



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Modelo matemático de flujo de la masa de agua
subterránea de Serral-Salinas (Alicante-Murcia, España)

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Ceron Gomez, Ana Manuela

Tutor/a: Cassiraga, Eduardo Fabián

Cotutor/a externo: NIETO ARIAS, ANA

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Trabajo Fin de Máster

MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA DE SERRAL - SALINAS (ALICANTE, ESPAÑA)

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

ANA MANUELA CERÓN GÓMEZ

Tutor:

EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor/es:

ANA NIETO ARIAS

MAYO, 2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Modelo matemático de flujo de la masa de agua subterránea de Serral - Salinas (Alicante, España).

Título del TFM en inglés: Mathematical flow model of the Serral-Salinas groundwater body (Alicante, Spain).

Título del TFM en Valenciano: Model matemàtic de flux de la massa d'aigua subterrània de Serral - Salinas (Alacant, Espanya).

Alumno: Ana Manuela Cerón Gómez

Tutor: Eduardo Cassiraga

Cotutor/es: Ana Nieto Arias

Director experimental:

Fecha de Lectura: Mayo de 2024

Resumen

Serral – Salinas es una masa de agua subterránea sobreexplotada y compartida entre la Demarcación Hidrográfica del Júcar y la Demarcación Hidrográfica del Segura. Con el fin de caracterizar la masa de agua (caracterización hidrogeológica e hidrodinámica), evaluar el recurso hídrico subterráneo y dar a las entidades competentes una herramienta para la gestión eficiente y sostenible, se desarrolló un modelo numérico de flujo con el código MODFLOW, calibrado para reproducir la realidad lo más fielmente posible.

En régimen natural la recarga por precipitación es la única entrada al sistema y la salida se da por el manantial Fuente de Salinas. En régimen alterado, se suma la recarga por infiltración de retornos de riego y el comportamiento hidrodinámico se ve completamente alterado por los bombeos, que pasan a ser la única salida de agua del sistema posterior al secado del manantial en la década de 1960.

La evaluación de los recursos hídricos por demarcación se basa en la realización de balances hídricos. En el balance para el periodo 2005 – 2021, considerado como representativo de las condiciones de explotación actuales, se estiman los recursos disponibles en 2.62 y 1.68 hm³/a para la Demarcación del Júcar y Segura respectivamente, mientras que la explotación se cuantificó en 8.76 y 4.83 hm³/a, por tanto, después de evaluar las transferencias entre

demarcaciones, el consumo de reservas del acuífero se evaluó en 5.59 y 4.01 hm³/a respectivamente. Consecuentemente, hay un descenso generalizado del nivel piezométrico en la masa de agua.

Se estima que las reservas totales actuales en Serral – Salinas son de 1840 hm³, una reducción del 51% en el periodo de 1960 a 2021. Finalmente, respecto a la distribución del recurso subterráneo entre demarcaciones, se plantean diversas opciones entre las que destacan dos: la primera, orientada al criterio administrativo y que responde al actual régimen de sobreexplotación, se basa en satisfacer una demanda de agua subterránea de 13.6 hm³/a en la que las aportaciones por demarcación son del 58% y 42% en el Júcar y Segura; la segunda, orientada a la estabilización de niveles piezométricos, distribuye un total de 4 hm³/año, 58% para la DHJ y 42% para el Segura.

Palabras clave: Recursos hídricos, hidrogeología, modelación matemática, masa compartida, acuíferos.

Resum

Serral – Salinas és una massa d'aigua subterrània sobreexplotada i compartida entre la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer i la Demarcació Hidrogràfica del Segura. Amb l'objectiu de caracteritzar la massa d'aigua (caracterització hidrogeològica i hidrodinàmica), avaluar el recurs hídric subterrani i proporcionar a les entitats competents una eina per a la gestió eficient i sostenible, es va desenvolupar un model numèric de flux amb el codi MODFLOW, calibrat per reproduir la realitat el més fidelment possible.

En règim natural, la recàrrega per precipitació és l'única entrada al sistema i la sortida es dona per la font de Salinas. En règim alterat, s'afegeix la recàrrega per infiltració de retorn de reg i el comportament hidrodinàmic es veu completament alterat pels bombejos, que passen a ser l'única sortida d'aigua del sistema després de l'assecamment de la font a la dècada de 1960.

L'avaluació dels recursos hídrics per demarcació es basa en la realització de balanços hídrics. En el balanç per al període 2005 – 2021, considerat representatiu de les condicions d'explotació actuals, s'estimen els recursos disponibles en 2.62 i 1.68 hm³/a per a la Demarcació del Xúquer i Segura respectivament, mentre que l'explotació es va quantificar en 8.76 i 4.83 hm³/a, per tant, després d'avaluar les transferències entre demarcacions, el consum de reserves de l'aquífer es va avaluar en 5.59 i 4.01 hm³/a respectivament. En conseqüència, hi ha un descens generalitzat del nivell piezomètric a la massa d'aigua.

S'estima que les reserves totals actuals a Serral – Salinas són de 1840 hm³, una reducció del 51% en el període de 1960 a 2021. Finalment, pel que fa a la distribució del recurs subterrani

entre demarcacions, es plantegen diverses opcions entre les quals destaquen dues: la primera, orientada al criteri administratiu i que respon a l'actual règim de sobreexplotació, pretén satisfer una demanda d'aigua subterrània de 13.6 hm³/a en què les aportacions per demarcació són del 58% i el 42% en el Xúquer i Segura; la segona, orientada a l'estabilització dels nivells piezomètrics, distribueix un total de 4 hm³/anuals, el 58% per a la DHJ i el 42% per al Segura.

Paraules clau: Recursos hídrics, hidrogeologia, modelatge matemàtic, massa compartida, aqüífers.

Summary

Serral – Salinas is an overexploited groundwater body shared between the hydrographic demarcation of the Júcar and the hydrographic demarcation of the Segura. In order to characterize the groundwater body (hydrogeological and hydrodynamic characterization), evaluate the groundwater resource, and provide competent entities with a tool for efficient and sustainable management, a numerical flow model was developed using the MODFLOW code, calibrated to reproduce reality as faithfully as possible.

Under natural conditions, precipitation recharge is the only input to the system, and the output occurs through Fuente de Salinas spring. Under altered conditions, recharge from irrigation return infiltration is added and the hydrodynamic behavior is completely altered by pumping, which becomes the sole water outlet from the system after the drying of the spring in the 1960s.

The evaluation of water resources by demarcation is based on water balance assessments. For the period 2005 – 2021, considered representative of current exploitation conditions, the available resources are estimated at 2.62 and 1.68 hm³/year for the Júcar and Segura Demarcations respectively, while exploitation was quantified at 8.76 and 4.83 hm³/year. Therefore, after evaluating transfers between demarcations, the consumption of aquifer reserves was assessed at 5.59 and 4.01 hm³/year respectively. Consequently, there is a generalized decrease in the piezometric level of the groundwater body.

Current total reserves in Serral – Salinas are estimated at 1840 hm³, a reduction of 51% from 1960 to 2021. Finally, regarding the distribution of groundwater resources between demarcations, various options are proposed, of which two stand out: the first, oriented towards administrative criteria and responding to the current regime of overexploitation, aims to meet a demand for groundwater of 13.6 hm³/year, with contributions from demarcations of 58% and 42% in the Júcar and Segura respectively; the second, oriented



towards the stabilization of piezometric levels, distributes a total of 4 hm³/year, with 58% for the Júcar and 42% for the Segura.

Keywords: Water resources, hydrogeology, mathematical modelling, shared mass, aquifers.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la Confederación Hidrográfica del Júcar que ha concedido la beca para la realización del presente trabajo, en el marco del convenio para realizar prácticas de empresa que mantiene con la Universitat Politècnica de València.

En segundo lugar, agradezco a mis tutores. A mi cotutora, Ana Nieto por su dedicación durante los meses de práctica en la Confederación, por su disposición e interés en proporcionarme todos los datos e información para el desarrollo de este trabajo. A mi tutor, Eduardo Cassiraga, quien me brindó las herramientas y conocimientos necesarios para desarrollar este trabajo, siempre dispuesto a asesorarme e invertir tiempo para mi aprendizaje, agradezco la confianza que siempre tuvo en mí y sus palabras de aliento en cada momento de este proceso.

A los compañeros de la Confederación, todos aportaron su granito de arena, me apoyaron y me brindaron sus conocimientos cuando los necesitaba, les agradezco.

Agradezco a mis amigos del Máster, que llenaron mis días de felicidad, amor y buenos momentos que me llevo en el corazón. Tenerlos ha sido un gran soporte de mi vida en Valencia y fortaleza para sacar el máster adelante.

Finalmente, y lo más importante, agradezco a mi familia, que me dan cada día su apoyo incondicional y mucho amor, sin ellos este sueño no hubiera sido posible. A mi prometido, que compartió conmigo esta experiencia, me dio tanto apoyo y palabras de fortaleza, me dio en los momentos difíciles el abrazo que necesitaba, gracias.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Tabla de contenido

1	Introducción.....	6
1.1	Objetivos.....	7
1.2	Antecedentes.....	7
2	Contexto.....	10
2.1	Localización del área de estudio.....	10
2.2	Clima, temperatura y precipitación.....	11
2.3	Hidrología.....	12
2.4	Geología.....	13
2.4.1	Estratigrafía y litología.....	14
2.5	Funcionamiento hidrogeológico y piezometría.....	16
2.6	Usos de agua.....	20
3	Modelo conceptual.....	22
3.1	Unidades hidrogeológicas y funcionamiento.....	22
3.2	Límites.....	23
3.3	Funcionamiento y dominios hidrogeológicos.....	23
3.4	Captaciones.....	25
3.5	Recarga.....	28
3.5.1	Recarga por precipitación.....	29
3.5.2	Recarga por retornos de riego.....	31
3.6	Flujos.....	33
3.7	Hipótesis y simplificaciones del modelo.....	33
4	Código utilizado.....	34
5	Construcción del modelo.....	35
5.1	Discretización horizontal.....	35
5.2	Discretización vertical.....	35
5.2.1	Topografía del terreno.....	36
5.2.2	Unidad Neógena.....	36
5.2.3	Unidad Senonense.....	37
5.2.4	Unidad Cenomaniense.....	38
5.2.5	Muro de la unidad Aptiense – Albiense.....	39



5.2.6	Muro de la unidad Jurásico.....	40
5.3	Discretización temporal.....	41
5.4	La condición inicial.....	42
5.5	Asignación preliminar de parámetros hidráulicos	43
5.6	Las condiciones de contorno	45
5.6.1	Paquete de recarga.....	45
5.6.2	Paquete de pozos	45
5.6.3	Paquete de drenes.....	46
5.7	Observaciones	46
5.7.1	Paquete de observación de alturas piezométricas.....	46
5.8	Solver.....	48
6	Calibración y balance hídrico.....	49
6.1	Parametrización.....	49
6.2	Calibración de series piezométricas.....	51
6.3	Balance hídrico en régimen estacionario.....	58
6.4	Balance hídrico en régimen transitorio.....	59
7	Análisis de los resultados	65
7.1	Estimación de las reservas.....	65
7.2	Estado cuantitativo.....	66
7.3	Distribución de los recursos hídricos	67
7.3.1	Según la cuenca adoptada	67
7.3.2	Según origen y forma de drenaje.....	68
8	Discusión y conclusiones.....	70
9	Recomendaciones	73
10	Alineación del TFM con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	73
11	Referencias.....	74

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la masa de agua subterránea Serral - Salinas.....	10
Figura 2. Relieve de la zona de estudio.	11
Figura 3. Precipitaciones anuales en la masa Serral - Salinas. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martin, 2005).	12
Figura 4. Evolución de las temperaturas en la masa Serral - Salinas. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martin, 2005).	12
Figura 5. Mapa general de la Cordillera Bética y encuadre del área de estudio. Fuente: Modificado de Galdeano & Garrido (2016).	13
Figura 6. Mapa hidrogeológico de la masa Serral-Salinas (IGME, 2022).	15
Figura 7. Cortes hidrogeológicos de la masa Serral-Salinas (localización en la Figura 6) (IGME, 2022).	15
Figura 8. Mapa de isopiezas de mayo de 1977 (IGME-DPA, 1982)	17
Figura 9. Mapa de isopiezas de octubre de 2006. Nota: “en el sector oriental las escasas diferencias de nivel piezométrico y los propios errores de nivelación no permiten trazar isopiezas” (IGME - DPA, 2007).	18
Figura 10. Superficie piezométrica deducida en régimen natural y en régimen influenciado (alterado por bombeos) al final del año 2017 (IGME, 2022).	19
Figura 11. Sondeos con extracción de recursos subterráneos en la masa Serral - Salinas (periodo 1960/61 - 2021/22) y entidades de explotación a las que pertenecen.	21
Figura 12. Mapa de permeabilidad en la zona de estudio. Fuente: modificado de IGME (2009).	25
Figura 13. Evolución anual de las extracciones totales y por demarcación hidrográfica.	28
Figura 14. Evolución anual de la recarga total en la masa Serral - Salinas y comparación con las extracciones subterráneas.	29
Figura 15. Evolución piezométrica en pozos representativos del sector oriental (tonos cálidos) y occidental (tonos fríos).	29
Figura 16. Sectores de recarga por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL...	30
Figura 17. Evolución anual de la recarga por infiltración de lluvia total y por sector de recarga. Fuente: datos de PATRICAL.	30
Figura 18. Uso de las extracciones de agua subterránea por demarcación hidrográfica.	31
Figura 19. Superficies de regadío en Serral - Salinas.	32
Figura 20. Evolución anual de la recarga por retornos de riego total y por UDA.	32
Figura 21. Discretización horizontal del modelo numérico. En rojo las celdas inactivas y en azul las celdas activas.	35
Figura 22. Modelo digital de terreno de resolución 200m x 200m.	36
Figura 23. Elevación del muro de la unidad Neógena (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).	37
Figura 24. Elevación del muro de la unidad Senonense (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).	38

Figura 25. Elevación del muro de la unidad Cenomaniense (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).	39
Figura 26. Elevación del muro de la unidad Aptiense-Albiense (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).	40
Figura 27. Perfiles de las capas del modelo geológico empleado.	41
Figura 28. Superficie piezométrica modelada en régimen natural.	42
Figura 29. Dominios hidrogeológicos y su respectiva asignación preliminar de parámetros hidráulicos.	44
Figura 30. Localización de los pozos de observación en la masa Serral - Salinas.	47
Figura 31. Conductividad hidráulica calibrada para las diferentes capas del modelo numérico.	50
Figura 32. Diagrama de dispersión de nivel observado vs simulado. Se resaltan algunos datos que se encuentran sospechosamente fuera de rango.	52
Figura 33. Calibración del piezómetro 08.42.039.	53
Figura 34. Calibración del piezómetro 08.42.003.	53
Figura 35. Calibración del piezómetro 08.42.004.	53
Figura 36. Calibración del piezómetro 08.42.037.	54
Figura 37. Calibración del piezómetro 08.42.035.	54
Figura 38. Calibración del piezómetro 2734-2-0044.	54
Figura 39. Calibración del piezómetro 08.42.012.	55
Figura 40. Calibración del piezómetro 08.42.036.	55
Figura 41. Calibración del piezómetro 08.42.006.	55
Figura 42. Calibración del piezómetro 2734-2-0043.	56
Figura 43. Calibración del piezómetro 2734-2-0060.	56
Figura 44. Calibración del piezómetro 2734-2-0052.	56
Figura 45. Calibración del piezómetro 2734-2-0041.	57
Figura 46. Calibración del piezómetro 2734-2-0002.	57
Figura 47. Calibración del piezómetro 2733-6-0030.	57
Figura 48. Calibración del piezómetro 2733-6-0001.	58
Figura 49. Profundidad de la Laguna de Salinas resultados del modelo estacionario.	59
Figura 50. Evolución de las transferencias de flujo entre la CHJ y CHS.	60
Figura 51. Mapa de isopiezas en régimen transitorio (septiembre 2022): De arriba abajo: Neógeno; Senonense; Cenomaniense; Aptiense – Albiense; y Jurásico.	64

Índice de tablas

Tabla 1. Permeabilidades calibradas en el modelo de flujo de IGME - DPA (2007).	8
Tabla 2. Parámetros de almacenamiento calibrados en el modelo de flujo de IGME - DPA (2007).	9
Tabla 3. Parámetros hidráulicos calibrados en el código RENATA (IGME, 2022).	9
Tabla 4. Valores medios de porosidad de las muestras de roca analizadas clasificadas por edad litológica (IGME - DPA, 2014)	23
Tabla 5. Valores de conductividad hidráulica y almacenamientos según dominio. Fuente: Elaboración propia con datos de Custodio & Llamas (1983) y Freeze & Cherry (1979).....	25
Tabla 6. Localización de las captaciones de agua subterránea en la masa Serral - Salinas.	26
Tabla 7. Asignación preliminar de parámetros hidráulicos.....	43
Tabla 8. Posición, cota y conductancia preliminar del manantial Serral - Salinas.	46
Tabla 9. Localización de los pozos de observación en el modelo de flujo.....	47
Tabla 10. Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico calibrados para las diferentes capas modeladas.....	50
Tabla 11. Resultados de la calibración por pozo de observación.....	51
Tabla 12. Balance hídrico en régimen estacionario.	59
Tabla 13. Balance hídrico en régimen transitorio del periodo 1960/61 - 2021/22 (año hidrológico medio).	60
Tabla 14. Balance hídrico en régimen transitorio del periodo 2005/06 - 2021/22 (año hidrológico medio).	61
Tabla 15. Estimación de reservas de agua subterránea total y por unidad hidrogeológica en Serral - Salinas	65
Tabla 16. Índice de explotación según la demarcación hidrográfica (periodo de 2005/06 - 2021/22).....	66
Tabla 17. Distribución de los recursos hídricos en régimen natural según adopte la cuenca hidrográfica o hidrogeológica.....	67
Tabla 18. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado (periodo 1960/61 – 2021/22) considerando la cuenca hidrológica.....	68
Tabla 19. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado (periodo 2005/06 – 2021/22) considerando la cuenca hidrológica.....	68
Tabla 20. Distribución de los recursos hídricos según origen y forma de drenaje. En régimen natural para el periodo medio 1940/41-1959/60 y en régimen alterado para el periodo medio 1960/61 – 2021/22.....	68
Tabla 21. Distribución de los recursos hídricos según origen y forma de drenaje. En régimen natural para el periodo medio 1940/41-1959/60 y en régimen alterado para el periodo medio 2005/06 – 2021/22.....	69



1 Introducción

La delimitación de las masas de agua subterránea en cada demarcación hidrográfica se circunscribe a los propios límites de la demarcación (DGA-CEDEX, 2017), esta valoración responde a las necesidades de gestión mas no atiende exclusivamente a los criterios hidrogeológicos. Por tanto, existen masas de agua en demarcaciones contiguas conectadas hidrogeológicamente.

El objeto de estudio del presente informe es la masa de agua subterránea Serral – Salinas, una de las cinco masas subterráneas compartidas entre la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) y la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS) declaradas en el Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional). En concordancia, la masa se conoce como masa de agua subterránea compartida de Serral – Salinas, integrada por las MASb 080-181 Serral – Salinas de la DHJ y 070.027 Serral – Salinas Segura de la DHS (CHJ, 2023; CHS, 2022). El presente estudio se aborda conjuntamente para toda la unidad hidrogeológica, sin dejar de lado el análisis de las masas individualmente.

Se encuentra además en la lista de las masas de agua subterránea declaradas en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo, destacando la necesidad de mejorar su conocimiento con la finalidad de realizar una gestión sostenible, eficiente y coordinada entre las distintas demarcaciones que la comparten.

El objetivo de este estudio es modelar el funcionamiento de la masa de agua subterránea Serral – Salinas, así como definir, caracterizar y evaluar el recurso hídrico. Para ello, se realiza primero una revisión bibliográfica prestando especial interés a modelos de flujo previos existentes en el área de estudio. Seguidamente, se elabora un modelo conceptual para definir y caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de la masa, lo que implica la recolección de la información geológica, hidrogeológica e hidrológica disponible. El modelo conceptual se traduce a un modelo numérico de flujo con el uso de la interfaz ModelMuse (Winston, 2009) y el código MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984). Finalmente, el modelo permite la evaluación del recurso hídrico y su posible distribución en las diferentes demarcaciones.

El modelo desarrollado constituye una herramienta útil para que las autoridades competentes realicen el seguimiento del comportamiento hidrogeológico ante diferentes escenarios de gestión hídrica. También permite evaluar el impacto del cambio climático en el funcionamiento de la masa y distribución del recurso hídrico.

1.1 Objetivos

El objetivo principal es:

- Diseño, construcción y calibración de un modelo matemático de flujo de la masa de agua subterránea compartida Serral – Salinas, que reproduzca el comportamiento real del sistema.

Otros objetivos del estudio son:

- Mejorar el conocimiento hidrogeológico de la masa de agua subterránea con la elaboración de un modelo conceptual que caracteriza su funcionamiento.
- Caracterizar y modelar el funcionamiento de la masa subterránea en su estado natural, sin intervenciones antrópicas.
- Evaluar los recursos hídricos existentes y su potencial distribución según las demarcaciones hidrográficas del Júcar y Segura.
- Estimar las reservas hídricas de la masa de agua en su estado actual y en condiciones naturales.
- Proveer de una herramienta útil y competente a las administraciones interesadas que les permita simular distintos escenarios para tomar decisiones de gestión más informadas.

1.2 Antecedentes

Las primeras referencias en las que se aborda el territorio ocupado por la masa de agua subterránea Serral – Salinas aparecen a inicios de la década de 1970. Desde entonces, se han realizado numerosos estudios hasta la actualidad. Fue incluido en la primera fase del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) entre 1971 y 1975, dentro del marco de la investigación de aguas subterráneas de las cuencas del Júcar, Segura, Guadiana, Sur y Baleares.

Uno de los primeros estudios en que se trata la masa con detenimiento es el *“Estudio hidrogeológico del sistema carche – Salinas. Posibilidades de captación de aguas subterráneas para usos agrícolas en la cañada del trigo (Jumilla)”* desarrollado por ADARO (1982).

Posteriormente se realizan estudios en base a la construcción de los diferentes sondeos de abastecimiento, y otros estudios de índole general, tal como el Libro Blanco del Agua en España (LBAE) (2000), el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (LBAS) (CEDEX, 1995), los planes hidrográficos de cuenca, las más recientes el ciclo 2022 – 2027, donde se presentan las

principales características de cada masa: 070.027 Serral – Salinas (CHS) y 080.181 Serral – Salinas (CHJ) (CHJ, 2023; CHS, 2022).

En 2003 IGME – DPA llevan a cabo el estudio “*Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero Serral – Salinas (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión*”. En este informe se desarrolla un modelo matemático unicelular con el fin de simular la evolución del nivel piezométrico, el modelo es calibrado en el año 1989, ya que es el único en el que se conocen las extracciones existentes en el acuífero Serral – Salinas. El coeficiente de almacenamiento fue calibrado en 0.005. La recarga media anual en el periodo de 1960 a 1999 se calculó en 3.45 hm³/a. Se reconoce la sobreexplotación del sistema y plantean diferentes escenarios de extracciones para la recuperación de los niveles del acuífero Serral – Salinas.

En 2007 IGME – DPA realizó el “*Estudio de funcionamiento y aplicación de modelos numéricos en acuíferos carbonatados explotados intensivamente: Serral – Salinas (Murcia – Alicante)*”. En este proyecto se realizó la reconstrucción histórica de la explotación por bombeo desde su origen en el año hidrológico 1956/57 hasta el año 2005/06, la explotación media anual se calculó en 15.6 hm³/año. Respecto a los usos del agua, se determinó que para el año 2005/06 el recurso hídrico se distribuyó en 58% para regadíos agrícolas y 42% en abastecimiento urbano. Se estimó la recarga mediante el código Visual Balan V2, siendo la media anual evaluada en el periodo de 1956/67 a 2003/04 igual a 5.1 hm³/año. El balance hídrico se calculó en un déficit de 321 hm³ en el año 2006, considerando que entre el periodo 1956 a 2006 el bombeo total fue de 569 hm³ y la recarga total es 248 hm³. Finalmente, se desarrolló un modelo de flujo subterráneo usando el código MODFLOW, dicho modelo está compuesto por 16 capas (capa 1: cuaternario, capa 2-7: mioceno, capa 10-15: cretácico y capa 16: jurásico), en la Tabla 1 y en la Tabla 2 se muestran los parámetros calibrados por zonas y capas.

Tabla 1. Permeabilidades calibradas en el modelo de flujo de IGME - DPA (2007).

Zona	Kx=Ky=Kz (m/día)	Capa
1	1	No asignado
2	3	1,2,4-9,
3	3	10, 11, 15
4	1	12, 14
5	3	13
6	4	No asignado
7	0,1	3
8	15	16

Tabla 2. Parámetros de almacenamiento calibrados en el modelo de flujo de IGME - DPA (2007).

Zona	Ss (m)	Sy	Capa
1	5,11E-5	0,00051	No asignado
2	6,50E-5	0,00050	Zona occidental (celdas activas capas 2 a 16)
3	5,11E-5	0,00051	No asignado
4	8,30E-6	0,00500	Zona oriental (celdas activas capas 2 a 16)
5	0,01	0,01000	Zona oriental (capa 4; sector Mioceno)
6	0,10	0,10000	Capa 1

En 2014 IGME – DPA desarrollaron el “Modelo geológico 3D del acuífero Serral – Salinas y evaluación de las reservas totales de agua subterránea”. A partir del estudio de Sondeos de investigación hidrogeológica, una campaña sísmica de reflexión llevada a cabo en los años 80, sondeos electromagnéticos, cartografías geológicas y fotointerpretación, se reconstruyeron 5 capas georreferenciadas de techo a muro de las formaciones geológicas neógena, paleógena, senonense, cenomaniense y albiense – aptiense de la masa. Se realizó también la caracterización del sistema poroso. Para ello se calculó la porosidad de 44 muestras recogidas en campo. Finalmente se calculó el volumen de las reservas.

En 2022 IGME realizó el estudio titulado “Definición y caracterización de masas de agua subterránea compartidas entre demarcaciones hidrográficas Júcar – Segura: Serral – Salinas”. Realizan la caracterización y distribución de los recursos hídricos en la masa Serral – Salinas. Para ello, aplican tres metodologías para el cálculo de la recarga: método APLIS, software VISUAL BALAN y software RENATA. Este último permite la estimación de series de recarga y la simulación del flujo subterráneo calibrado con observaciones de nivel piezométrico. Complementaron la reconstrucción de las series de extracciones actualizándola hasta el año hidrológico 2016/17 y realizaron la distribución mensual de cada una de ellas. El modelo de flujo subterráneo desarrollado considera una sola capa de techo correspondiente a la topografía y muro en los 0 m.s.n.m. en el sector occidental y -200 m.s.n.m. en el sector oriental, los parámetros hidráulicos se han calibrado como se muestra en la Tabla 3. La recarga por infiltración de lluvia obtenida mediante el Software RENATA para el periodo de 1960/61 – 2016/17 es de 4.72 hm³/año para el total de la masa, repartidos en 2.07 hm³/año en la CHJ y 2.65 hm³/año en la CHS. Finalmente, a partir del modelo, se calculó el balance hídrico y la distribución del recurso subterráneo.

Tabla 3. Parámetros hidráulicos calibrados en el código RENATA (IGME, 2022).

Parámetro hidráulico	Sector occidental	Sector Oriental
Conductividad [m/día]	1	3
Coefficiente de almacenamiento confinado [1/m]	2.2E-5	9E-6
Coefficiente de almacenamiento libre	0.001	0.001

2 Contexto

2.1 Localización del área de estudio

La masa de agua subterránea Serral – Salinas se ubica entre las provincias de Murcia y Alicante, en el sureste de España. La superficie abarca parte del territorio de los municipios de Yecla y Jumilla en la provincia de Murcia y los municipios de Monóvar, Villena, Pinoso y Salinas en la provincia de Alicante, siendo Salinas el único núcleo urbano dentro de los límites de la masa. Se trata de una masa con un área total de 234.63 km², de los cuales 137.59 km² corresponden a la DHJ y 97.04 km² corresponden con la DHS, como se aprecia en la Figura 1.

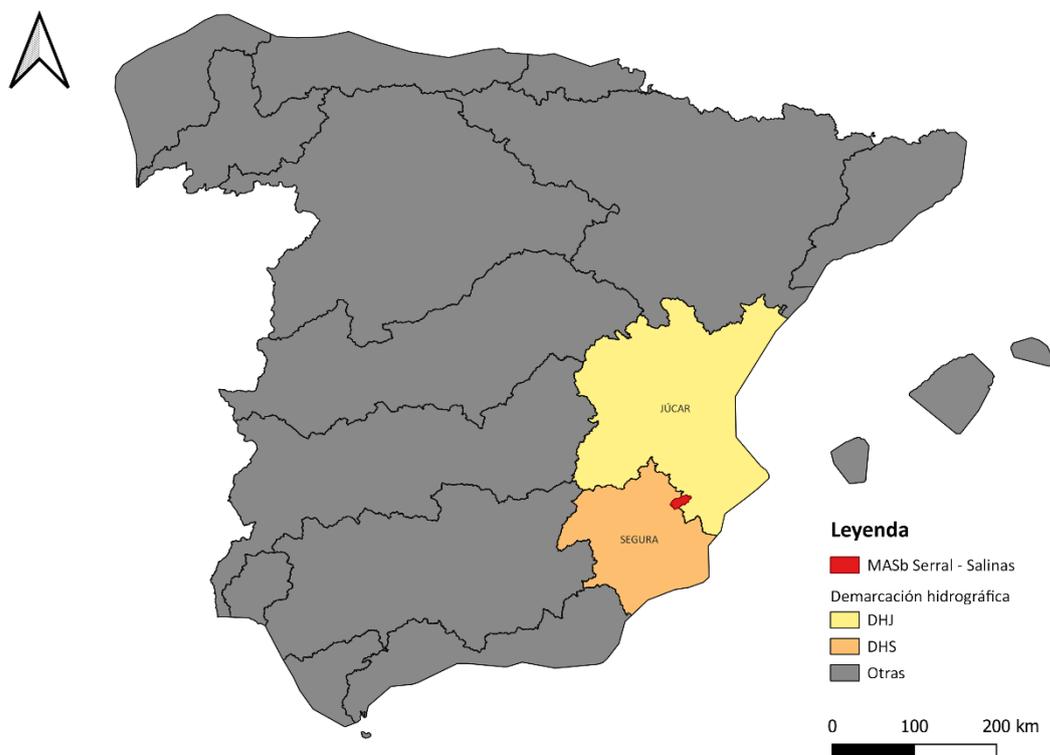


Figura 1. Ubicación geográfica de la masa de agua subterránea Serral - Salinas.

La orografía de la zona esta influenciada por las diferentes sierras que allí se encuentran (Figura 2), las más altas y que dan nombre a la masa de agua son la Sierra de Salinas con altitudes mayores a 1200 m s.n.m. (1237 m s.n.m en el Pico de la Capilla) y Sierra del Serral con altitudes superiores a los 900 m s.n.m. Al sur se extiende una planicie con elevaciones entre 600 y 700 m s.n.m. y hacia el sureste nos encontramos el punto más bajo correspondiente al Manantial Fuente de Salinas con una elevación de 473 m s.n.m. dentro de la laguna que lleva este mismo nombre.

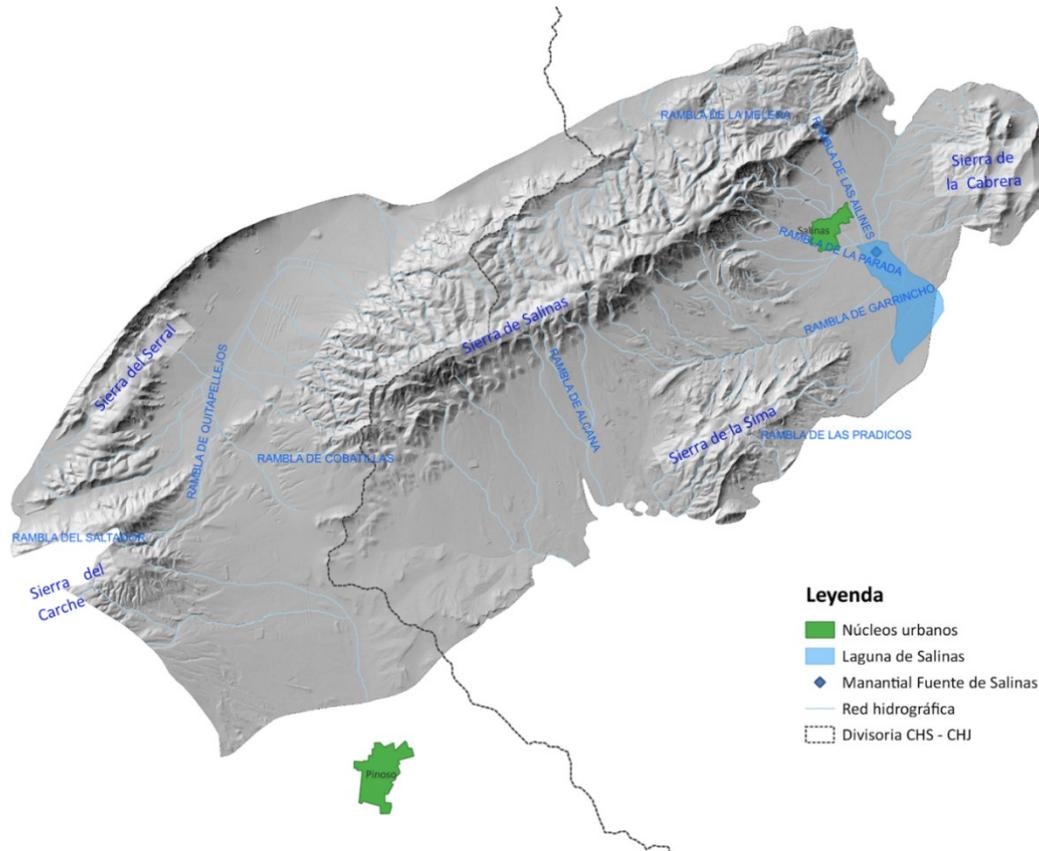


Figura 2. Relieve de la zona de estudio.

2.2 Clima, temperatura y precipitación

El clima de la zona es de tipo mediterráneo seco con carácter continental, influenciado por la sequedad que afecta al Valle del Vinalopó. En el valle la precipitación no alcanza los 300 mm/año mientras en la sierra se superan los 400 mm/año.

La precipitación media anual es de 340 mm, los periodos más lluviosos suelen ser primavera y otoño, con una precipitación media mensual de 40 mm en octubre y abril, el verano e invierno son los periodos más secos con precipitación media mensual de 22 mm en enero y 9 mm en julio. En cuanto a la temperatura, la media anual ronda los 15°C; las mínimas se dan en inviernos, con temperatura media de 7°C; las máximas se dan en verano, con temperatura media de 24 °C.

En la Figura 3 se presenta la evolución anual de la precipitación para la zona de estudio, la Figura 4 presenta la temperatura mensual y la media móvil de 12 meses. Ambas variables se obtienen del modelo PATRICAL (Pérez-Martin, 2005).

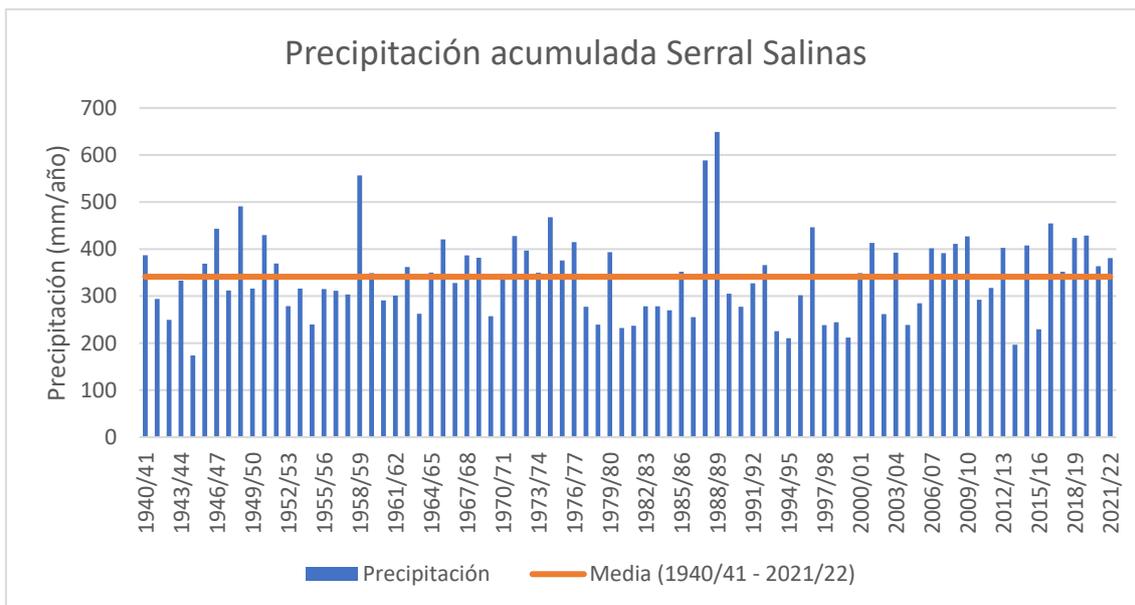


Figura 3. Precipitaciones anuales en la masa Serral - Salinas. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martin, 2005).

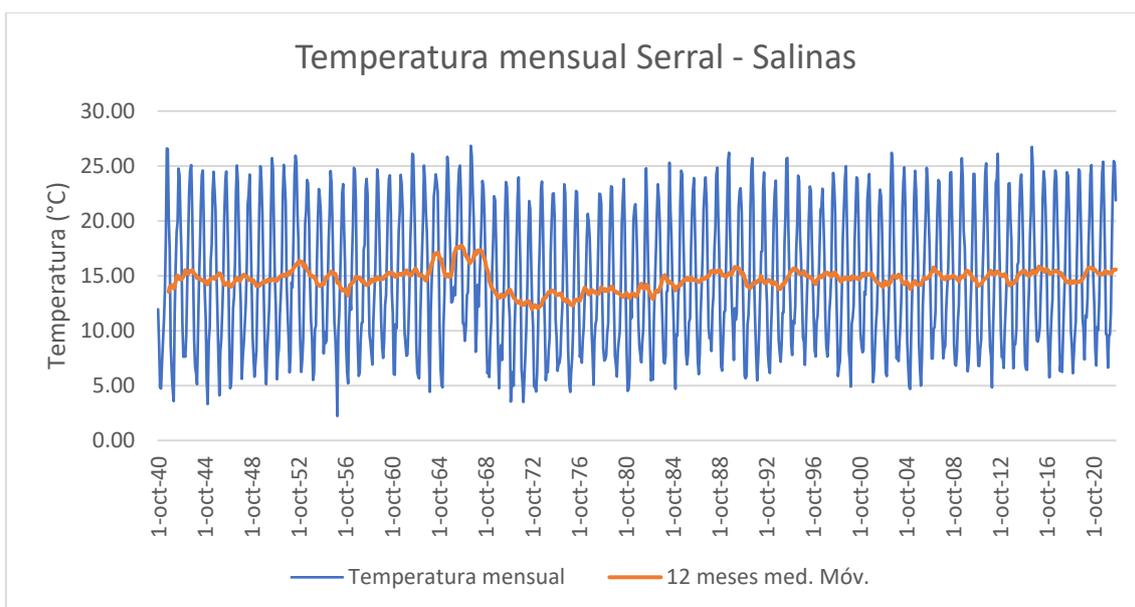


Figura 4. Evolución de las temperaturas en la masa Serral - Salinas. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martin, 2005).

2.3 Hidrología

Dentro de los límites de la masa de agua no hay cursos fluviales permanentes, sin embargo, existen ramblas y barrancos que bajan desde la sierra durante eventos de lluvia. Algunas son la Rambla de Quitapellojos, Rambla la Alcana, Rambla las Ailines, Rambla de la Parada y Rambla de Garrincho. Las tres últimas vierten agua a la laguna endorreica de Fuente de Salinas, ubicada al sur – este del centro urbano del municipio Salinas, como se muestra en la

Figura 2. Además de los aportes superficiales, la laguna se alimentaba principalmente de agua subterránea. Antes de la explotación por bombeo, el manantial Fuente de Salinas tenía una descarga de 40 l/s y constituía la única salida natural del acuífero. Los bombeos de agua subterránea provocaron un agotamiento progresivo de este manantial, hasta su completo secado alrededor de 1960 - 1970 (IGME - DPA, 2007).

2.4 Geología

En el marco geológico regional, la masa Serral – Salinas se ubica en las zonas externas de las Cordilleras Béticas (gran unidad geológica que abarca el sur de la Península Ibérica) (Figura 5), específicamente se ubica en el dominio Prebético externo. Además, contiene términos del dominio Prebético interno que cabalgan sobre el externo.

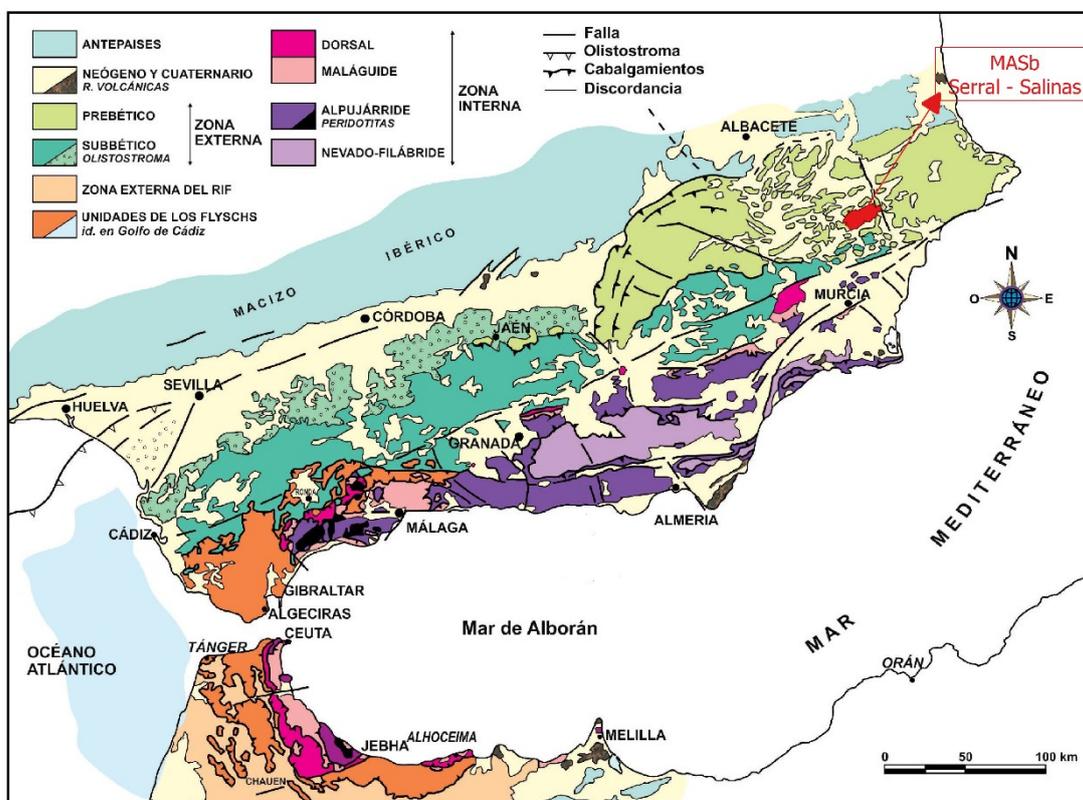


Figura 5. Mapa general de la Cordillera Bética y encuadre del área de estudio. Fuente: Modificado de Galdeano & Garrido (2016).

En general hablamos de una zona que presenta fuertes cambios de facies y de potencia. Con características litológicas intermedias del Prebético Externo, formado por depósitos continentales Jurásicos y Cretácicos en transición a plataformas internas someras y características del Prebético Interno, formado por materiales margosos y marinos que reposan sobre las secuencias Jurásicas y Cretácicas que presentan un aumento progresivo de potencia hacia en SE.

Estas importantes diferencias estratigráficas de norte a sur son condicionadas por accidentes paleográficos profundos, mientras que las diferencias estratigráficas entre este y oeste son menos acusadas, causadas por fallas de desgarre en general.

Los principales elementos estructurales que configuran la zona de estudio tienen una dirección principal SO-NE, estos son: el Anticlinal de Carche-Serral-Salinas, el cabalgamiento frontal de las Sierras del Carche-Serral-Salinas, el cabalgamiento al norte de Salinas, el cabalgamiento al norte de Pinoso, la falla de desgarre del extremo oriental de la Sierra del Carche (contacto con la Sierra de las Pansas y Serral) y la falla de desgarre del extremo occidental de la Sierra de Salinas.

2.4.1 Estratigrafía y litología

La sucesión estratigráfica en la zona de estudio comprende de muro a techo rocas de edad triásica, seguido de rocas Jurásicas, Cretácicas, rocas del Paleógeno principalmente en la Sierra de Cabrera, rocas del Neógeno y finalmente depósitos cuaternarios. A continuación, se describe de muro a techo la litoestratigrafía que conforma la masa Serral – Salinas. En la Figura 6 y Figura 7 se presentan el mapa y cortes geológicos de la zona de estudio, allí, quedan reflejados los afloramientos de las formaciones y se obtiene una visión de la estratigrafía que compone la masa.

El Triásico: corresponde litológicamente a arcillas y margas rojas con yesos del Trías Keuper. Este material conforma la base impermeable del sistema, se caracteriza por tener una permeabilidad muy baja. En la zona de estudio, los únicos afloramientos de materiales Triásicos se dan en el Diapiro del Vinalopó localizado en el límite oriental del acuífero, y otro afloramiento al SE de la población de Úbeda.

El Jurásico: corresponde litológicamente a calizas generalmente oolíticas, con nódulos de sílex. El único afloramiento de rocas Jurásicas tiene un área de 2 km² que se extiende paralelo a la estratificación Cretácica y Miocena, se localizan en la sierra de Collado y Barranco de la Boquera, al SE de la Sierra de Salinas.

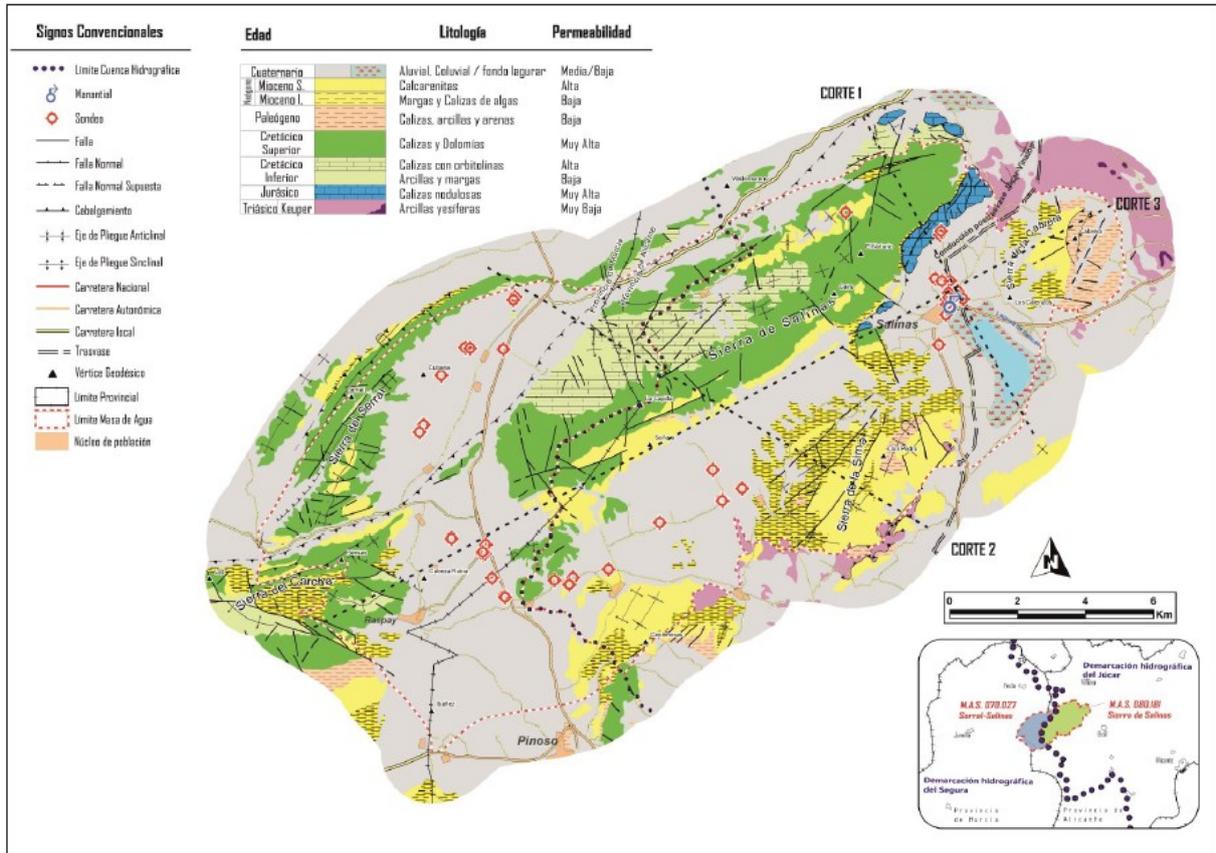


Figura 6. Mapa hidrogeológico de la masa Serral-Salinas (IGME, 2022).

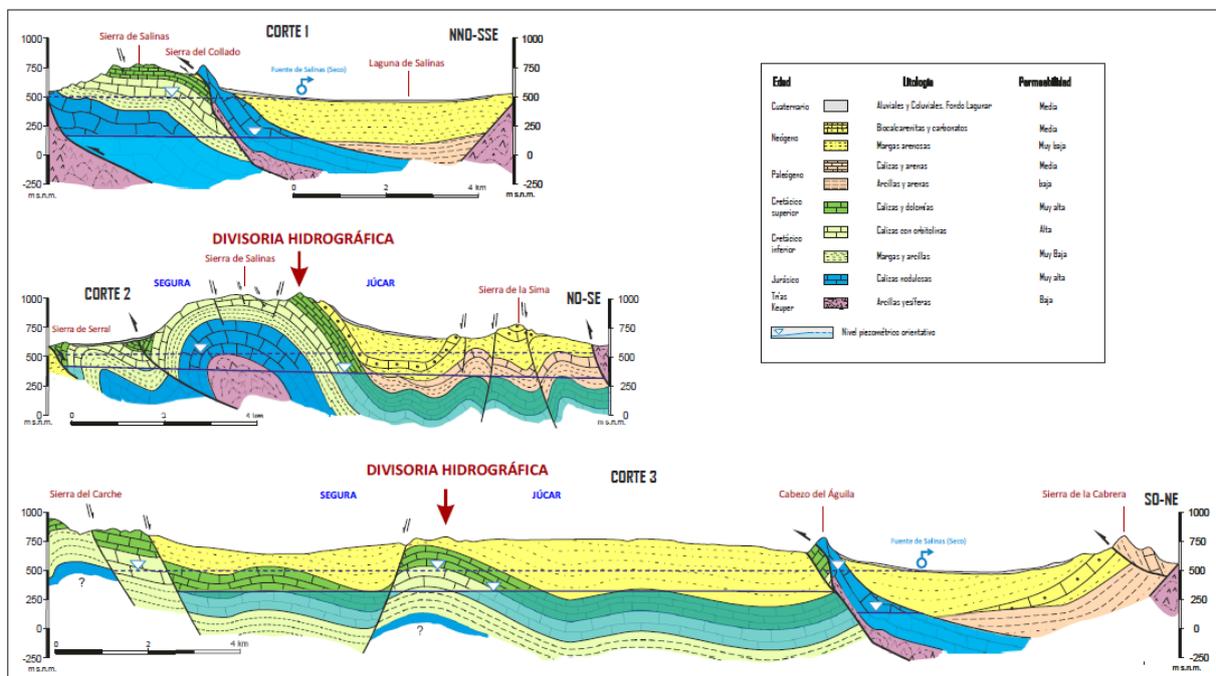


Figura 7. Cortes hidrogeológicos de la masa Serral-Salinas (localización en la Figura 6) (IGME, 2022).

El cretácico: en la zona de estudio se presentan series del Cretácico Inferior y del Cretácico Superior.

Las series que conforman el Cretácico Inferior son el Berriasiense, Barremiense, Aptiense y Albiense; las dos primeras, litológicamente corresponden a areniscas y arcillas de facies Weald y arenas y arcillas versicolores de la facies Utrillas, materiales de muy baja permeabilidad con conductividad hidráulica media de 1 m/d (IGME, 2022), esta unidad estratigráfica aflora en el Cerro del Recodo al NE de la Sierra de Salinas; las dos últimas, litológicamente corresponden a calizas con Toucasias, arenas y calcarenitas del Aptiense y calizas con Orbitolinas, calcarenita, arenas y margas del Aptiense, afloran ampliamente en el núcleo anticlinal de la Sierra de Salinas.

El Cretácico superior se compone principalmente por Calizas y Dolomías. Estratigráficamente se divide en: la serie Cenomaniense, constituida por dolomías masivas negras Karstificadas, aflora en todo el anticlinal de Sierra de Salinas y en la Sierra del Serral; y la serie Senonense, litológicamente correspondiente con calizas y calizas margosas, que aflora al este de la Sierra de Salinas.

El Paleógeno: corresponde litológicamente con calizas eocenas y conglomerados, areniscas, acillas y margas oligocenas. Aflora principalmente en la Sierra de Cabrera, otros afloramientos en la Sierra de Salinas y Sierra de la Sama son muy reducidos. Bajo el relleno neógeno los sondeos no perforan sedimentos paleógenos.

El Neógeno: se presenta en la serie del Mioceno Inferior y Mioceno Superior, litológicamente las conforman margas y calizas de algas, y calcarenitas respectivamente. Se encuentra ampliamente extendido al sur de la Sierra de Salinas donde se ven afloramientos, alcanza potencias de 600 m.

El Cuaternario: lo conforman sedimentos de facies continentales fluviales y aluviales, compuestos por conglomerados, gravas, arenas, arcillas y limos. Se caracteriza por una permeabilidad baja.

2.5 Funcionamiento hidrogeológico y piezometría

La masa Serral – Salinas está formada por tres acuíferos:

- **Acuífero Cretácico:** Es el principal acuífero de Serral – Salinas, se encuentra en gran parte de su extensión confinado por las margas del Mioceno como techo y el acuitardo de Utrillas – Weald como muro.
- **Acuífero Jurásico:** Constituido por la formación hidrogeológica Jurásica en profundidad, es un acuífero principalmente confinado bajo el acuitardo de Utrillas – Weald y por base el Trías Keuper, sin embargo, se identifica un afloramiento de éste

en el cabalgamiento existente al norte de Salinas que da lugar a las elevaciones de la Sierra de Collado, allí, se conectaba con el acuífero cretácico cuando los niveles piezométricos estaban más altos (IGME, 2022).

- Acuífero de Cabrera: Constituido por las formaciones hidrogeológicas del Paleógeno, se ubica en la Sierra de Cabrera. Se encuentra hidráulicamente desconectado de los dos anteriores. Debido a los descensos piezométricos y la mala calidad de sus aguas (Atlas hidrogeológico de la provincia de Alicante, 2015), no es explotado y es de poca importancia dentro de la masa.

Las primeras superficies piezométricas trazadas en la zona de estudio se remontan al año 1977 (Figura 8) cuando ya se encontraba la masa en régimen alterado. Desde entonces, ya se hablaba del cambio de gradiente significativo entre el sector oriental y occidental de la masa, implicando su desconexión hidráulica. Se observa también, la generación de un conoide de bombeo en el sector oriental.

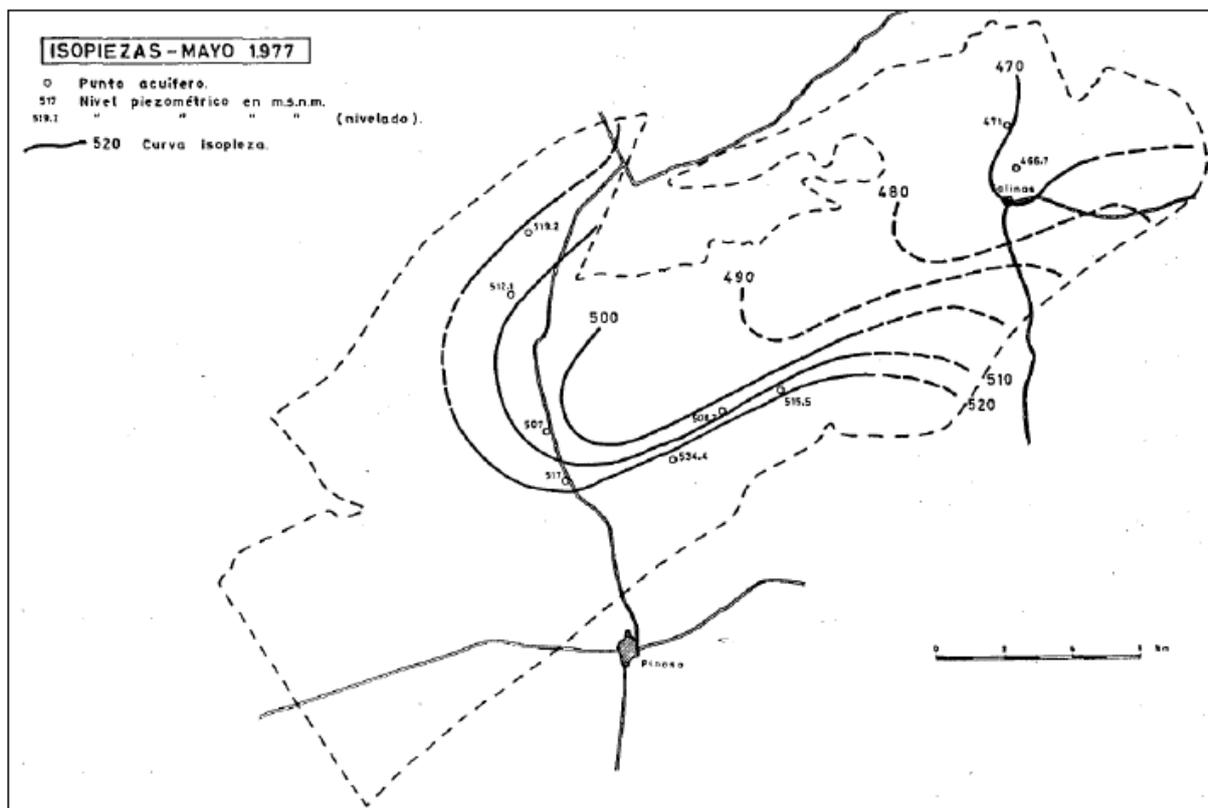


Figura 8. Mapa de isopiezas de mayo de 1977 (IGME-DPA, 1982)

En el informe presentado por IGME-DPA (2007), se trazan isopiezas para octubre de 2006 que diferencian claramente el salto piezométrico entre sectores ubicando una línea de separación trazada de norte a sur tres kilómetros al oeste de Salinas (Figura 9).

En el estudio realizado por IGME (2022), a partir de las características hidrogeológicas y de la información planteada en estudios previos, se determinaron superficies piezométricas para la masa en régimen natural e influenciado a final del año 2017 (Figura 10). También se puede observar la desconexión hidráulica entre los sectores oriental y occidental, y se observa como la dirección preferencial del flujo es hacia los puntos de bombeo.

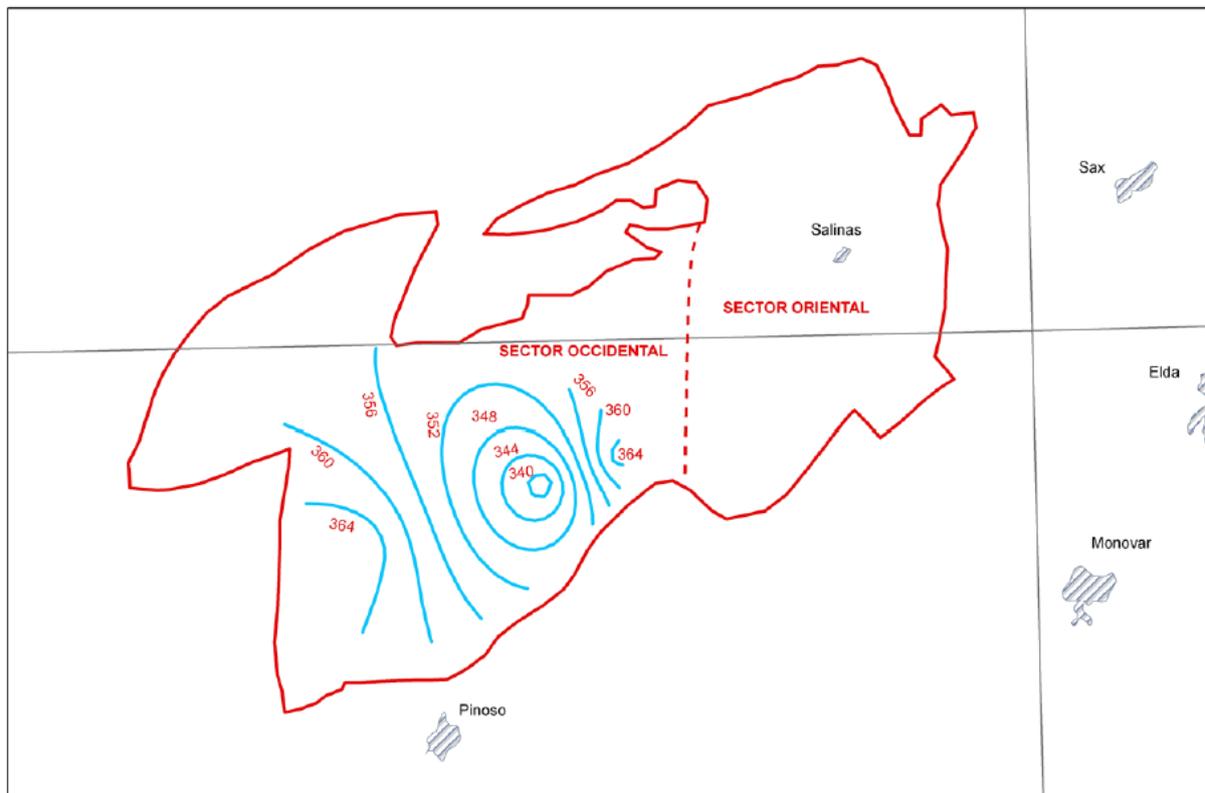


Figura 9. Mapa de isopiezas de octubre de 2006. Nota: “en el sector oriental las escasas diferencias de nivel piezométrico y los propios errores de nivelación no permiten trazar isopiezas” (IGME - DPA, 2007).

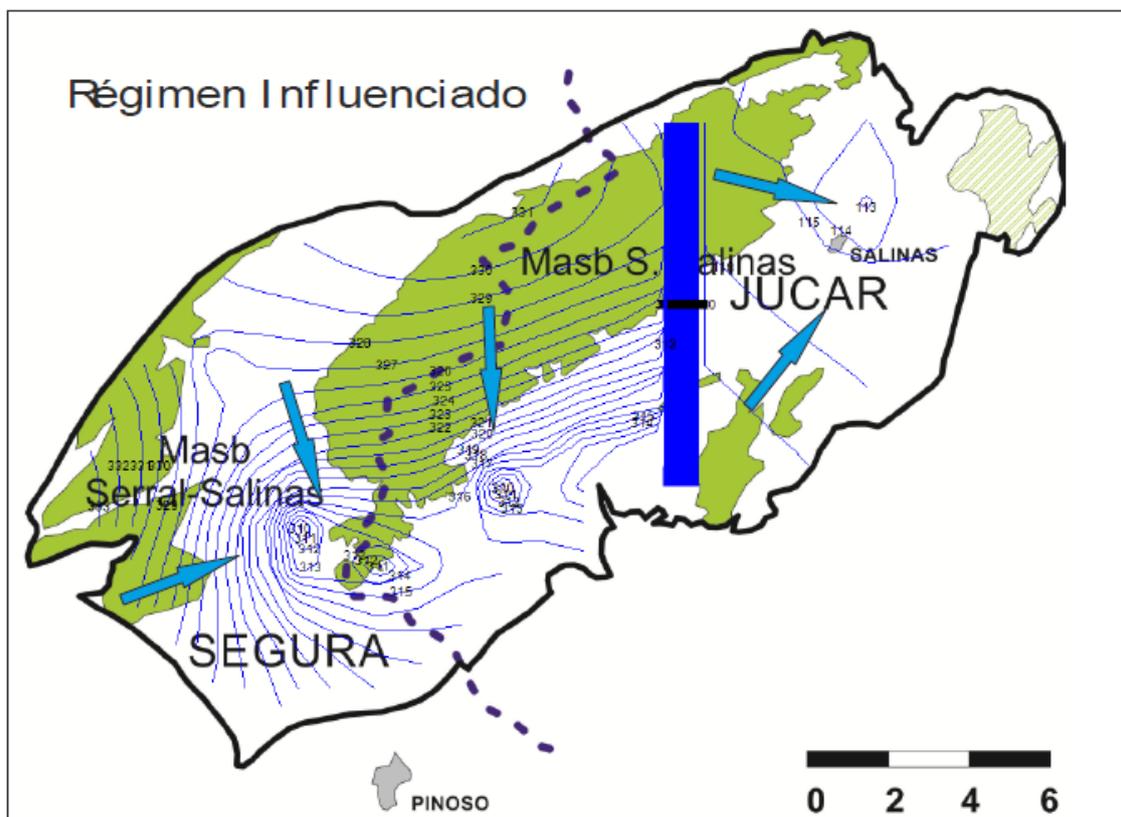
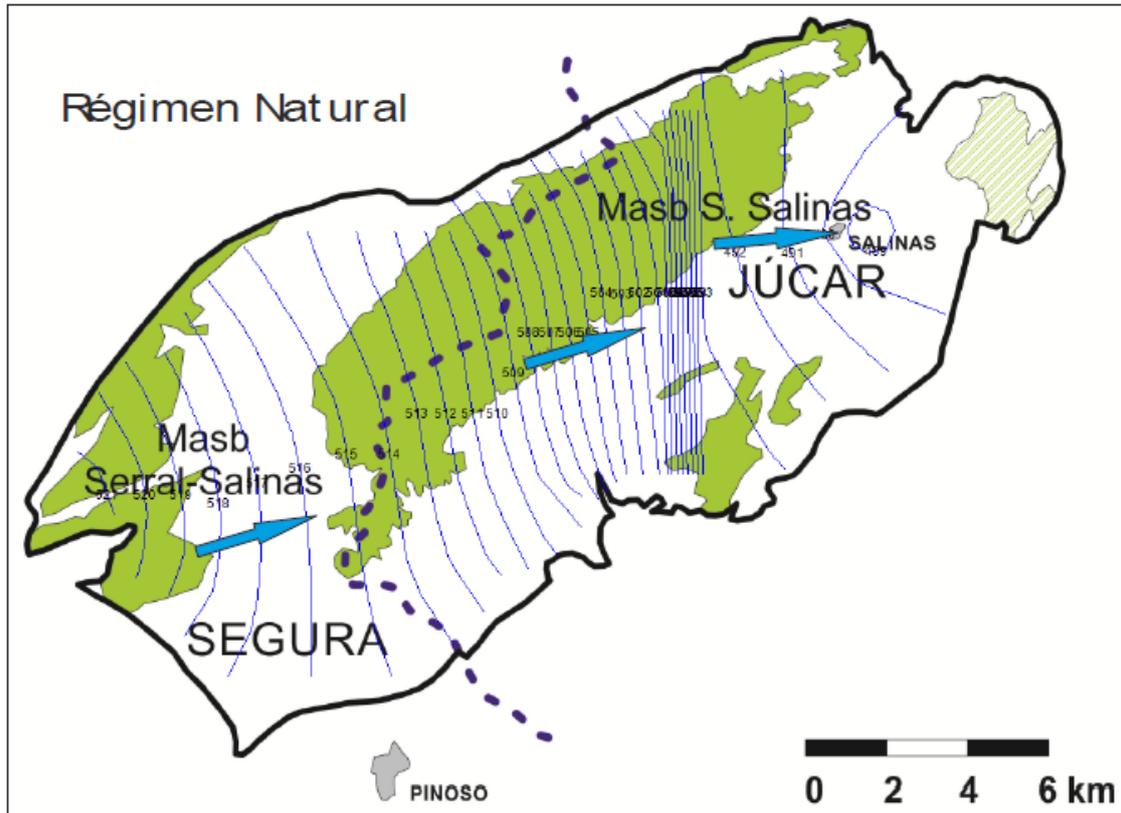


Figura 10. Superficie piezométrica deducida en régimen natural y en régimen influenciado (alterado por bombeos) al final del año 2017 (IGME, 2022).

2.6 Usos de agua

El sistema de la masa Serral – Salinas está altamente influenciado por la presencia de extracciones de agua a través de captaciones. La explotación a gran escala se inició a mediados del siglo XX. En estado natural, la masa de agua contaba con una única surgencia, el manantial Fuente de Salinas, por donde drenaban los acuíferos Mioceno y Jurásico, conectados a través del Cuaternario. El manantial funcionó hasta aproximadamente 1961, previo a la implementación de la red de control hidrométrico, por lo que, la falta de registros detallados sobre la surgencia dificulta la comprensión completa de su comportamiento y dinámicas en el secado definitivo.

La Laguna de Salinas, que en régimen natural era alimentada principalmente por los aportes subterráneos y en menor medida por la precipitación directa y escorrentía superficial, actualmente, no recibe aportes subterráneos y presenta un carácter temporal (IGME, 2022).

Se han registrado 56 captaciones, 34 captaciones (19 activas) de la CHJ y 22 captaciones (12 activas) de la CHS, pueden agruparse en 8 entidades explotadoras de agua como se muestra en la Figura 11. De mayor a menor consumidor de agua del acuífero históricamente son: la Bateria N8, Abastecimiento Elda, Abastecimiento y riego del Alto Vinalopó, la Comunidad de Regantes de la Hoya del Mollidar, la S.A.T Aguas del Pinoso y el abastecimiento a Pinoso. Las demás consumen cada una menos del 1% de las explotaciones.

El agua extraída del acuífero tiene dos usos principales, agrícola y urbano (incluye algunas industrias conectadas al suministro urbano). Entre los años 2005/06 a 2021/22 el recurso fue destinado en un 59% para riego y 41% para el abastecimiento urbano.

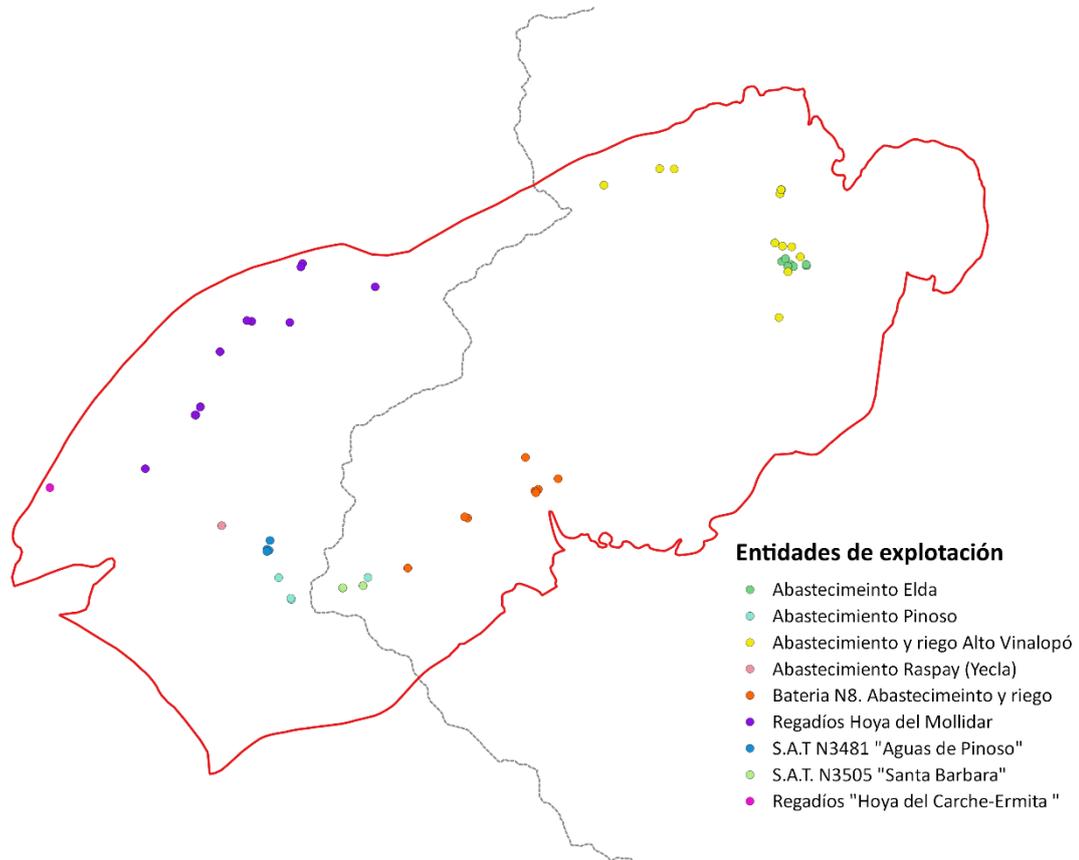


Figura 11. Sondeos con extracción de recursos subterráneos en la masa Serral - Salinas (periodo 1960/61 - 2021/22) y entidades de explotación a las que pertenecen.

3 Modelo conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual permite definir las principales características del sistema acuífero y será el sustento técnico a la hora de definir el modelo numérico. Entre las características a definir están: identificación de unidades hidrogeológicas y condiciones de contorno, revisión de niveles de la piezometría, identificar y cuantificar las entradas y salidas de agua. En Serral – Salinas, se considera que la única entrada al modelo es la procedente de la recarga por precipitación y los retornos agrícolas. Las salidas en régimen natural se dan exclusivamente por el manantial Fuente de Salinas y en régimen transitorio las salidas se realizan por los pozos de captación.

3.1 Unidades hidrogeológicas y funcionamiento

Las unidades hidrogeológicas se refieren a un conjunto de formaciones geológicas con características hidráulicas similares, tales como la permeabilidad y la porosidad, de modo que conviene considerar su funcionamiento hidrogeológico conjuntamente. Estas unidades pueden ser acuíferos, acuitardos o capas impermeables. Se determinó 5 unidades hidrogeológicas que configuran la masa Serral - Salinas:

- Unidad hidrogeológica del Mioceno
- Unidad hidrogeológica del Senonense
- Unidad hidrogeológica del Cenomaniense
- Unidad hidrogeológica del Albiense - Aptiense
- Unidad hidrogeológica del Jurásico

La unidad hidrogeológica del Mioceno corresponde a un importante relleno margoso de baja permeabilidad, que confina parcialmente a las unidades del Cretácico.

En las unidades hidrogeológicas calizo-dolomíticas, Senonense y Cenomaniense, IGME-DPA (2007) reporta los resultados de un ensayo realizado en el actualmente inexistente “Sondeo de Salinas”, en el que se obtuvo una transmisividad que varía entre 2400 y 12000 m²/d y un valor del coeficiente de almacenamiento de 1%. Además, según Soto Venegas *et al* (2004), la conductividad hidráulica en las unidades alcanza los 100 m/d. La unidad hidrogeológica del Albiense – Aptiense presenta también una permeabilidad alta, pero inferior al tramo calizo – dolomítico. La transmisividad media de esta formación es de entre 100 y 500 m²/d y su coeficiente de almacenamiento en torno a 1% (IGME-DPA, 1982).

La unidad hidrogeológica del Jurásico se compone principalmente por calizas nodulosas y dolomías de permeabilidad muy alta. Se localiza a grandes profundidades, bajo el acuitardo Utrillas-Weald del Cretácico inferior, por tanto, es una formación poco conocida.

En cuanto a la porosidad de los materiales se refiere, IGME-DPA (2014) realizó la caracterización del sistema poroso cuyos resultados se muestran en la Tabla 4. Cabe resaltar que las muestras obtenidas del Jurásico corresponden con una afloración al sureste de la Sierra de Salinas, en el paraje conocido como Sierra de Collado y Barranco de la Boquera, no con el Jurásico profundo ubicado bajo el Cretácico.

Tabla 4. Valores medios de porosidad de las muestras de roca analizadas clasificadas por edad litológica (IGME - DPA, 2014)

Unidad	N	Porosidad (%)
Jurásico	9	2.5
Aptiense-Albiense	13	2
Cenomaniense	18	4.15
Senonense	4	4.9

3.2 Límites

En este estudio se ha tenido en cuenta el límite establecido por la CHJ. Los límites de la masa son todos impermeables por la presencia de materiales margosos, arcillosos y yesíferos. De acuerdo con los estudios IGME (1982), IGME (2007), IGME (2014), los límites del sistema son:

Límite norte: materiales acuitardos del cretácico inferior al norte de la Sierra de Salinas, tales como arenas y margas de facies Utrillas. Al norte de la Sierra del Serral, el límite está definido por los materiales del cretácico inferior junto con un cabalgamiento que pone en contacto los materiales cretácicos con materiales margosos del Mioceno.

Límite este: conformado por arcillas y yesos del Trías.

Límite sur: Al este, se encuentran materiales de Trías de la alineación Cañada Roja, al occidente, el límite está definido por el Cretácico que presenta un cambio de facies a materiales margosos, cambio coincidente con el cabalgamiento al norte de Pinoso.

Límite oeste: lo configuran materiales margosos del Mioceno, que desconectan la Sierra del Carche de la Sierra de Salinas mediante la depresión Miocena al oeste de Pinoso (Figura 6).

3.3 Funcionamiento y dominios hidrogeológicos

Los dominios que se definen en este trabajo, comprenden áreas geográficas de tamaño regional con características hidrogeológicas comunes, para definirlos, se usó el mapa de permeabilidades realizado por IGME en escala 1:200.000 (Figura 12). Allí, se identificó 5 dominios hidrogeológicos distintos que van de permeabilidad muy alta a permeabilidad muy baja, distribuidos como se presenta a continuación.

- Dominio 1: zonas de permeabilidad muy alta que se encuentran principalmente en depósitos aluviales – coluviales y fondo del valle en la depresión miocena al noroeste de Pinoso, y otros pequeños depósitos ubicados en la Sierra de Salinas y Sierra de la Sima.
- Dominio 2: se trata de materiales de permeabilidad alta tales como dolomías y eventualmente calizas del Cretácico superior. Este dominio predomina en la Sierra de Salinas.
- Dominio 3: predomina en las unidades cartográficas de la masa y se trata de materiales de permeabilidad media, tales como gravas, arenas, arcillas y limos del cuaternario. Se desarrolla en la depresión neógena y en la Hoya del Mollidar.
- Dominio 4: se trata de materiales de permeabilidad baja tales como calcarenitas y calizas con Orbitolinas y Rudistas, dolomías, margas y arenas del Cretácico inferior que afloran en la Sierra de Salinas y materiales conglomerados, margas, calcarenitas, biocalcarenitas y calizas de Algas que se encuentran en la Sierra de la Sima y al noreste de Pinoso.
- Dominio 5: dominio de permeabilidad muy baja que solo se encuentra en los límites impermeables sur y este de la masa, se compone por Arcillas abigarradas y yesos, a veces con margas y areniscas (F. Keuper).

Cada uno de estos dominios determina la conductividad hidráulica asignada en la capa superior en el modelo. En algunos casos, se ha optado por subdividir estos dominios con el fin de mejorar la calibración y el rendimiento del modelo.

La Tabla 5 muestra un rango de posibles valores de parámetros hidráulicos para cada dominio, este se tendrá en cuenta para la asignación preliminar de parámetros y se procura mantenerse dentro de los rangos una vez realizada la calibración.

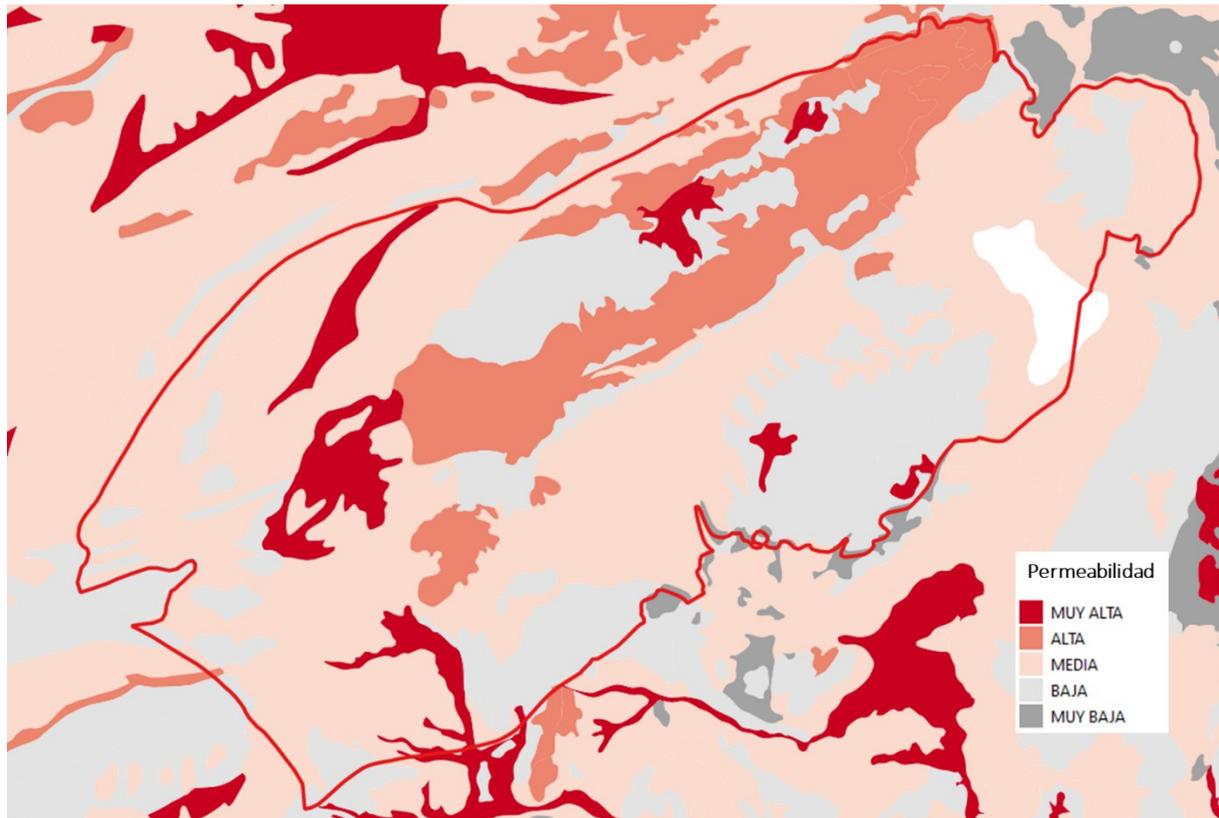


Figura 12. Mapa de permeabilidad en la zona de estudio. Fuente: modificado de IGME (2009).

Tabla 5. Valores de conductividad hidráulica y almacenamientos según dominio. Fuente: Elaboración propia con datos de Custodio & Llamas (1983) y Freeze & Cherry (1979)

	k_x (m/día)	S_s (1/m)	S_y (-)
Dominio 1	1000-450	$10^{-5} - 10^{-2}$	0.20 – 0.35
Dominio 2	450 – 1	$10^{-5} - 10^{-2}$	0.20 – 0.35
Dominio 3	1 – 0.01	$10^{-5} - 10^{-2}$	0.10 – 0.20
Dominio 4	0.01 – 0.0001	$10^{-5} - 10^{-2}$	0.05 – 0.10
Dominio 5	0.0001 – 0.000001	$10^{-5} - 10^{-2}$	0.05 – 0.10

3.4 Captaciones

Para el desarrollo del modelo de flujo se cuenta con series de extracción mensuales desde 1960/61 a 2021/22, provenientes de diversos estudios previos. IGME-DPA (2007) realizaron una detallada reconstrucción histórica de la explotación por bombeo desde el año hidrológico 1956/57 al 2005/06, obteniendo series anuales de bombeos en 45 captaciones. Posteriormente, IGME (2022) han complementado la serie hasta el 2016/17 y a partir de la información disponible han estimado la distribución mensual de las series. Para el presente estudio, se han completado las series de extracciones hasta el año hidrológico 2021/22, para

ello se usó la información de contadores de la CHJ disponible a escala mensual de 2005/06 a 2020/21, y escala anual para el año 2021/22, distribuido mensualmente según la curva de demanda de la respectiva UDA a la que abastece el pozo. La información de contadores de la CHS cuenta con datos mensuales desde 2007/08 a 2021/22 en algunas captaciones. En los casos que esta información no estaba disponible, se usó los datos anuales distribuidos según la curva de demanda de la UDA.

Se han considerado 34 captaciones (19 activas) de la CHJ y 22 captaciones (12 activas) de la CHS, para un total de 56 captaciones, 31 de ellas actualmente activas. Las captaciones inferiores a 7000 m³/año se han agrupado en una sola serie ubicada en el centroide de la masa. En la Tabla 6 se listan las captaciones, detallando su localización, la profundidad según la información suministrada por las confederaciones y el IGME, la capa en la que extrae cada captación que fue estimada en base a la profundidad del pozo y la geometría del modelo. La distribución de captaciones en la masa se muestra en la Figura 11.

Tabla 6. Localización de las captaciones de agua subterránea en la masa Serral - Salinas.

Código	Nombre	Demarcación	X	Y	Z	Prof (m)	Capa
A_016	D. CIRO III	Júcar	675690	4260050	633	800	Albiense
VI1807	Boquerón I	Júcar	682023	4267844	566	660	Albiense
VI0992	POZO Nº6	Júcar	682298	4265985	486	150	Neógeno
273380033	La Florida	Júcar	682555	4266178	494	¹	Neógeno
273380035	Pozo Garrincho	Júcar	682714	4265941	485	119	Neógeno
273380036	Pozo Begoña	Júcar	682380	4265925	490	117	Neógeno
273380037	Pozo Pilarica	Júcar	682226	4265929	492	148	Neógeno
273380039	Las Norias	Júcar	682232	4265785	488	170	Neógeno
273380045	Pozo de la Virgen	Júcar	681996	4264581	497	150	Neógeno
273420023	LEL - 1	Júcar	672267	4257972	620	615	Neógeno
VI1813	La Mina Bis	Júcar	682329	4266445	519	650	Cenomaniense
VI1811	El Pinar	Júcar	682087	4266463	505	484	Cenomaniense
VI1691	Corraló	Júcar	673834	4259292	635	562	Cenomaniense
VI0993	Esperanza	Júcar	682066	4266059	492	670	Cenomaniense
VI0991	Nuevo Garrincho	Júcar	682707	4265978	483	820	Cenomaniense
VI0634	Casa Peñas	Júcar	679249	4268496	700	193	Jurásico*
Nuevo010	Nuevo Lel	Júcar	671097	4257506	615	650	Cenomaniense
273380025	Boqueron III	Júcar	682056	4267952	566	408	Cenomaniense
273380030	Casa del Escolano	Júcar	681889	4266546	520	484	Cenomaniense
273380048	Boqueron I-D	Júcar	682060	4267948	567	408	Cenomaniense
273420038	LEL - 1	Júcar	671223	4257726	618	655	Cenomaniense
273430001	Herrada	Júcar	673757	4259324	635	530	Cenomaniense
273430085	Don Ciró I	Júcar	675598	4260005	641	723	Cenomaniense
273430086	Don Ciró II	Júcar	675633	4259985	641	660	Cenomaniense
menor7000	Centroide_080-181	Júcar	678453	4263446		²	Cenomaniense
402	Pozo Regina	Júcar	682163	4266132	496	719	Cenomaniense

Código	Nombre	Demarcación	X	Y	Z	Prof (m)	Capa
95561	Hoya Hermosa	Júcar	678867	4268503	690	120	Jurásico *
VI2630	Toscar	Júcar	675352	4260889	677	633	Albiense
VI1814b	Paredon Ramal	Júcar	670563	4257449	622	¹	Albiense
VI1814	Santa Bárbara	Júcar	670565	4257454	622	378	Albiense
VI1810	Boquerón II	Júcar	682051	4267950	566	600	Albiense
VI1692	Don Ciro II-D	Júcar	675624	4259958	639	699	Albiense
273430096	Don Ciro III	Júcar	676206	4260329	625	708	albiense
55191	CASA RITAS	Júcar	677407	4268071**	677	140	Albiense
8584_1	Raspay 1	Segura	668578	4258470	638	680	Albiense
8584_2	Raspay 2	Segura	668630	4258440	638	380	Albiense
8584_3	Raspay 3	Segura	668576	4258411	641	700	Albiense
273420040	Casas del Castellano N3	Segura	668657	4258700	638	300	Albiense
7941_1	Raspay IV	Segura	668884	4257718	635	400	Albiense
7941_2	Paredon 2	Segura	669215	4257147	632	500	Albiense
273420019	El Paredón	Segura	669202	4257179	627	154	Cenomaniense
4608	Joaquín	Segura	667389	4259092	653	679	Albiense
808	Pozo Casa del Rincon	Segura	665389	4260592	610	177	Jurásico*
432	Hoya del Carche-Ermita	Segura	662889	4260092**	625	260	Albiense
8119_1	Casa Valdés (N4)	Segura	666706	4262001	567	306	Jurásico
8119_2	Casa Valdés (N1)	Segura	666713	4262013	568	310	Jurásico
8119_3	Hoya del Mollidar	Segura	671414	4265388**	655	400	Jurásico
8119_4	Hoya del Mollidar	Segura	666692	4262010	568	325	Jurásico
8119_5	San Isidro 2	Segura	668180	4264478	580	500	Jurásico
273360002	Pozo N1 o Pozo sur	Segura	668050	4264500	578	112	Jurásico
273360003	Hoya Moñigal	Segura	669175	4264450	600	150	Jurásico
273360026	Casa el Quincallero	Segura	669509	4266004	614	117	Jurásico
273360027	Casa de los quincalleros	Segura	669466	4265913	600	100	Jurásico
273360032	Pozo San Cayetano	Segura	667346	4263679	580	200	Albiense
273420026	Casa Valdés (N2)	Segura	666831	4262226	568	940	Albiense
273420027	Casa Valdés (N3)	Segura	666827	4262215	568	299	Albiense

*Se modela en una capa inferior a la que sugiere la profundidad registrada.

** Se modifica ligeramente su ubicación.

¹No hay registros de profundidad, se asume la misma capa que pozos cercanos.

²Grupo de todas las captaciones menores a 7000 m³/año, se asume que captan del cenomaniense por mayoría.

En la Figura 13 se presenta la evolución de las extracciones. Desde 1960 las extracciones aumentan progresivamente hasta 1983 donde se alcanzan los 19 hm³/año. A partir de allí se estabilizan alrededor de 16 hm³/año. La extracción media de 1960/61 a 2021/22 es de 13 hm³/año, de los que 8.5 hm³/año corresponden a captaciones de la CHJ y 4.5 hm³/año a la CHS. Entre los años 1980/81 a 2021/22 la media es de 16.2 hm³/año de los que 10.6 y 5.6 hm³/año corresponde a captaciones de la CHJ y CHS respectivamente.

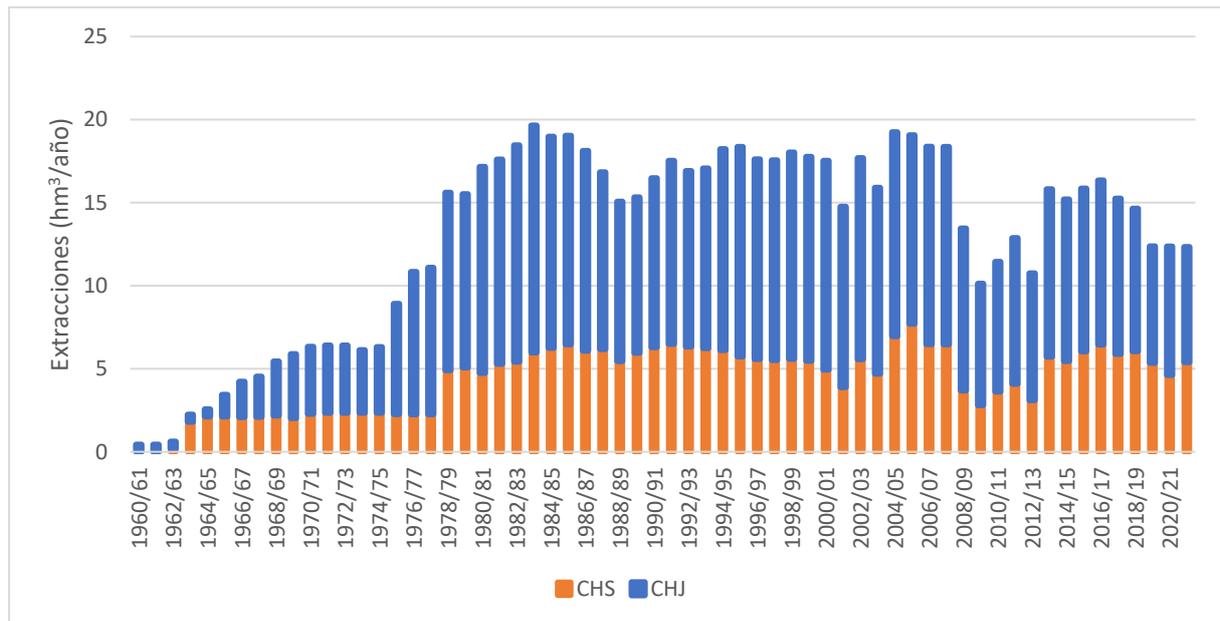


Figura 13. Evolución anual de las extracciones totales y por demarcación hidrográfica.

3.5 Recarga

Estudios previos coinciden en considerar solo la recarga natural por la infiltración de lluvia, considerando que la superficie de cultivos sobre los principales afloramientos permeables es reducida (IGME-DPA, 2007; IGME-DPA, 2014; IGME, 2022) (Figura 19). Sin embargo, en el Plan Hidrológico (CHJ, 2023a), la CHJ emplea para la estimación del recurso hídrico subterráneo la simulación hidrológica del modelo PATRICAL (Pérez-Martin, 2005), que incorpora tanto los retornos de riego como la infiltración de lluvia en el cálculo de los recursos de la masa Serral - Salinas. El plan hidrológico del Júcar 2022 – 2027 estima para la masa, 1.54 hm³/año de recarga de precipitación y 0.55 hm³/año de retornos de riego. Por tanto, para el presente estudio se consideran ambas recargas.

En la Figura 14 se observa la evolución de las extracciones totales en la masa comparados a la recarga total, como consecuencia de una explotación superior a la recarga, se puede observar en la Figura 15 el descenso continuo del nivel freático en los piezómetros de control.

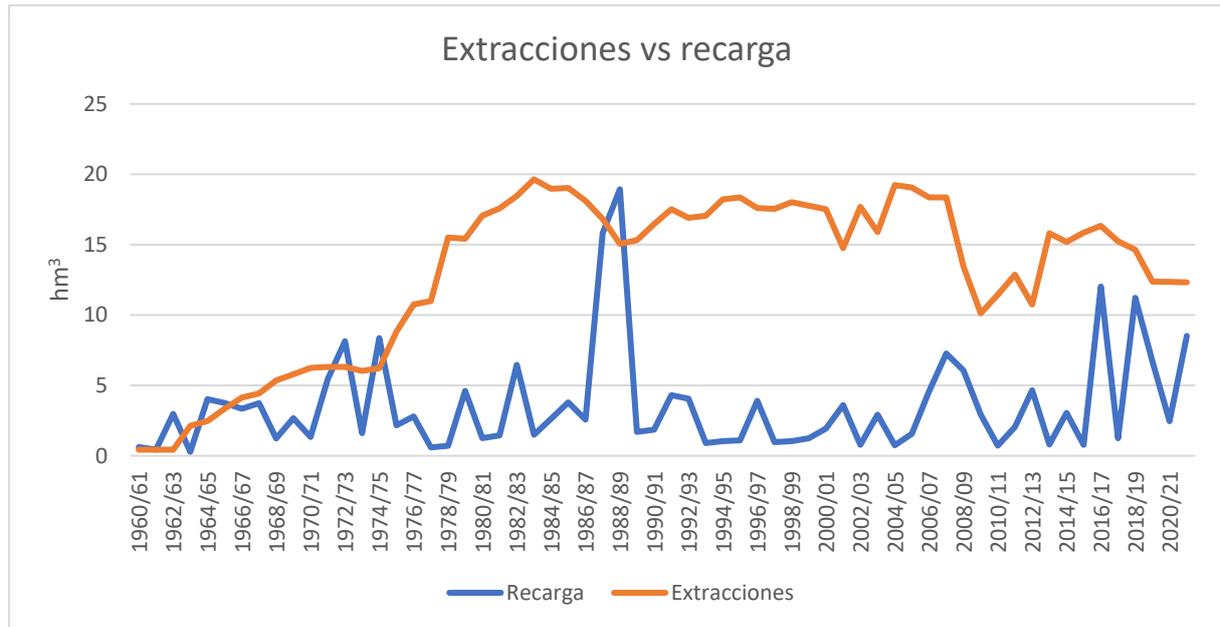


Figura 14. Evolución anual de la recarga total en la masa Serral - Salinas y comparación con las extracciones subterráneas.

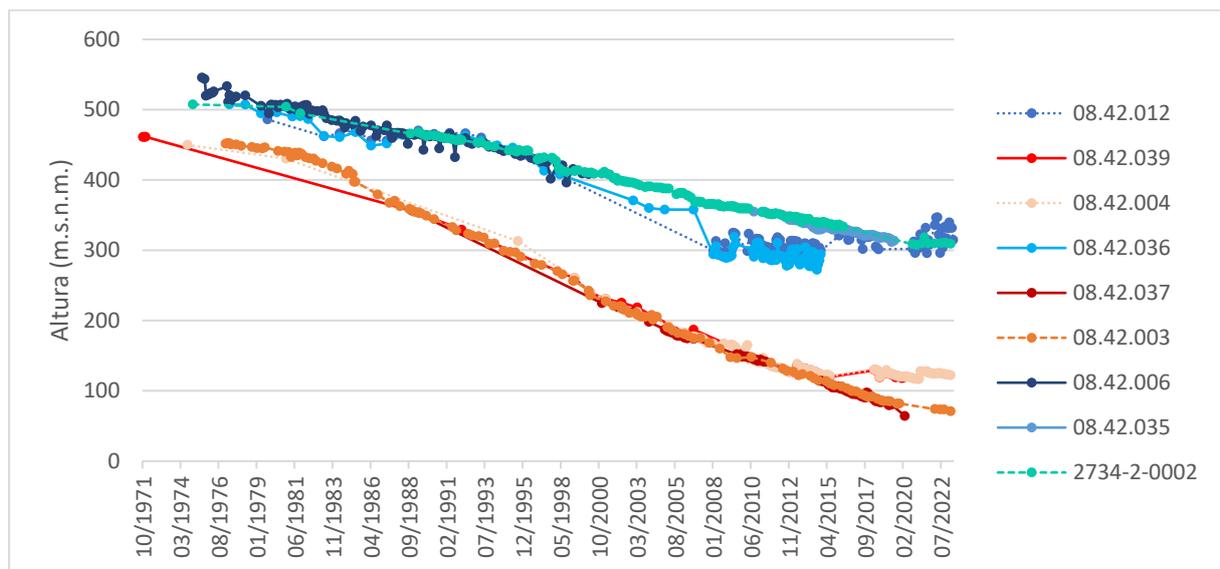


Figura 15. Evolución piezométrica en pozos representativos del sector oriental (tonos cálidos) y occidental (tonos fríos).

3.5.1 Recarga por precipitación

La recarga por infiltración de lluvia se toma del modelo PATRICAL, que divide la masa en tres sectores, 8157020, 8157060 y 7102700. Para cada sector se dispone de una serie mensual. Los polígonos de cada sector se adaptaron respecto a la geometría del modelo como se muestra en la Figura 16. En la Figura 17 se presenta la evolución de la recarga en la masa Serral Salinas. La recarga media por precipitación es de 3.13 hm³/año evaluada entre el año hidrológico 1960/61 y 2021/22 y de 3.32 hm³/año evaluada entre 1980/81 y 2021/22. Discretizando por los sectores 7102700, 8157060 y 8157020, la recarga media es

de 1.44 hm³/año, 0.71 hm³/año, 0.99 hm³/año, respectivamente. Para la incorporación de esta información en el modelo matemático, la recarga se distribuye de forma uniforme entre las celdas de cada sector.

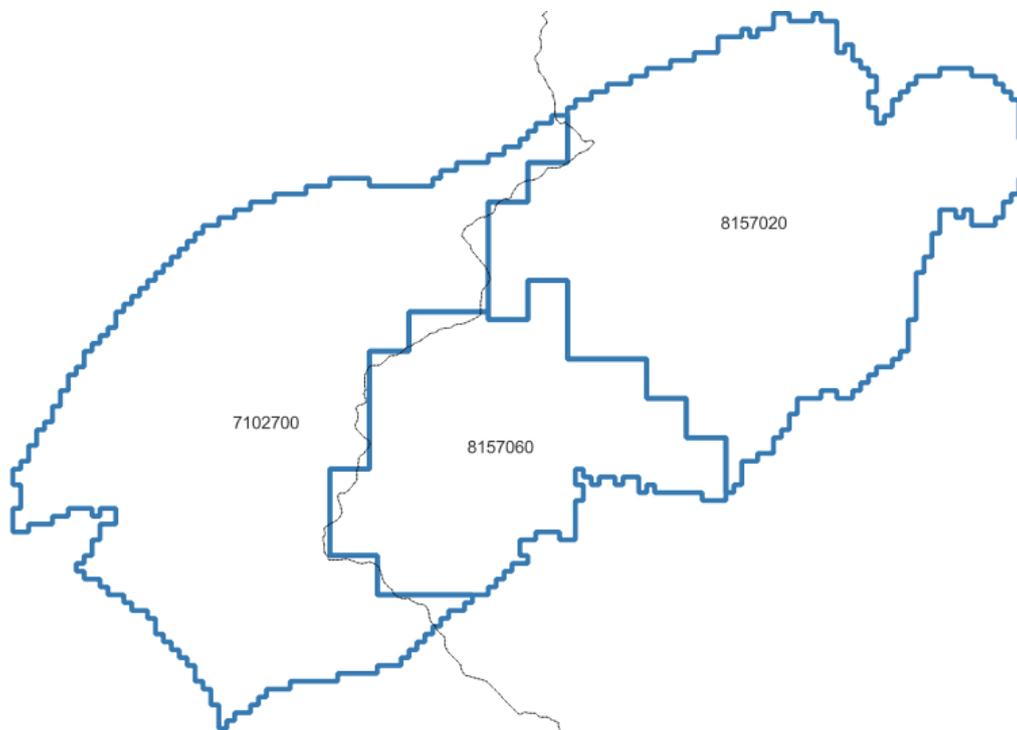


Figura 16. Sectores de recarga por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL.

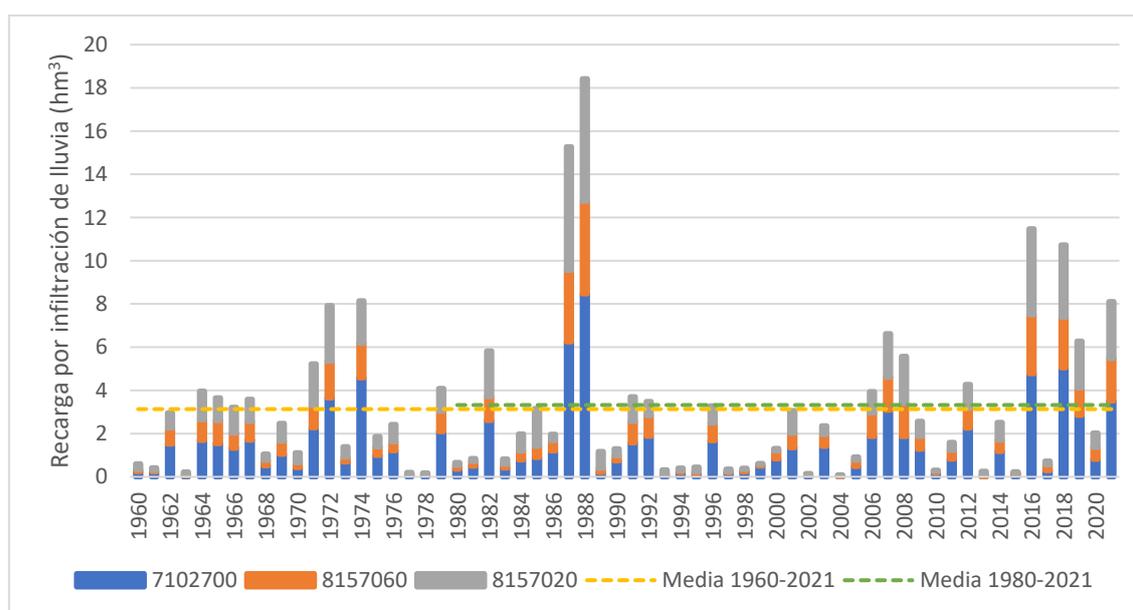


Figura 17. Evolución anual de la recarga por infiltración de lluvia total y por sector de recarga. Fuente: datos de PATRICAL.

3.5.2 Recarga por retornos de riego

La recarga por retornos de riego se calculó como un porcentaje de las extracciones agrícolas. De la información de contadores de la CHJ se tienen registros de 2005-2022, donde, en promedio, 57% de las extracciones tienen uso agrícola. De la información proporcionada por la CHS, en el periodo de 2018-2020, se identifica que un 82% de las extracciones son para uso agrícola. En la Figura 18 se presenta su distribución. Estos porcentajes se aplican a la serie anual de extracciones con el fin de obtener series a las que aplicar los porcentajes de retorno.

Los porcentajes de retornos de riego fueron proporcionados por la CHJ y se calculan a partir de la demanda bruta y neta de la superficie cultivada junto a la eficiencia en la red de transporte y métodos de riego. En la Figura 19 se presenta la ubicación de las UDAs A9035, A9045, A9050 de la CHJ y de la CHS la UDA05. Los porcentajes de retorno respecto a los bombeos agrícolas son de 3.1%, 3.7%, 0.7% y 2.5%. Finalmente, los retornos se distribuyen mensualmente con las curvas de demanda correspondientes a cada UDA.

Se asume que los retornos se distribuyen uniformemente en el área de su correspondiente UDA. Adaptando los polígonos a la geometría del modelo matemático, las áreas son de 21.9 km² (A9035), 22.9 km² (A9040), 1.5 km² (A9050) y 33.6 km² (UDA05). Es importante resaltar que no se tiene en cuenta el efecto de las variaciones de suelo.

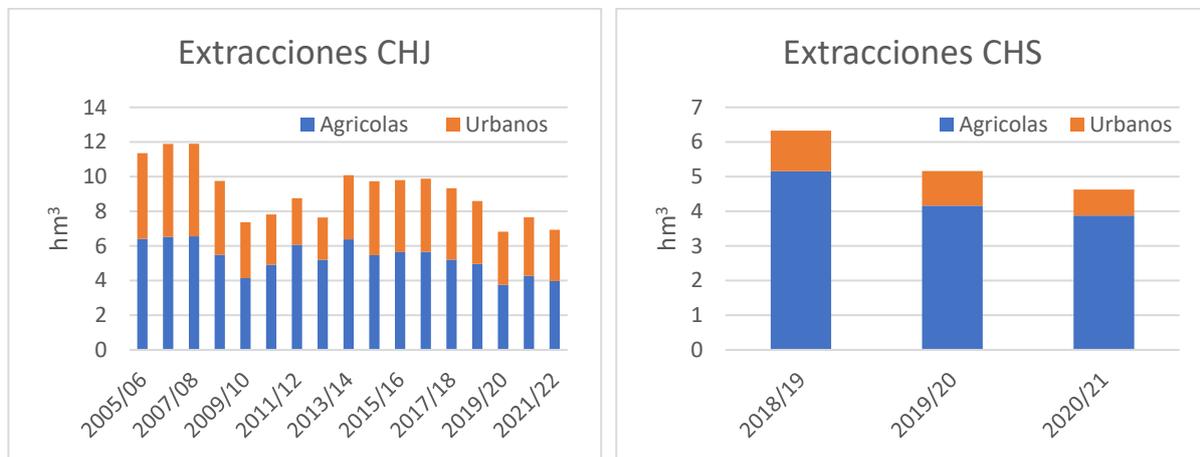


Figura 18. Uso de las extracciones de agua subterránea por demarcación hidrográfica.

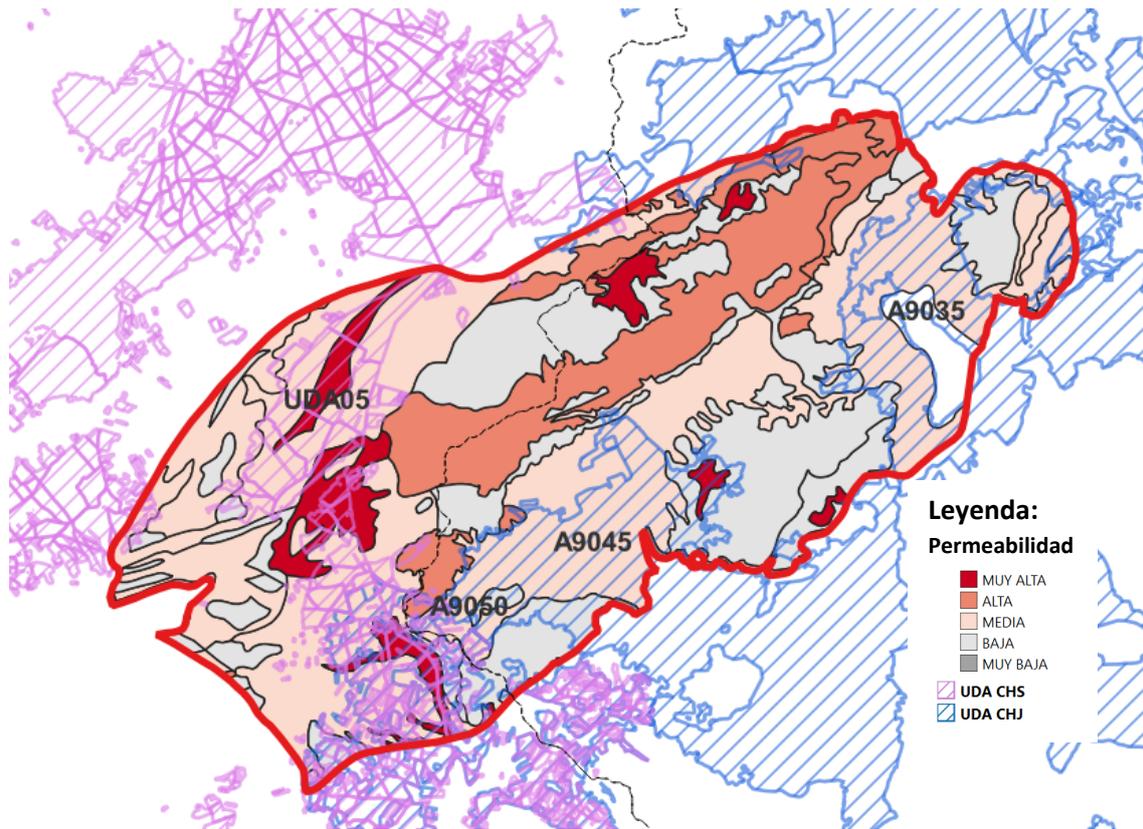


Figura 19. Superficies de regadío en Serral - Salinas.

En la Figura 20 se presenta la evolución de los retornos de riego discriminando por UDA. En promedio para el periodo 1960 – 2022, el retorno de riego es de 0.15 hm³/año, 0.18 hm³/año, 0.03 hm³/año y 0.09 hm³/año, respectivamente en las UDA A9035, A9045, A9050 y UDA05.

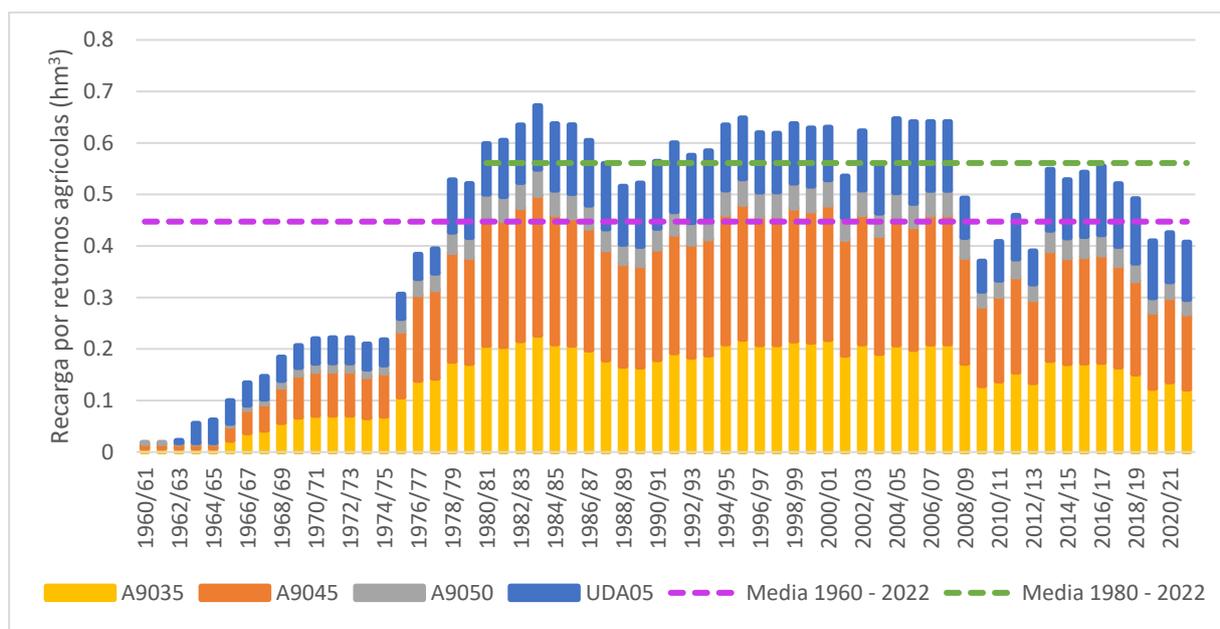


Figura 20. Evolución anual de la recarga por retornos de riego total y por UDA.

3.6 Flujos

Los límites laterales del acuífero son impermeables, por tanto, no hay flujos subterráneos laterales ni de entrada ni de salida. Además, como ya se mencionó, los flujos superficiales son de carácter efímero, por tanto, no se considera ninguna relación río - acuífero relevante para el funcionamiento de la masa. La única salida natural del sistema es el manantial Fuente de Salinas.

3.7 Hipótesis y simplificaciones del modelo

El modelo de flujo de la masa de agua subterránea Serral – Salinas está sujeto a una serie de hipótesis y simplificaciones inherentes al modelo conceptual. Las mayores incertidumbres provienen de la geología de la masa, también se han realizado una serie de asunciones en la construcción de las series de extracciones y retornos de riego, así mismo, hay gran incertidumbre asociada a los datos de recarga por infiltración de lluvia usados, prueba de ello es la diferencia que puede encontrarse con los valores medios de estas variables en los referentes estudiados. Las principales hipótesis y simplificaciones realizadas son:

- No se ha incluido dentro del modelo numérico el acuífero de Cabrera y se ha adjudicado la recarga que allí ocurre a las demás formaciones consideradas dentro del modelo.
- La recarga por infiltración de lluvia se distribuye de forma uniforme según los polígonos definidos por PATRICAL y la recarga por retornos de riego se distribuye uniforme en los polígonos de las UDA. En ningún caso se toma en cuenta los efectos de los diferentes suelos.
- Se asume el muro del acuífero Jurásico en base a información cartográfica. Debido a la gran profundidad de la formación hidrogeológica, este no es muy conocido, ni hay sondeos que alcancen el muro, por tanto, tiene una gran incertidumbre asociada. Además, solo se considera esta capa en el sector occidental de la masa al haber un mayor desconocimiento de su geometría en el sector oriental.
- No se modela el pequeño afloramiento de rocas Jurásicas que se dan en el paraje conocido como Sierra del Collado y Barranco de la Boquera. La zona se asigna como una continuación de las demás capas del modelo.
- No se han modelado capas impermeables tales como el Cretácico inferior (Barremiense), que confina la capa Jurásica.

Se ha simplificado varias capas superficiales tales como el Cuaternario (Cenozoico), Mioceno superior y Mioceno inferior en una sola capa, el Neógeno.

4 Código utilizado

La implementación numérica del modelo de flujo para Serral – Salinas se realiza con el código MODFLO (McDonald & Harbaugh, 1984) a través de la interfaz gráfica ModelMuse (Winston, 2009), ambos desarrollados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estos programas se eligen por su robustez, rendimiento, versatilidad y por el hecho de que son de libre acceso.

MODFLOW es un código de un modelo matemático en diferencias finitas diseñado para simular el flujo de agua subterránea en medio poroso. A lo largo del tiempo, han ido apareciendo diferentes mejoras y ampliaciones, actualmente hay 5 versiones, la primera: MODFLOW-88 y la última: MODFLOW 6. En este trabajo se ha usado la versión MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005).

MODFLOW permite simular el flujo saturado en acuíferos confinados, semiconfinados y libres. Dispone paquetes utilizados por la rutina principal para resolver problemas específicos tales como flujo hacia drenes, flujo a través del lecho de ríos, recarga distribuida en superficie, evapotranspiración, bombeos en pozos, existencia de barreras horizontales, el secado y recuperación de celdas, condiciones de contorno de potencial hidráulico variable, entre otros.

El movimiento en 3D del agua subterránea en un medio poroso saturado, heterogéneo y anisótropo en régimen transitorio es descrito matemáticamente por la Ecuación 1.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Ecuación 1}$$

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

Para que el problema quede completamente definido y la ecuación diferencial que lo describe tenga una única solución, es necesario asociar a la misma las condiciones iniciales y de contorno, posterior, el código MODFLOW resuelve la ecuación del flujo utilizando una aproximación en diferencias finitas. En el método de las diferencias finitas el sistema descrito de forma continua por la Ecuación 1, es sustituido por un número finito de puntos en el espacio y el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por diferencias entre los valores de las variables en esos puntos. Este proceso conduce a un sistema de ecuaciones lineales cuya solución son los valores de la altura piezométrica para los puntos en el espacio y el tiempo sobre los cuales se ha discretizado el sistema, es decir, $h = h(x, y, z, t)$.

5 Construcción del modelo

El modelo conceptual descrito en el apartado 3 se traduce a un modelo numérico de MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984) con la ayuda de la interfaz gráfica ModelMuse (Winston, 2009). Para todas las variables y parámetros se usó como unidad de longitud el metro [m] y como unidad de tiempo el día [d]. La escala temporal de modelación es mensual.

5.1 Discretización horizontal

Se adopta una discretización horizontal constante, con celdas de 200m x 200m, obteniendo un mallado de 128 columnas por 91 filas, de las cuales 5857 son celdas activas y definen el perímetro de la masa Serral – Salinas (Figura 21).

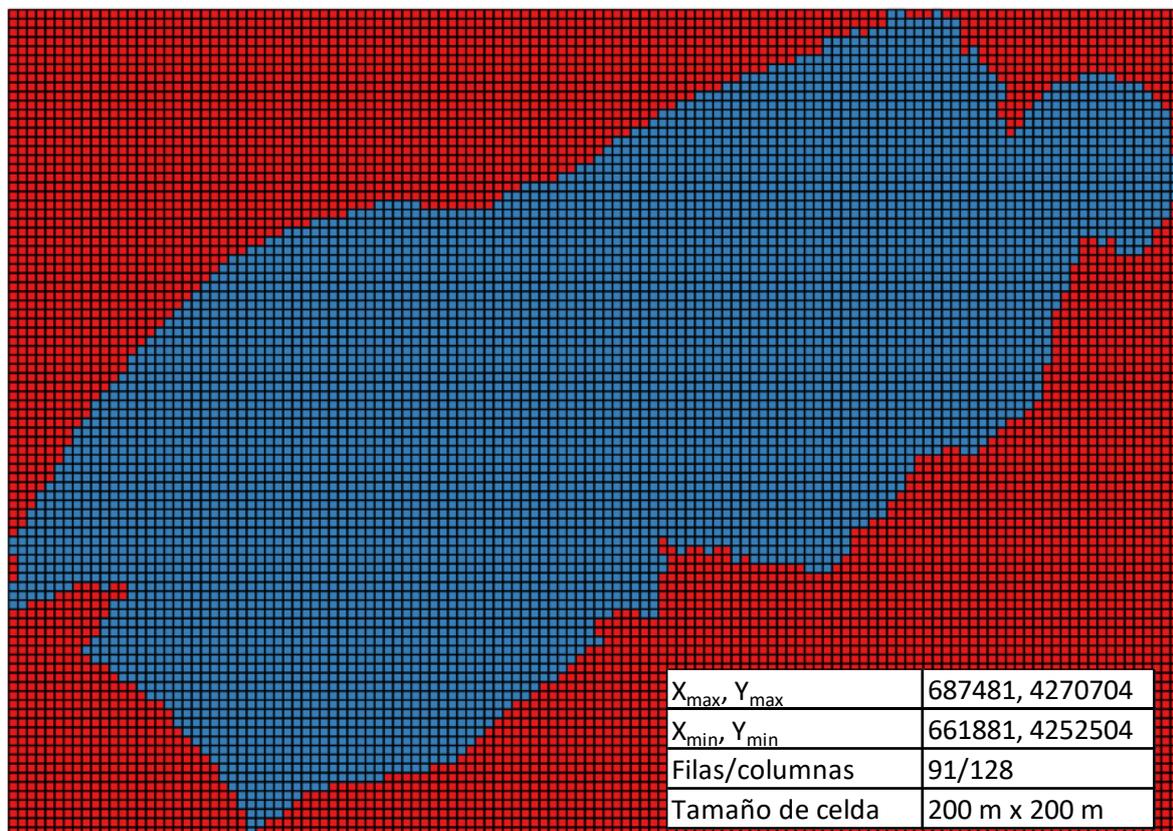


Figura 21. Discretización horizontal del modelo numérico. En rojo las celdas inactivas y en azul las celdas activas.

5.2 Discretización vertical

El acuífero se divide verticalmente en 5 capas, la unidad Neógena, el Cretácico que a su vez se divide en Senonense, Cenomaniense y Albiense-Aptiense, y la unidad Jurásica, 4 de ellas presentes en el sur de la masa, y 3 en la zona norte hacia la Sierra de Salinas. Las cotas de techo y muro georreferenciadas se adaptaron a partir del modelo geométrico 3D de la masa Serral – Salinas desarrollado por IGME-DPA (2014), a excepción de la formación del Jurásico.

5.2.1 Topografía del terreno

Como techo absoluto del acuífero, se ha utilizado el modelo digital de terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con malla de 200m, coincidente con la discretización horizontal del modelo de flujo (Figura 22).

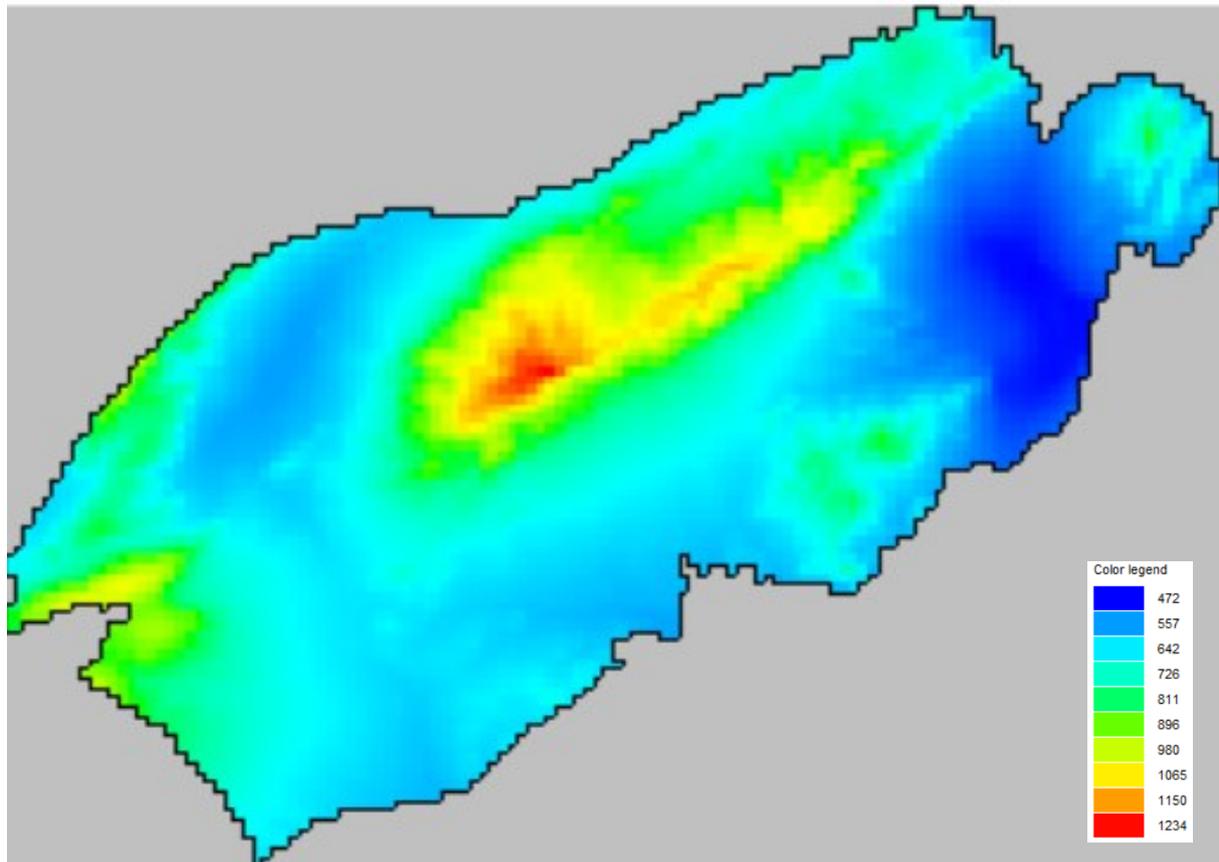


Figura 22. Modelo digital de terreno de resolución 200m x 200m.

5.2.2 Unidad Neógena

La unidad Neógena tiene por techo el MDT y como muro se ha adaptado la superficie definida por IGME-DPA (2014) (Figura 23). Para la construcción de esta capa se tuvo en cuenta la información de 26 sondeos que la perforan, la interpretación de horizontes sísmicos y la interpretación de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDТ).

Esta unidad predomina al sur de la Sierra de Salinas, bajo una formación cuaternaria y sobre la formación del Cretácico. Su geometría es la de un sinclinal principal de dirección N60E, con un buzamiento medio de 20° (IGME - DPA, 2014).

La potencia media de la capa es de 100 m. Al sur de la población de Salinas, la potencia media es de 450 m, alcanzando hasta los 540 m. En el sector al sur - oeste de la población de Lel, la potencia media es de 500 m, alcanzando los 570 m.

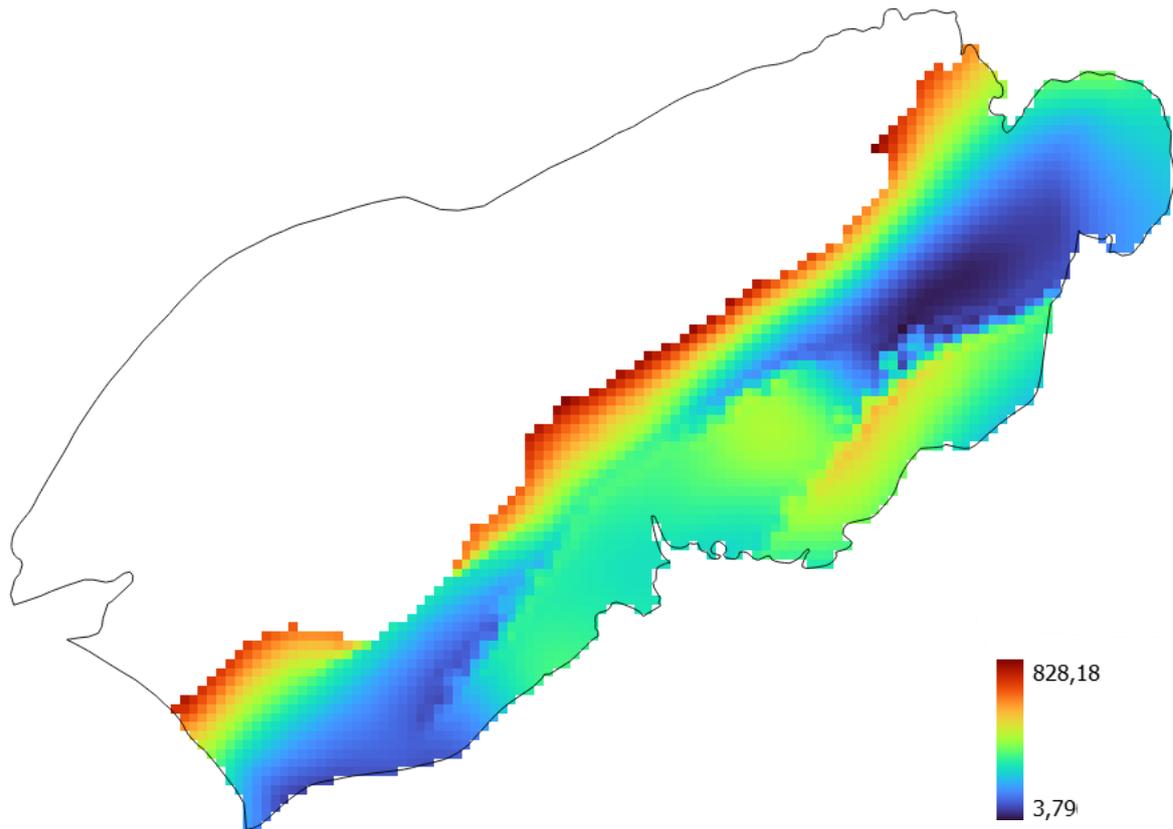


Figura 23. Elevación del muro de la unidad Neógena (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).

5.2.3 Unidad Senonense

Es la unidad superior de las unidades del Cretácico incluidas. Esta unidad aflora únicamente en el sector oriental de la Sierra de Salinas, hacia el sur, se extiende bajo la depresión Neógena. Como muro se ha adaptado la superficie definida por IGME-DPA (2014), en la construcción de la capa se usaron 9 sondeos que la perforan y la interpretación de horizontes sísmicos.

La geometría de la formación es un sinclinal de dirección N50E, con buzamientos de 22°. La potencia media de la unidad es de 80 m. Las máximas profundidades del muro de la unidad se dan al sur del poblado de Salinas, donde se alcanzan cotas de hasta - 140 m s.n.m. (Figura 24).

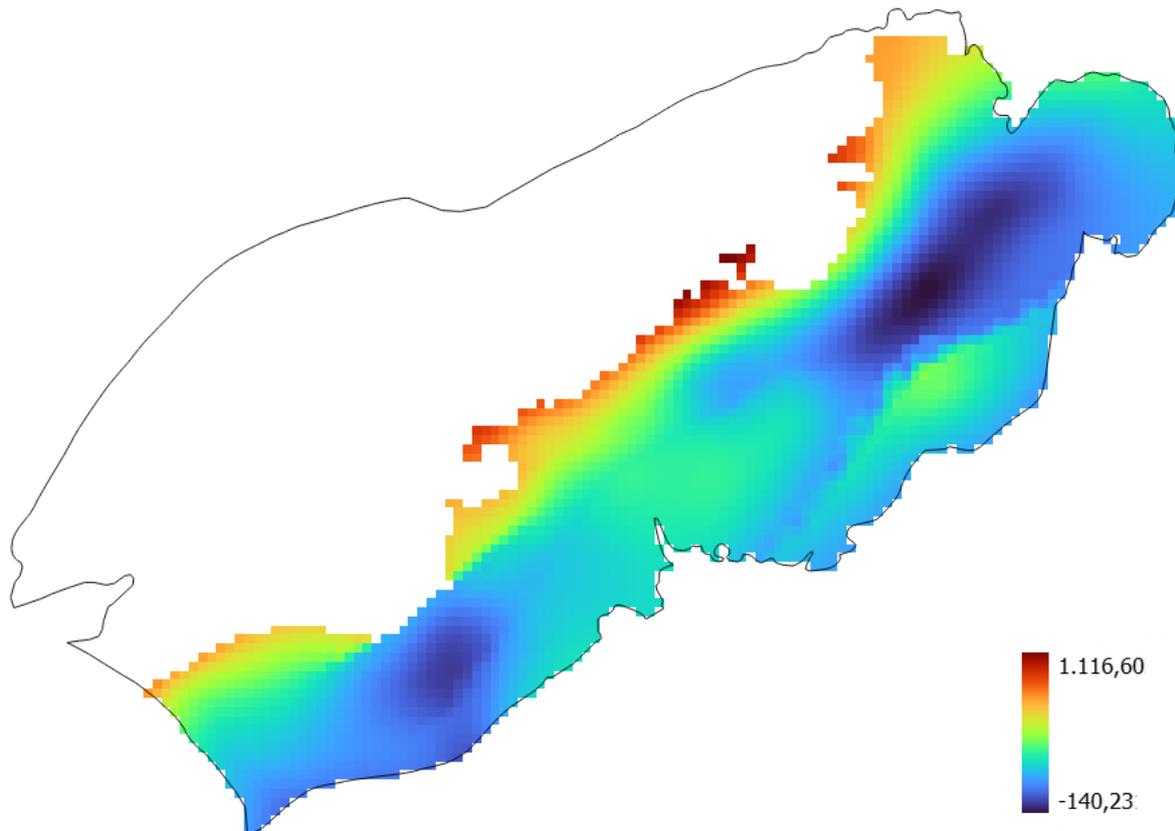


Figura 24. Elevación del muro de la unidad Senonense (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).

5.2.4 Unidad Cenomaniense

La formación geológica Cenomaniense hace parte del Cretácico superior. Esta unidad aflora en toda la Sierra de Salinas, Serral y las Pansas, a excepción de la zona central – occidental de la Sierra de Salinas donde aflora directamente el Albiense – Aptiense. Se extiende hacia el sur bajo el Senonense. El muro de la unidad fue adaptado según la superficie definida por IGME-DPA (2014), fue construida a partir de información de 12 sondeos que la perforan, 9 de los cuales alcanzan el muro y la interpretación de horizontes sísmicos.

La geometría de la unidad corresponde al norte, a un anticlinal paralelo con una longitud de 18 km, el flanco norte esta vertical y el flanco sur tienen un buzamiento medio de 20°. Al sur se desarrolla el sinclinal con buzamiento medio de 22°. El espesor medio de la unidad es de 300 m. Se alcanzan profundidades máximas de hasta -440 m s.n.m en el eje sinclinal bajo de depresión neógena (Figura 25).

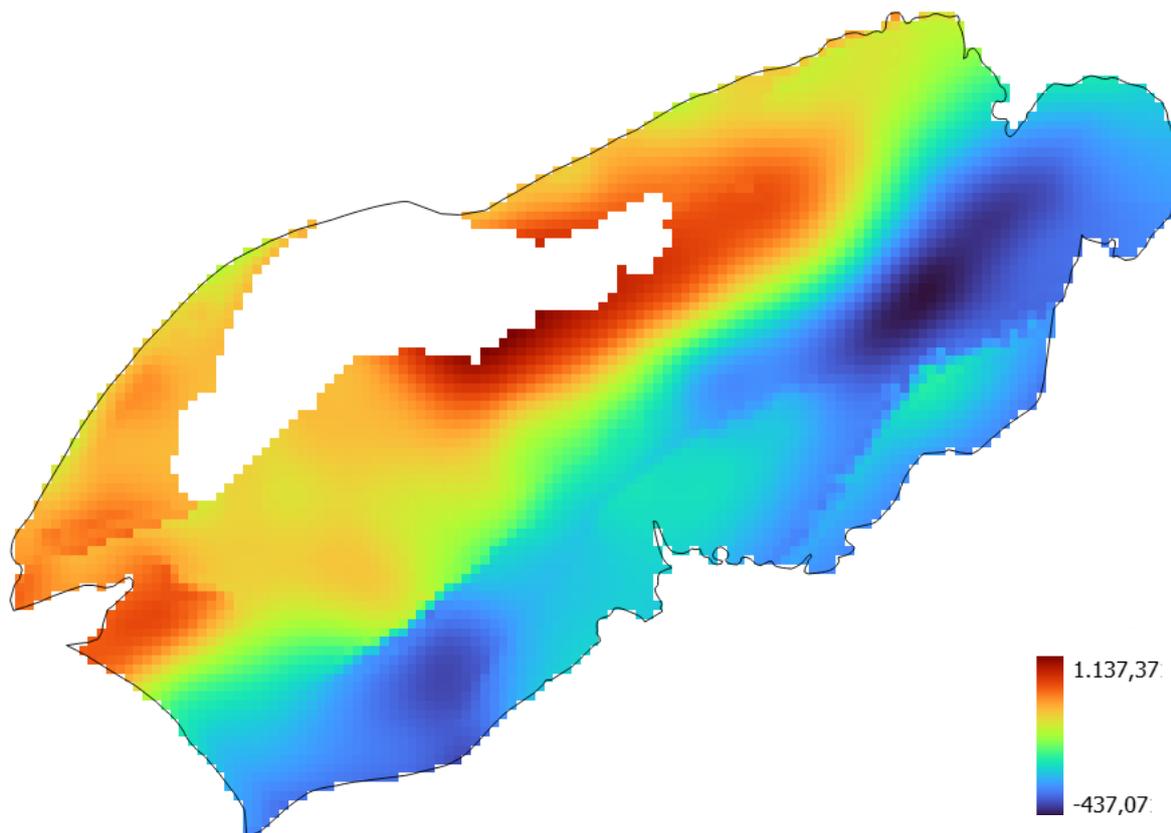


Figura 25. Elevación del muro de la unidad Cenomaniense (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).

5.2.5 Muro de la unidad Aptiense – Albiense

Las unidades Albiense y Aptiense se han modelado como una sola capa, es la inferior de las unidades del Cretácico modeladas. La formación descansa sobre las unidades del Cretácico inferior, el Barremiense y el Neocomiense, de carácter acuitardo. El muro se ha adaptado a partir de la superficie desarrollada por IGME-DPA (2014). Para su construcción, se tuvo en cuenta la información de 10 sondeos que la atraviesan, aunque solo 3 de ellos alcanzan el muro, y la interpretación de horizontes sísmicos.

La unidad aflora en el sector central – occidental de la Sierra de Salinas, el paraje Umbría Alta y en el Cerro del Recodo. Se extiende bajo el Cenomaniense en el resto de la masa. La unidad tiene una potencia media de 220 m y al igual que las unidades anteriores, la profundidad máxima se alcanza en el eje del sinclinal bajo la depresión Neógena, con -650 m s.n.m. (Figura 26).

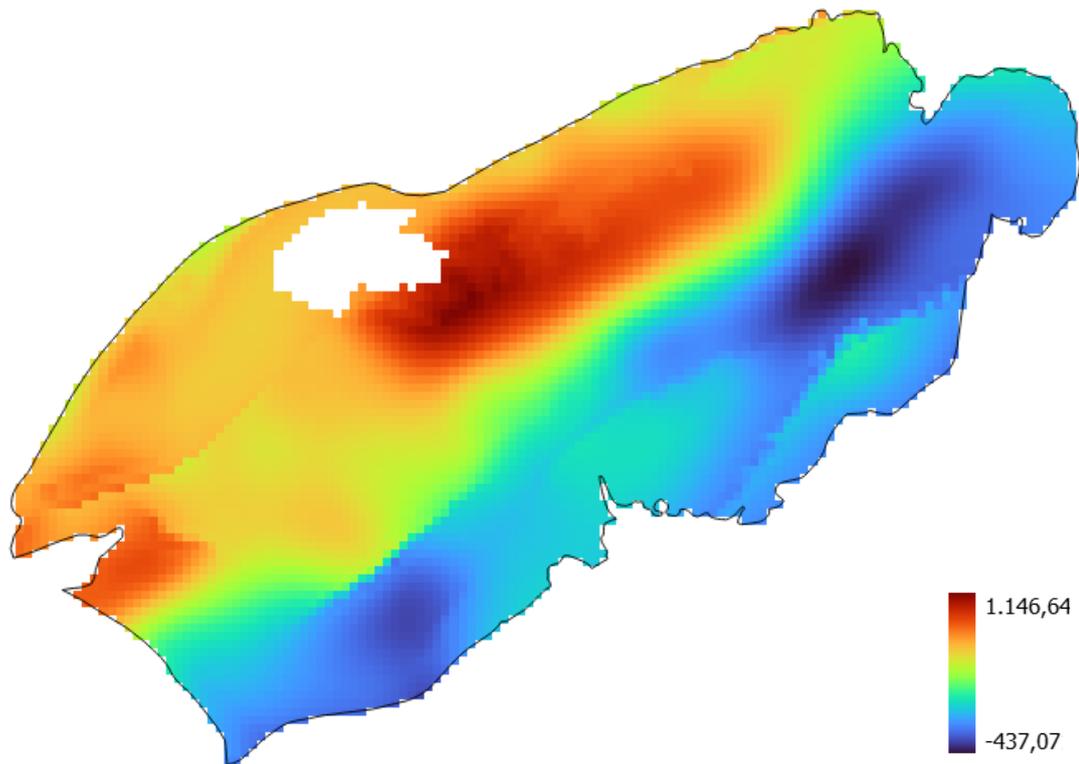


Figura 26. Elevación del muro de la unidad Aptiense-Albiense (m s.n.m.). Fuente: adaptado de IGME-DPA (2014).

5.2.6 Muro de la unidad Jurásico

Bajo el Cretácico se ubica la formación geológica Jurásica, este acuífero se encuentra confinado por los acuitardos del Cretácico inferior y como muro por la unidad del Triásico de Keuper, correspondiente a la base impermeable del acuífero.

Para la obtención del muro de la unidad jurásica, se asume que tiene un espesor de 250 m en la zona del anticlinal Sierra de Salinas, Sierra del Serral y Sierra de Panasas. La potencia disminuye gradualmente hacia el sur hasta el inicio del sinclinal de la depresión Neógena. Para lo anterior, se tomó como referencia los cortes hidrogeológicos de la masa (Figura 7).

Con el fin de darle continuidad a las capas a efectos de cálculo del modelo, las zonas en las que aflora el muro de cualquiera de las capas, se define un espesor mínimo de un metro para las unidades superiores y posteriormente en ModelMuse se asignaron como celdas no activas.

La Figura 27 muestra en perfiles la discretización vertical adoptada.

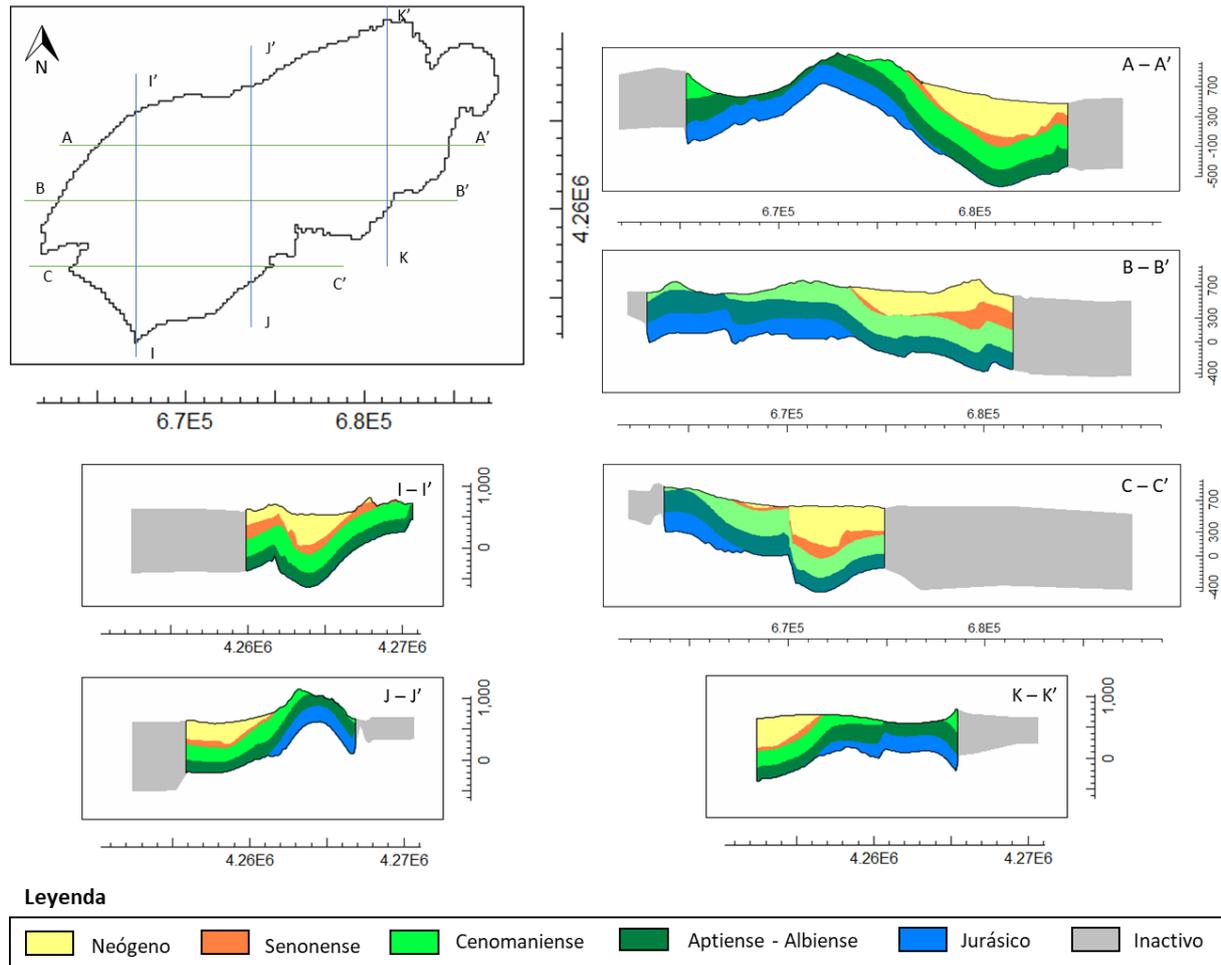


Figura 27. Perfiles de las capas del modelo geológico empleado.

5.3 Discretización temporal

Se adoptó un paso de tiempo mensual para la simulación del acuífero Serral – Salinas. Se abarca un total de 82 años hidrológicos que se dividen en dos periodos según el régimen del acuífero:

- Régimen estacionario o no influenciado: desde octubre de 1940 hasta septiembre de 1960.
- Régimen transitorio o influenciado: desde octubre de 1960 hasta septiembre de 2022.

El régimen estacionario o no influenciado hace referencia al estado natural del acuífero, en el cual hay un estado de equilibrio hidráulico en el que las entradas y salidas de agua son iguales, por tanto, no hay cambios en el almacenamiento a largo plazo. Para el acuífero en cuestión, las entradas corresponden a la recarga por precipitación y las salidas se dan por el manantial Fuente de salinas.

El régimen transitorio o influenciado, hace referencia al periodo en el cual hay influencia de las actividades humanas en el balance de aguas de la masa. Serral-Salinas se ve especialmente influenciado por los bombeos de agua para usos agrícolas y urbanos.

5.4 La condición inicial

La condición inicial describe los valores de altura piezométrica para el tiempo considerado inicial, que para el presente trabajo corresponde con la superficie piezométrica en régimen natural.

Debido a la falta de estudios previos al inicio de las explotaciones, no se conoce con precisión la configuración de la superficie piezométrica en régimen natural, la única información disponible para la calibración del régimen estacionario es la cota del manantial Fuente de Salinas, 472 m s.n.m, única salida natural, localizada en la DHJ, por tanto, la superficie piezométrica inicial debe ser levemente mayor a esta cota (altura piezométrica de la Laguna de Salinas).

Sin embargo, no es posible calibrar el modelo estacionario a partir de esta información, por tanto, su calibración surge de un proceso iterativo entre la calibración del modelo transitorio que a su vez usa el resultado del estacionario como condición inicial. Se verifica, además, que la superficie utilizada sea cercana a los niveles registrados en los primeros años de piezometría. La Figura 28 presenta la superficie piezométrica resultante del modelo estacionario y, por tanto, usada como condición inicial del modelo transitorio.

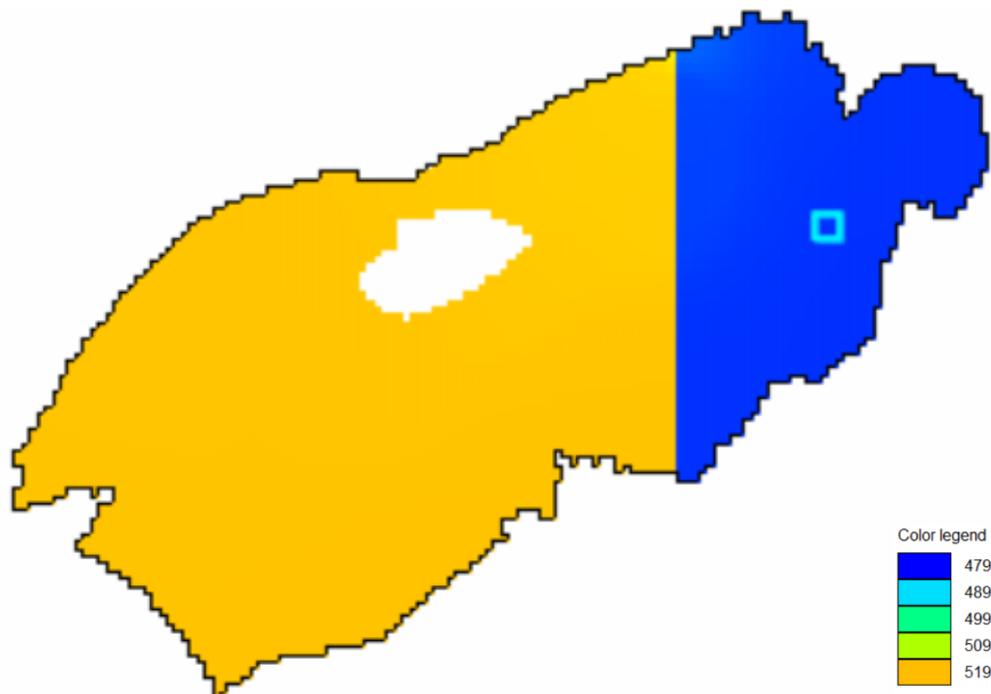


Figura 28. Superficie piezométrica modelada en régimen natural.

5.5 Asignación preliminar de parámetros hidráulicos

La resolución del modelo de Serral - Salinas requiere de parámetros hidráulicos en tres elementos: las capas acuíferas, las barreras de flujo que permiten representar fallas estructurales que dificultan el paso del flujo entre los distintos dominios hidrogeológicos y el manantial.

Los parámetros hidráulicos necesarios en las capas acuíferas son la conductividad hidráulica (K_x , K_y y K_z), el rendimiento específico (S_y) y el coeficiente de almacenamiento (S_s). Las barreras de flujo horizontal requieren de un espesor y conductividad hidráulica. Finalmente, la conductancia del Manantial Fuente de Salinas.

A pesar de que en la realidad el medio es anisótropo y heterogéneo, la insuficiencia de datos hidráulicos no permite la caracterización exhaustiva y detallada de la distribución de los parámetros que configuran cada una de las unidades hidrogeológicas que componen el acuífero. La información existente es mucho más abundante para la superficie del acuífero y se hace más escasa para los materiales en profundidad. Por ello, la metodología adoptada en este trabajo para la asignación preliminar de parámetros hidráulicos en las capas acuíferas se basa en los dominios y rangos definidos en el apartado 3.3 y la información reportada por referentes plasmada en el apartado 3.1.

En cada dominio se asume que la distribución de las conductividades hidráulicas es homogénea. En cada capa $K_x=K_y$, y $K_z=K_x/10$. En lo que respecta a los parámetros S_s y S_y , se asumen constantes por capa.

La asignación preliminar de parámetros hidráulicos se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Asignación preliminar de parámetros hidráulicos.

Capa	Dominio	Permeabilidad	K_x (m/d)	S_s (1/m)	S_y (-)
Neógeno	Dominio 1	Muy alta	600	1E-4	0.1
	Dominio 2	Alta	200		
	Dominio 3	Media	0.1		
	Dominio 4	Baja	0.001		
Senonense	-	Alta	200	1E-5	0.05
Cenomaniense	Dominio 1	Muy alta	600	1E-5	0.04
	Dominio 2	Alta	200		
	Dominio 3	Media	0.1		
	Dominio 4	Baja	0.001		
	-	Alta	200		
Albiense/Aptiense	Dominio 1	Muy alta	600	1E-4	0.02
	Dominio 3	Media	0.1		

Capa	Dominio	Permeabilidad	Kx (m/d)	Ss (1/m)	Sy (-)
	Dominio 4	Baja	0.001		
	-	Media	0.1		
Jurásico	-	Alta	200	1E-5	0.02

La incorporación de las fallas estructurales se realiza a través del paquete de MODFLOW denominado *Horizontal Flow Barrier Package*. Los datos que se requieren son la altura y profundidad de la barrera. Los parámetros requeridos y objeto de calibración serán la conductividad hidráulica y el espesor de la barrera. Únicamente se incorpora aquella barrera que, a efectos del modelo numérico, es relevante para alcanzar la altura piezométrica observada.

La falta de datos bibliográficos que caractericen el grado de impermeabilidad o espesor de esta estructura dificulta la asignación inicial de los parámetros por lo que se asume inicialmente de 200 m de espesor y un valor de 1E-7 m/d de conductividad hidráulica.

La posición de la falla corresponde a una línea N-S tres kilómetros al oeste de Salinas, aproximadamente a la altura del pico Caire (IGME - DPA, 2007). La falla va del muro del sistema a 450 m s.n.m. La Figura 29 muestra los dominios hidrogeológicos con las respectivas conductividades hidráulicas preliminares y la posición de la barrera hidráulica adoptada.

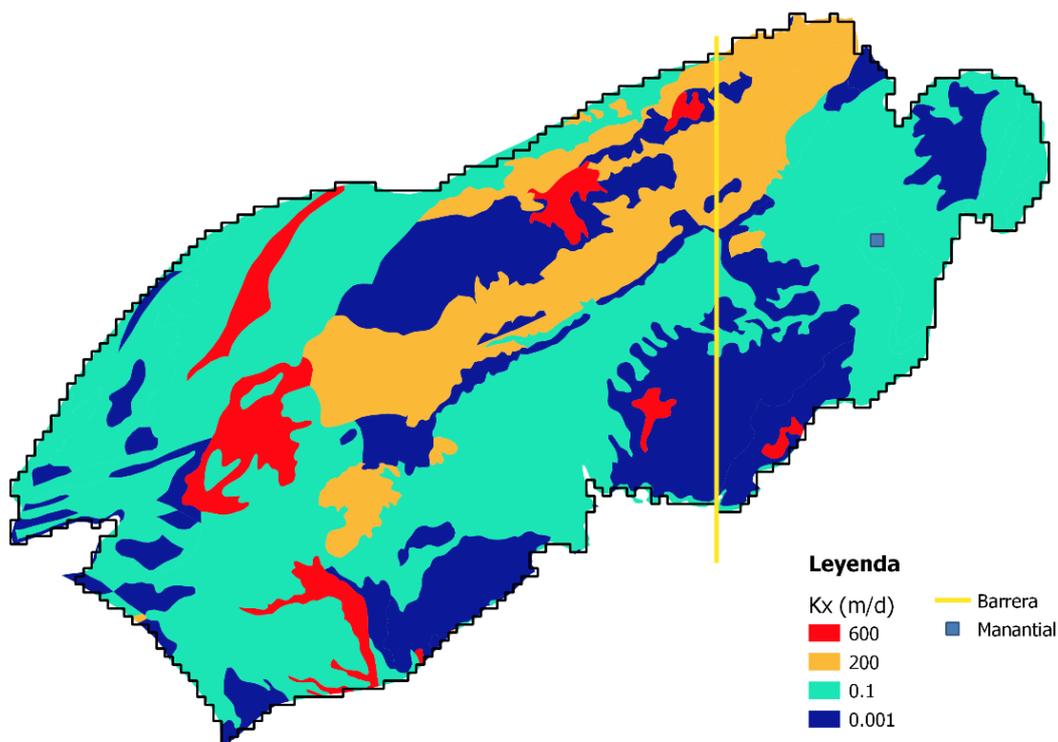


Figura 29. Dominios hidrogeológicos y su respectiva asignación preliminar de parámetros hidráulicos.

5.6 Las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno informan al modelo matemático acerca de la interacción entre el sistema analizado y el medio exterior, tales como la recarga, extracciones, relación río-acuífero o relación lago-acuífero. En un modelo de flujo existen tres condiciones de contorno:

1. Condición de Dirichlet: la altura piezométrica es prescrita y conocida en el tiempo. Serral – Salinas no presenta condiciones de contorno de este tipo.
2. Condición de Neumann: borde con un gradiente de altura piezométrica prescrito o borde con un flujo prescrito. Pertenecen a este tipo de condición la recarga por precipitación y retornos de riego, el efecto de los bombeos o representación de los bordes impermeables.
3. Condición de Cauchy: es una combinación de las dos anteriores, el borde es semipermeable o flujo dependiente del nivel piezométrico. Se incluye en este tipo de condición el caudal drenado por el manantial Fuente de Salinas.

En síntesis, las condiciones de contorno que se definen en el sistema de Serral – Salinas son la recarga por precipitación y retornos de riego, las extracciones de agua por bombeos y el caudal drenado por el manantial Fuente de Salinas. MODFLOW permite incorporar estas condiciones por medio de paquetes específicos que se describen a continuación.

5.6.1 Paquete de recarga

El paquete de MODFLOW denominado *Recharge Package* se usa para simular la entrada de un flujo conocido distribuido sobre la superficie del modelo. El flujo debe de introducirse al modelo en tasas puntuales, es decir en unidades de longitud/tiempo internamente MODFLOW multiplica por el área de las celdas afectadas para calcular las tasas de flujo volumétrico.

En Serral – Salinas se introdujo la recarga producida por infiltración de precipitación y retornos de riego, en los sectores y con las tasas de recarga descritas en el apartado 3.5.

5.6.2 Paquete de pozos

El paquete de MODFLOW denominado *Well Package* se usa para simular un flujo específico de entrada o salida aplicado a una celda en unidades de volumen/tiempo. Puede ser empleado tanto para extracciones como inyecciones de flujo al acuífero.

El paquete fue usado para simular las extracciones volumétricas de los pozos definidas en el apartado 3.4 en régimen transitorio.

5.6.3 Paquete de drenes

El paquete de MODFLOW denominado *Drain Package* se usa para simular salidas de flujo que son dependientes del nivel piezométrico. Si el nivel piezométrico cae bajo un cierto umbral en las celdas con drenaje, el flujo se hace nulo.

Este paquete se ha usado para incorporar el efecto del manantial Fuente de Salinas, dado que es una surgencia natural. El drenaje se mantiene tanto para el modelo en régimen natural (estacionario) como para el régimen alterado (transitorio), a una cota de surgencia constante tal que haya surgencia cuando la altura sea mayor a ésta.

Un dren requiere de ubicación, altura y conductancia del material, que es la facilidad con la que el agua fluye a través del dren y se expresa en unidades de L^2/T . A efectos del modelo el dren se ha ubicado a 472 m s.n.m. Se desconocen las propiedades hidráulicas del material, por lo que la conductancia ha sido objeto de calibración. La Tabla 8 presenta las propiedades del dren usadas para simular el manantial Fuente de Salinas.

Tabla 8. Posición, cota y conductancia preliminar del manantial Serral - Salinas.

Manantial	UTM X	UTM Y	Cota (ms.n.m.)	Conductancia (m ² /d)
Fuente de Salinas	683250	4265066	472	1000

5.7 Observaciones

El paquete de observaciones en MODFLOW permite comparar los valores simulados con los observados. Comparación necesaria para la calibración del modelo.

5.7.1 Paquete de observación de alturas piezométricas

En MODFLOW, el paquete *Head Observation Package* permite incluir pozos donde se conoce la evolución del nivel piezométrico. Como resultado se obtiene el estadístico raíz del error cuadrático medio (RMSE) evaluado entre los niveles simulados y respectiva serie de observaciones, lo que permite una evaluación cuantitativa de la calibración del modelo.

Se han utilizado 16 puntos piezométricos (Figura 30) de diversas bases de datos, distribuidos de forma no uniforme por la masa de agua. Los registros se dan en diversos periodos, los más antiguos van desde 1971. La inexistencia de información piezométrica previa imposibilita la calibración del modelo en régimen estacionario, por tanto, solo se incluyen observaciones en el modelo de régimen transitorio.

Los datos necesarios para el uso del paquete de observaciones son la ubicación y profundidad del pozo de observación y los registros de nivel piezométrico en m s.n.m. asociados a un paso

de tiempo modelado. La Tabla 9 presenta la ubicación y la base de datos de la que se obtuvo la serie de niveles piezométricos para de los pozos de observación.

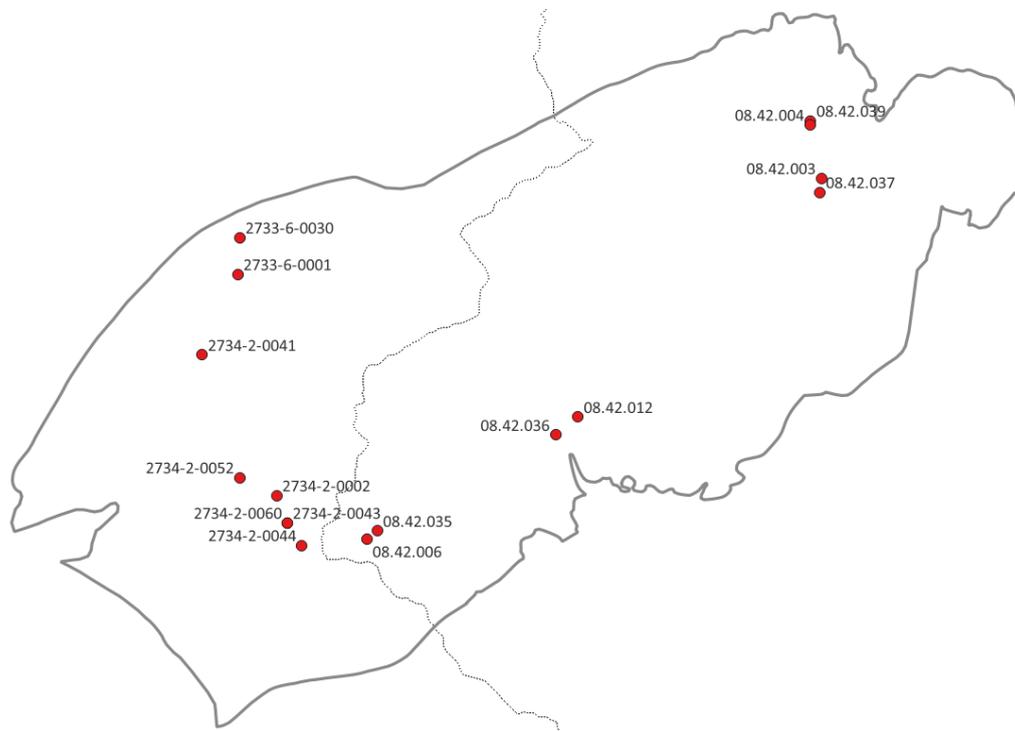


Figura 30. Localización de los pozos de observación en la masa Serral - Salinas.

Tabla 9. Localización de los pozos de observación en el modelo de flujo.

Código	Base datos	UTM X	UTM Y	Col.	Fila	Capa
08.42.012	CHJ	676181	4260417	72	52	Albiense/Aptiense
08.42.039	CHJ	682051	4267950	101	14	Albiense/Aptiense
08.42.004	CHJ	682029	4267848	101	15	Albiense/Aptiense
08.42.036	CHJ	675624	4259961	69	54	Cenomaniense
08.42.037	CHJ	682275	4266119	102	23	Cenomaniense
08.42.003	CHJ	682321	4266477	103	22	Cenomaniense
08.42.006	CHJ	670856	4257318	45	67	Cenomaniense
08.42.035	CHJ	671119	4257522	47	66	Cenomaniense
2734-2-0002	CHS	668577	4258411	34	62	Albiense/Aptiense
2734-2-0044	DA	669222	4257147	37	68	Albiense/Aptiense
2734-2-0043	DA	668842	4257716	35	65	Albiense/Aptiense
2734-2-0060	DA	668859	4257729	35	65	Albiense/Aptiense
2734-2-0052	DA	667649	4258870	29	60	Albiense/Aptiense
2734-2-0041	DA	666703	4261996	25	44	Albiense/Aptiense
2733-6-0001	IGME	667598	4264034	29	34	Albiense/Aptiense
2733-6-0030	IGME	667649	4264969	29	29	Albiense/Aptiense



5.8 Solver

El solver es el algoritmo que se encarga de resolver las ecuaciones de flujo de agua subterránea por diferencias finitas. MODFLOW incorpora 5 opciones de solver. En este trabajo se usó el solver GMG (*Geometric Multigrid Package*), ya que con este se logró encontrar resultados de convergencia del modelo que con los otros solvers no.

6 Calibración y balance hídrico

El objetivo de la calibración del modelo es reproducir el comportamiento del sistema hidrogeológico. En este procedimiento se ajustan los parámetros hidráulicos para minimizar las diferencias entre las cargas hidráulicas y flujos simulados con los observados.

Como se ha mencionado, la calibración se realizó para el modelo de la masa Serral - Salinas en régimen transitorio y se ha comprobado que los resultados son acordes a la poca información que se tiene del régimen estacionario. La calibración se ha realizado buscando reproducir las series piezométricas.

A partir del modelo calibrado se obtiene el balance hídrico global y zonal, es decir, se cuantifican las entradas, salidas y el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero en el tiempo. Cuando las salidas son mayores a las entradas de agua al acuífero, se espera que el almacenamiento disminuya y por tanto descienda el nivel de agua subterránea, este es el comportamiento esperado y observado en la masa de Serral – Salinas.

6.1 Parametrización

Los parámetros calibrados en la modelación del acuífero Serral – Salinas son: la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico de cada capa; el espesor y la conductividad hidráulica de la barrera hidráulica; y la conductancia del Manantial del Fuente de Salinas.

Los valores preliminares presentados en el apartado 5.5 se modifican siguiendo una metodología de prueba y error (calibración manual). Aunque las propiedades hidráulicas definitivas de los materiales se han salido de los rangos presentados en la Tabla 5, principalmente el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específicos de las capas, se justifica este comportamiento por la baja porosidad efectiva de los materiales, reportado en la Tabla 4.

Los parámetros calibrados de conductividad hidráulica de las capas se presentan en la Figura 31, el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico en la Tabla 10. Los parámetros calibrados de la barrera hidráulica son 800 m de espesor y una conductividad hidráulica de $1E-5$ m/d.

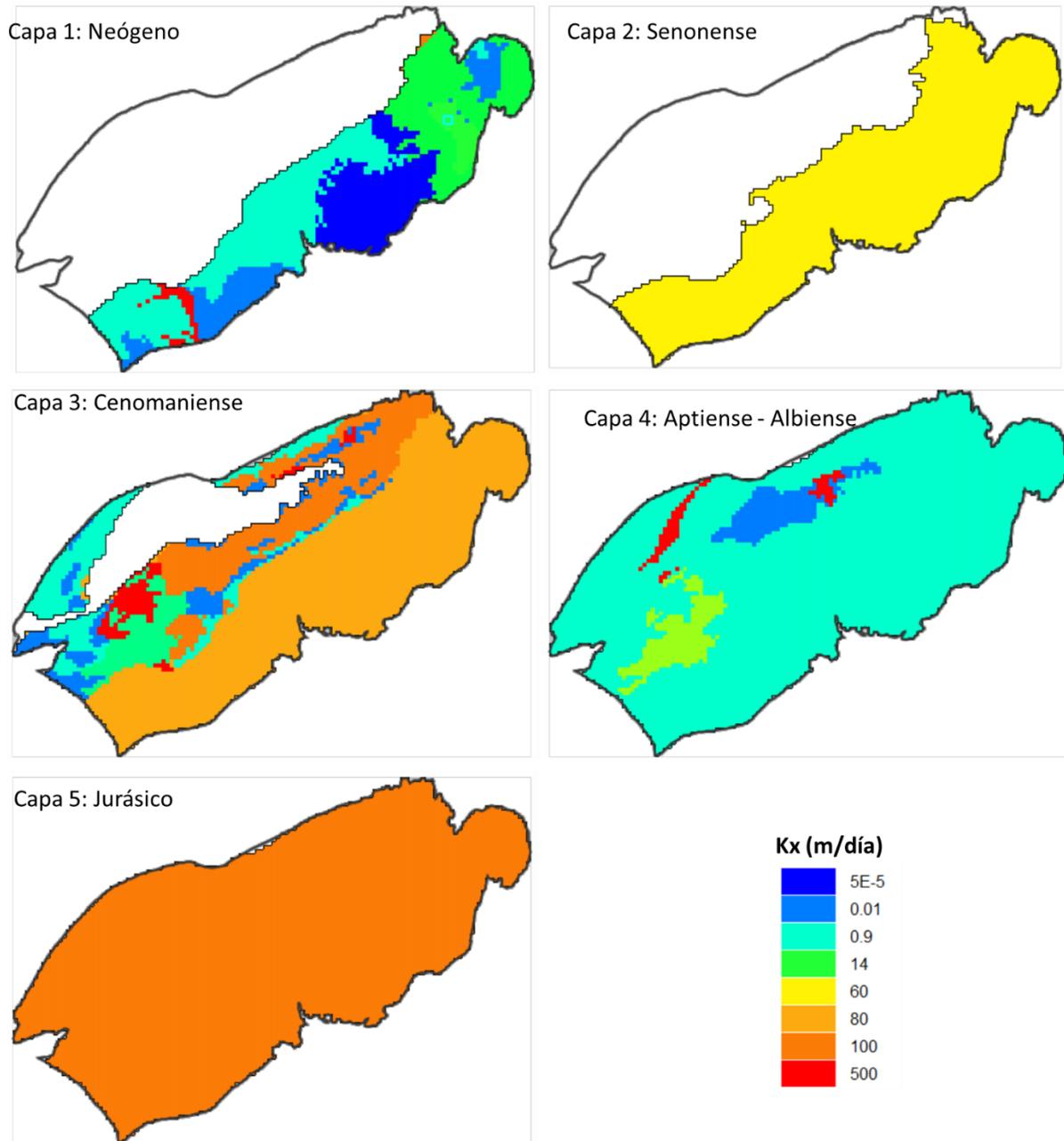


Figura 31. Conductividad hidráulica calibrada para las diferentes capas del modelo numérico.

Tabla 10. Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico calibrados para las diferentes capas modeladas.

Capa	Ss (1/m)	Sy (-)
Neógeno	0.0001	0.0087
Senonense	5E-06	0.0074
Cenomaniense	8E-07	0.014
Aptiense -Albiense	2E-06	0.01
Jurásico	1E-07	0.011

6.2 Calibración de series piezométricas

El análisis del grado de bondad del ajuste de los datos piezométricos se ha realizado mediante la comparación visual entre las observaciones y la simulación, y mediante estadísticos tales como la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el coeficiente de Nash - Sutcliffe.

Se ha calibrado a partir de 16 piezómetros. Del ajuste global ha resultado un RECM de 21.46 m y un coeficiente de Nash de 0.97. En la Tabla 11 se presentan los estadísticos por pozo de observación. En la Figura 32 se muestra el diagrama de dispersión de los niveles simulados vs observados. El diagrama y la Tabla 11 nos permite identificar datos que se encuentran sospechosamente fuera del rango, destacan malos resultados para los pozos con código 08_42_012, 08_42_036, ubicados en la zona centro de la masa, y el pozo 2733_6_0030 ubicado al NO; quitando estos tres, el RECM es de 11.26 m y el Nash de 0.996.

Tabla 11. Resultados de la calibración por pozo de observación.

Código pozo	RECM	Nash
08_42_003	14.107	0.990
08_42_004	15.550	0.992
08_42_006	16.565	0.989
08_42_012	35.260	0.419
08_42_035	2.725	0.967
08_42_036	48.412	0.607
08_42_037	16.700	0.992
08_42_039	13.718	0.994
2733_6_0001	8.035	0.998
2733_6_0030	52.659	0.895
2734_2_0002	7.185	0.992
2734_2_0041	19.165	0.988
2734_2_0043	3.006	0.998
2734_2_0044	4.310	0.998
2734_2_0052	14.735	0.975
2734_2_0060	2.858	0.980

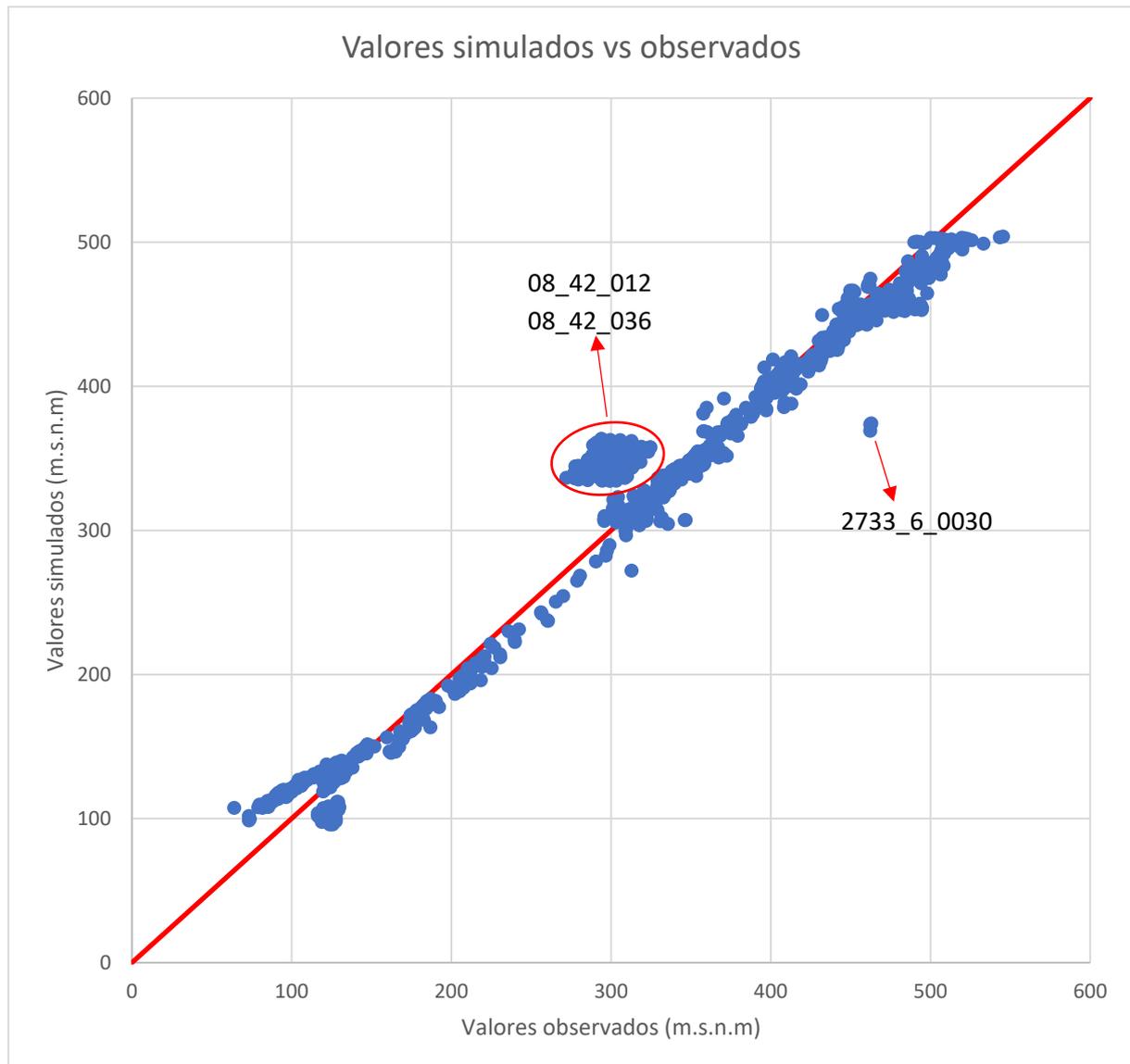


Figura 32. Diagrama de dispersión de nivel observado vs simulado. Se resaltan algunos datos que se encuentran sospechosamente fuera de rango.

De la Figura 33 a la Figura 48 se muestran los resultados para los 16 puntos de control utilizados. Las 4 primeras figuras representan el sector oriental del acuífero, las demás responden al nivel piezométricos en el sector occidental y centro del acuífero.

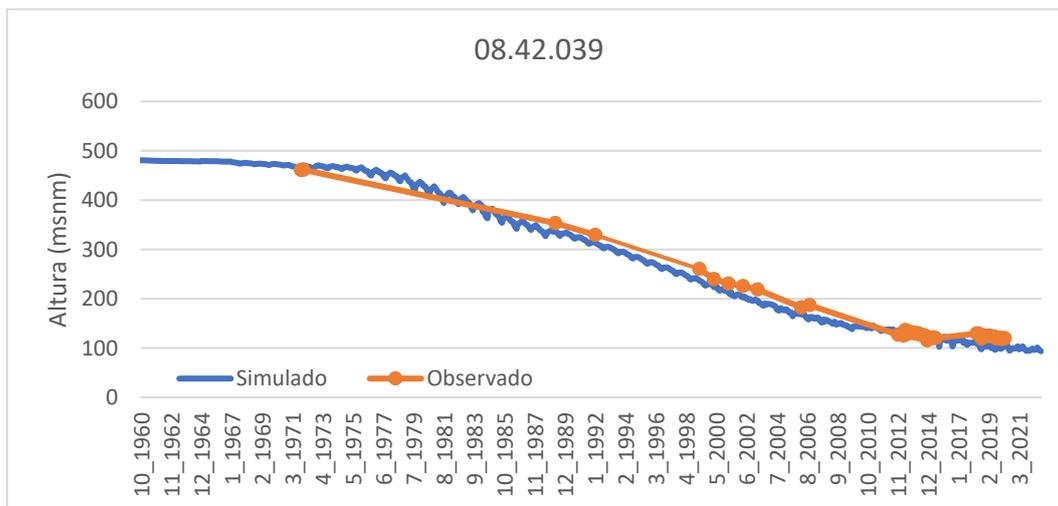


Figura 33. Calibración del piezómetro 08.42.039.

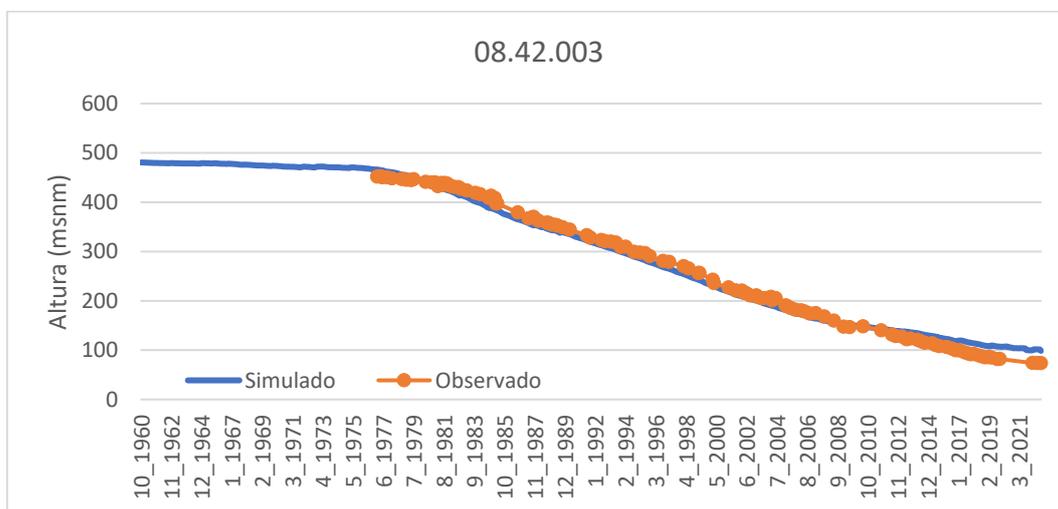


Figura 34. Calibración del piezómetro 08.42.003.

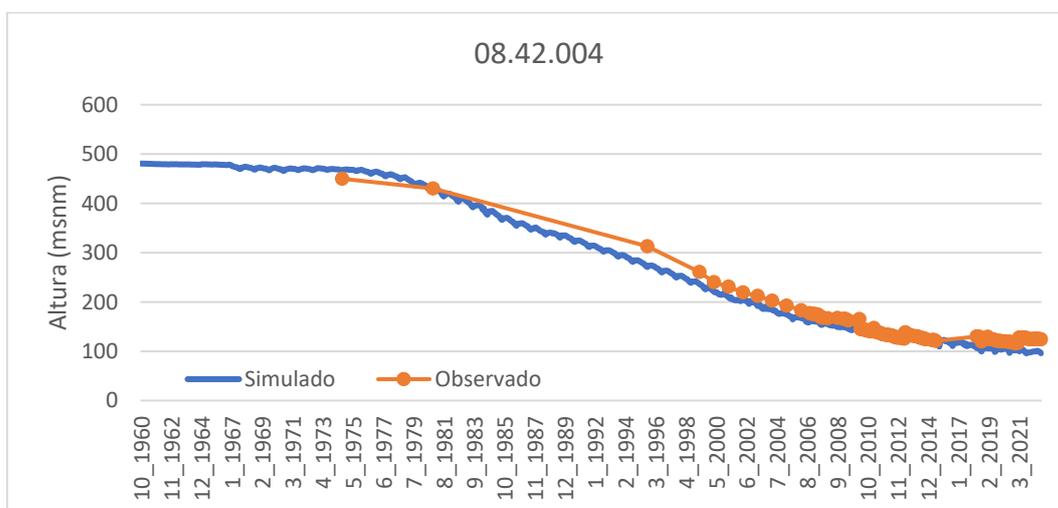


Figura 35. Calibración del piezómetro 08.42.004.

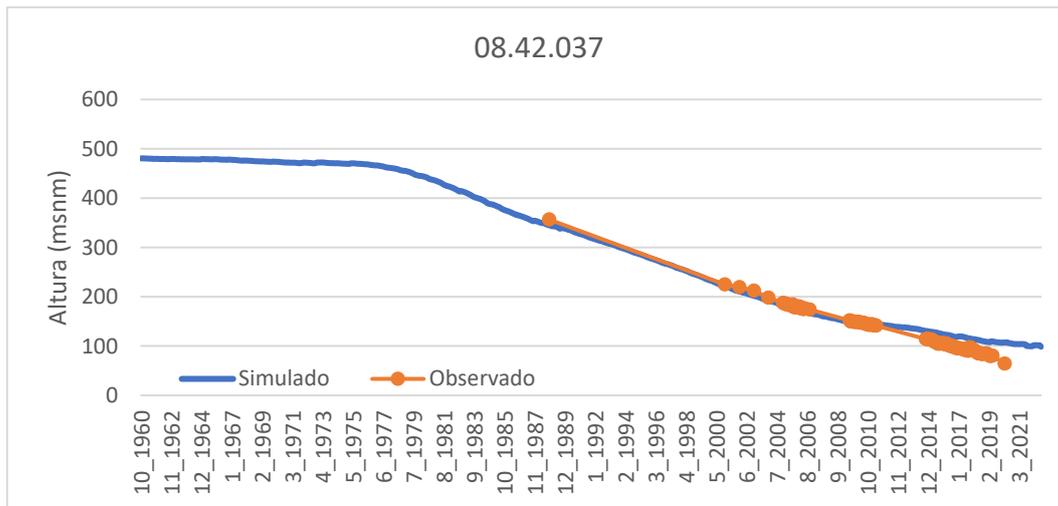


Figura 36. Calibración del piezómetro 08.42.037.

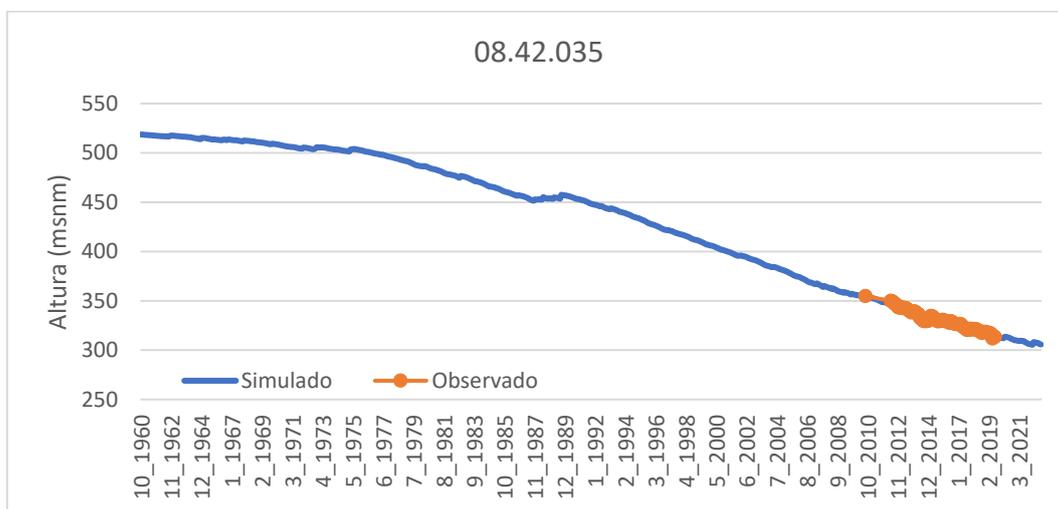


Figura 37. Calibración del piezómetro 08.42.035.

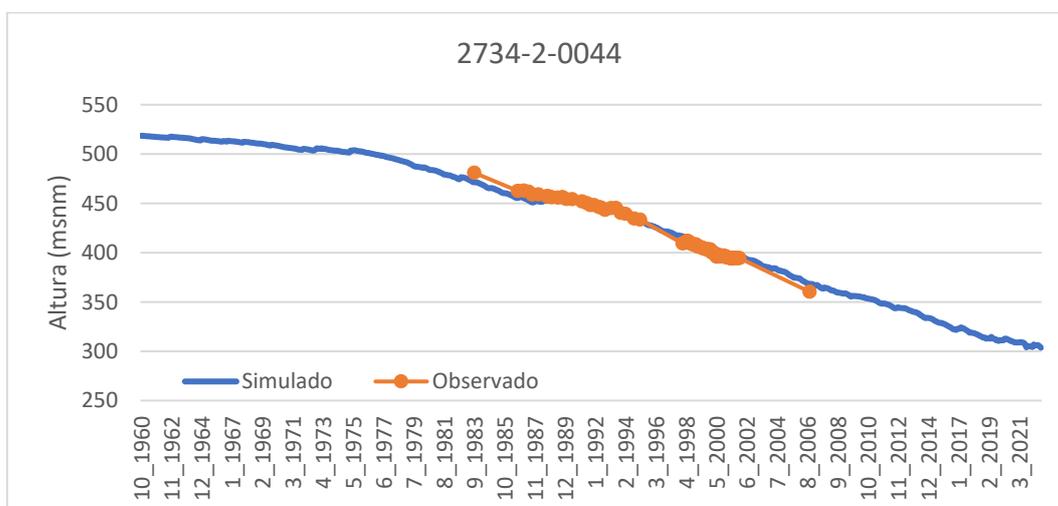


Figura 38. Calibración del piezómetro 2734-2-0044.

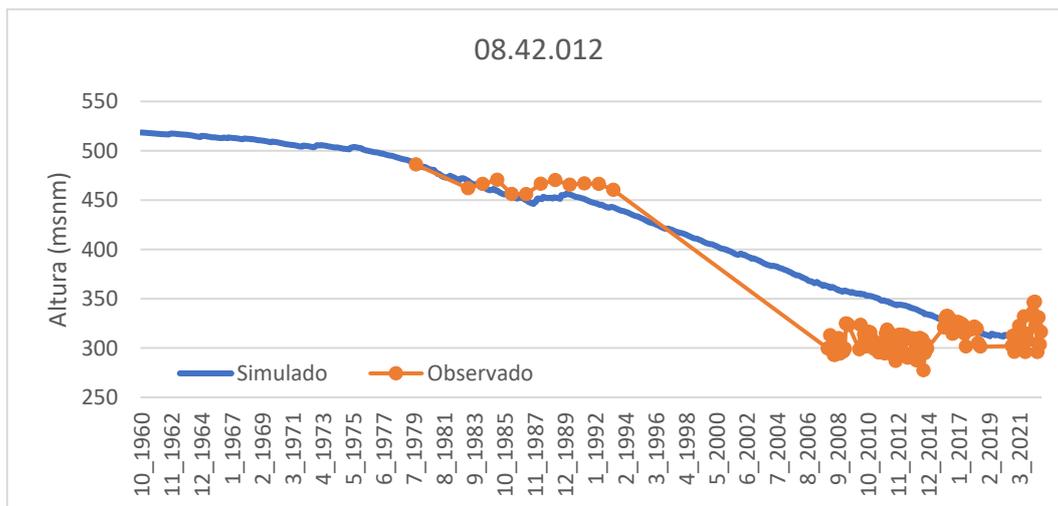


Figura 39. Calibración del piezómetro 08.42.012.

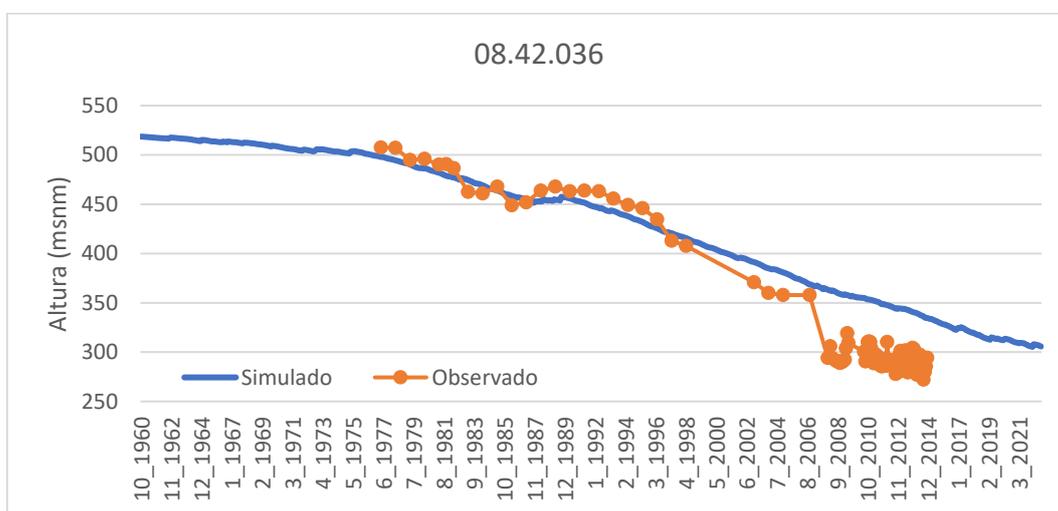


Figura 40. Calibración del piezómetro 08.42.036.

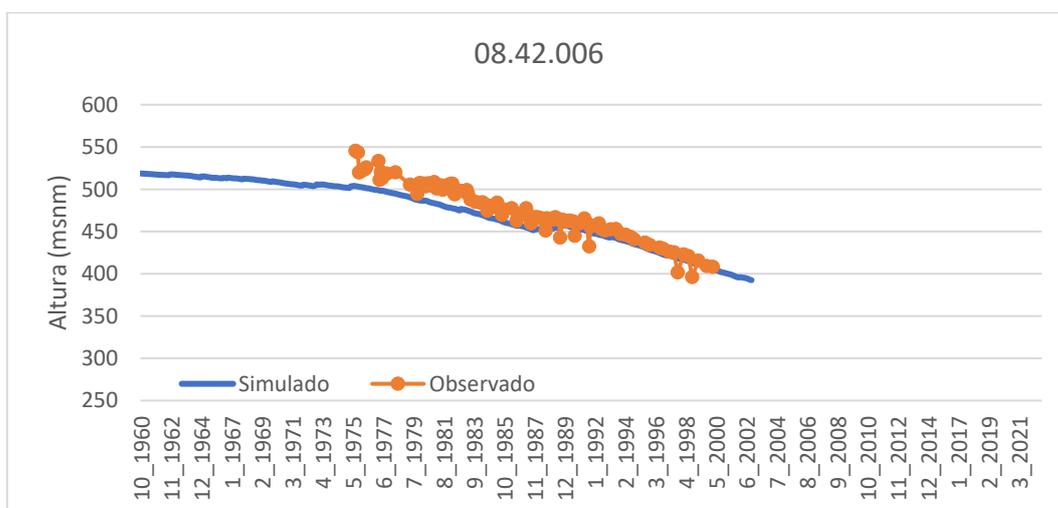


Figura 41. Calibración del piezómetro 08.42.006.

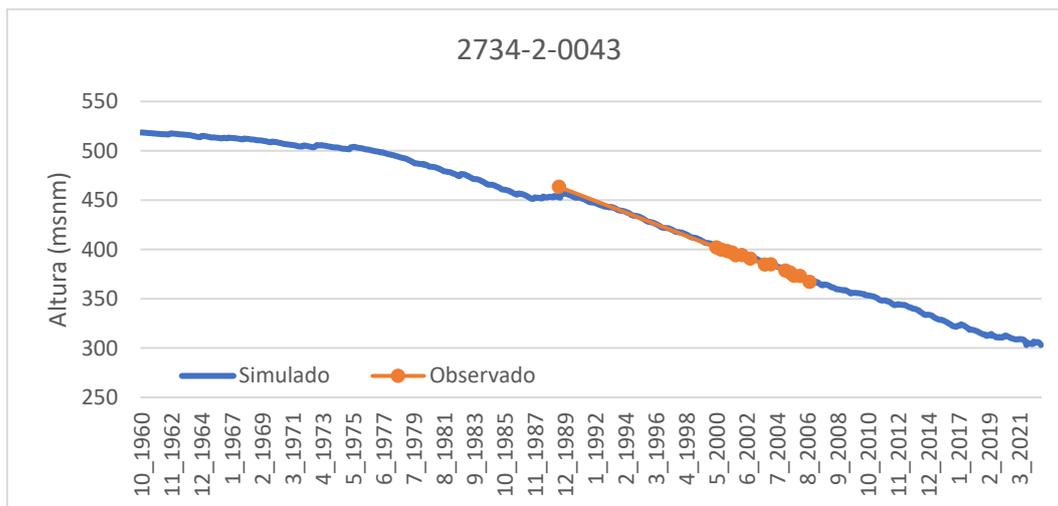


Figura 42. Calibración del piezómetro 2734-2-0043.



Figura 43. Calibración del piezómetro 2734-2-0060.

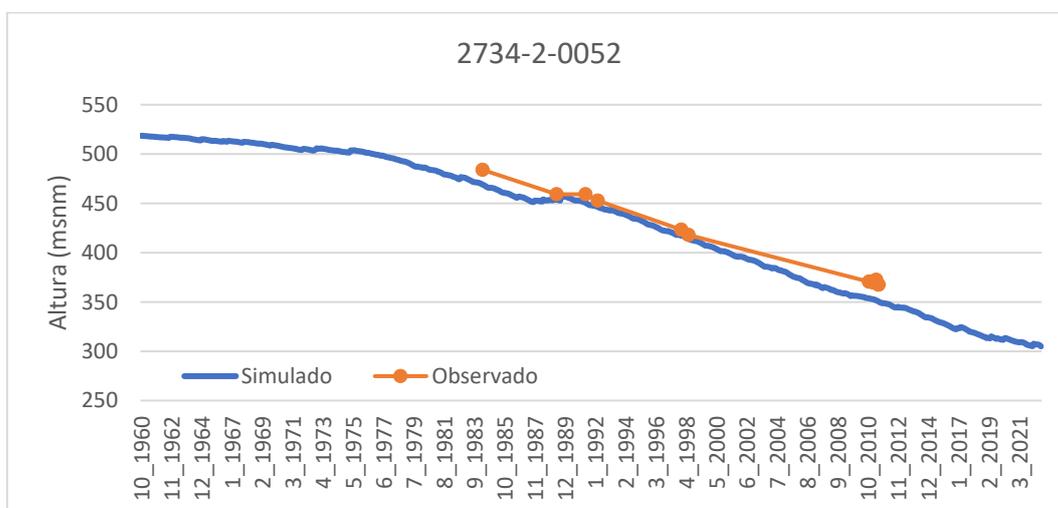


Figura 44. Calibración del piezómetro 2734-2-0052.

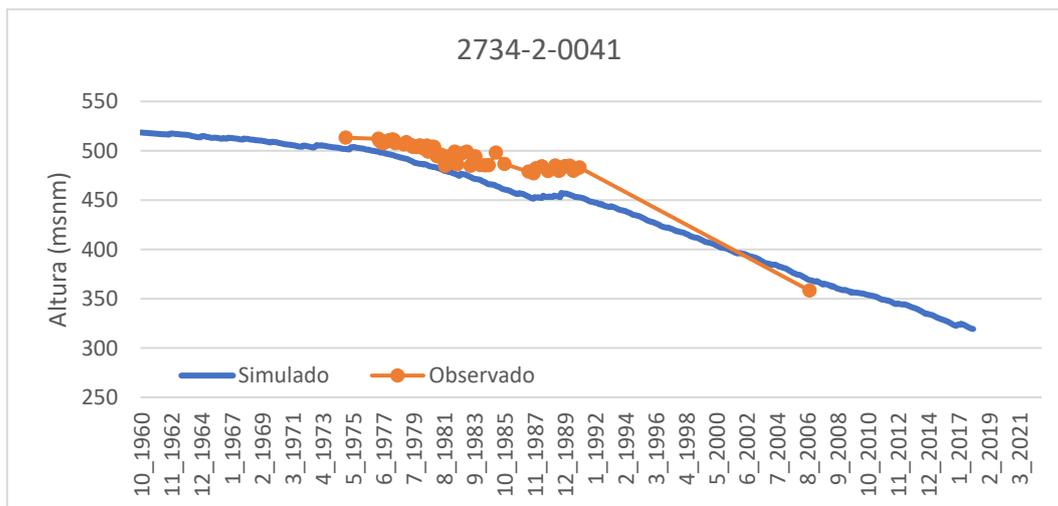


Figura 45. Calibración del piezómetro 2734-2-0041.

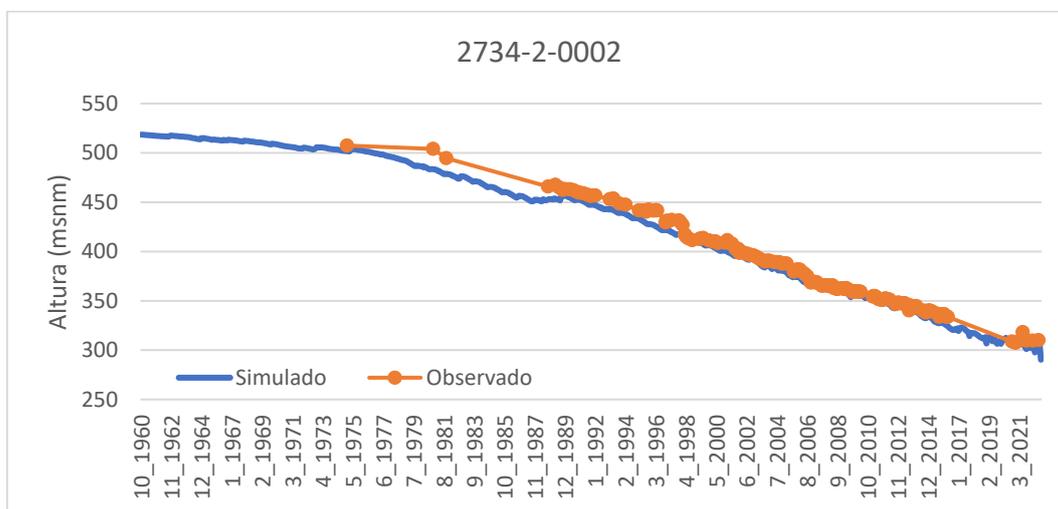


Figura 46. Calibración del piezómetro 2734-2-0002.

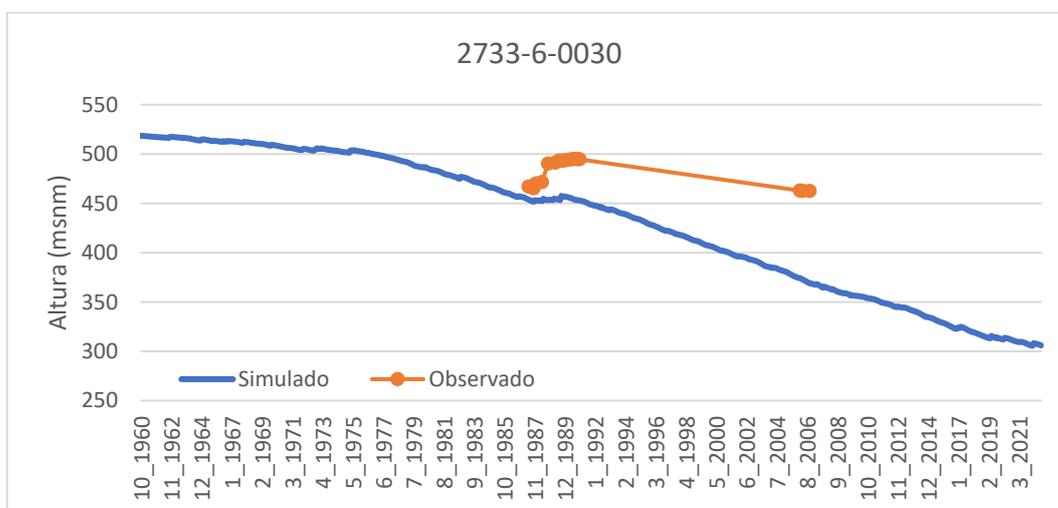


Figura 47. Calibración del piezómetro 2733-6-0030.

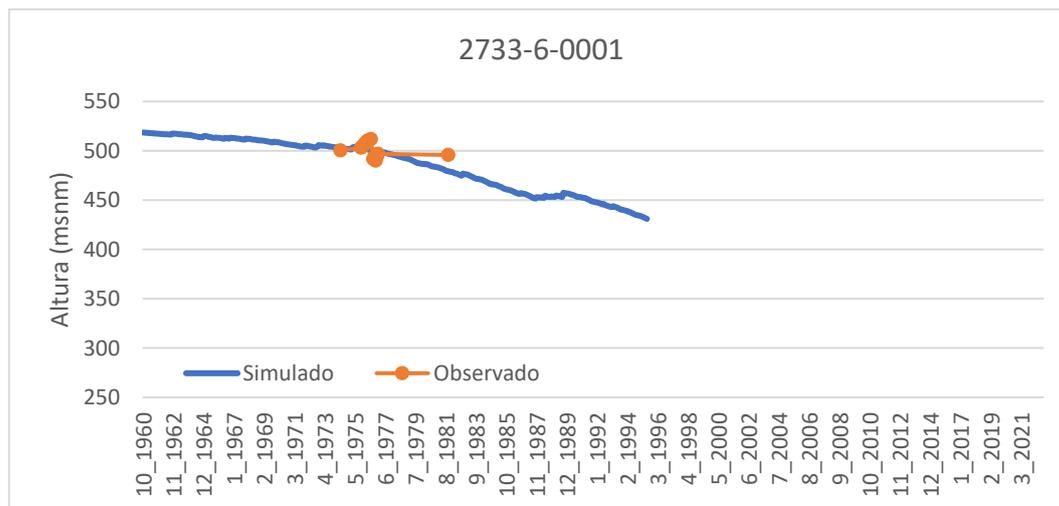


Figura 48. Calibración del piezómetro 2733-6-0001.

Como puede observarse, a excepción de los piezómetros 08_42_012, 08_42_036 y 2733_6_0030, la representación de los niveles es aceptable y se sigue la tendencia correctamente. Los piezómetros 08_42_012 y 08_42_036 se representan adecuadamente en el periodo de 1970 a 2000 aproximadamente, pero en el periodo de 2006 a la actualidad, la simulación sobreestima respecto a los valores observados. Respecto al piezómetro 2733_6_0030 se pone en duda la veracidad de las observaciones, ya que su comportamiento difiere a los demás piezómetros en el sector occidental; el piezómetro más cercano, el 2733_6_0001, tiene pocos datos y en un periodo diferente, por lo que no permite corroborar la información.

6.3 Balance hídrico en régimen estacionario

El modelo en régimen estacionario representa el escenario natural de sistema, en el que no existe la influencia humana sobre las condiciones del acuífero, por tanto, sin la presencia de las extracciones por bombeo ni los retornos de riego. Como se mencionó anteriormente, las entradas consisten en la recarga por precipitación, las salidas son proporcionales y se dan exclusivamente por el manantial Fuente de Salinas, por tanto, el almacenamiento se mantiene constante en el sistema.

Al no disponer datos del nivel piezométrico previo al inicio de las intervenciones humanas, no se ha calibrado un modelo en régimen estacionario. Los parámetros usados en el modelo son los que se calibraron en régimen transitorio.

La recarga por precipitación se calculó como el promedio de la reportada por PATRICAL en el periodo de 1940/41 a 1959/60, en total la recarga es de 2.88 hm³/año. La Figura 28 muestra la superficie piezométrica en régimen no influenciado.

La Tabla 12 presenta el balance hídrico en régimen estacionario por demarcación hidrográfica. El 58.4% (1.63 hm³/año) de las entradas al sistema se dan en la CHJ, el 41.6% (1.16 hm³/año) restante se da en la DHS. La dirección preferencial del flujo es hacia el oriente donde se ubica el punto más bajo y única salida del sistema Fuente de Salinas en la CHJ al sur de Salinas. La totalidad de las salidas se dan por el manantial Fuente de Salinas, con un caudal de 2.79 hm³/año que alimentan la laguna de Salinas, en la Figura 49 se observa el tamaño y profundidad de la laguna en base a los resultados del modelo estacionario.

Tabla 12. Balance hídrico en régimen estacionario.

Demarcación	Recarga Lluvia (hm ³ /año)	Transferencias (hm ³ /año)	Descarga Manantial (hm ³ /año)
DHJ	1.63	+1.16	2.79
DHS	1.16	-1.16	0.00
Total	2.79		2.79

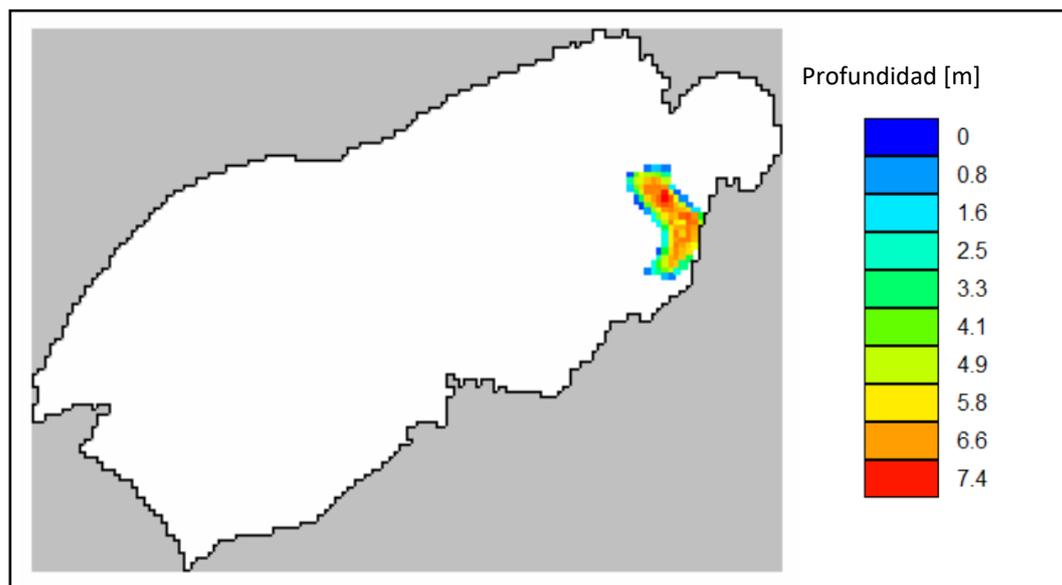


Figura 49. Profundidad de la Laguna de Salinas resultados del modelo estacionario.

6.4 Balance hídrico en régimen transitorio

La modelación en régimen influenciado abarca los años de 1960/61 a 2021/22, se tienen en cuenta además de las entradas y salidas naturales del sistema, las extracciones por bombeo y la recarga por retornos de riego. Bajo estas condiciones, el balance hídrico del sistema cambia notablemente, en especial por la magnitud de los bombeos (12.72 hm³/año) que superan con creces la recarga (3.36 hm³/año), dando lugar al consumo de las reservas del acuífero (9.65 hm³/año). En la Tabla 13 se presenta el balance hídrico en régimen influenciado para el año medio.

Tabla 13. Balance hídrico en régimen transitorio del periodo 1960/61 - 2021/22 (año hidrológico medio).

Demarcación hidrográfica	Recarga total (hm ³ /año)	Consumo reservas (hm ³ /año)	Aportes demarcación (hm ³ /año)	Transferencia DHS a DHJ (hm ³ /año)	Transferencia DHJ a DHS (hm ³ /año)	Manantial (1) (hm ³ /año)	Explotación (hm ³ /año)
DHJ	1.95	6.29	8.24	1.29	-0.82	0.28	8.43
DHS	1.41	3.36	4.77	-1.29	0.82	0	4.29
Total	3.36	9.65	13.01			0.28	12.72

(1) Drenaje hacia el manantial se da entre los años 1960 - 1970

En el periodo modelado, los aportes a la demarcación de la CHJ son de 8.24 hm³/año (1.95 hm³/año de recarga y 6.29 hm³/año en consumo de reservas), inferior a la explotación que es de 8.43 hm³/año. Por su parte, la DHS aporta 4.77 hm³/año (1.41 hm³/año de recarga y 3.36 hm³/año en consumo de reservas), superior a la explotación que es de 4.29 hm³/año.

Lo anterior nos indica que el balance entre aportaciones y explotación se encuentra desequilibrado a favor del Júcar, con una transferencia media de 1.29 hm³/año desde la DHS, superior a la transferencia media hacia la CHS que es de 0.82 hm³/año. La Figura 50 muestra la evolución de las transferencias entre demarcaciones en el periodo simulado, en general se observa una mayor transferencia desde la CHS a la CHJ, sin embargo, en el periodo de 1984 a 1993 las transferencias se invirtieron y fueron mayores en dirección de la CHJ hacia la CHS, este periodo coincide con un decremento en las explotaciones por parte de la CHJ (Figura 13) y un aumento significativo en las precipitaciones (Figura 3).

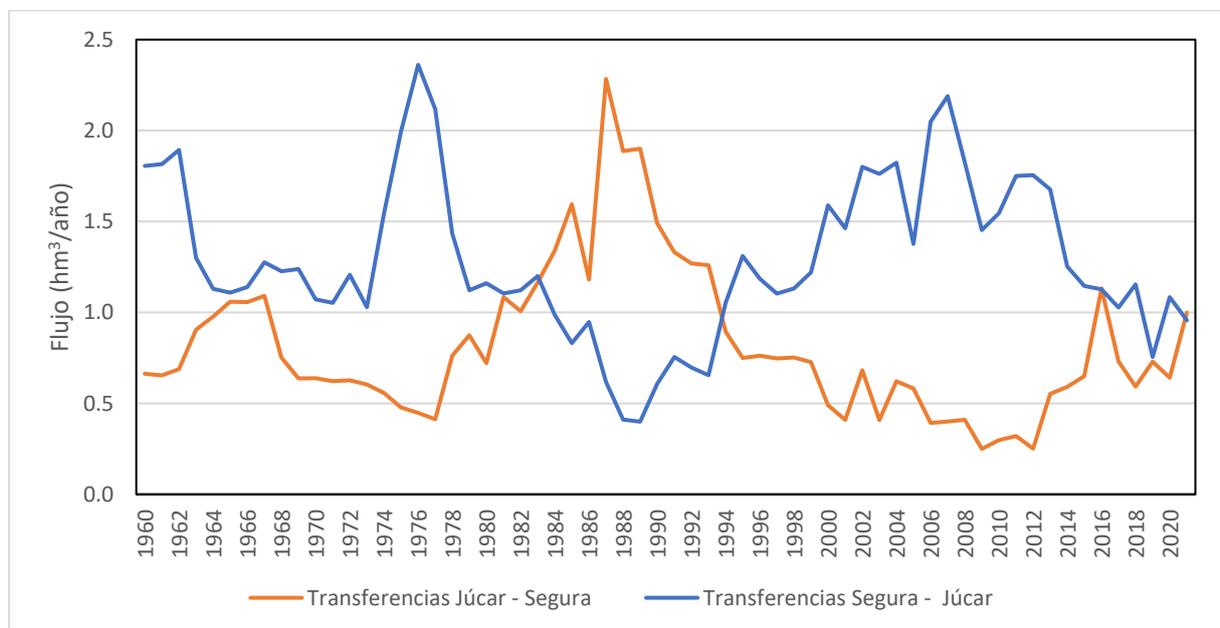


Figura 50. Evolución de las transferencias de flujo entre la CHJ y CHS.

El mismo balance se realiza para el periodo 2005/06 – 2021/22 (Tabla 14), considerado como representativo de condiciones más actuales. La explotación media anual es de 13.59 hm³/año,

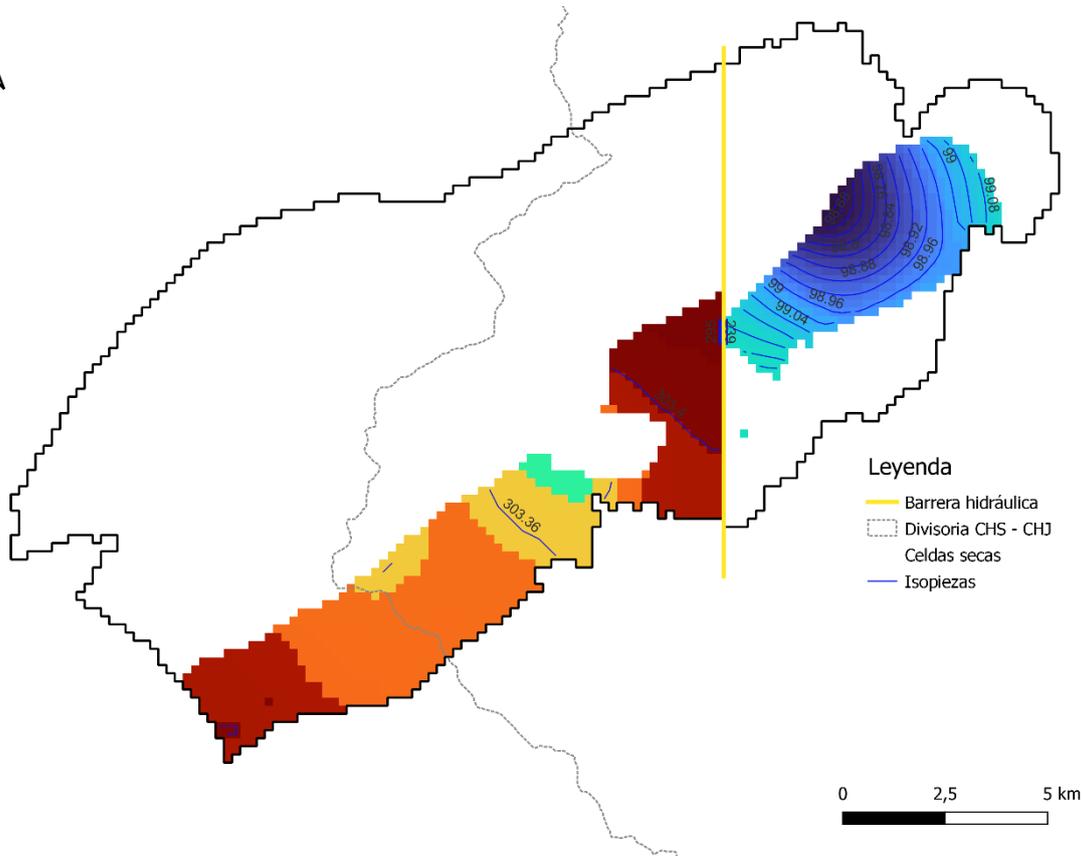
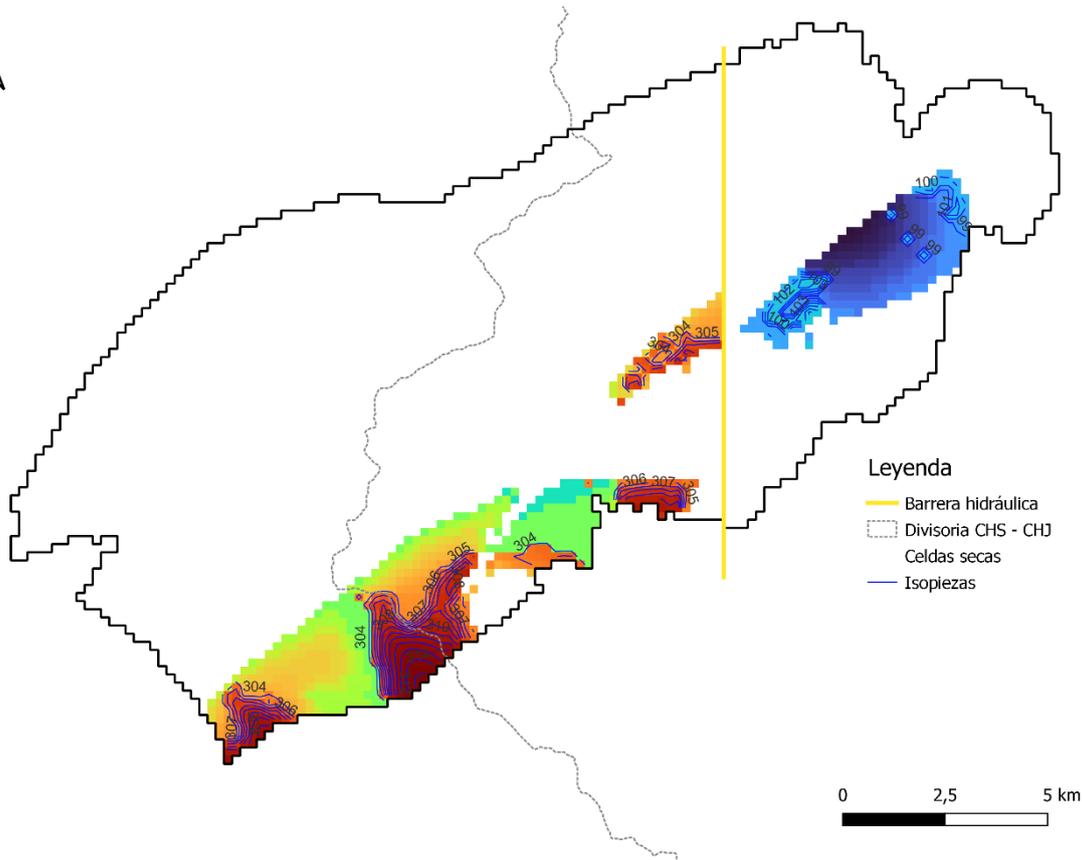
mayor a la explotación en el anterior periodo analizado, sin embargo, la recarga media también se incrementa a 4 hm³/año por lo que al consumo de reservas no se ve significativamente alterado.

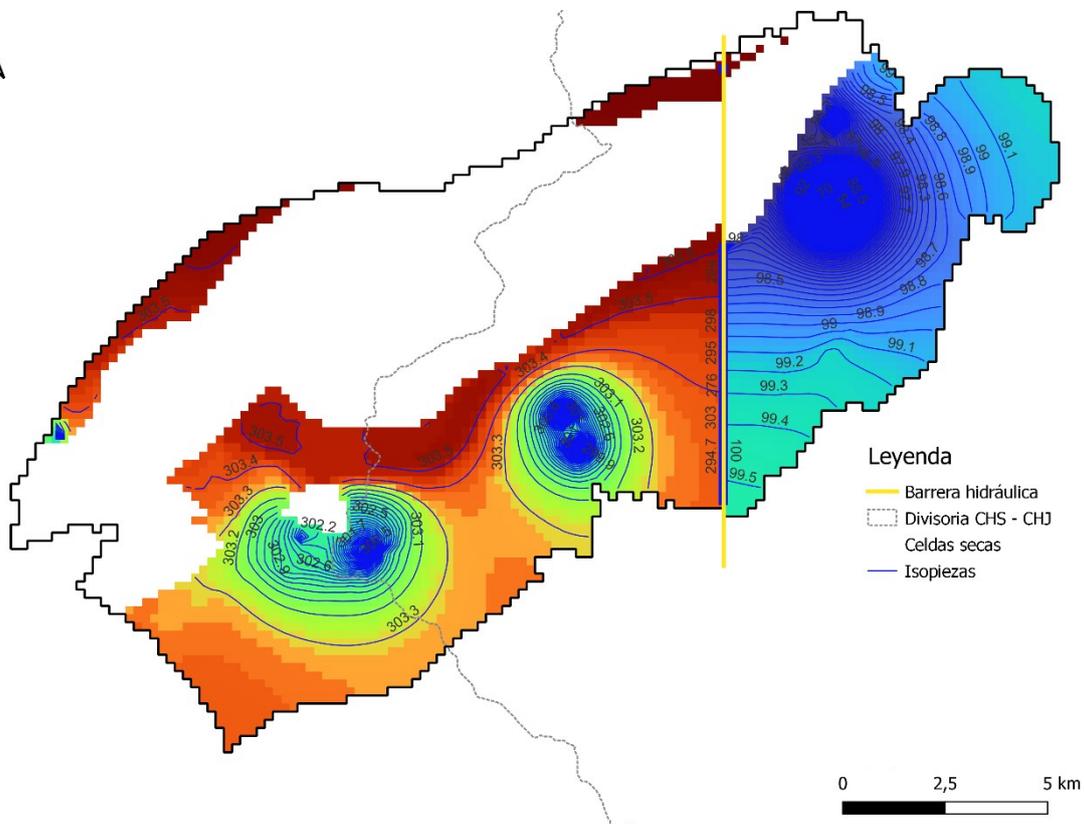
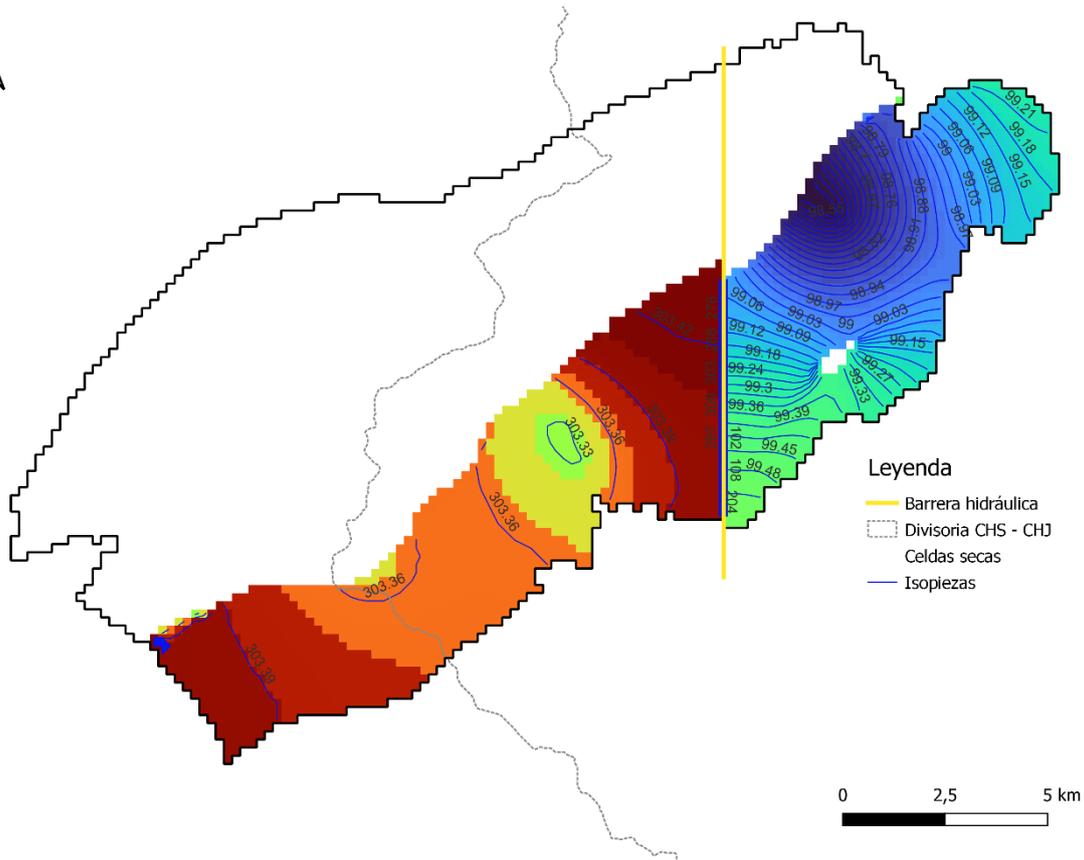
En este periodo el desequilibrio entre aportaciones y explotación se incrementa a favor de la DHJ, con una transferencia media desde la CHS de 1.42 hm³/año, consecuencia de la mayor recarga.

Tabla 14. Balance hídrico en régimen transitorio del periodo 2005/06 - 2021/22 (año hidrológico medio).

Demarcación hidrográfica	Recarga total (hm ³ /año)	Consumo reservas (hm ³ /año)	Aportes demarcación (hm ³ /año)	Transferencia DHS a DHJ (hm ³ /año)	Transferencia DHJ a DHS (hm ³ /año)	Manantial (hm ³ /año)	Explotación (hm ³ /año)
DHJ	2.32	5.59	7.90	1.42	-0.56	0.00	8.76
DHS	1.68	4.01	5.69	-1.42	0.56	0.00	4.83
Total	4.00	9.60	13.60			0.00	13.59

La Figura 51 presenta las superficies piezométricas de las 5 capas correspondientes al último paso de tiempo modelado (septiembre de 2022). En régimen alterado, la dirección del flujo se da principalmente hacia tres zonas donde se concentran las mayores explotaciones; en el sector oriental del acuífero la zona donde se ubican los pozos de abastecimiento Elda y abastecimiento y riego del Alto Vinalopó; en el sector occidental hacia la zona donde se ubican los pozos de Aguas de Pinoso, Santa Barbara y abastecimiento Pinoso; en el sector centro, la zona donde se ubica la batería de pozos N8.





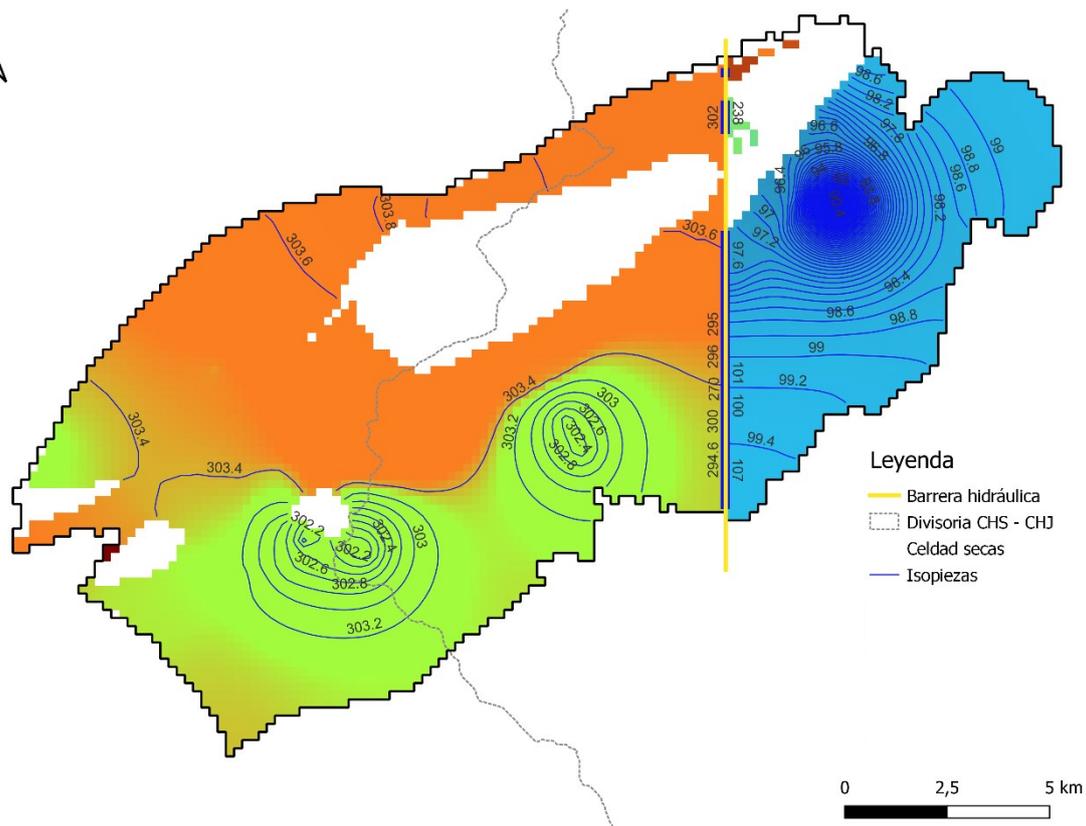


Figura 51. Mapa de isopiezas en régimen transitorio (septiembre 2022): De arriba abajo: Neógeno; Senonense; Cenomaniense; Aptiense – Albiense; y Jurásico.

7 Análisis de los resultados

7.1 Estimación de las reservas

Se realiza la estimación de reservas en las condiciones naturales del sistema y para las condiciones modeladas en septiembre de 2022, es decir el último periodo modelado en régimen transitorio. Para el cálculo de las reservas se usa la Ecuación 2. Los datos necesarios se obtienen de los resultados del modelo numérico y son procesados con herramientas SIG, estos son: archivos ráster de resolución 200 x 200 m correspondientes a las superficies piezométricas, muros de las capas y los coeficientes de almacenamiento.

$$V_{ac} = [(P_c - M_c) * S_c] * A_c \quad \text{Ecuación 2}$$

donde V_{ac} es el volumen de agua (L³), P_c es la cota piezométrica (msnm), M_c es la cota del muro (m.s.n.m.), S_c es la porosidad eficaz (%) y A_c es el área de celda (L²).

Finalmente, el volumen total de reservas es la suma de todas las celdas y capas.

En la Tabla 15 se presenta la estimación de reservas por capa y por régimen de flujo. En la masa de agua Serral – Salinas. El volumen total de reservas en las condiciones naturales del sistema es de 3752.54 hm³, adoptando los límites de las demarcaciones hidrográficas, 2802.56 hm³ corresponden a la DHJ. Las reservas calculadas para las condiciones piezométricas modeladas al mes de septiembre de 2022 son de 1840.84 hm³, de las cuales, 1344.77 hm³ corresponden a la delimitación de la CHJ. Comparando ambos periodos, se ha dado una reducción del 51% de las reservas.

Cabe destacar que para establecer las reservas de una masa de aguas subterránea es necesario tener información precisa de la geometría de sus acuíferos y la porosidad de los materiales, ya que influyen directamente en el cálculo del volumen. Ambos datos tienen una alta incertidumbre asociada, destacando la incertidumbre en la geometría de la capa del jurásico, para la cual se dedujo el muro en base a información cartográfica.

Tabla 15. Estimación de reservas de agua subterránea total y por unidad hidrogeológica en Serral - Salinas

Escenario de estimación de reservas (hm ³)	Condiciones naturales			Septiembre 2022		
	CHJ	CHS	Masa	CHJ	CHS	Masa
Neógeno	160.16	41.59	201.75	12.06	15.86	27.92
Senonense	196.57	45.31	241.88	36.48	20.1	56.58
Cenomaniense	742.41	164.5	906.91	342.21	101.2	443.41
Albiense-Aptiense	774.99	256.28	1031.27	437.05	125.98	563.03
Jurásico	928.43	442.3	1370.73	516.97	232.93	749.9
Total	2802.56	949.98	3752.54	1344.77	496.07	1840.84

7.2 Estado cuantitativo

Para evaluar el estado cuantitativo de la masa Serral – Salinas se usó el test del balance hídrico descrito en la “Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas” (MITERD, 2020), el test permite identificar si las extracciones superan las recargas después de descontar las necesidades ambientales. El análisis se realizó para el periodo de 2005/06 a 2021/22 el cual se considera representativo de las condiciones actuales de explotación y recarga del sistema.

La evaluación del estado cuantitativo de la masa de agua subterránea de Serral - Salinas presenta una complejidad adicional, debido a su carácter intercuenca se debe de evaluar el estado cuantitativo en ambas demarcaciones (DHS y DHJ) y para el global de la masa. El cálculo del recurso disponible y del índice de explotación se realiza según la Ecuación 3 y la Ecuación 4, respectivamente.

$$\begin{aligned} \text{Recurso disponible (RD)} = & \text{recarga por lluvia} + \text{retornos de riego} + \\ & + \text{infiltración fluvial} + \text{entradas laterales} - \text{salidas laterales} - \\ & - \text{descargas ambientales} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Índice de explotación (IE)} = \frac{\text{tasa media anual de extracción}}{\text{recursos disponibles}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Una masa de agua subterránea se diagnosticará en mal estado cuantitativo cuando el índice de explotación es mayor o igual a 1 si la tendencia piezométrica no es descendente, o cuando el índice de explotación sea mayor o igual a 0,8 y además exista una tendencia piezométrica a largo plazo descendente, según el modelo numérico desarrollado. La Tabla 16 muestra los resultados por demarcación hidrográfica y el global de la masa.

Tabla 16. Índice de explotación según la demarcación hidrográfica (periodo de 2005/06 - 2021/22).

Demarcación	Explotación (hm ³ /año)	Recurso disponible (hm ³ /año)	Índice de explotación
DHJ	8.76	3.18	2.75
DHS	4.83	0.82	5.89
Total	13.59	4.00	3.40

Se presenta un gran desequilibrio entre extracciones y recurso disponible, los resultados indican un mal estado cuantitativo en ambas demarcaciones. Partiendo de los recursos disponibles medios del periodo estudiando, se podría alcanzar el buen estado cuantitativo global de la masa (IE <= 0.8) con una disminución del 76% de las extracciones (extracción máxima de 3.2 hm³/año), según el origen de los recursos, disminución del 71% en la DHJ y del 86% en la DHS, aunque, la respuesta del sistema por demarcación, ante la disminución de

extracciones debe de evaluarse en el modelo numérico ya que habrá cambios en el recurso disponible debido a cambios en las transferencia entre demarcaciones.

Por su parte, en el Plan Hidrológico del Júcar se ha evaluado el índice de explotación de Serral – Salinas (parte de la masa adscrita a la DHJ) en 4.5 (CHJ, 2023b). El Plan Hidrológico del Segura ha evaluado el índice de explotación de Serral – Salinas (parte de la masa adscrita a la DHS) en 3.2 (CHS, 2022b).

7.3 Distribución de los recursos hídricos

La distribución de recursos hídricos en una masa de agua compartida puede ser abordada en base a dos enfoques:

1. Según la cuenca: hidrológica (H) o hidrogeológica (G).
2. Según el origen de los recursos (A) o según la forma del drenaje del recurso (B).

También se hace la atribución de recursos hídricos según el régimen en el acuífero:

1. Estacionario o natural (valores medios de 1940/41 a 1959/60).
2. Transitorio o influenciado (valores medios de 1960/61 a 2021/22 o 2005/06 a 2021/22).

7.3.1 Según la cuenca adoptada

En régimen natural y atendiendo a la divisoria hidrográfica, el 58% de los recursos de la masa se generan en el ámbito de la DHJ y 42% en la CHS. Si se atiende a la divisoria hidrogeológica, los recursos drenados en régimen natural en la DHS son nulos, ya que toda el agua vierte hacia la DHJ (Tabla 17).

Tabla 17. Distribución de los recursos hídricos en régimen natural según adopte la cuenca hidrográfica o hidrogeológica.

Criterio	DHJ (hm ³ /año)	DHS (hm ³ /año)	Masa (hm ³ /año)
(H) Cuenca hidrológica	1.63 (58%)	1.16 (42%)	2.79
(G) cuenca hidrogeológica	2.79 (100%)	0 (0%)	

En régimen influenciado la distribución de recursos es más compleja debido al consumo de las reservas del sistema y la creación de varios umbrales piezométricos. En esta situación, solo se considera la distribución por cuenca hidrológica, ya que no se pueden distinguir fácilmente cuencas hidrogeológicas, pues la dirección del flujo es hacia las explotaciones. Teniendo en cuenta el consumo de reservas, las aportaciones provienen en un 63% de la DHJ y en un 36%

de la CHS evaluado en el periodo de 1960/61 – 2021/22 (Tabla 18); y 58% de la DHJ y 42% de la DHS evaluando el periodo de 2005/06 – 2021/22 (Tabla 19).

Tabla 18. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado (periodo 1960/61 – 2021/22) considerando la cuenca hidrológica.

Criterio	DHJ (hm ³ /año)	DHS (hm ³ /año)	Masa (hm ³ /año)
(H) Cuenca hidrológica	8.24 (63%)	4.77 (37%)	13.01

Tabla 19. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado (periodo 2005/06 – 2021/22) considerando la cuenca hidrológica.

Criterio	DHJ (hm ³ /año)	DHS (hm ³ /año)	Masa (hm ³ /año)
(H) Cuenca hidrológica	7.9 (58%)	5.69 (42%)	13.6

7.3.2 Según origen y forma de drenaje

Según el origen y régimen hídrico el recurso puede distribuirse teniendo en cuenta: la recarga por infiltración de lluvia en estado natural (A1), la recarga por infiltración de lluvia y retornos de riego (A2) o la recarga total y consumo de reservas en régimen transitorio (A3). Según la forma de drenaje, es decir, según su destino o aprovechamiento: salidas naturales (manantiales, ríos, humedales, transferencias, etc) (B1) o salinas naturales y antrópicas (bomberos) (B2). La Tabla 20 y la Tabla 21 recogen los resultados para los diferentes periodos analizados.

Tabla 20. Distribución de los recursos hídricos según origen y forma de drenaje. En régimen natural para el periodo medio 1940/41-1959/60 y en régimen alterado para el periodo medio 1960/61 – 2021/22.

Criterio	Régimen hídrico	Subcriterio	DHJ (hm ³ /año)	DHS (hm ³ /año)	Masa (hm ³ /año)
(A) Origen	Estacionario	A1	1.63 (58%)	1.16 (42%)	2.79
		A2	1.95 (58%)	1.41 (42%)	3.36
	Transitorio	A3	8.24 (63%)	4.77 (37%)	13.01
(B) Forma de drenaje	Estacionario	B1	2.79 (100%)	0.00 (0%)	2.79
	Transitorio	B2	8.71 (67%)	4.29 (33%)	13.01

Tabla 21. Distribución de los recursos hídricos según origen y forma de drenaje. En régimen natural para el periodo medio 1940/41-1959/60 y en régimen alterado para el periodo medio 2005/06 – 2021/22.

Criterio	Régimen hídrico	Subcriterio	DHJ (hm ³ /año)	DHS (hm ³ /año)	Masa (hm ³ /año)
(A) Origen	Estacionario	A1	1.63 (58%)	1.16 (42%)	2.79
		A2	2.32 (58%)	1.68 (42%)	4.00
	Transitorio	A3	7.91 (58%)	5.69 (42%)	13.60
(B) Forma de drenaje	Estacionario	B1	2.79 (100%)	0.00 (0%)	2.79
	Transitorio	B2	8.76 (64%)	4.83 (36%)	13.60

8 Discusión y conclusiones

El principal objetivo de este trabajo es la construcción de un modelo numérico de flujo de la masa de agua subterránea Serral – Salinas. Para ello, se ha realizado una amplia exploración de la geología e hidrogeología, se estudió el funcionamiento de la masa, y se realizó la caracterización de los flujos implicados en el balance hídrico. Toda la información disponible que ha sido analizada y una serie de hipótesis y simplificaciones dieron lugar a la modelización de la masa de agua subterránea con resultados satisfactorios.

Un aspecto crítico en los modelos de flujo subterráneo es su geometría. Se destaca positivamente la precisión geométrica del modelo de Serral - Salinas, cuyas superficies de referencia (Neógeno, Senonense, Cenomaniense, Aptiense - Albiense) han sido extraídas del modelo geológico 3D resultado del exhaustivo estudio realizado por IGME-DPA (2014). Esta cuidadosa definición reduce significativamente la incertidumbre y brinda confianza en los resultados obtenidos.

Durante la calibración del modelo se ha confirmado la importancia de la unidad geológica Jurásica profunda en el funcionamiento actual de la masa de agua. La información recolectada sobre la profundidad de los sondeos ha permitido identificar por lo menos 9 sondeos de la DHJ que se ubican por debajo del muro Aptiense – Albiense del modelo geológico 3D base usado en la definición de la geometría de la masa. Además, durante la calibración del modelo, se ha constatado que pozos (10 en la CHS y 2 en la CHJ) en los que hay registros recientes de extracciones, se encuentran captando agua de la capa Jurásica, pues en dichas ubicaciones las capas superiores se han secado (en base a la geometría del modelo). De las unidades modeladas, la unidad Jurásica es la que mayores incertidumbres asociadas presenta, tanto en su geometría como las propiedades hidráulicas.

El análisis de las series piezométricas pone de manifiesto la existencia de dos sectores con comportamientos hidráulicos diferentes, el salto piezométrico entre ambos sectores se acusa con el descenso de los niveles. En los primeros años del registro piezométrico (década de 1970) el salto piezométrico es de aproximadamente 40 m, para el año 2021 el salto es de más de 200 m. Para representar este comportamiento, IGME (2022) e IGME - DPA (2007) han diferenciado dos sectores, el occidental representativo del Cretácico y el oriental representativo de Jurásico, y entre ellos una franja central de baja conductividad hidráulica. Sin embargo, IGME – DPA (2014) dice *“La estructura que define el acuífero de Serral-Salinas tiene continuidad geológica y no se han encontrado criterios geológicos que permitan dividir esta estructura en dos compartimentos hidrogeológicos independientes”*.

Por lo anteriormente descrito, en este trabajo se ha dado continuidad geológica a las unidades (unidad Cretácica continua de oriente a occidente) y se logra el salto piezométrico por medio de una franja de baja conductividad hidráulica, de modo que ambos sectores quedan

parcialmente desconectados hidráulicamente. El modelo numérico logra reproducir el comportamiento del salto piezométrico en función del nivel de agua en el acuífero.

Los resultados de la calibración están expuestos a puntos piezométricos cuya tendencia se encuentra claramente fuera del rango. El filtrado y supresión de dichos puntos refleja una notable disminución del error, sin embargo, al no tener certezas sobre la validez de estos datos y teniendo en cuenta que los puntos 08_42_012 y 08_42_036 son los que más representan la zona centro del acuífero, se han tenido en cuenta durante el desarrollo de este trabajo. Finalmente, los estadísticos con los que se ha evaluado el modelo son: la raíz del error cuadrático medio global en 21.46 m y el coeficiente de Nash en 0.97.

En este trabajo se ha diferenciado el balance hídrico según la confederación hidrográfica. En régimen natural, el 41.6% de las entradas se generan en la CHS y 58.4% en la CHJ. La totalidad de la descarga se realiza por el manantial Fuente de Salinas ubicado en la DHJ al sur de Salinas, con un caudal de 2.79 hm³/año. Por tanto, la dirección preferencial del flujo es hacia el manantial.

En régimen influenciado, la sobreexplotación genera un consumo de reservas de 9.6 hm³/año, de los cuales el consumo es de 5.59 hm³/año en la CHJ y 4.01 hm³/año en la CHS. Consecuentemente, hay un descenso generalizado de los niveles piezométricos en la masa de agua, en la zona oriental del acuífero más acusados que en el sector occidental. En el primero, el descenso total es de 380 m, en el segundo de 215 m durante el periodo simulado (hasta septiembre de 2022).

El comportamiento hidrodinámico del sistema en este escenario, está completamente determinado por las acciones antrópicas que toman lugar en la masa de agua, la dirección del flujo se da principalmente hacia tres zonas donde se concentran las mayores explotaciones; en el sector oriental del acuífero la zona donde se ubican los pozos de abastecimiento Elda y abastecimiento y riego del Alto Vinalopó; en el sector occidental hacia la zona donde se ubican los pozos de Aguas de Pinoso, Santa Barbara y abastecimiento Pinoso; en el sector centro, la zona donde se ubica la batería de pozos N8.

En cuanto a las transferencias entre demarcaciones, se encuentra que estas dependen de la piezometría presente, altamente influenciada por la magnitud de las extracciones. En general se observa una mayor transferencia desde la CHS a la CHJ, sin embargo, en el periodo de 1984 a 1993 las transferencias se invirtieron y fueron mayores en dirección de la CHJ hacia la CHS, periodo que coincide con un decremento en las explotaciones por parte de la CHJ y un aumento significativo en las precipitaciones. Para el periodo analizado, las transferencias se encuentran desequilibradas a favor del Júcar, con una transferencia media de 1.29 hm³/año desde la DHS, superior a la transferencia media hacia la CHS que es de 0.82 hm³/año.

Las reservas en régimen natural se estimaron en 3752 hm³, que, en comparación con los niveles piezométricos de septiembre de 2022, se ven reducidas en 51%. A diferencia de estudios previos en los que se ha estimado las reservas de la masa Serral – Salinas, en el presente trabajo se tuvo en cuenta las reservas de la unidad hidrogeológica Jurásica que se ubica bajo el cretácico.

La masa de agua subterránea Serral – Salinas se encuentra en mal estado cuantitativo según el test del balance hídrico, con un índice de explotación de 2.75 en la DHJ y 5.89 en la DHS. El recurso disponible es de 3.2 hm³/año, por lo que es necesario una disminución del 76% en las extracciones (evaluadas entre 2005 y 2022) para detener la degradación del estado de la masa. Su recuperación, podría plantearse a muy largo plazo.

Finalmente, los recursos totales de la masa pueden distribuirse de acuerdo con las distintas propuestas recogidas en IGME (2022) y mencionadas en el apartado 7.3. En la situación actual alterada, el criterio A3 es el más eficiente ya que la mayor parte del recurso aprovechado proviene de las reservas hídricas del sistema. Este criterio distribuye el recurso total (13.6 hm³/año) en un 58% (7.91 hm³/año) y 42% (5.69 hm³/año) para la CHJ y CHS. No obstante, este criterio no está fundamentado para conseguir el buen estado cuantitativo de la masa o al menos en conseguir un régimen de explotación sostenible, caso para el cual conviene aplicar el criterio A2, considerando exclusivamente los recursos renovables. Este criterio distribuye el recurso renovable (4.00 hm³/año) en 58% (2.32 hm³/año) para la DHJ y 42% (1.68 hm³/año) para la DHS.

Dada la intensa explotación que existe en la masa Serral – Salinas, la gestión hídrica a corto y mediano plazo debe enfocarse en la estabilización de los actuales niveles piezométricos. Acciones de recuperación de las descargas naturales deben ser planteadas a largo plazo.

El modelo desarrollado supone una herramienta útil para las administraciones competentes para gestión del recurso hídrico. Será posible simular la respuesta del sistema ante diferentes escenarios de gestión, así como cuantificar el efecto sobre la calidad cuantitativa y las reservas de la masa.

9 Recomendaciones

Se proponen las siguientes mejoras a este estudio:

- Incorporación de una mayor heterogeneidad y anisotropía en la hidrogeología que configuran el acuífero: zonificaciones locales y distribución espacial de la recarga.
- Mejorar el conocimiento de la geometría y propiedades hidráulicas de la unidad hidrogeológica Jurásica. Estudiar el beneficio de la explotación de esta unidad dada la gran profundidad en que se encuentra.
- Estudio de un escenario de explotación por demarcación que permita el alcance del buen estado cuantitativo de la masa. Ya que éstos deben ser planteados a muy largo plazo, estudiar la relación coste/beneficio de tal recuperación.
- Evaluar el impacto de diferentes escenarios de cambio climático sobre los recursos y el balance hídrico de la masa Serral - Salinas.

10 Alineación del TFM con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Este TFM está alineado con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible:

1. Agua limpia y saneamiento.
2. Ciudades y comunidades sostenibles.
3. Producción y consumo responsables.
4. Vida de ecosistemas terrestres.

11 Referencias

- ADARO. (1982). *Estudio hidrogeológico del sistema acuífero Carche-Salinas. Posibilidades de captación de aguas para usos agrícolas en la cañada del Trigo (Jumilla)*.
- CEDEX. (1995). *Libro blanco de las aguas subterráneas*.
- CEDEX. (2000). *Libro blanco del agua en España*.
- CHJ. (2023a). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2022 – 2027. Memoria*.
- CHJ. (2023b). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2022 – 2027. Anejo 12: Evaluación del estado de las masas de agua superficial y subterránea*.
- CHS. (2022a). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Ciclo de planificación hidrológica 2022 – 2027. Memoria*.
- CHS. (2022b). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Ciclo de planificación hidrológica 2022 - 2027. Anejo 7: Presiones e impactos*.
- Custodio, E., & Llamas, R. (1983). *Hidrología Subterránea*.
- DGA-CEDEX. (2017). *Síntesis de los Planes Hidrológicos Españoles. Segundo ciclo de la DMA (2015-2021)*.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, 604 pp.
- Galdeano, C. S., & Garrido, A. C. (2016). Transcurrencia y mélange tectónica en el área de Sierra Arana (Cordillera Bética, NE de Granada). *Estudios Geológicos (Vol. 72)*. doi:<https://doi.org/10.3989/egeol.42468.415>
- Harbaugh, A. (2005). *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16*.
- IGME - DPA. (2003). *Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero Serral – Salinas (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión*.
- IGME - DPA. (2007). *Estudio de funcionamiento y aplicación de modelos numéricos en acuíferos carbonatados explotados intensivamente: Serral – Salinas (Murcia – Alicante)*.

- IGME - DPA. (2014). *Modelo geológico 3D del acuífero Serral – Salinas y evaluación de las reservas totales de agua subterránea.*
- IGME. (1971 - 1975). *Programa Nacional de Investigación de Aguas subterráneas (PIAS).*
- IGME. (2009). *Mapa Litoestratigráfico, de Permeabilidad e Hidrogeológico de España continuo digital a escala 1:200.000.* Convenio de colaboración entre el Ministerio de Medio Ambiente y el Instituto Geológico y Minero de España para la realización de trabajos técnicos en relación con la aplicación de la Directiva Marco del Agua en materia de agua subterránea, Madrid.
- IGME. (2022). *Definición y caracterización de masas de agua subterránea compartidas entre demarcaciones hidrográficas Júcar – Segura: Serral – Salinas.*
- IGME-DPA. (1982). *Las aguas subterráneas de la provincia de Alicante.*
- IGME-DPA. (2015). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Alicante.*
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1984). *A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model.* Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90106-x](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90106-x)
- MITERD. (2020). *Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas.*
- Pérez-Martin, M. Á. (2005). *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad de agua, integrado en sistema de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la directiva marco del agua.*
- Soto Venegas, J. M., Martínez Arias, A., & Cases Martínez, C. (2004). Nuevas aportaciones al conocimiento de la unidad hidrogeológica N° 07.05 (Jumilla-Villena) de la cuenca del Segura. *VIII. Simposio de Hidrogeología*, (págs. pp.205-213). Zaragoza, España.
- Winston, R. B. (2009). *A graphical user interface for MODFLOW – 2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6 – A29.*