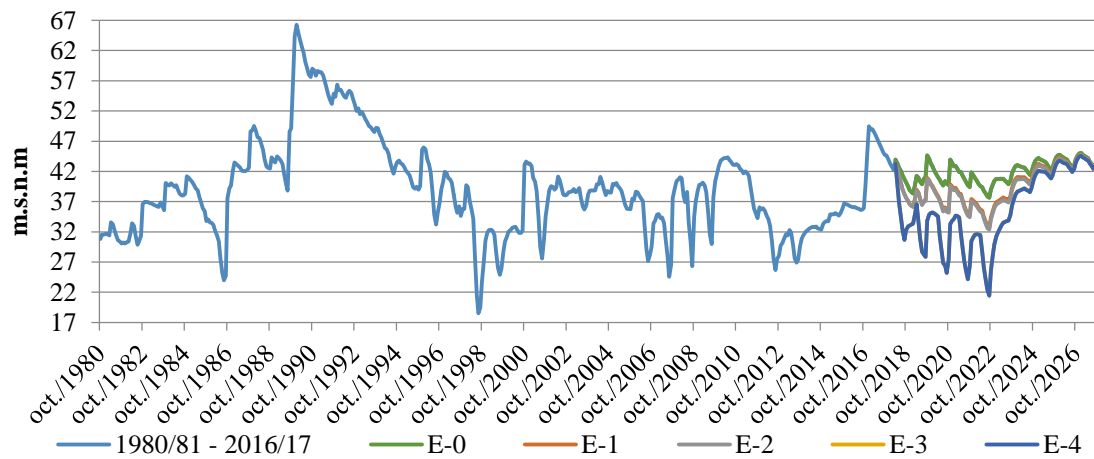
SECTOR MESTALLA



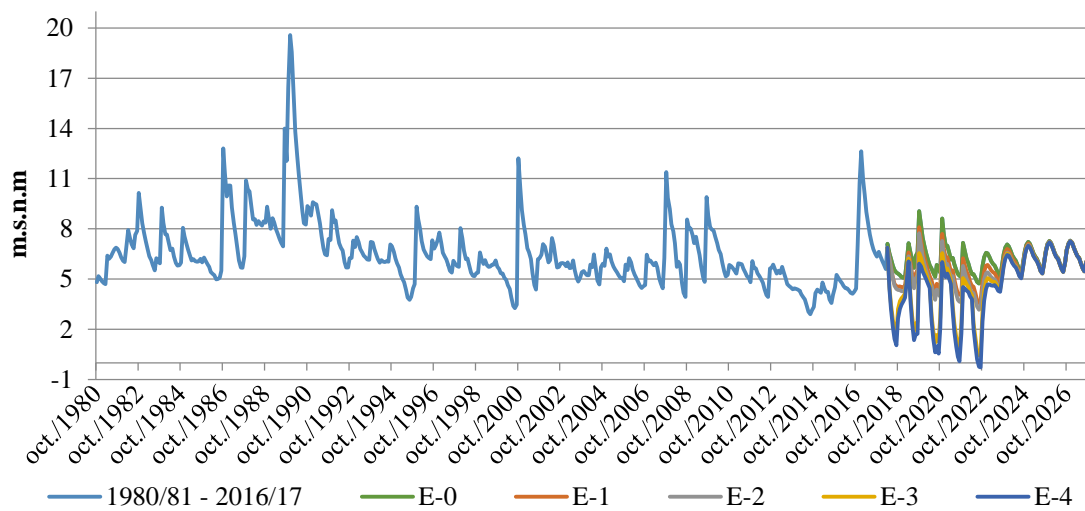
SECTOR MANISES



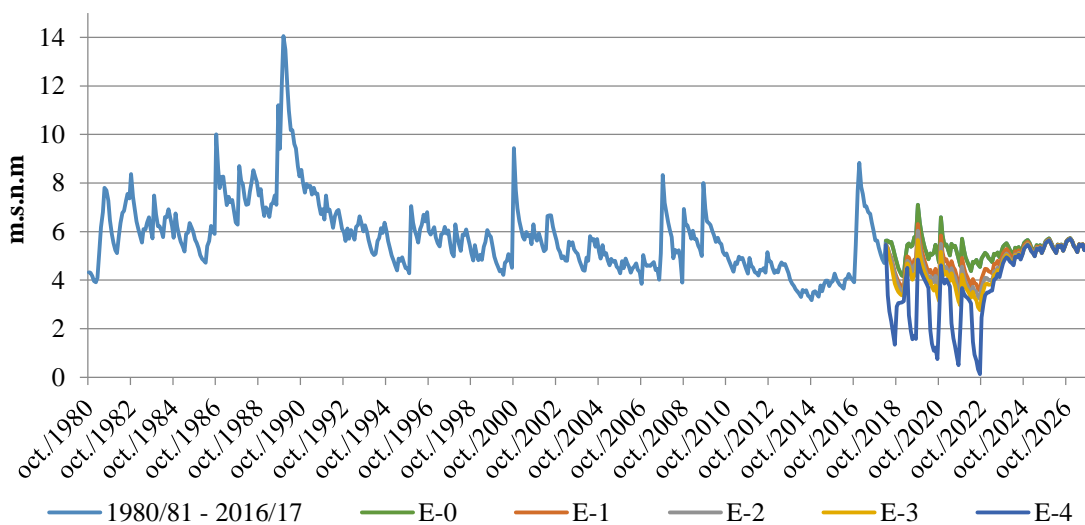
SECTOR TORRENT

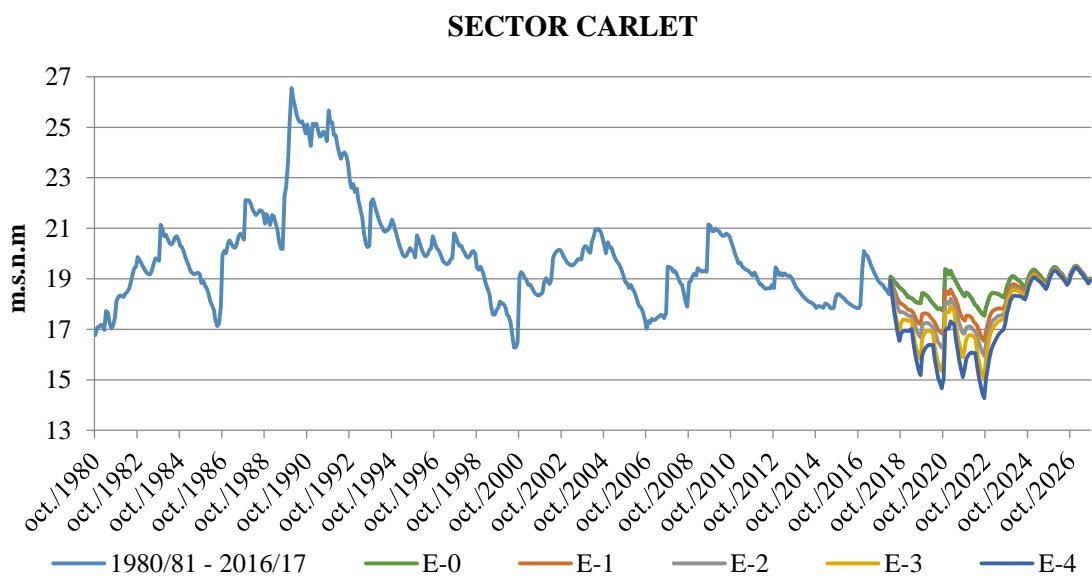
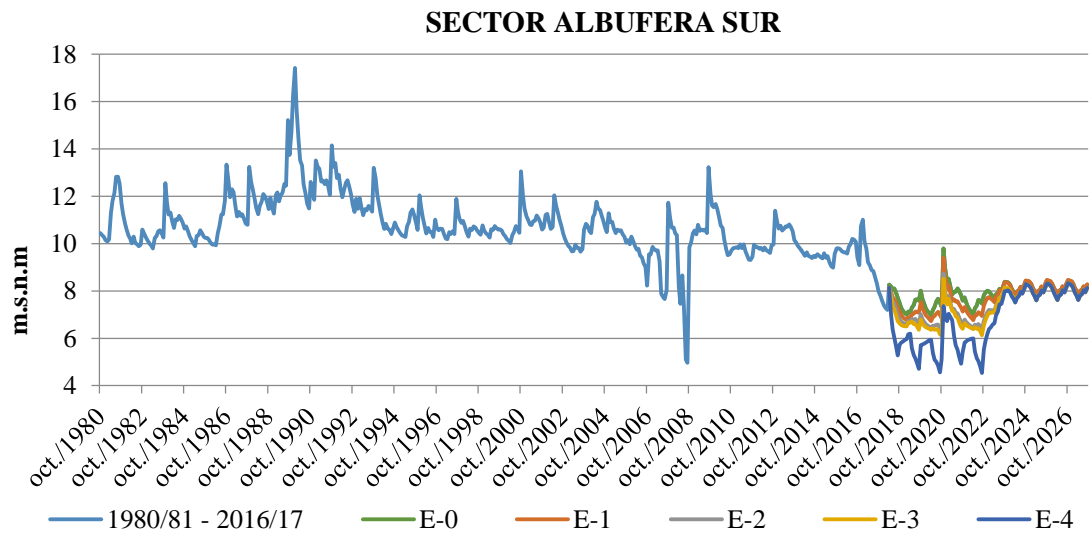
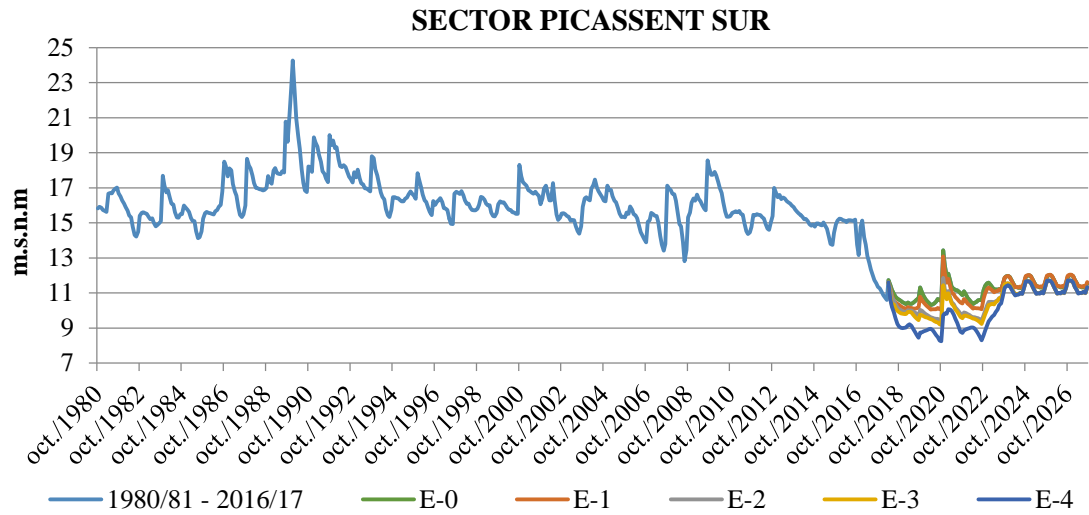


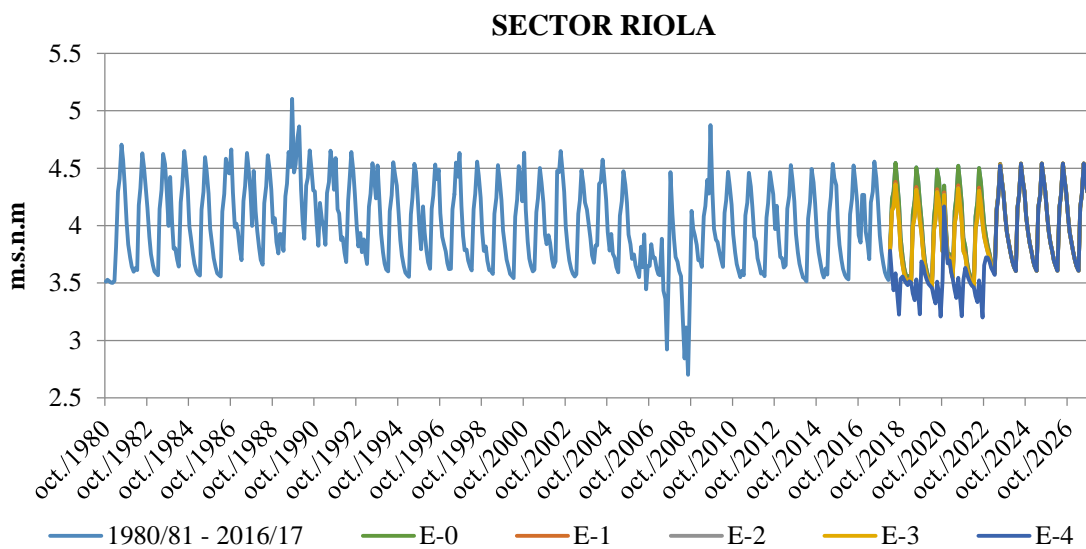
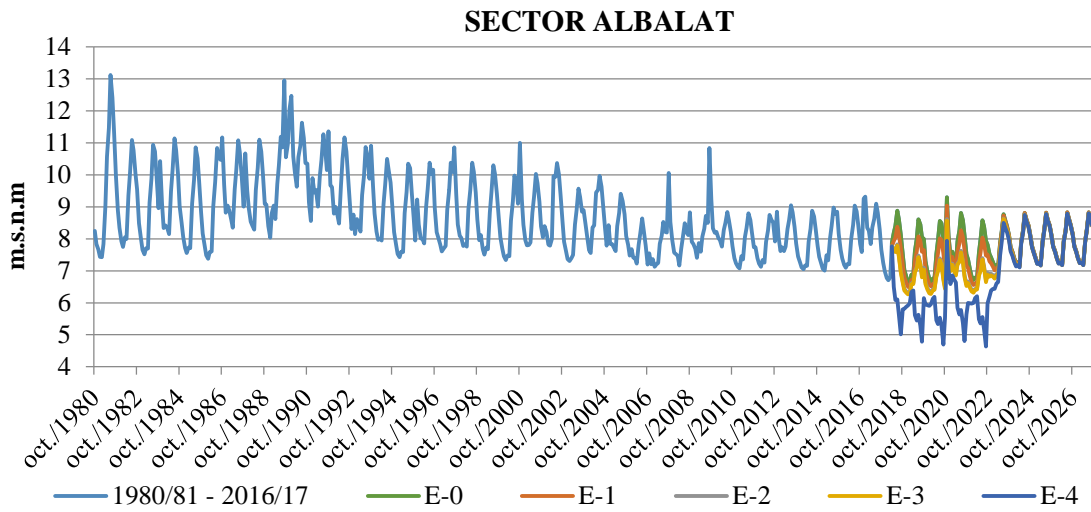
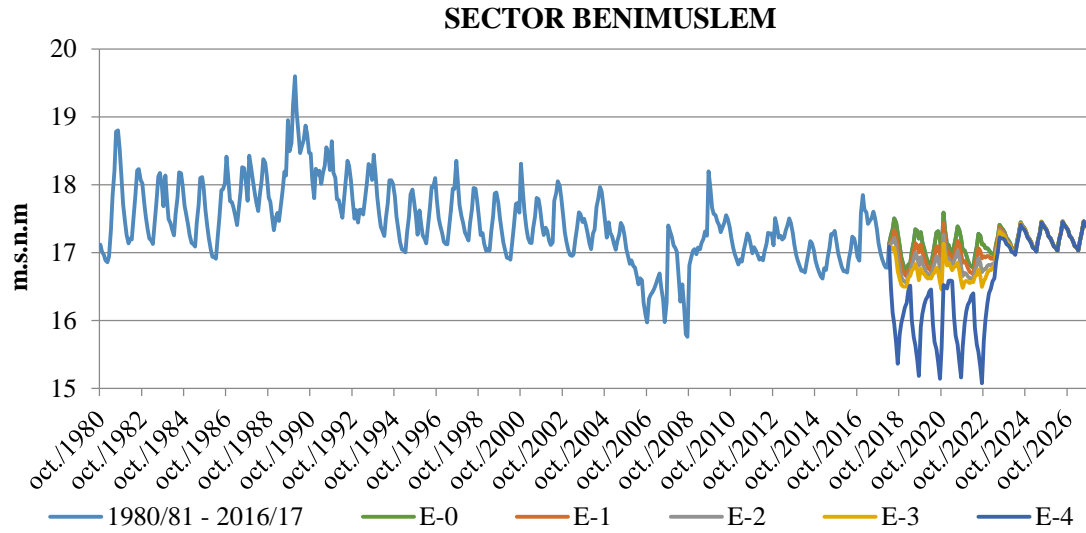
SECTOR PICASSENT NORTE



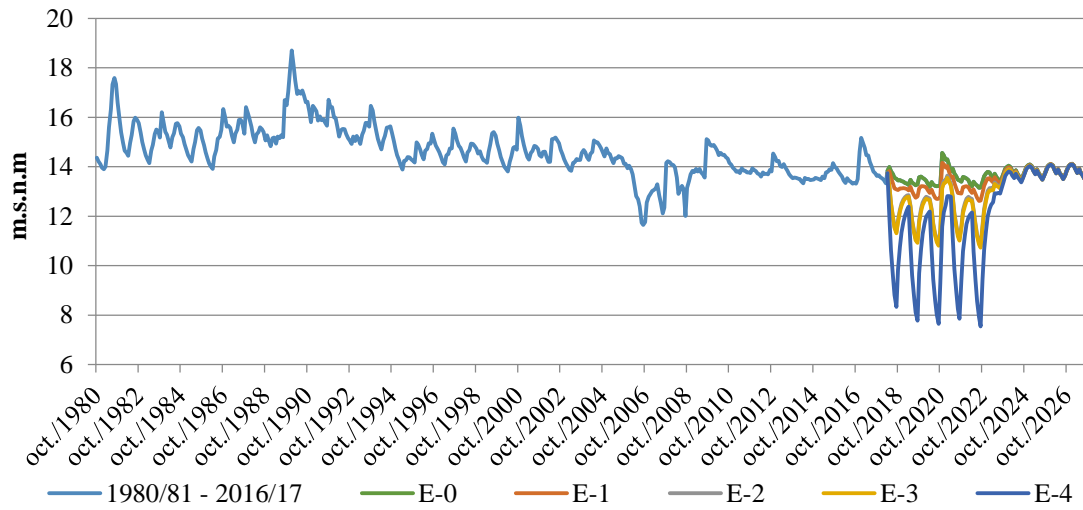
SECTOR ALBUFERA NORTE - ALCÁCER



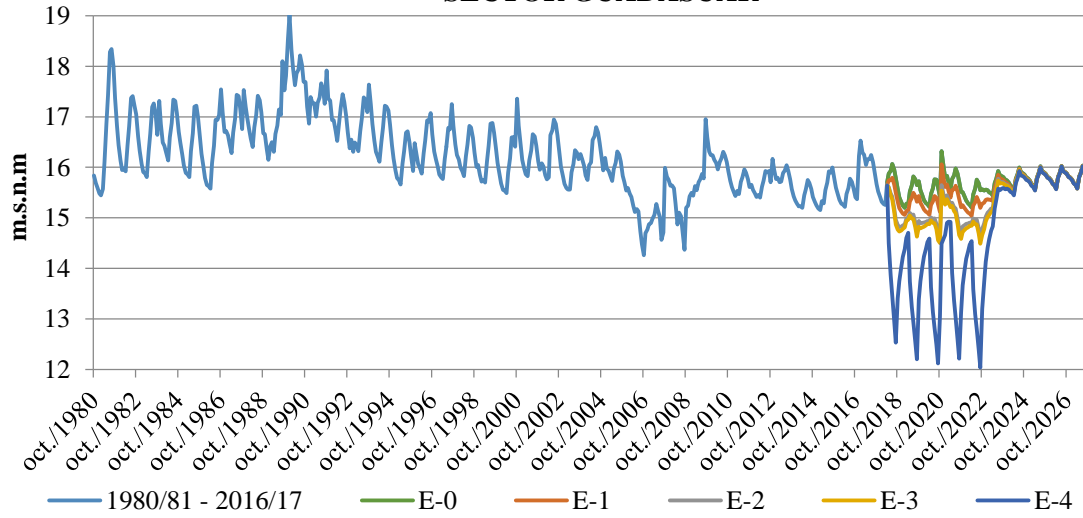




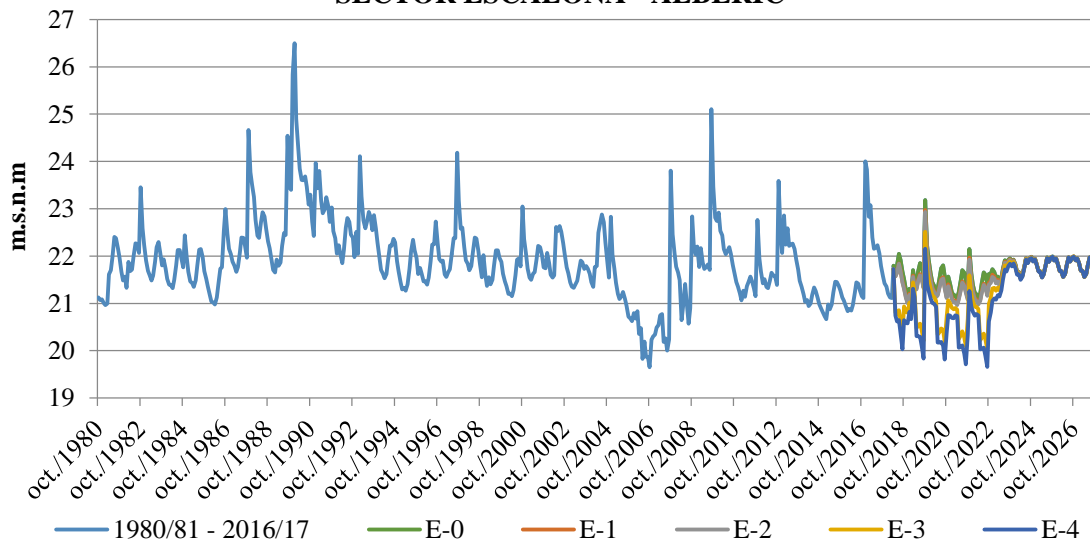
SECTOR ALGEMESÍ



SECTOR GUADASUAR



SECTOR ESCALONA - ALBERIC



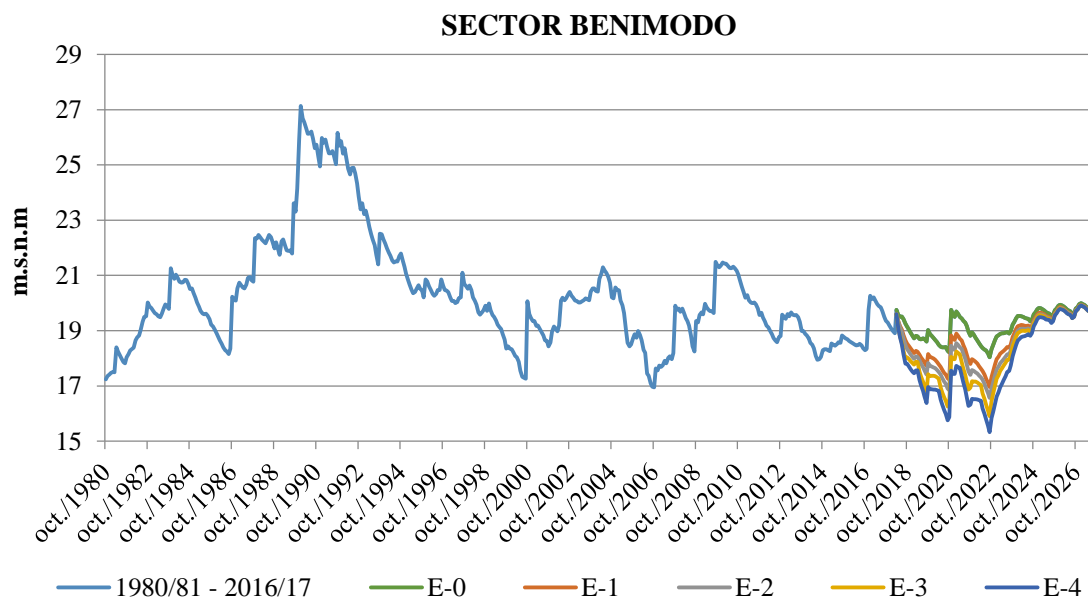


Figura 51. Evolución piezométrica de los sectores de seguimiento de sequía para los diferentes escenarios modelados. Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 51 cada escenario tiene un descenso más acusado en la piezometría. En algunos sectores dos o más escenarios generan la misma piezometría o muy similar ya que las extracciones de más de un escenario en ese sector no varían.

Por lo general, cuanto mayor es el volumen extraído más acusado es el descenso piezométrico. Se observa como el descenso se concentra en los 5 meses de extracción al año e inmediatamente después existe una tendencia de recuperación sin llegar al nivel de agua del año anterior. Es por esto último, por lo que la piezometría anual tiene una tendencia descendente. Esto es, cada año que pasa el sistema en situación de sequía y los pozos de sequía activos la piezometría alcanza niveles más bajos llegando a valores mínimos en el año hidrológico 2021/2022, último año de la simulación en condiciones de sequía.

En varios de los sectores analizados se aprecia también el efecto de los pozos de la sequía que tuvo lugar entre los años 2006 y 2009. Al igual que sucedió en dicha sequía, se observa que la recuperación piezométrica, cuando se dejan de utilizar los pozos de sequía es, por lo general, muy buena y alcanza rápidamente valores piezométricos cercanos a los anteriores a la sequía y valores muy similares a los de la simulación del escenario 0 (sin actuaciones contra la sequía).

En la Figura 52 se muestran los mapas piezométricos del escenario 4 para el momento más desfavorable de la sequía (septiembre del año 2022, último mes con pozos de sequía activos) correspondiente al instante con niveles más bajos de este periodo y se muestra, también, el mapa piezométrico para el momento con niveles piezométricos representativos del periodo de recuperación (septiembre del año 2027, último mes simulado).

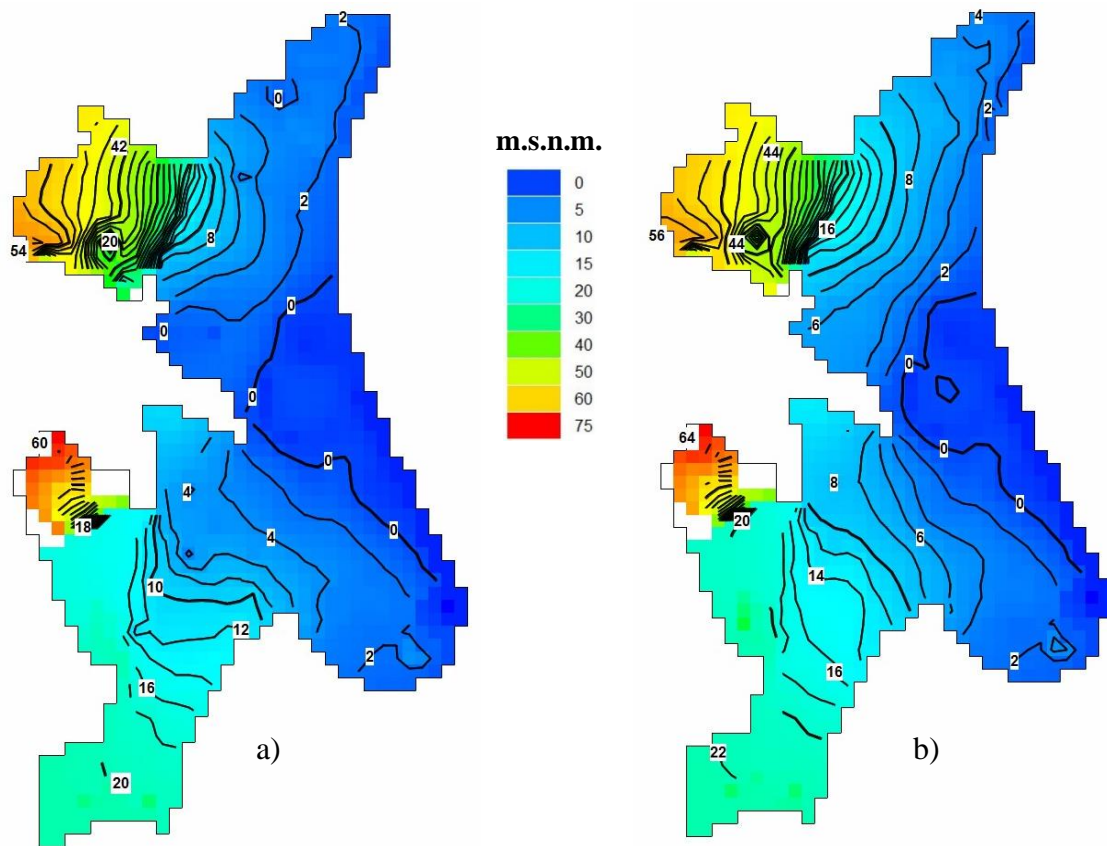


Figura 52. a) Mapa piezométrico del momento más desfavorable del escenario 4. Septiembre, 2022. b) Mapa piezométrico del último mes simulado. Septiembre, 2027. Fuente: Elaboración propia.

Los mapas piezométricos de la Figura 52 muestran los niveles de agua de la situación más desfavorable dentro de los escenarios simulados (a) y la situación en la que termina la simulación, que se considera a su vez representativa del periodo de recuperación (b). Existe una diferencia piezométrica considerable con más importancia en las zonas de extracción de agua subterránea por pozos de sequía. Por lo general la diferencia de niveles de agua es mayor cuanto más cerca de la costa, dónde el terreno es más plano y abundan los cultivos agrícolas.

El descenso piezométrico del momento de aguas más bajas del escenario más desfavorable respecto del escenario 0 se observa en torno a los 2 - 4 metros, pudiendo llegar a los 15 metros en puntos concretos como el sector de Torrent, situado en una zona con piezometría muy variable y con un cono de depresión piezométrica que genera gradientes hidráulicos muy altos.

6.6.2. Análisis de la afección de la sequía a los volúmenes aportados

En este apartado se presentan, de manera conjunta, los efectos que genera la sequía en los volúmenes aportados. La Figura 53 muestra los porcentajes de reducción de los aportes subterráneos al Parque Natural de la Albufera, al río Júcar y a las salidas al mar. Estas reducciones son las más desfavorables ya que se comparan los aportes en época de sequía con su valor medio para el periodo entre los años 1980/81 y 2016/17.

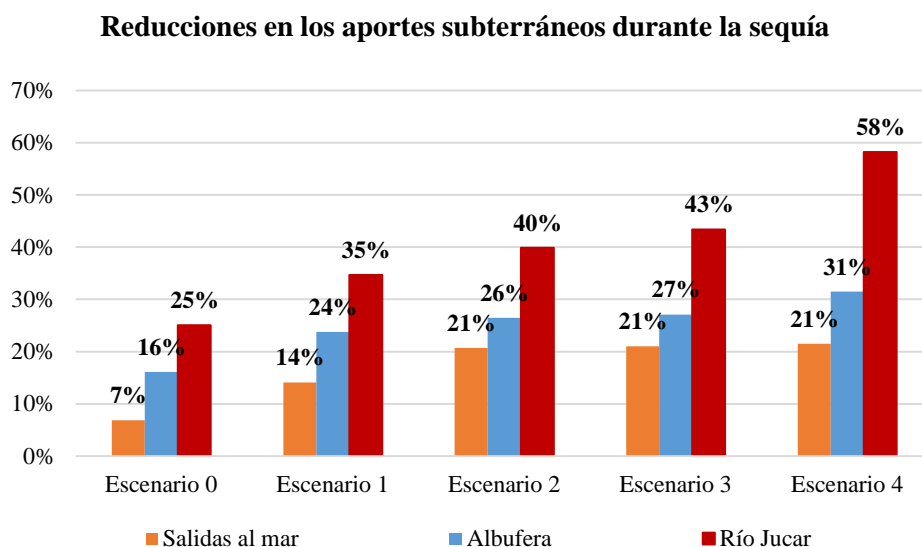


Figura 53. Comparación de los porcentajes de reducción de los volúmenes aportados para las componentes de seguimiento de la sequía. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de comparar los valores medios de la sequía con la media de los últimos 10 años simulados (periodo 2007/08 – 2016/17), los porcentajes de reducción no son tan elevados. En las Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 se muestran los porcentajes de reducción de la sequía y de la recuperación para los tres elementos del balance seleccionados.

Tabla 17. Afección a los volúmenes aportados al parque de la Albufera. Fuente: Elaboración propia.

Parque de la Albufera	Afección de los escenarios a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Escenario 0	-16%	-7%	-12%	-3%
Escenario 1	-24%	-16%	-13%	-4%
Escenario 2	-26%	-19%	-14%	-5%
Escenario 3	-27%	-20%	-14%	-6%
Escenario 4	-31%	-24%	-15%	-6%

Tabla 18. Afección a los volúmenes aportados a las salidas al mar. Fuente: Elaboración propia.

Salidas al mar	Afección de los escenarios a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo analizado	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Escenario 0	-7%	-2%	-5%	1%
Escenario 1	-14%	-9%	-6%	-1%
Escenario 2	-21%	-16%	-8%	-3%
Escenario 3	-21%	-17%	-8%	-3%
Escenario 4	-21%	-17%	-8%	-3%

Tabla 19. Afección a los volúmenes aportados al río Júcar. Fuente: Elaboración propia.

Río Júcar	Afección de los escenarios a los volúmenes aportados (%)			
	Sequía		Recuperación	
	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo analizado	2017/18 - 2021/22		2022/23 - 2026/27	
Periodo de referencia	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17	1980/81 - 2016/17	2007/08 - 2016/17
Escenario 0	-25%	-9%	-14%	5%
Escenario 1	-35%	-20%	-15%	4%
Escenario 2	-40%	-27%	-16%	2%
Escenario 3	-43%	-31%	-17%	2%
Escenario 4	-58%	-49%	-19%	-1%

Por último, en la Figura 54, se presenta la comparación de la evolución del cambio del almacenamiento acumulado para los diferentes escenarios. Como es de esperar, cuanto más desfavorable es el escenario mayor es el vaciado del acuífero en el periodo de sequía, siendo la recuperación rápida, similar para todos los escenarios y con tendencia a ser nulo debido a que los años simulados para el periodo de recuperación son repetidos.

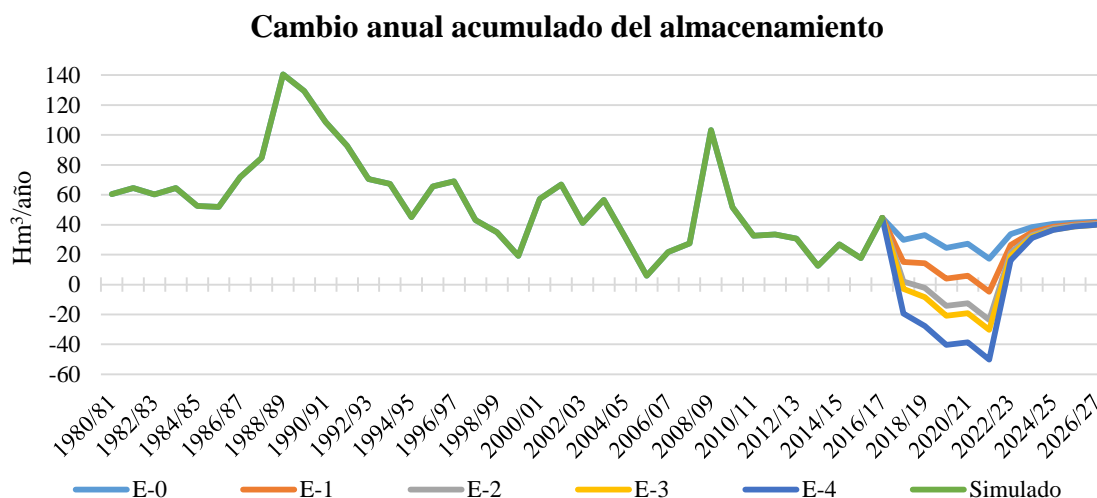


Figura 54. Evolución del cambio en el almacenamiento del modelo para los diferentes escenarios. Fuente: Elaboración propia.

7. Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo ha sido la construcción de un modelo numérico de flujo de agua subterránea de la masa de agua subterránea de la Plana de Valencia Norte y Sur. A lo largo de este documento se han descrito la construcción, calibración y aplicación que han constituido el desarrollo del modelo. Con todos los resultados obtenidos se puede afirmar que se trata de un modelo robusto que funciona adecuadamente y reproduce de manera fiable las principales componentes del sistema estudiado.

La primera simulación correspondiente al modelo en régimen no influenciado representa el funcionamiento del sistema bajo condiciones relativamente naturales, con datos de entrada del periodo más antiguo entre los años 1940/41 y 1979/80, con el objetivo de simular el funcionamiento original del sistema. No se ha simulado la explotación de este acuífero y el cambio en el almacenamiento es prácticamente nulo.

La simulación correspondiente al modelo en régimen influenciado representa el funcionamiento del sistema bajo condiciones de antropización acusada. Se ha simulado el periodo entre los años hidrológicos 1980/81 y 2016/17. En este caso se simulan las extracciones por bombeos y acequias o canales de riego junto con la recarga producida por los retornos de riego. Los retornos de riego son muy importantes en el funcionamiento del sistema en este periodo, ya que suponen en torno a tres cuartas partes de la recarga total del sistema. En gran medida, es gracias a esta recarga por lo que el almacenamiento del acuífero se mantiene relativamente estable con llenados y vaciados alternos que resultan en una tendencia de cambio nulo del almacenamiento. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se puede considerar como sostenible la explotación de este acuífero en lo que a volumen de recursos hídricos se refiere.

Otra de las principales finalidades de este trabajo ha sido el análisis del funcionamiento hidrodinámico del lago de la Albufera. Mediante el análisis de los datos recientes de piezometría y de niveles de la lámina de agua del lago se ha observado que el nivel freático está por debajo del nivel del lago en todo su entorno. Esto hace pensar que el lago no recibe aportes subterráneos directos mediante su lecho. Las acequias o canales de riego repartidos por todo el parque de la Albufera drenan importantes volúmenes de aportes subterráneos directos que, mediante bombeos, se dirigen de manera superficial al lago, a los cultivos y a las golas que conectan con el mar. En el modelo en régimen no influenciado, en cambio, si existe un aporte subterráneo natural directo al lago de la Albufera inundando incluso gran parte de la superficie del parque. Esta información coincide con el conocimiento popular de antiguos manantiales en el propio lecho del lago que han dejado de funcionar por colmatación o por el descenso piezométrico. En resumen, se puede concluir que el lago recibía aportes subterráneos directos de manera natural pero el complejo funcionamiento de regadíos de la Albufera mediante acequias y bombeos ha desconectado el lago del acuífero alimentándose exclusivamente de manera superficial con agua de origen subterráneo extraído mediante los canales del parque y los ullals. Tal comportamiento ha sido reproducido correctamente por el modelo, tanto en régimen no influenciado, con aportes directos al lago, como en régimen influenciado simulando dicha desconexión y la correcta piezometría del entorno.

La bondad de ajuste del modelo se ha valorado mediante indicadores estadísticos, considerándose buena la calibración y dando fiabilidad a los resultados. A la hora de manejar los resultados es importante recordar que éstos están sujetos a un grado de incertidumbre que depende tanto del papel del modelador como de los datos de entrada introducidos al modelo. Un factor que ha dotado al modelo de la variabilidad requerida para estas simulaciones ha sido la introducción de las condiciones de borde de los límites laterales con altura de agua variable mediante series temporales de piezometría reconstruidas y completadas estadísticamente.

Por otro lado, se considera muy importante la aplicación que pueden tener estos modelos. En este caso se ha optado por predecir el comportamiento futuro del sistema bajo condiciones de sequía y sus respectivas actuaciones previstas por la Confederación Hidrográfica del Júcar. Como se describe detalladamente en este informe, estas medidas tratan de paliar la sequía mediante restricciones de riego y extracción de agua subterránea extraordinaria desde pozos de sequía. Estas actuaciones podrían generar efectos negativos considerables de diversa magnitud que se cuantifican de manera aproximada en este trabajo. Es de mencionar que la recuperación del sistema, una vez suspendidas las actuaciones mencionadas, es muy buena llegando a niveles anteriores a la sequía con relativa rapidez. La simulación de los diferentes escenarios y sus efectos pueden servir de apoyo a la hora de gestionar estas situaciones extremas.

8. Recomendaciones

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento de este modelo se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- La principal mejora de este modelo se puede centrar en la discretización espacial de la Plana de Valencia Norte mediante un estudio de más detalle de la geometría de las capas. En este modelo se han utilizado diferentes sondeos existentes de diverso origen para discretizar esta zona y, en cambio, para la zona sur se ha utilizado la geometría resultante de un estudio más exhaustivo realizado por el IGME. Con un estudio de detalle de la zona norte se podría conseguir mejoras en el funcionamiento hidrodinámico del modelo.
- Otro punto de interés sería la medición precisa de las cotas de los piezómetros del entorno del lago de la Albufera con el objetivo de dar más fiabilidad y contrastar el modelo conceptual del funcionamiento de esta masa de agua. En cuanto a este aspecto es interesante los resultados de piezometría presentados en la tesis doctoral “Evaluación espacio-temporal de las aguas y suelos de la zona colindante al lago de la Albufera de Valencia: Intento de recuperación” (Moreno, 2013) que coinciden con lo descrito en este trabajo, siendo el nivel freático inferior al nivel de la lámina de agua del lago de la Albufera.
- La relación del acuífero con el río Júcar es excepcionalmente compleja ya que existen numerosas interacciones superficiales y subterráneas cuyos valores no tienen continuidad espacial ni temporal. Un estudio de detalle que cuantifique los volúmenes aportados y extraídos del río Júcar sería determinante para la mejor calibración de esta masa de agua superficial.
- El modelo queda preparado para futuras posibles actualizaciones e introducción de mejoras. Mediante una actualización a corto o medio plazo se podría validar el funcionamiento reproducido del sistema. También es posible utilizar este modelo como base para otro tipo de usos como puede ser el análisis del transporte o predicciones futuras bajo diferentes hipótesis a las presentadas en este trabajo.

9. Referencias bibliográficas

- Ballesteros Navarro, Bruno J.; García Menéndez, Olga; Domínguez Sánchez, José A.; Hernández Torres, José María; Navarro Odriozola, José Oriol; Barba-Romero Muñoz, Joaquín; Fernández Portal, José Miguel; Clausell Borja, Vicente; Rosado Piqueras, Silvia y Rodríguez Mauricio, Tomás (2012). *Uso sostenible de las masas de agua subterránea en épocas de sequía. Aplicación a la cuenca baja del río Júcar. Tomo II. Memoria y Planos. Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero de la Plana de Valencia Sur*. Instituto Geológico y Minero de España. Fondo documental.
- Ballesteros Navarro, Bruno J.; Navarro Odriozola, José Oriol; Hernández Torres, José María; Barba-Romero Muñoz, Joaquín y Fernández Portal, José Miguel (2012). *Uso sostenible de las masas de agua subterránea en épocas de sequía. Aplicación a la cuenca baja del río Júcar. Tomo III. Modelo numérico de flujo del acuífero de la Plana de Valencia Sur*. Instituto Geológico y Minero de España. Fondo documental.
- CHJ, (1989). *Caracterización estadística de los recursos subterráneos que afluyen al Júcar aguas abajo de Tous*. Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ, (1996). *Obras del proyecto de complemento de caudales a la acequia real del Júcar y las acequias de la Vega de Valencia mediante captaciones de agua subterránea. Informe hidrogeológico final*. Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ, (1997). *Estudio del plan general de adecuación del sistema de explotación de los aprovechamientos tradicionales del Júcar*. Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ, (2002). *Estudio de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en las cuencas media y baja de los ríos Júcar y Turia. Informe final*. Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ, (2009). *Identificación y delimitación de las masas de agua superficial y subterránea. Ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar*.
- CHJ, (2010). *Fuentes alternativas de suministro en la Ribera del Júcar y tramo final del río Turia*. Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ. (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021*. Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ, (2017). *Plan Especial de Sequía. Demarcación Hidrográfica del Júcar*.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.

- IGME-DGA. (2009a). *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015*. Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua.
- IGME-DGA. (2009b). *Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica*. Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua.
- IGME-IRYDA, (1977). *Plan nacional de investigación de aguas subterráneas. Investigación hidrogeológica de la cuenca media y baja del río Júcar. Informe final. Sistema 51: Plana de Valencia*. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME, (1982). *Modelo hidrodinámico del Caroch-Plana de Valencia*. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME, (1986). *Evaluación a nivel de aplicación de los recursos hídricos subterráneos disponibles en los acuíferos del sector sur del sistema 51(Plana de Valencia). Posibilidades de su utilización inmediata*. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME, (2006). *Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España*. Instituto Geológico y Minero de España.
- McDonald, M., y Harbaugh, A. (1984). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. U.S. Geological Survey.
- Moreno, H. (2013). *Evaluación espacio-temporal de las aguas y suelos de la zona colindante al lago de la Albufera de Valencia: Intento de recuperación*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Valencia.
- 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*.
- Prickett, T.A. y C.G. Lonquist (1971). Illinois Water Survey, Urbana, Bulletin 55.
- Winston, R. B. (2009). *ModelMuse - A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Virginia.