



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 Sierra de Crevillente (Alicante-Murcia,
España

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Lopez , Agustin

Tutor/a: Cassiraga, Eduardo Fabián

Cotutor/a externo: TANCO BALLESTEROS, LAURA

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA DE SIERRA DE CREVILLENTE (ALICANTE-MURCIA, ESPAÑA)

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

AGUSTÍN LÓPEZ

Tutor:

EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor/es:

LAURA TANCO BALLESTEROS

JULIO, 2023



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 Sierra de Crevillente (Alicante-Murcia, España).

Título del TFM en inglés: Mathematical model of flow of the groundwater mass of Sierra de Crevillente (Alicante-Murcia, Spain).

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

Alumno: Agustín López

Tutor: Eduardo Cassiraga

Cotutor/es: Laura Tanco Ballesteros

Director experimental:

Fecha de Lectura: Julio de 2023

Resumen

La masa de agua subterránea de Crevillente presenta continuidad hidrogeológica entre las demarcaciones hidrográficas del Júcar y del Segura, lo que supone una complejidad añadida en la evaluación y asignación de los recursos hídricos según la demarcación. Con el fin de adoptar una gestión eficiente y sostenible, este trabajo define y caracteriza esta masa para evaluar los recursos hídricos subterráneos y plantear escenarios futuros mediante la realización de un modelo numérico de flujo.

En primer lugar, se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica para recopilar toda la información disponible previa sobre la zona de estudio. A continuación, se ha desarrollado un modelo conceptual detallado que permite definir y caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de la masa de agua. Posteriormente, se ha trasladado este modelo conceptual a un modelo numérico de flujo utilizando la interfaz ModelMuse (Winston, 2009) y el código MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984). Una vez calibrado dicho modelo, se evalúan los recursos hídricos realizando un balance (tanto en régimen natural como en régimen alterado), estimando las reservas disponibles y analizando el estado cuantitativo y la distribución potencial de los recursos según distintos criterios.

Por último, se plantea un escenario donde se busca representar los efectos del plan de extracciones futuras planteado por la Confederación Hidrográfica del Júcar junto al impacto del cambio climático en la recarga de la masa.

Palabras clave: Recursos hídricos, Hidrogeología, modelación matemática de acuíferos, MODFLOW, ModelMuse.

Resum

La massa d'aigua subterrània de Crevillent presenta continuïtat hidrogeològica entre les demarcacions hidrogràfiques del Xúquer i del Segura, la qual cosa suposa una complexitat afegida en l'avaluació i assignació dels recursos hídrics segons la demarcació. Amb la finalitat d'adoptar una gestió eficient i sostenible, aquest treball defineix i caracteritza aquesta massa per a avaluar els recursos hídrics subterrànies i plantejar escenaris futurs mitjançant la realització d'un model numèric de flux.

En primer lloc, s'ha realitzat una exhaustiva revisió bibliogràfica per a recopilar tota la informació disponible prèvia sobre la zona d'estudi. A continuació, s'ha desenvolupat un model conceptual detallat que permet definir i caracteritzar el funcionament hidrogeològic de la massa d'aigua. Posteriorment, s'ha traslladat aquest model conceptual a un model numèric de flux utilitzant la interfície de ModelMuse (Winston, 2009) i el codi MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984). Un cop calibrat aquest model, s'avaluen els recursos hídrics realitzant un balanç hídric (tant en règim natural com en règim alterat), estimant les reserves disponibles i analitzant l'estat quantitatiu i la seua distribució potencial dels recursos segons diferents criteris.

Finalment, es planteja un escenari futur on es busca representar els efectes del pla d'extraccions futures plantejat per la Confederació Hidrogràfica del Xúquer juntament amb l'impacte del canvi climàtic en la recàrrega de la massa.

Paraules clau: Recursos hídrics, hidrogeologia, modelatge matemàtic d'aqüífers, MODFLOW, ModelMuse.

Summary

The Crevillente groundwater body presents hydrogeological continuity between the Júcar and Segura river basins, which adds complexity to the assessment and allocation of water resources according to the basin. In order to follow an efficient and sustainable management, this study defines and characterizes this mass to evaluate the groundwater resources and propose future scenarios through the development of a numerical flow model.

Firstly, an exhaustive bibliographic review has been conducted to gather all the available previous information about the study area. Then, a detailed conceptual model has been



developed to define and characterize the hydrogeological functioning of the water mass. Subsequently, this conceptual model has been translated into a numerical flow model using the ModelMuse interface (Winston, 2009) and the MODFLOW code (McDonald & Harbaugh, 1984). Once the model has been calibrated, the water resources are evaluated by performing a water balance (both under natural and altered regimes), estimating the available reserves, and analyzing the quantitative state and potential distribution of resources according to different criteria.

Finally, a future scenario is proposed to represent the effects of the planned future extractions by the Júcar River Basin Authority, along with the impact of climate change on the recharge of the mass.

Keywords: Water resources, Hydrogeology, mathematical modelling of aquifers, MODFLOW, ModelMuse.

Agradecimientos

En primer lugar, quería agradecer a la Confederación Hidrográfica del Júcar por concederme la beca para realizar el siguiente trabajo en el marco del convenio que mantiene con la Universitat Politècnica de València para realizar prácticas en empresas.

En segundo lugar, agradecer a mi tutor, Eduardo Cassiraga, por darme las herramientas para realizar el presente trabajo, por estar siempre presente en los momentos que necesité, por su paciencia y tiempo y, además, mostrar su confianza en mí en todo momento.

También agradezco a Laura Tanco, cotutora, por mostrar buena predisposición en todo momento, ayudarme con su conocimiento, su paciencia y dedicación durante los meses de prácticas en la CHJ, al igual que a todo el equipo de la CHJ que conforman un ambiente laboral excelente.

Además, agradecer al Máster y a los compañeros/amigos hechos durante estos meses, en especial a Sebastián Arias, gran amigo con quien compartimos tardes de estudio y experiencias fuera de la universidad, y Meritxell Lahidalga, también por todo el tiempo que pasamos juntos y por ser una gran persona.

Por último, pero no menos importante, a mi familia que siempre está presente a pesar de la distancia de los últimos años, por darme su apoyo incondicional y ser mi ejemplo y motivación en todo momento. A mi novia, que me dio su apoyo y paciencia en los últimos meses, y para mi amigo Tomas Di Giannantonio, quien también está siempre presente, es un hermano y agradezco haber podido compartir los últimos meses con él.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Tabla de contenido

1	Introducción.....	6
1.1	Objetivos del modelo.....	7
1.2	Antecedentes.....	8
2	Contexto.....	9
2.1	Localización del área de estudio.....	9
2.2	Clima, temperatura y precipitación.....	11
2.3	Hidrología.....	13
2.4	Geología.....	13
2.4.1	Unidades litoestratigráficas.....	15
2.5	Formaciones hidrogeológicas.....	18
2.6	Usos de agua.....	20
3	Modelo conceptual.....	23
3.1	Unidades hidrogeológicas y funcionamiento.....	23
3.2	Geometría y límites.....	23
3.3	Funcionamiento y dominios hidrogeológicos.....	24
3.4	Captaciones.....	26
3.5	Recarga.....	28
3.5.1	Por precipitación.....	28
3.5.2	Recarga por retornos de riego.....	30
3.6	Flujos.....	31
3.7	Hipótesis y simplificaciones del modelo.....	32
4	Código utilizado.....	34
5	Construcción del modelo.....	36
5.1	Discretización horizontal.....	36
5.2	Discretización vertical.....	37
5.2.1	Topografía del terreno.....	37
5.2.2	Base del acuífero.....	37
5.3	Discretización temporal.....	38
5.4	La condición inicial.....	38
5.5	Asignación preliminar de parámetros hidráulicos.....	40



5.6	Las condiciones de contorno	42
5.6.1	Paquete de recarga	43
5.6.2	Paquete de pozos	43
5.6.3	Paquete de drenes	44
5.7	Observaciones	45
5.7.1	Paquete de observación de alturas piezométricas	45
5.8	Solver	47
6	Calibración y balance hídrico	48
6.1	Calibración de series piezométricas	48
6.1.1	Crevillente	51
6.1.2	Argallet	54
6.2	Balance hídrico en régimen estacionario	56
6.3	Balance hídrico en régimen transitorio	58
7	Análisis de los resultados	62
7.1	Estimación de las reservas	62
7.2	Estado cuantitativo	62
7.3	Distribución de los recursos hídricos	64
7.3.1	Según la cuenca adoptada	64
7.3.2	Según origen y forma de drenaje	65
7.4	Escenario futuro	66
8	Discusión y conclusiones	74
9	Recomendaciones	77
10	Referencias	78

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica de la masa de agua subterránea Sierra de Crevillent.....	9
Figura 2: Municipios dentro de la zona de estudio.....	10
Figura 3: Imagen satelital de la zona de estudio.....	11
Figura 4. Evolución de las precipitaciones anuales en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).	12
Figura 5. Evolución de las temperaturas en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).....	12
Figura 6: Localización de manantiales.....	13
Figura 7: Marco geológico de la MASb Sierras de Crevillente (IGME, 2020, p. 5)	14
Figura 8: Sector Argallet y sector Crevillente	15
Figura 9: Mapa geológico de la MASb Sierra de Crevillente (IGME, 2008).....	17
Figura 10: Cortes geológicos de la MASb Sierra de Crevillente (IGME, 2008)	18
Figura 11: Hidrogeología de la MASb Sierra de Crevillente (IGME,2020).....	19
Figura 12: Cortes hidrogeológicos de la MASb de Sierra de Crevillente (IGME,2020)	20
Figura 13. Localización de las captaciones.....	21
Figura 14: Mapa de permeabilidades de la zona de estudio. Fuente: IGME	25
Figura 15. Evolución anual de las extracciones estimadas totales anuales.	27
Figura 16: Evolución piezométrica de la zona Tolomó	27
Figura 17: Extracciones vs recarga	28
Figura 18: Sectores de recarga. Fuente: PATRICAL recortado a zona de estudio.....	29
Figura 19. Evolución anual de la recarga total por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL	30
Figura 20. Superficie de las UDAs en la zona de estudio	31
Figura 21: Celdas activas (azules) y celdas inactivas (rojas).....	36
Figura 22: Límite superior del modelo	37
Figura 23: Ubicación del manantial.....	39
Figura 24. Condiciones iniciales para el modelo en régimen transitorio.....	40
Figura 25. Dominios hidrogeológicos y ubicación de las barreras hidráulicas en el modelo. .	42
Figura 26: Ubicación de los piezómetros de control.....	46
Figura 27. Valores observados versus valores simulados para los pozos de control	50
Figura 28. Calibración piezómetro 08.52.002	51
Figura 29. Calibración piezómetro 08.52.003	51
Figura 30. Calibración piezómetro 08.52.004	52
Figura 31. Calibración piezómetro 08.52.006	52
Figura 32. Calibración piezómetro 08.52.007	53
Figura 33. Calibración piezómetro 08.52.007	53
Figura 34. Calibración piezómetro 08.51.001.....	54
Figura 35. Calibración piezómetro 08.99.003	54
Figura 36. Calibración piezómetro 08.99.004	55
Figura 37. Calibración piezómetro 08.99.008	55

Figura 38. Superficie piezométrica en régimen estacionario	58
Figura 39. Evolución de las transferencias de flujo entre CHJ y CHS	60
Figura 40. Mapa de isopiezas en régimen transitorio (septiembre 2021).....	61
Figura 41: Evolución de los derechos en las extracciones	67
Figura 42: Serie de recarga proyectada	68
Figura 43: Mapa de isopiezas en septiembre 2021	69
Figura 44: Mapa de isopiezas en septiembre 2027	70
Figura 45: Mapa de isopiezas en septiembre 2039	71
Figura 46: Evolución de niveles piezométricos en los sectores más críticos.	72

Índice de tablas

Tabla 1: Rangos de K según bibliografía.....	25
Tabla 2. Características de las UDAs ubicadas en la zona de estudio.....	30
Tabla 3. Datos relativos a la generación del mallado del modelo.	36
Tabla 4. Asignación preliminar de parámetros hidráulicos.	41
Tabla 5. Ubicación de las captaciones en el modelo en régimen influenciado.	43
Tabla 6. Posición, cota y conductancia del manantial	45
Tabla 7. Posición de los pozos de observación.	46
Tabla 8. Resultados de la calibración por pozo observado.....	49
Tabla 9. Balance hídrico en régimen estacionario por demarcación.....	57
Tabla 10: Balance hídrico en régimen estacionario por acuífero.	57
Tabla 11. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 1967/68-2020/21 (año hidrológico medio) por demarcación.....	59
Tabla 12. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 2005/06-2020/21 (año hidrológico medio).	59
Tabla 13. Explotaciones, recurso disponible e índice de sobreexplotación según la demarcación hidrográfica (periodo 2005/06-2020/21).....	63
Tabla 14. Distribución de los recursos hídricos en régimen natural según se adopte la cuenca hidrológica o hidrogeológica.....	64
Tabla 15. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado considerando la cuenca hidrológica.....	65
Tabla 16. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 1967/68-2020/2021)...	65
Tabla 17. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 2005/06 - 2020/2021). 65	
Tabla 18: Plan de actuación de la CHJ (BOE 71/2009, 2020)	66
Tabla 19. Índice de explotación para el periodo de 2027-39.....	72



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

1 Introducción

En los planes hidrológicos de cuencas se establece la delimitación de las masas de agua subterránea (MASb) dentro de los límites de cada demarcación, esto implica que, formal y administrativamente, no se reconozcan masas de agua subterránea compartidas. Sin embargo, la realidad física no se ajusta a esta definición, ya que las divisiones hidrológicas no suelen coincidir con los límites hidrogeológicos de las masas, lo que implica que existan masas de agua subterránea conectadas hidrogeológicamente en demarcaciones contiguas.

En este contexto, esta memoria aborda la definición, caracterización y evaluación de los recursos hídricos de la masa de agua subterránea Sierra de Crevillente (070.031 y 080.189) que muestra conexión hidrogeológica entre los ámbitos de planificación del Segura y Júcar, respectivamente (CHJ, 2023; CHS, 2023). A su vez, la MASb presenta una conexión hidrogeológica con la masa subterránea de Sierra de Argallet (070.030 y 080.188), que también muestra una continuidad hidrogeológica entre la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) y la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS), por lo tanto, se abordará el estudio de éstas conjuntamente.

La situación actual de sobreexplotación en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) ha destacado la necesidad de fortalecer el conocimiento de esta masa de agua subterránea. El objetivo es lograr una gestión integral, sostenible y eficiente, promoviendo una coordinación efectiva entre las diferentes demarcaciones que comparten esta masa y alcanzando un estado cuantitativo óptimo.

Para abordar este estudio, se ha empleado una metodología integral que involucra diversas etapas. En primer lugar, se ha llevado a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica para recopilar toda la información previa disponible sobre la zona de estudio. A continuación, se ha desarrollado un modelo conceptual detallado que permite definir y caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de la masa de agua a nivel local. Este modelo conceptual se ha trasladado posteriormente a un modelo numérico de flujo, utilizando la interfaz ModelMuse (Winston, 2009) y el código MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984). Construido el modelo, se calibra con la serie de datos históricos disponible para poder tener un modelo que replique el funcionamiento de la masa de agua y poder utilizarlo para obtener distintas conclusiones.

La aplicación de este modelo numérico ha permitido llevar a cabo una evaluación precisa de los recursos hídricos presentes en la zona de estudio, así como analizar su posible distribución entre las demarcaciones afectadas de manera coherente y justificada. Esta herramienta se erige como un valioso recurso para las autoridades competentes, ya que les brinda la capacidad de monitorear de forma continua el comportamiento hidrogeológico en futuras planificaciones. Asimismo, este modelo también se puede utilizar para evaluar el impacto de

cambios en los consumos de agua y analizar los efectos del cambio climático, entre otros aspectos relevantes.

1.1 Objetivos del modelo

A la luz de lo comentado anteriormente, este estudio busca cumplir con los siguientes objetivos:

- Elaborar un modelo conceptual del funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta toda la información disponible y los antecedentes de los que se disponga para mejorar el conocimiento geológico e hidráulico de la masa de agua subterránea de Crevillente. Esto permitirá comprender de manera más precisa las características y dinámicas de dicha masa.
- Desarrollar y calibrar un modelo numérico de flujo con un funcionamiento hidrogeológico conjunto. Este modelo permitirá reproducir de manera eficiente y precisa el comportamiento real del sistema, considerando sus interconexiones y flujos.
- Analizar, en respuesta a las entradas y salidas del sistema, los recursos de la masa de agua subterránea de Crevillente tanto en un régimen natural como en uno alterado por bombeos. Esto permitirá evaluar cómo influyen las extracciones de agua en las reservas, la disponibilidad y el equilibrio del acuífero.
- Evaluar los recursos hídricos existentes en la masa de agua subterránea y determinar su potencial distribución entre las demarcaciones hidrográficas afectadas. Este análisis ayudará a establecer una gestión adecuada de los recursos, considerando las necesidades y prioridades de cada demarcación.
- Simular un posible escenario futuro para evaluar el impacto del cambio climático conjuntamente al plan de actuación futuro de la CHJ.
- Proporcionar una herramienta útil y eficaz a las administraciones responsables, que les permita resolver cuestiones relacionadas con el funcionamiento de la masa de agua subterránea de Crevillente en diversos escenarios planteados. Esta herramienta contribuirá a mejorar la gestión de la masa en futuras planificaciones, brindando información precisa y respaldada por el modelo desarrollado.

En resumen, el objetivo principal de este trabajo es mejorar el conocimiento y la gestión de la masa de agua subterránea de Crevillente. Para lograrlo, se empleará una metodología que incluye la elaboración de un modelo conceptual, el desarrollo de un modelo numérico de flujo, el análisis de los recursos hídricos, la distribución potencial y evaluación de escenario futuro, así como la provisión de una herramienta útil para las administraciones competentes. Estos

esfuerzos contribuirán a una mejor comprensión y gestión de esta masa en el contexto de futuras planificaciones.

1.2 Antecedentes

Cronológicamente, el primer estudio que se encuentra en la zona se realizó entre 1971 y 1975. La zona fue objeto de estudio en la primera fase del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), dentro del marco de la investigación de aguas subterráneas de las cuencas del Júcar, Segura, Guadiana, Sur y Baleares.

En 1982, el estudio de Las aguas subterráneas de la provincia de Alicante, realizado por la Diputación Provincial de Alicante (DPA) y el Instituto Geológico de España (IGME) define el “Sistema acuífero Crevillente” cuyos límites coinciden con las actuales MASb denominadas Sierra de Crevillente en las demarcaciones del Segura y Júcar (070.31 y 080.189, respectivamente).

Posteriormente, se realizan varios estudios de índole general. Destacan los Planes Hidrológicos de Cuenca, el Libro Blanco del Agua en España (LBAE) (MITECO, 2000) y la tesis doctoral titulada “Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid Y Cabezo D'Or (Provincia de Alicante)” (Andreu, 1997).

En 2008 el IGME-DPA realizan el Modelo matemático de flujo del acuífero de Crevillente (IGME, 2008). En este trabajo el “acuífero de Crevillente” está constituido por el sector de Crevillente, coincidente con las MASb actualmente definidas en las DHS y DHJ como “Sierra de Crevillente”, y el sector de Argallet, coincidente aproximadamente con las antiguamente definidas en las DHS y DHJ como “Sierra de Argallet” antes de la revisión de la DHJ de 2019, que englobaba las sierras de Argallet y Reclot.

Finalmente, en 2020, IGME realiza otro estudio (IGME, 2020), donde afronta la problemática de acuíferos compartidos entre demarcaciones hidrográficas. Este estudio actualiza los límites de la masa de agua subterránea Sierra de Argallet, con los límites de igual nombre 080.188 de la DHJ y 070.030 de la DHS.

2 Contexto

2.1 Localización del área de estudio

La masa de agua subterránea de Crevillente se encuentra al suroeste de la provincia de Alicante (Figura 1), en el límite con la provincia de Murcia, ocupando una superficie próxima a los 132 km². Esta masa de agua subterránea tiene carácter intercuenca ocupando 30 km² en la DHS (6 km² de la 070.030 y 24 km² de la 070.031) y 102 km² en la DHJ (3 km² de la 080-210 y 69 km² de la 080-189).

Dentro de esta extensión ocupa parte de los términos municipales de Crevillente, Hondón de las Nieves, Hondón de los Frailes, Aspe, Alagueña, La Romana, Albaterra, Orihuela y Albanilla. Dentro de sus límites se localizan los núcleos de El Cantón, Barbarroja, La Canalosa, El Rebalso, Hondón de los Frailes y Hondón de las Nieves (Figura 2).

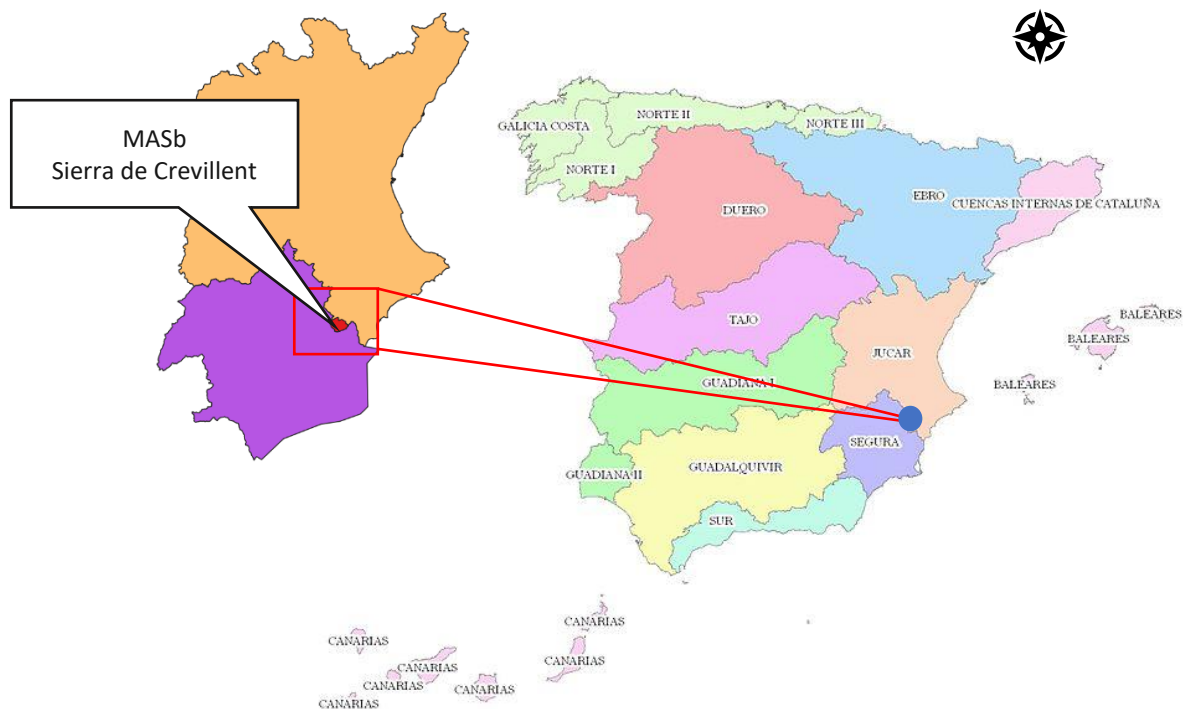


Figura 1: Ubicación geográfica de la masa de agua subterránea Sierra de Crevillente



Figura 2: Municipios dentro de la zona de estudio

La topografía de la zona se caracteriza por la presencia de elevaciones montañosas y depresiones cubiertas por materiales cuaternarios (Hondón de las Nieves y Hondón de los Frailes (Figura 3)). Estas elevaciones están alineadas de este a oeste y coinciden con los afloramientos de macizos carbonáticos. La máxima elevación se encuentra en la sierra de Argallet, con una altitud de alrededor de 1.100 metros sobre el nivel del mar, mientras que las zonas más deprimidas se encuentran en el interior de la MASb, en las proximidades de Hondón de las Nieves, con una altitud de alrededor de 350 metros sobre el nivel del mar. En la zona de descarga en el extremo noreste, la altitud más baja sería de 300 metros sobre el nivel del mar (IGME, 2008).

Además, la zona carece de cursos fluviales de importancia, tanto permanentes como temporales. Esto hace que el acuífero no tenga entradas o salidas de ríos o lagos siendo alimentado exclusivamente por infiltración (IGME, 2008).

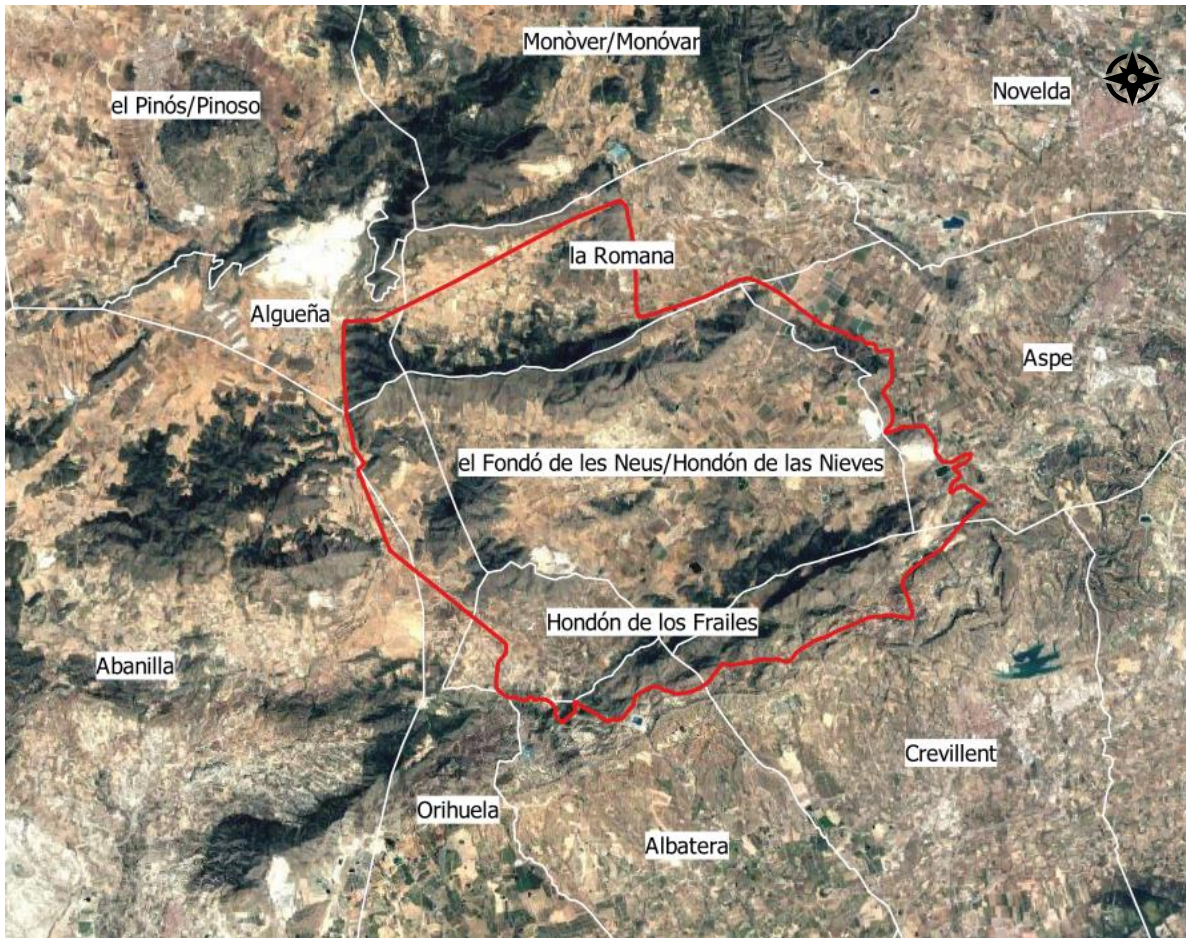


Figura 3: Imagen satelital de la zona de estudio

2.2 Clima, temperatura y precipitación

La zona de estudio tiene un clima mediterráneo semiárido que se caracteriza por precipitaciones irregulares y sequías intensas en verano. Los inviernos son suaves, sin llegar a temperaturas bajo cero, y los veranos son secos y cálidos, con grandes variaciones en las temperaturas y precipitaciones durante la primavera y el otoño.

En lo que respecta a la DHJ, las temperaturas medias anuales oscilan entre los 14°C y los 16,5°C con estaciones invernales suaves de 9°C y veranos más cálidos de 24°C, aunque a veces puede alcanzar los 37°C en días puntuales. Por lo que respecta a las precipitaciones, esta zona se caracteriza por medias anuales de 300 mm. Los registros más escasos corresponden a los meses de julio y agosto en los que, de media, apenas superan los 12 mm/mes. Los más lluviosos suelen ser en primavera y otoño con registros que suelen superar los 200 mm conjuntamente. Cabe destacar que entre los meses de septiembre y noviembre pueden producirse episodios de precipitación de gran intensidad, conocido comúnmente como “gota fría”, donde se concentran muchos milímetros en poco tiempo.

En la Figura 4 y en la Figura 5 se muestran los datos de precipitación y temperatura, respectivamente. Ambas variables se obtienen del modelo de PATRICAL (Pérez Martín, 2005) correspondiente al sector con código 8161500 que se encuentra, junto con otras zonas, dentro del área de estudio.

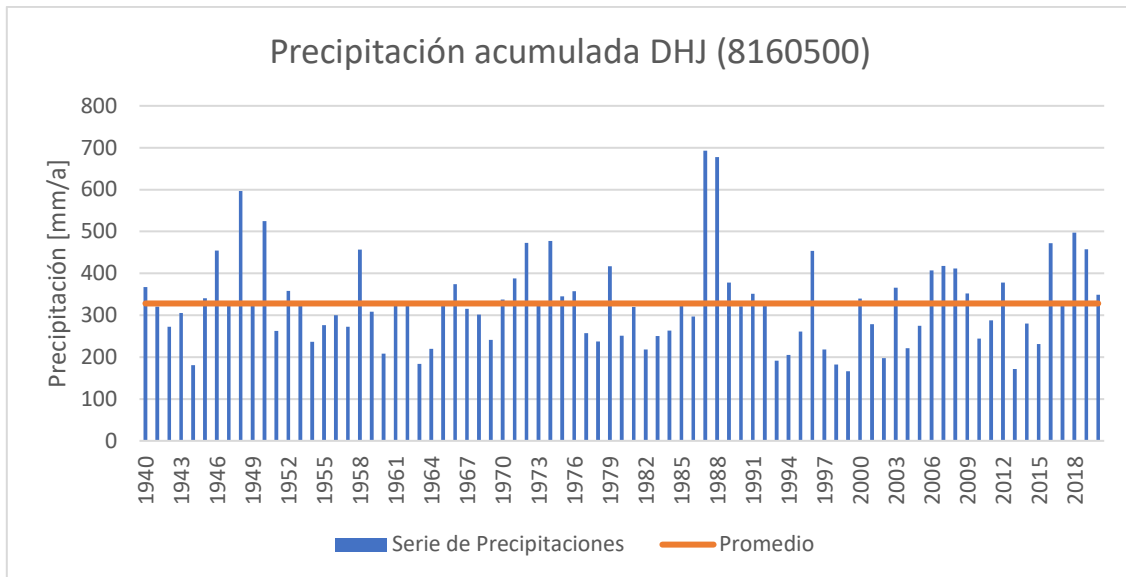


Figura 4. Evolución de las precipitaciones anuales en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).

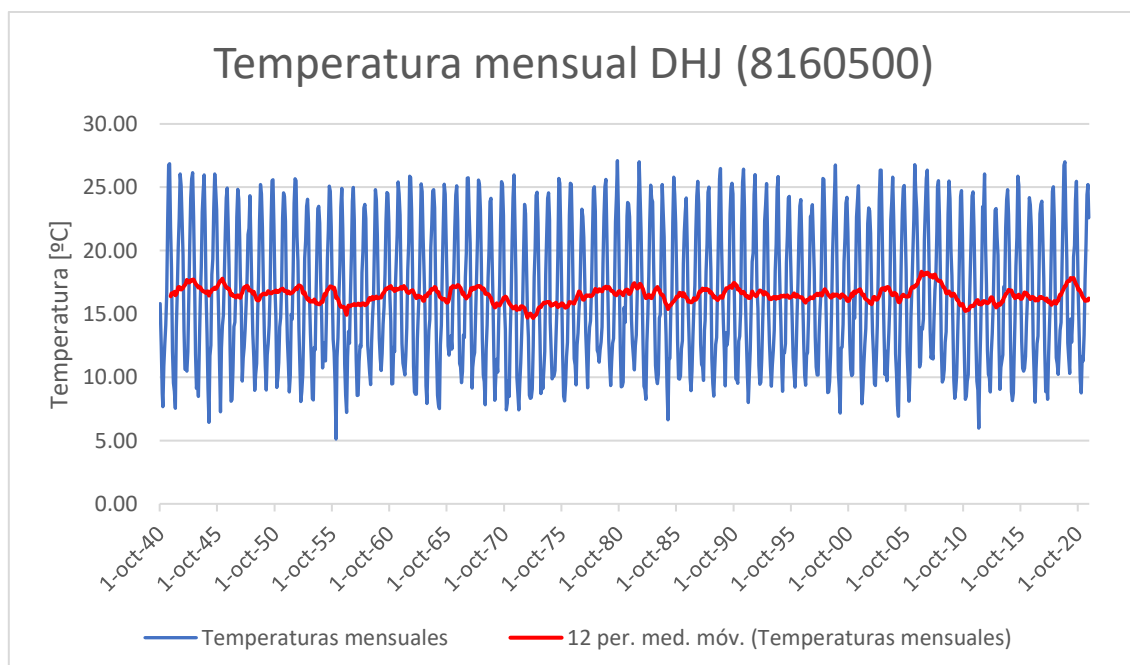


Figura 5. Evolución de las temperaturas en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).

La media de la temperatura mensual en Figura 5 es calculada como la media móvil de los últimos 12 meses.

2.3 Hidrología

Como se ha mencionado anteriormente, no existen cursos fluviales, tanto permanentes como temporales, o masas de agua superficial en la zona de estudio o que influyan en la recarga o salidas del acuífero. De todas maneras, cabe destacar que existían manantiales, ya que se secaron a principios de la década de los años 60 debido a la intensa explotación del acuífero de Crevillent para fines agrícolas e industriales. Estos se encontraban en el extremo este de la sierra de Crevillente (Figura 6), a una altitud aproximada de 300 metros sobre el nivel del mar, concordante con las cotas más bajas del terreno (IGME, 2020).

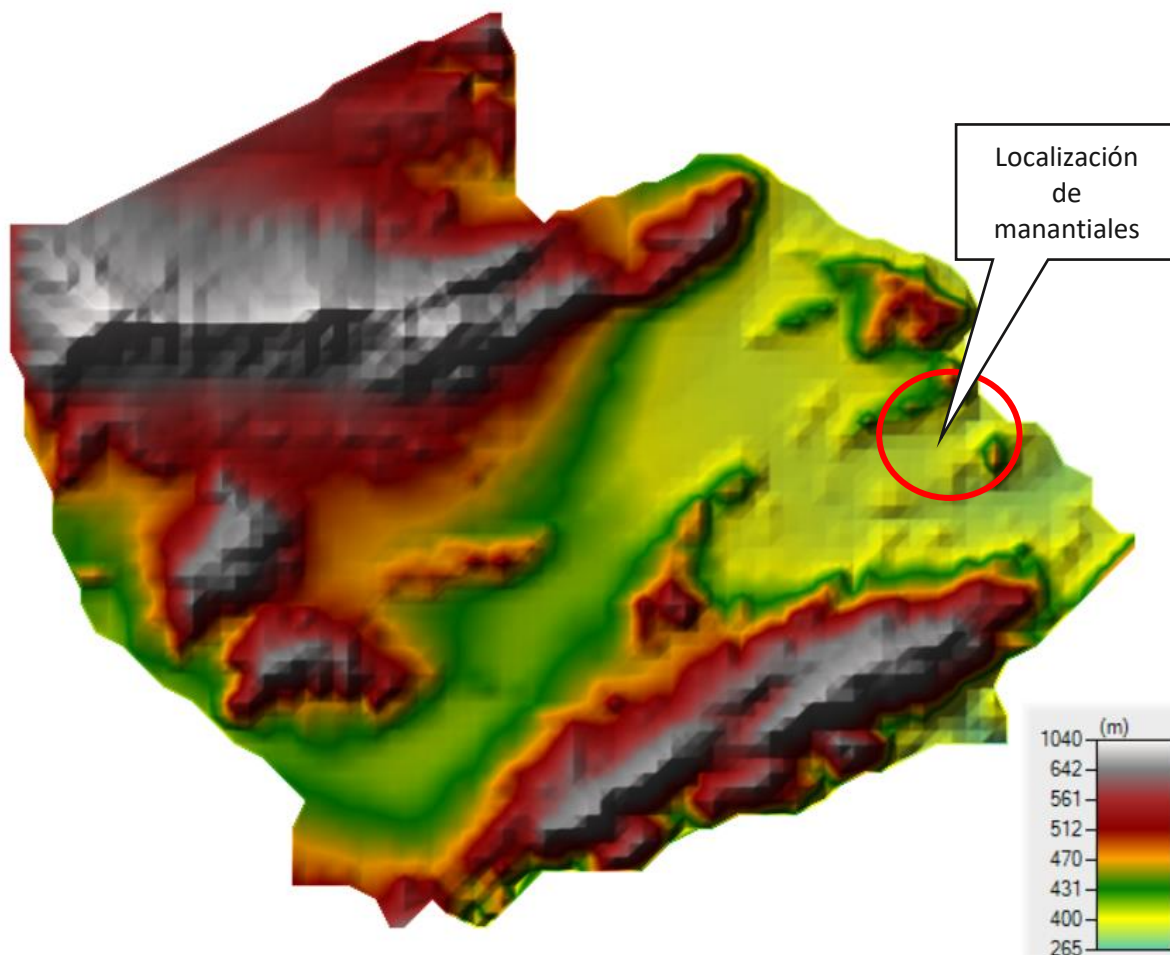


Figura 6: Localización de manantiales.

2.4 Geología

La zona donde se ubica la MASb a nivel regional se encuentra en las Cordilleras Béticas, específicamente en el dominio Prebético externo, aunque también hay algunos términos del

dominio Prebético interno que se superponen (Figura 7). Los materiales que afloran en esta área son principalmente de origen sedimentario y exhiben una amplia variedad de facies que datan del Triásico hasta el Cuaternario.

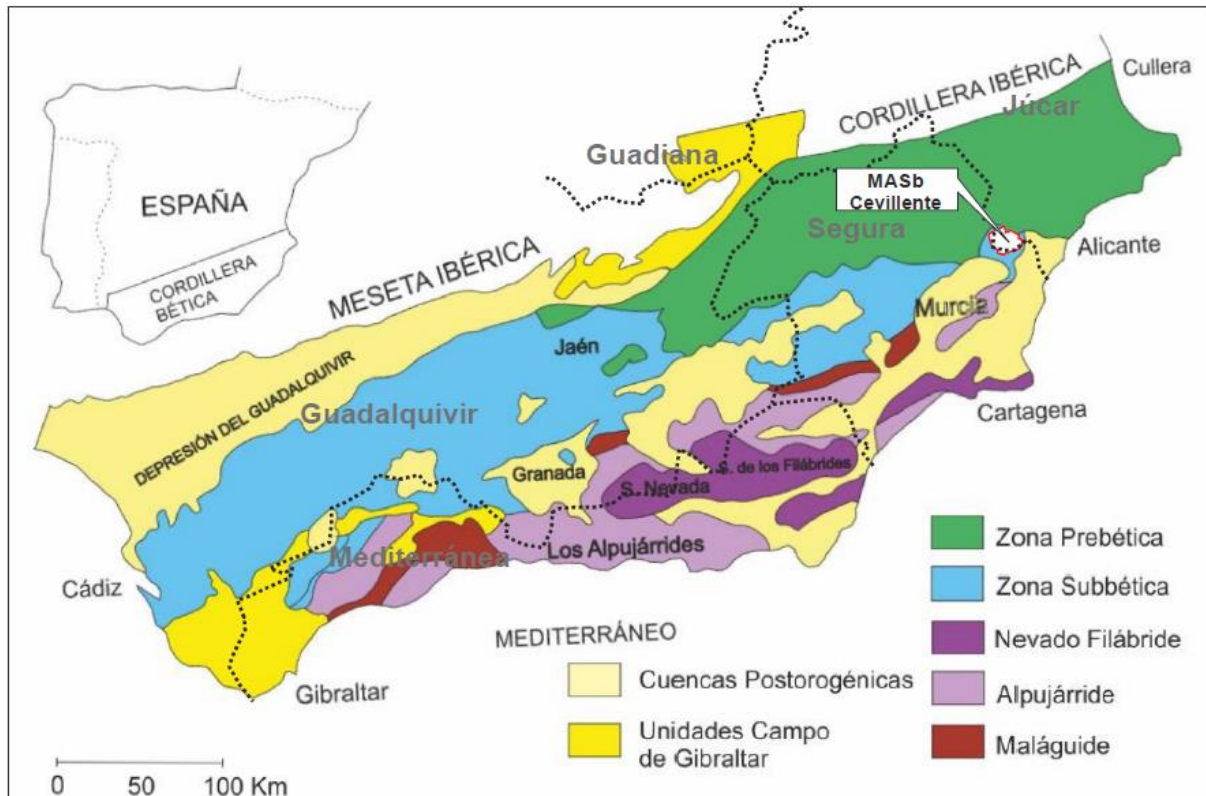


Figura 7: Marco geológico de la MASb Sierras de Crevillente (IGME, 2020, p. 5)

El sistema de Crevillente se divide en dos sectores según la disposición estructural de las formaciones litológicas que lo conforman (Figura 8). El primero, conocido como el sector de Argallet, se ubica al norte de las Sierras de Argallet, Cava y Rollo. El segundo, denominado sector de Crevillente, se extiende desde la mencionada alineación montañosa hasta la Sierra de Crevillente. Estos dos sectores se encuentran hidráulicamente conectados en el extremo oriental del límite que los separa, al sur de la Sierra de Ofra.



Figura 8: Sector Argallet y sector Crevillente

Desde una perspectiva geológica, los materiales que conforman el sistema de Crevillente están compuestos principalmente por dolomías y calizas masivas del Jurásico Inferior, con un espesor variable entre 200 y 500 m y una potencia media de alrededor de 450 m. Estos materiales forman una unidad estructural del Subbético que se encuentra completamente despegada y cabalgando sobre los materiales de las formaciones del Prebético. El nivel de despegue corresponde a las arcillas y yesos del Triásico, que sirven como base impermeable y como límite lateral del sistema (IGME, 2008).

2.4.1 Unidades litoestratigráficas

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la secuencia litoestratigráfica típica que conforma la MASb Sierra de Crevillente comienza con los materiales triásicos en la base, sobre los cuales se encuentran los niveles de calizas y dolomías del Jurásico Inferior (Lías), mientras que el Jurásico Superior y el Cretácico superior suelen estar ausentes o presentes en pequeñas extensiones. En las depresiones que se forman entre los sistemas montañosos se encuentran depósitos de materiales recientes. Además, cerca de la Sierra de Argallet y en la falda sur de la Sierra de Crevillente, se pueden encontrar afloramientos cretácicos del Prebético (IGME, 2008).

A continuación, se presentan las características litológicas de las formaciones que componen el sistema de Crevillente (IGME, 2008):

- Triásico: Se compone de margas abigarradas, arcillas rojas y verdes y yesos blancos o coloreados de la facies Keuper. Este material está presente a lo largo de grandes extensiones en forma de cordones más o menos continuos, que probablemente han ascendido por contactos estructurales. También se encuentra debajo de las formaciones carbonatadas del Jurásico de forma continua.
- Jurásico Inferior (Lías): La columna litológica del Lías consta de calizas masivas blancas o grises de grano fino y estructura oolítica en la base, con niveles glauconíticos poco potentes en la parte superior. Sobre esta formación se deposita una unidad de dolomías masivas grises. En conjunto, tiene un espesor máximo de alrededor de 350m.
- Jurásico Medio (Dogger): Esta unidad aparece en el extremo oriental del sector de Argallet y en algunos puntos de la Sierra de Crevillente. Está compuesta por calizas rosa ligeramente ferruginosas, estratificadas en pequeños bancos y a veces con filamentos. Su espesor no supera los 50 m.
- Jurásico Superior (Malm): Esta formación se encuentra ampliamente distribuida en el flanco sur de la Sierra de Crevillente y tiene un espesor total de alrededor de 80 m. Su base está compuesta por calizas estratificadas y resistentes con mezclas de colores, sobre las cuales se encuentran calizas nodulosas blancososas. En la parte superior hay un nivel más blando y noduloso de color rojo ladrillo, que forma depresiones en la topografía. Sobre este nivel se apoyan bancos regulares de caliza gris o gris verdosa con niveles de sílex y textura granoclasificada muy fina. Por último, el Jurásico Superior está coronado por un nivel de pequeños bancos de calizas claras gris-verdosas.
- Cretácico Inferior: Esta formación está poco representada en la zona de estudio y aparece en pequeños retazos fuertemente tectonizados. Está compuesta en general por margas y margocalizas grises o gris-amarillentas con abundantes ammonites.

Finalmente, las formaciones carbonatadas se depositan sobre los materiales del cuaternario indiferenciado con una potencia variable.

Se resume todo lo anterior en la Figura 9 y Figura 10 desarrollada en el documento elaborado por el IGME-DPA (2008).

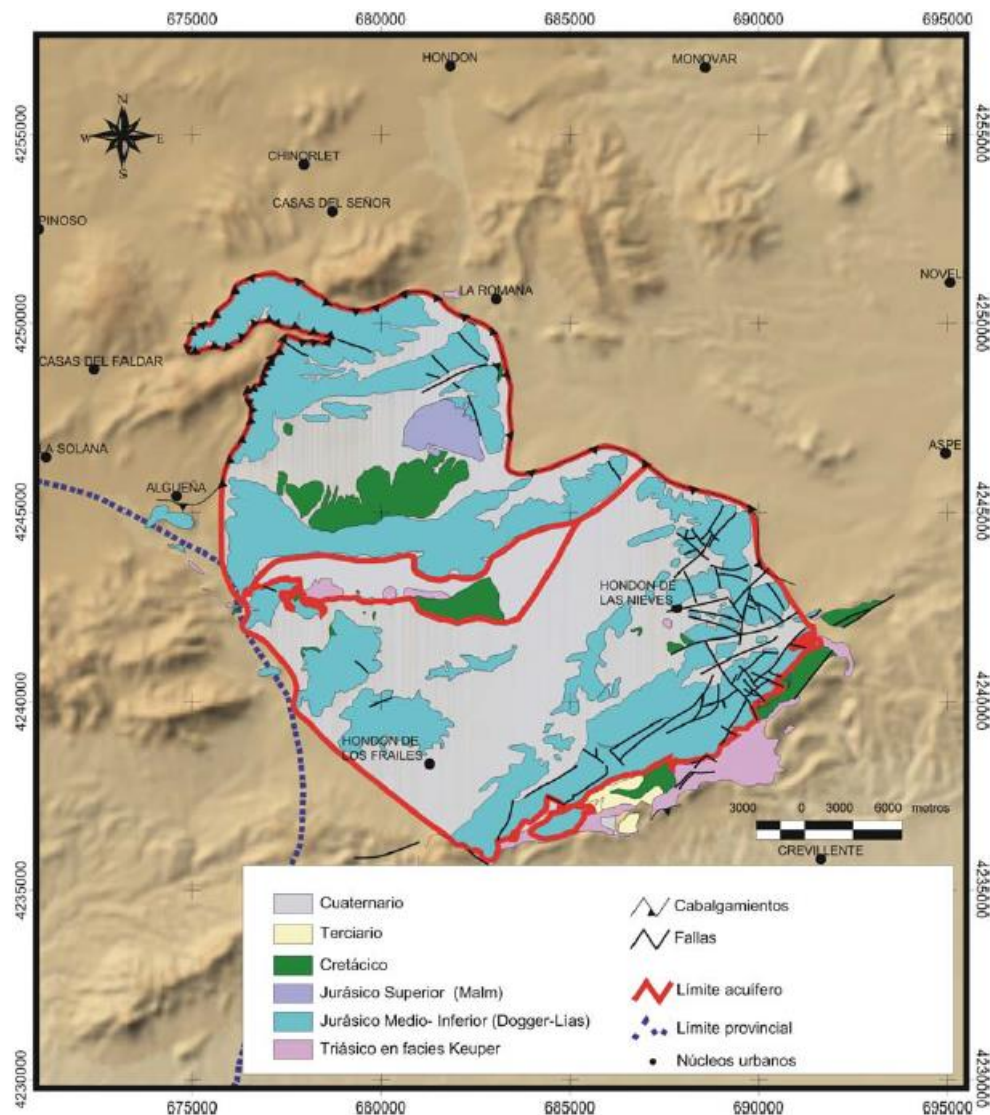


Figura 9: Mapa geológico de la MASb Sierra de Crevillente (IGME, 2008)

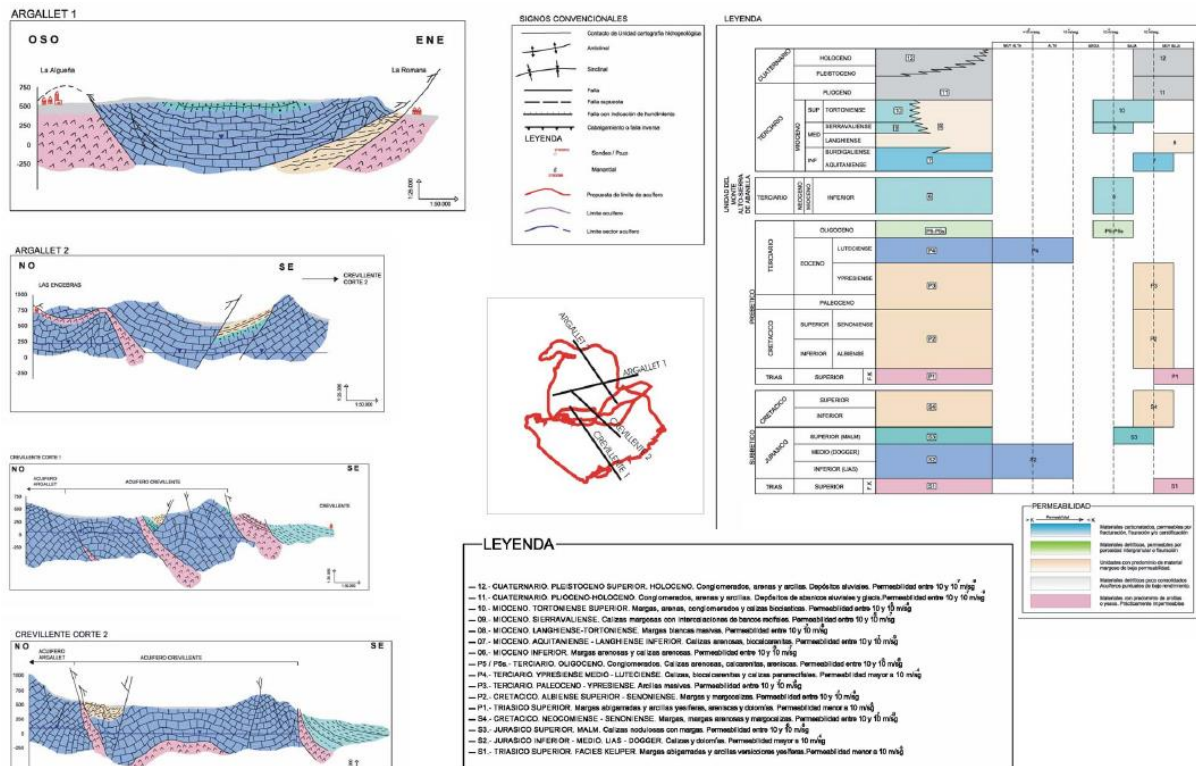


Figura 10: Cortes geológicos de la MASb Sierra de Crevillente (IGME, 2008)

2.5 Formaciones hidrogeológicas

El contexto geológico descrito previamente se refiere a una secuencia sedimentaria que permite identificar una sola formación hidrogeológica compuesta por materiales del Jurásico inferior y medio. Esta formación está constituida principalmente por calizas y dolomías masivas con una potencia media de 450 m y se divide en dos sectores acuíferos: Argallet al norte y Crevillente al sur.

Aunque el Cuaternario también es permeable, su papel en el sistema hidrogeológico es principalmente de transmisión de la infiltración del agua de lluvia y los retornos de riego hacia la formación jurásica.

Es importante destacar que los dos sectores acuíferos del Jurásico están conectados hidráulicamente solo en su extremo oriental a lo largo de una franja de 6 km de longitud. Esto significa que el flujo de agua subterránea en uno de los acuíferos puede afectar el nivel de agua en el otro acuífero en esa área.

Esta configuración queda recogida en la Figura 11 y en la Figura 12 desarrollados en el documento elaborado por el IGME (IGME, 2020).

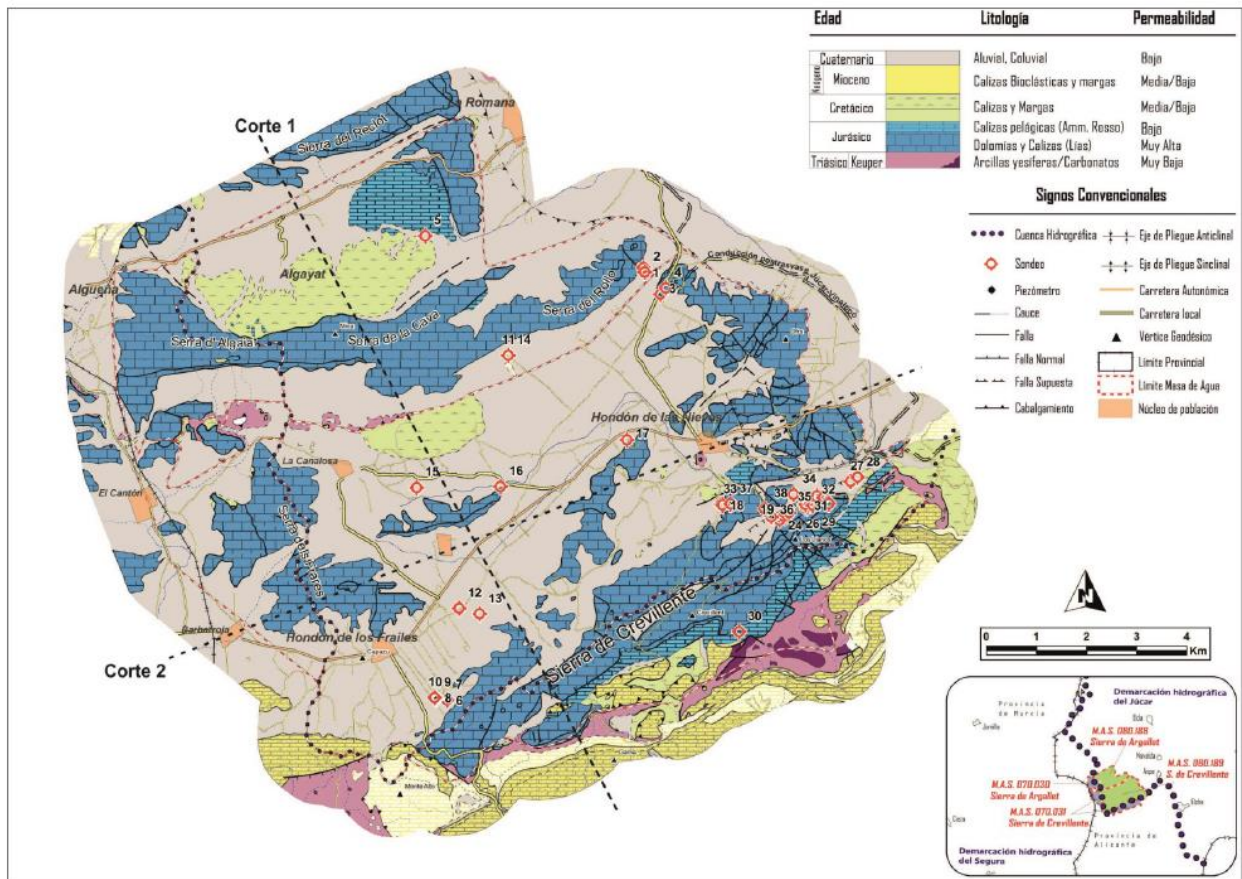


Figura 11: Hidrogeología de la MASb Sierra de Crevillente (IGME,2020)

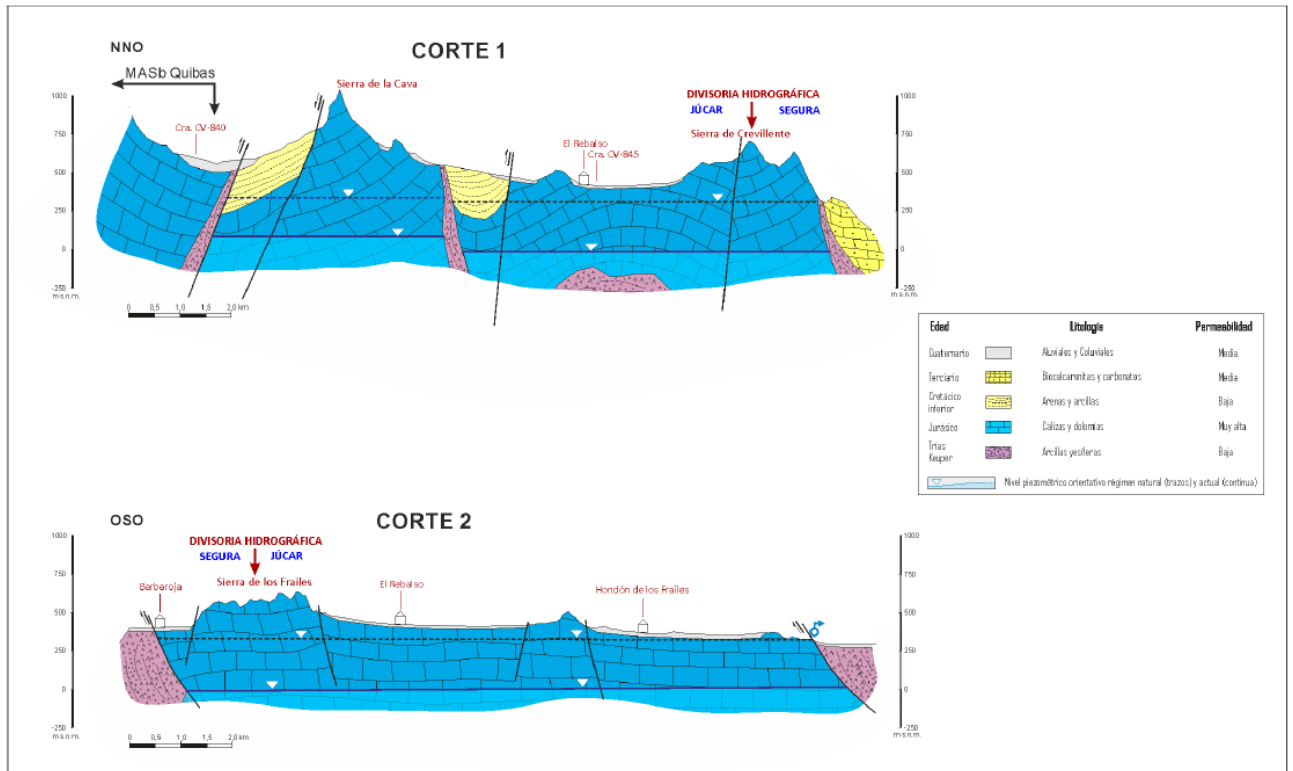


Figura 12: Cortes hidrogeológicos de la MASb de Sierra de Crevillente (IGME,2020)

En general, la información proporcionada sugiere que la formación hidrogeológica del Jurásico es la principal fuente de agua subterránea en la zona estudiada y es importante entender cómo fluye y se recarga el agua subterránea en esta formación para una gestión adecuada de los recursos hídricos.

2.6 Usos de agua

El sistema de Crevillente está altamente influenciado por la presencia de extracciones de agua a través de captaciones. La mayoría de las extracciones de agua se ubican en la DHJ con solo un sondeo registrado en la DHS (que se encuentra seco desde 2003) y se encuentra en el extremo sur de la MASb. En 2010 la masa de agua subterránea estaba expuesta a un total de 19 pozos de extracción activos, destacándose principalmente dos sectores de explotación: La Galería de los Suizos y Tolomó como puede observarse en la Figura 13 (Andreu, 1997).

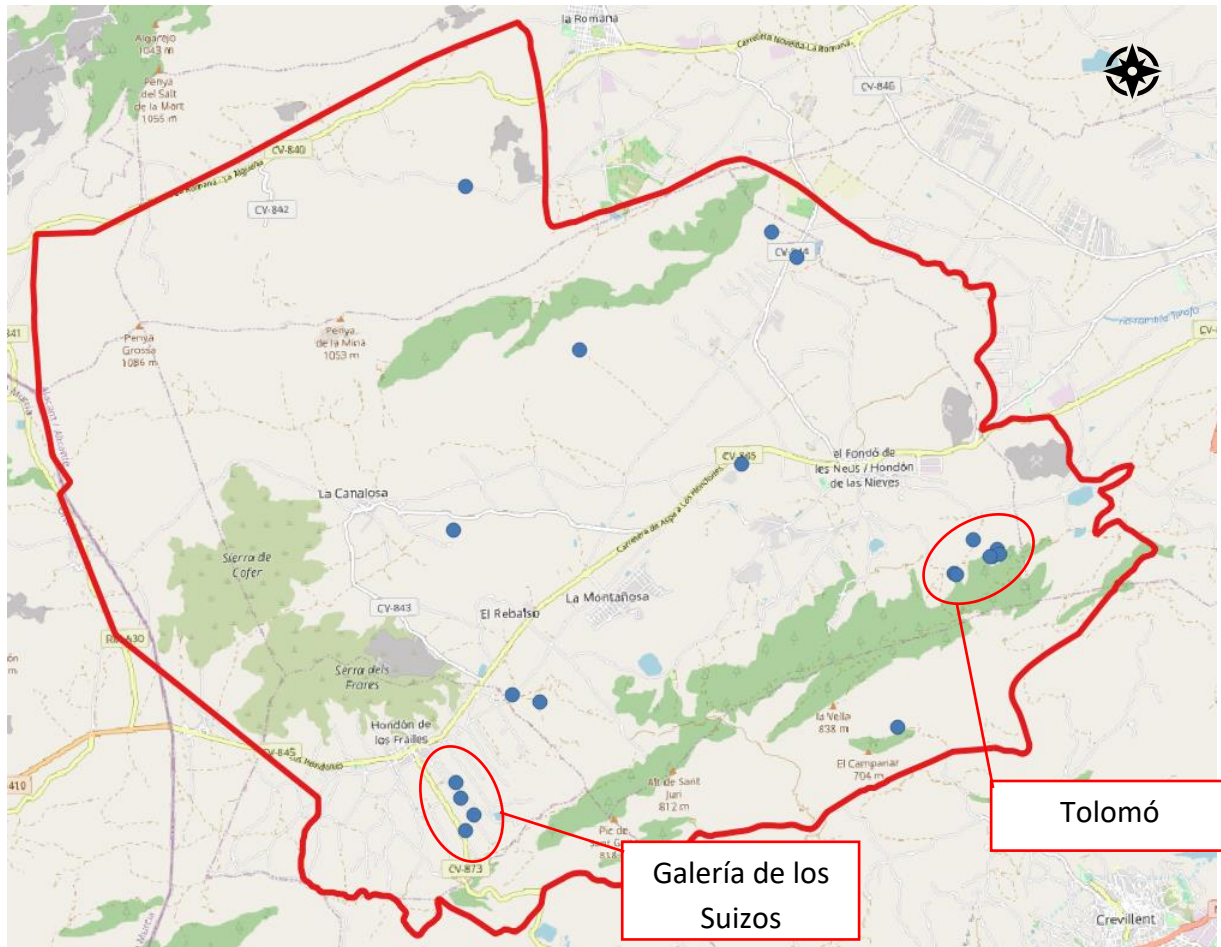


Figura 13. Localización de las captaciones

Por un lado, el sector de Tolomó se localiza en la parte oriental de la Sierra de Crevillente y comprende todas las captaciones en el Barranco del Tolomó y parte meridional de Hondón de las Nieves. Las aguas bombeadas en este sector sirvieron para transformar en regadío tierras anteriormente incultas situadas en los términos de Aspe, Hondón de las Nieves, Elche y Crevillente. Es considerado el sector con mayor densidad de captaciones, llegándose a encontrar, hace unos años atrás, perforaciones emplazadas a menos de 50 m de distancia. Hoy en día, el uso de las aguas es principalmente para agricultura, aunque también se destina parte al abastecimiento urbano de Aspe, Hondón de las Nieves y algunas zonas de Elche.

En el otro extremo de la Sierra de Crevillente, en el sector occidental, encontramos la Galería “Riesgos de Salud” o más conocida como Galería de los Suizos. Esta galería fue construida en la década de los 60 alcanzando una longitud de 2360 m. Durante su construcción aparecieron puntos de agua muy localizados que vertían en forma de manantial caudales que oscilaban entre 6 l/s y 75 l/s, alcanzando hasta 200 l/s según aforos efectuados. Debido a estos caudales elevados, al finalizarse quedó prácticamente seca y tuvieron que construir perforaciones verticales en su interior. Dentro del túnel existen 12 perforaciones que bombean agua y la vierten al suelo de la galería para que circule hasta la salida. El agua procedente de este túnel



es utilizada en su mayor parte para el riego en Albufera, Orihuela, Crevillente y Elche. También se usa para el abastecimiento de Hondón de los Frailes y alguna urbanización de Elche (Andreu, 1997).

Dentro del área de estudio, desde su inicio en 1965/66, las extracciones de agua han aumentado rápidamente, pasando de 5 hm³/a a más de 20 hm³/a entre 1979 y 1988. A fines de la década de 1980, se redujeron a 10-15 hm³/a hasta 2003, especialmente en la zona de Tolomó. Desde entonces, han oscilado entre 8 y 12 hm³/a. La alta intensidad de extracción se refleja en los niveles de agua, que muestran una fuerte disminución hasta finales de los años 80, con una recuperación posterior, especialmente en la zona de Tolomó, después de la reducción de las extracciones. Sin embargo, a mediados de la década de 1990, los niveles volvieron a disminuir y se estabilizaron desde el inicio del siglo actual.

3 Modelo conceptual

Es de gran importancia contar con un modelo conceptual que incluya todas las características relevantes para describir el comportamiento hidrogeológico del sistema antes de desarrollar un modelo matemático de flujo. Estas características pueden incluir la revisión de los niveles de agua, la identificación de unidades hidrogeológicas y las condiciones de contorno. Este apartado presenta detalles importantes para realizar la modelización matemática del acuífero en cuestión.

3.1 Unidades hidrogeológicas y funcionamiento

El objetivo de identificar y caracterizar las unidades hidrogeológicas es entender cómo se mueve el agua subterránea y cómo interactúa con el medio ambiente. Las unidades hidrogeológicas se refieren a las formaciones geológicas que tienen características hidráulicas similares, como la permeabilidad y la porosidad, y que pueden ser utilizadas para el almacenamiento y el flujo de agua subterránea. Estas unidades pueden ser acuíferos, capas impermeables o zonas de transición. La delimitación se realiza de forma que se pueda plantear el balance hídrico de la misma, siendo el objetivo principal tratar de conseguir una administración eficaz del agua.

La delimitación de las unidades hidrogeológicas se ha realizado en los planes hidrológicos de cuenca, lo cual ha requerido recopilar información sobre la geología, pozos y propiedades hidrogeológicas del subsuelo. A partir de esto, se ha concluido que la masa de agua subterránea en estudio está configurada por una única unidad hidrogeológica de funcionamiento libre con todos sus límites impermeables. Es importante señalar que se ha incluido el sector de la MASb Sierra de Argallet a la MASb Sierra de Crevillente debido a su drenaje hacia ésta. Sin embargo, como se ha mencionado, la conexión hidráulica solo se produce en una estrecha franja en el extremo noreste del contacto entre ambas MASb.

3.2 Geometría y límites

Los principales elementos estructurales que definen la geometría interna del área de estudio son los frentes de cabalgamiento y los anticlinales que siguen la tendencia general de las Béticas generando los principales accidentes orográficos de la zona. El desplazamiento de la escama subbética sobre los materiales prebéticos ha generado, a su vez, complejos accidentes tectónicos dentro de la unidad estructural, con pliegues de dirección general suroeste-noreste muy cerrados e incluso volcados, así como la formación de escamas de menor entidad.

La sierra de Argallet es un anticlinal con dirección ENE-OSO que se inclina hacia el N-NO y está formada principalmente por materiales liásicos. Su flanco septentrional está afectado por una

falla inversa que provoca la superposición del sector de Argallet sobre los materiales del sinclinal de Algueña-La Romana.

Por su parte, la sierra de Crevillente presenta una estructura anticlinal de dirección ENE-OSO que se inclina hacia el este. El flanco meridional de la sierra de Crevillente tiene buzamientos interrumpidos por una banda de arcillas y yesos triásicos que separan los materiales mesozoicos de los postorogénicos. Esta banda triásica se extiende hacia la sierra de Abanilla, continuación de la sierra de Crevillente hacia el suroeste, mientras que al noreste está cubierta por materiales neógenos.

Con la configuración geológica comentada en la Sección 2.4, los límites exteriores del área de estudio, tanto en profundidad como lateralmente, queda determinada por las arcillas, margas y yesos del Trías y/o por las margas y margocalizas del Cretácico inferior. El límite norte no permite ver claramente su sellado por materiales de baja permeabilidad, pero existen evidencias hidrogeológicas, como saltos piezométricos importantes, que han permitido definirlo. Por otro lado, la presencia de afloramientos arcillosos y margosos del Trías y del Cretácico en el borde meridional de las sierras de Argallet y de La Cava indica un comportamiento hidrodinámico diferenciado para estos dos sectores. Sin embargo, los estudios hidrogeológicos realizados señalan la existencia de una conexión hidráulica entre ambos en su extremo oriental, al sur de la sierra de Ofra (IGME, 2020).

3.3 Funcionamiento y dominios hidrogeológicos

Los dominios hidrogeológicos son áreas geográficas de tamaño regional con características hidrogeológicas y/o geológicas comunes. Su definición se basa en la información disponible sobre la topografía, los mapas hidrogeológicos, litológicos y de permeabilidad, así como las fichas de caracterización de las masas de agua subterránea. A partir de esta información, se han identificado cinco dominios hidrogeológicos distintos dependiendo de su permeabilidad, desde muy baja hasta muy alta, según el Mapa de Permeabilidades de España en formato digital a escala 1:200.000 (IGME), que se presentan a continuación (Figura 14):

- **Dominio 1:** Dominio con permeabilidad MUY ALTA, solo se encuentra al oeste cerca de los límites impermeables del acuífero. Principalmente contiene gravas, arenas y limos (depósitos de aluviales, fondos de valle y terrazas bajas en los ríos principales).
- **Dominio 2:** Se trata de materiales con permeabilidad ALTA como pueden ser dolomías, brechas dolomíticas, carniolas, calizas en bancos (Fm. Cortes de Tajuña). Este dominio predomina en la masa de agua subterránea, tanto en Argallet como en Crevillent.
- **Dominio 3:** En este dominio se encuentran mayoritariamente calizas generalmente oolíticas, con nódulos de sílex y, a veces, margas (Fm. Carb. de Chelva) y se caracteriza por una permeabilidad MEDIA. También se puede encontrar pequeñas zonas de conglomerados y calizas travertínicas.

- **Dominio 4:** Este dominio es caracterizado por una permeabilidad BAJA con areniscas, arenas, calizas arenosas, margas, arcillas y margocalizas. Esta zona está concentrada principalmente en la zona sureste y noroeste del sistema.
- **Dominio 5:** Se trata de arcillas abigarradas y yesos, a veces con margas y areniscas (F. Keuper) predominantemente en la zona de falla o al sur en los límites del acuífero.

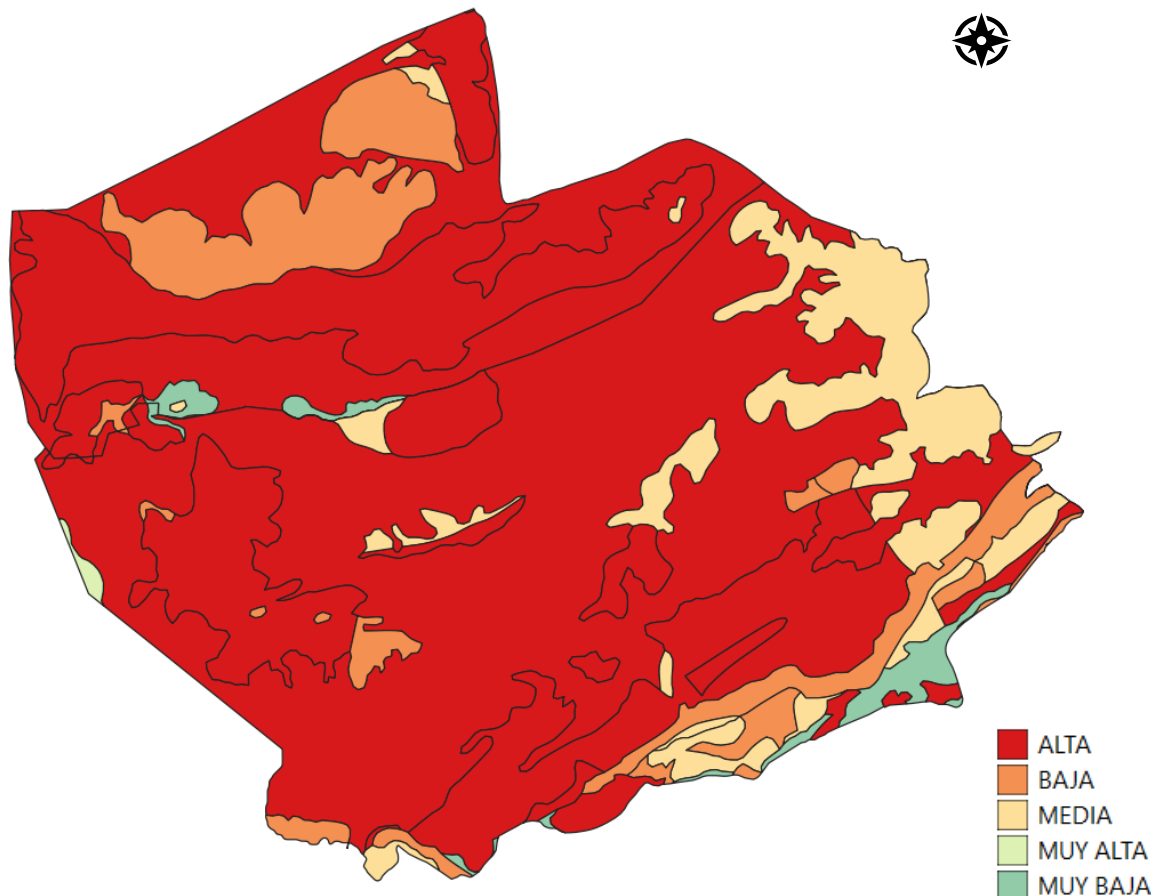


Figura 14: Mapa de permeabilidades de la zona de estudio. Fuente: IGME

La interconexión de estos dominios hidrogeológicos varía en todo el acuífero y las propiedades hidrogeológicas han sido ajustadas para cada una de las capas. En algunos casos, se ha optado por subdividir estos dominios con el fin de mejorar la calibración y el rendimiento del modelo.

La siguiente tabla muestra los posibles valores de permeabilidad hidráulica para cada dominio:

Tabla 1: Rangos de K según bibliografía

Dominio	Permeabilidad	K_{max} (m/d)	K_{min} (m/d)
Dominio 1	Muy alta	1000	450
Dominio 2	Alta	450	1

Dominio 3	Media	1	0.01
Dominio 4	Baja	0.01	0.0001
Dominio 5	Muy Baja	0.0001	0.000001

A partir de esta tabla se hará la asignación preliminar de conductividades. Sus valores serán modificados durante la calibración intentando permanecer dentro de los rangos establecidos.

3.4 Captaciones

Según la revisión bibliográfica, se asume que la afección de las captaciones en el sistema de Crevillente tiene origen en el final de la década de 1960. Sin embargo, la información relativa a esta explotación es muy escasa y, por lo general, de carácter anual, salvo a partir de 2005 en que se dispone de información de contadores de la CHJ permitiendo la reproducción y obtención de datos mensuales de dichas explotaciones.

Para el desarrollo del presente modelo se toman como referencia las series anuales reportadas en el último trabajo de Crevillente elaborado por el IGME (IGME, 2020) para el periodo comprendido entre octubre de 1967 y septiembre de 2005, aunque con modificaciones ya que los bombeos en dicho modelo se distribuyeron en pozos de los cuales no se tiene información. Se cuenta, también, con la serie de extracciones desde el año 2005 hasta el 2020 de la CHJ y su distribución por pozos como referencia. En resumen, la serie utilizada es:

1. Volumen anual de serie de extracciones del IGME (1967-2005) con modificaciones en determinados periodos según calibración con registros piezométricos (Figura 15 y Figura 16).
2. Distribución porcentual de los volúmenes anuales según el promedio bombeado por pozo en los años de datos conocidos por contadores (periodo 2005-2020).
3. Aplicación de las curvas de demanda teórica publicadas en los Planes Hidrológicos 22/27 para la obtención de series temporales a escala mensual según el uso de las extracciones.
4. A partir de octubre 2005 la serie se completa con información proporcionada por la CHJ, los cuales corresponden a datos tratados directamente de contadores.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la evolución de extracciones adoptada se muestra en la Figura 15 la cual responde a un volumen variado y de tendencia decreciente a partir de los años 80 con un intervalo de incremento en los 90. Según la demarcación, se

estima que en el periodo 1969/70-2019/20 la cuenca del Júcar y del Segura extraen volúmenes promedios de 4.8 y 2.2 hm³/a, representando el 68 y 32% de las extracciones anuales totales, respectivamente. Dentro de este periodo pueden diferenciarse tres regímenes de explotación según los tramos 1969/70-1974/75, 1975/76-2001/02 y 2002/03-2019/20. Este último se considera representativo de unas condiciones normales de suministro en los últimos años.

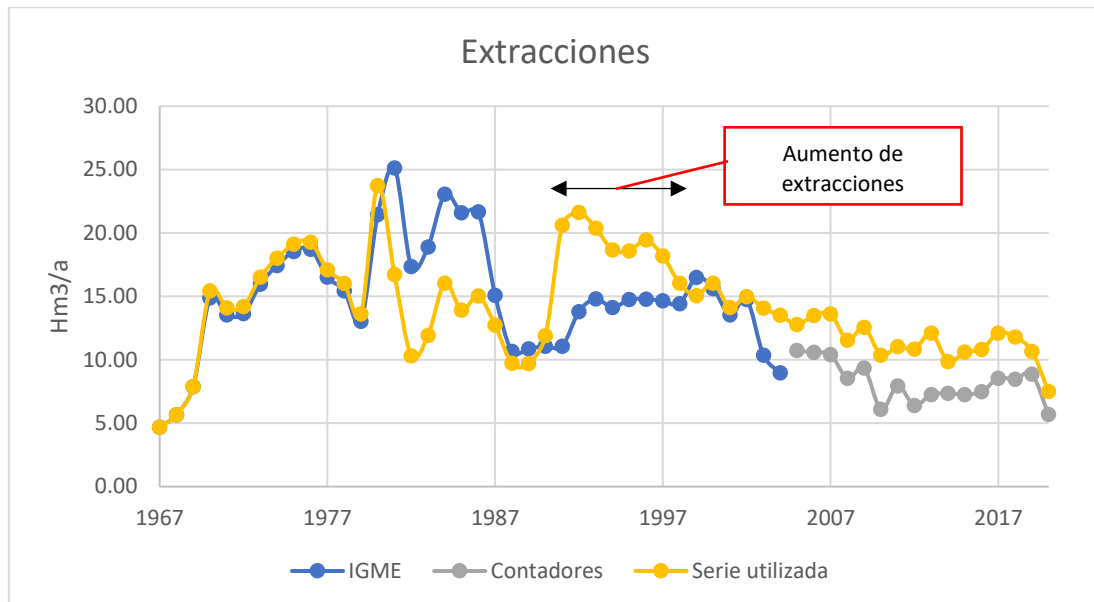


Figura 15. Evolución anual de las extracciones estimadas totales anuales.

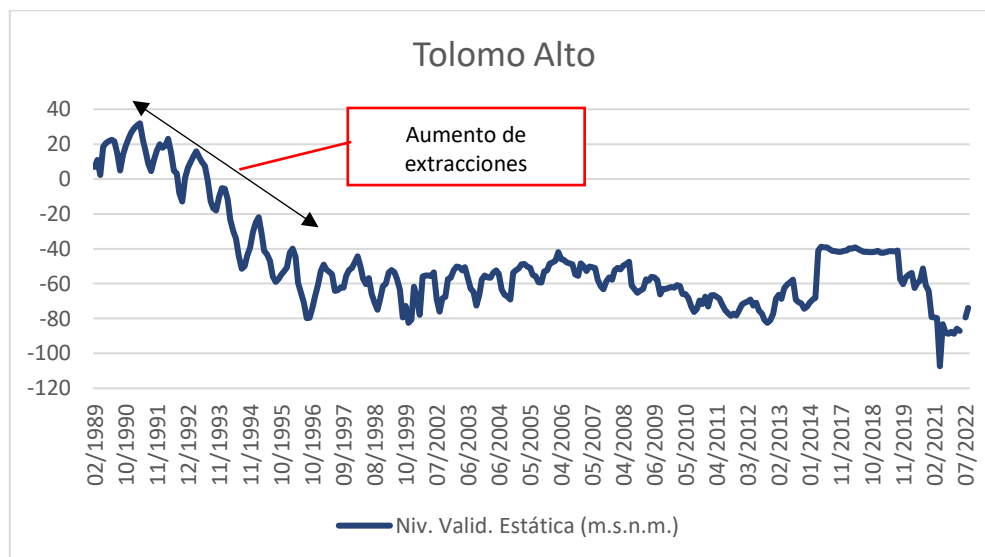


Figura 16: Evolución piezométrica de la zona Tolomó

3.5 Recarga

En el sistema de Crevillente se consideran dos tipos de recarga: natural producida por la infiltración de la lluvia; y artificial correspondiente a excedentes de regadío en un régimen ya influenciado por la presencia de extracciones por captaciones. En la Figura 17 se puede ver la diferencia entre lo que se extrajo por año y la recarga correspondiente mostrando la intensa explotación que sufrió la masa de agua subterránea.

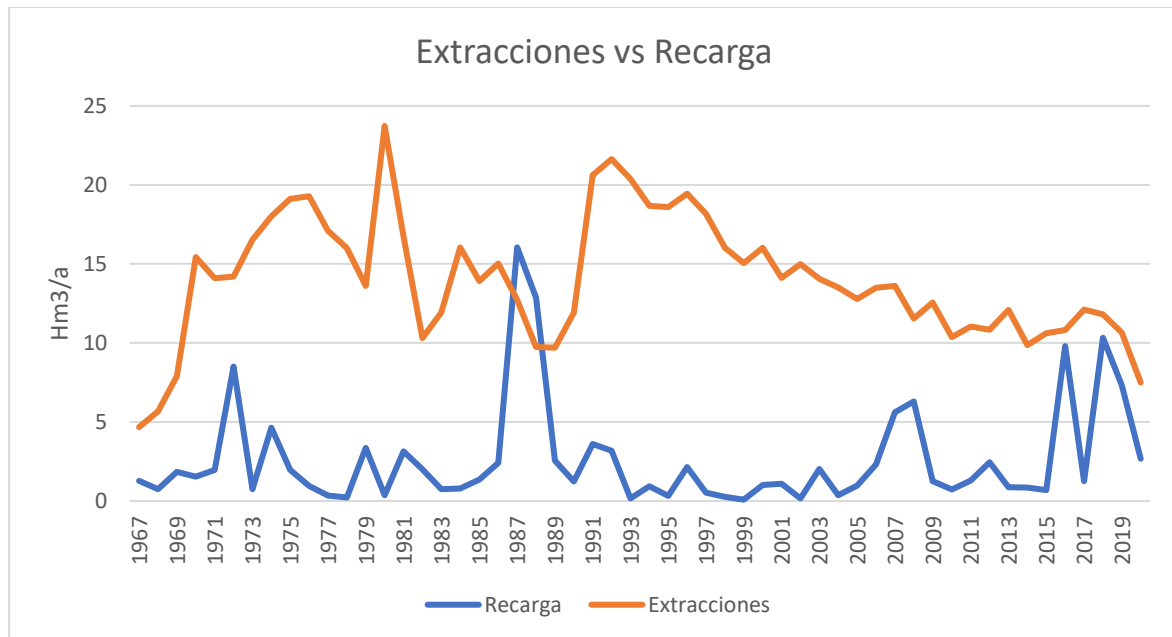


Figura 17: Extracciones vs recarga

3.5.1 Por precipitación

Los datos sobre la recarga del acuífero mediante la infiltración de lluvia han sido proporcionados por la CHJ y se obtuvieron a partir del modelo PATRICAL (Pérez Martín, 2005). De acuerdo con este modelo, la recarga en el sistema de Crevillente se distribuye temporal y espacialmente en los sectores con códigos 7103000, 7103100, 8161000 y 8161500 (como se muestra en la Figura 18).

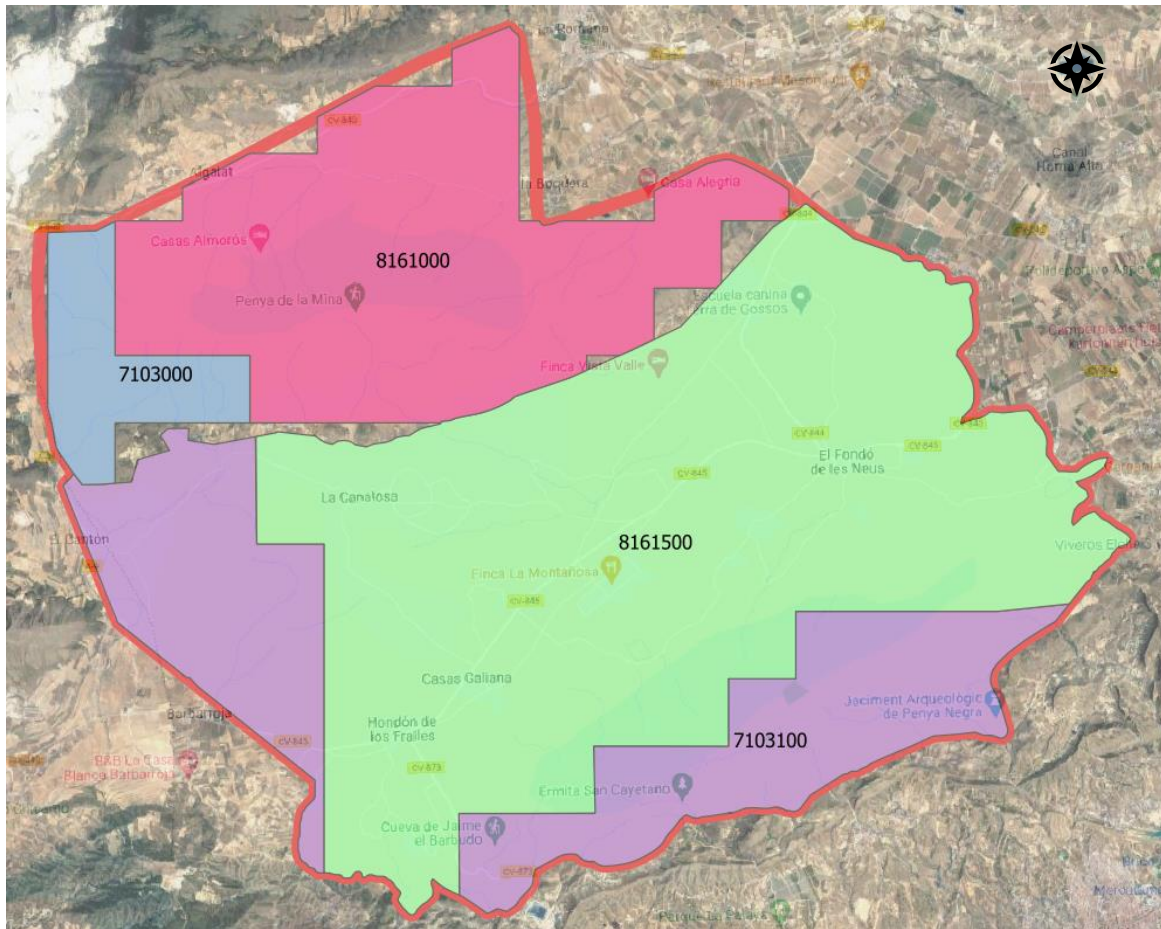


Figura 18: Sectores de recarga. Fuente: PATRICAL recortado a zona de estudio

Como se observa, las zonas están divididas entre acuíferos (Crevillente y Argallet) y confederaciones (CHJ y CHS):

- 8161500: Recarga en sector Crevillente en CHJ
- 7103100: Recarga en sector Crevillente en CHS
- 8161000: Recarga en sector Argallet en CHJ
- 7103000: Recarga en sector Argallet en CHS

En la Figura 19 vemos la serie histórica de recarga en el área de estudio.

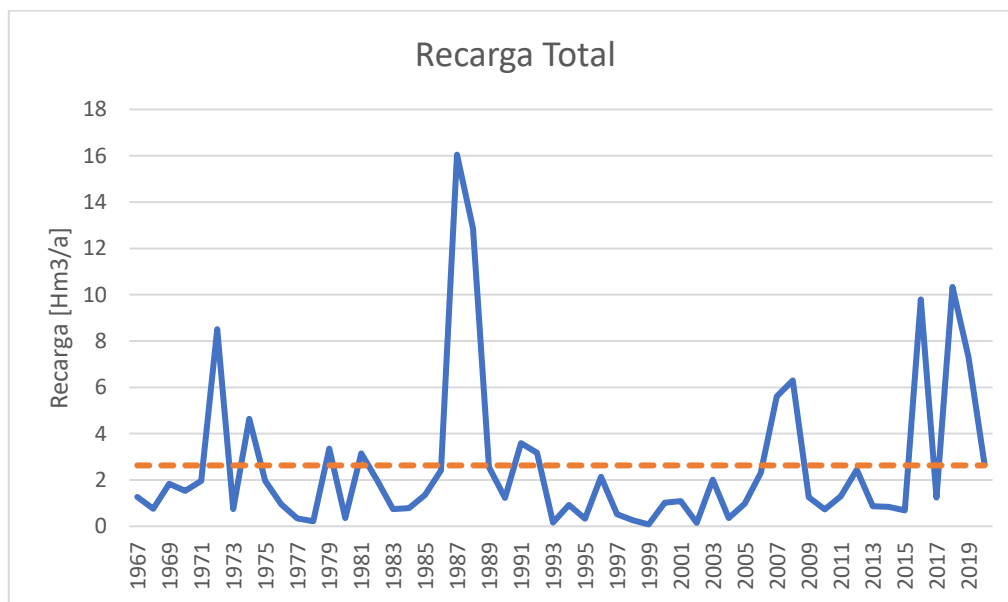


Figura 19. Evolución anual de la recarga total por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL

3.5.2 Recarga por retornos de riego

La Tabla 2 muestra las características de las Unidades de Demanda Agraria (UDA's) que se encuentran dentro de los límites de la zona de estudio. La metodología utilizada para determinar los retornos de riego varía dependiendo de la demarcación gestora de la UDA.

Tabla 2. Características de las UDAs ubicadas en la zona de estudio

NOM_MSBT	COD_UDA	NOM_UDA	Área (km2)
Sierra de Crevillente	A9045	Zona regable del Medio Vinalopó con recursos subterráneos del Medio Vinalopó	26.15
Sierra de Argallet	A9045	Zona regable del Medio Vinalopó con recursos subterráneos del Medio Vinalopó	2.37

No hay UDAs en el sector correspondiente a la CHS, por lo que todos los retornos se concentran en la CHJ.

Los retornos de riego subterráneo correspondientes a las UDAs de la DHJ fueron proporcionados por la CHJ. 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, se estima que en el sector de Crevillente hay un retorno del 3.36% de las explotaciones en el mismo, distribuidas en una

superficie de 26.15 km^2 , y un retorno del 3.17% de las explotaciones en el sector Argallet, distribuidas en una superficie de 2.38 km^2 .

En cuanto a la distribución espacial, se asume que los retornos son constantes en toda la superficie de regadío. Es importante destacar que todos los datos utilizados provienen de los planes hidrológicos 22/27 (CHJ, 2023) y, por lo tanto, no se tienen en cuenta las posibles variaciones espaciales de retorno asociadas a cambios en la superficie. En la Figura 20 se pueden ver las superficies descritas anteriormente.



Figura 20. Superficie de las UDAs en la zona de estudio

3.6 Flujos

Dado que no existen transferencias laterales con otras masas de agua ni cursos fluviales permanentes, se considera que el manantial es la única salida natural del sistema hasta el inicio de las explotaciones, es decir, antes de la década de los años 60. Luego, toda salida del sistema será artificial debido a pozos de extracción. Además, se desestiman las posibles

ramblas existentes debido a su carácter efímero y, por lo tanto, no relevantes para el funcionamiento del acuífero.

3.7 Hipótesis y simplificaciones del modelo

Debido a la incertidumbre existente en la caracterización hidrogeológica de la zona y a la falta de datos de captación y niveles piezométricos que podrían mejorar el conocimiento hidráulico del acuífero a un nivel más detallado, la simulación de la masa de agua subterránea de Crevillente, tanto sector Argallet como Crevillent, estará expuesta a una serie de simplificaciones e hipótesis sujetas a la información obtenida y bibliografía de la zona. Las hipótesis formuladas son:

- Se ha mantenido constante la localización, profundidad y uso de las captaciones. Aunque en la bibliografía revisada se han reportado cambios, la falta de datos correspondientes no permite modelizar o integrar estos cambios en el modelo conceptual, por lo que se ha priorizado mantener el volumen extraído por zona sin cambiar de lugar posibles pozos que se relocalizaron por motivos económicos, hidrogeológicos o de calidad del agua.
- Se ha definido un régimen estacionario poco influenciado que se extiende hasta octubre de 1967 debido a la falta de datos sobre el inicio real de las explotaciones. En este régimen se considera que no hay cambios significativos en el comportamiento hidrogeológico del acuífero a lo largo del tiempo, lo que permite simplificar el modelo y simular su comportamiento de manera más sencilla.
- Dada la complejidad estructural del sistema hidrogeológico y la falta de sondeos y mapas cartográficos a escala local, se asume que la profundidad del muro varía entre -200 y -250 msnm en toda la extensión de la unidad hidrogeológica. No es posible modelar o realizar una estimación precisa de la profundidad del muro. En los cortes hidrogeológicos se aprecia la cota -200 msnm como límite y al resto se le aumenta el espesor, principalmente, para que no se sequen determinadas celdas del modelo.
- La no inclusión de un posible goteo existente en la zona de la Sierra del Reclot proveniente de la unidad cabalgante subbética y su consideración como una recarga adicional al sistema acuífero subyacente. Para su correcta incorporación en el modelo, se requiere de un estudio hidrogeológico de la zona más detallado que permita analizar la posible conexión hidráulica entre el domino subbético cabalgante y el prebético subyacente. Las incertidumbres existentes en esta zona pueden verse reflejadas con los continuos cambios de la delimitación de la masa en esta zona en planes hidrogeológicos anteriores (CHJ, 2009, 2015, 2021).
- La integración de un manantial como única salida del sistema en régimen natural



- La no consideración de la existencia de más surgencias en régimen influenciado por la falta de datos hidrométricos (que permitan saber cuándo se secó) y posibles ubicaciones de éstas.

4 Código utilizado

Una vez definido el modelo conceptual, se requiere llevar a cabo su implementación para permitir la simulación. En este sentido, se deben establecer diferentes condiciones, como el diseño de la malla, la discretización temporal, las condiciones de contorno e iniciales, la definición de valores iniciales de los parámetros del modelo y las interacciones con el entorno.

Para el modelo de flujo del acuífero de Crevillente se ha elegido el código MODFLOW (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 se compone de diversos módulos o paquetes que permiten simular diferentes procesos o interacciones que ocurren en las aguas subterráneas, como pozos, recarga, ríos, entre otros. Con la versión desarrollada en 2005, se consiguió mejorar la definición de la malla mediante un paquete de refinamiento local, la estimación de parámetros y los análisis de sensibilidad e incertidumbre.

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

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

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).

El proceso de modelado en MODFLOW implica la discretización del área de estudio en N celdas y la asignación de propiedades específicas para cada celda según la naturaleza de la zona que representa. Además, se establecen las condiciones de contorno necesarias para el modelo. MODFLOW resuelve la ecuación diferencial para cada celda y utiliza el álgebra matricial y soluciones iterativas para obtener valores de altura piezométrica o caudal. De esta manera, se puede obtener la altura piezométrica en función del espacio y del tiempo, $h = h(x,y,z,t)$, y los balances de flujo para cada celda.

En MODFLOW, las celdas pueden ser discretizadas verticalmente en capas y se pueden tratar como libres, confinadas o una combinación de ambas. Además, el programa permite simular la influencia de diferentes acciones externas, como pozos de bombeo, recarga, drenajes, ríos,

entre otros. También es posible crear balances hídricos de subzonas dentro del área de estudio utilizando el programa ZONEBUDGET.

Por último, la interfaz gráfica de usuario ModelMuse es una herramienta útil para la introducción de datos en el modelo de flujo. Esta interfaz utiliza objetos, bases de datos y fórmulas para simplificar la entrada de datos. Los objetos, que pueden ser dibujados en la ventana principal o importados, se utilizan para modificar valores por defecto y definir condiciones de contorno. También se pueden utilizar para generar la malla. Los conjuntos de datos se utilizan para representar información distribuida en el espacio, como la conductividad hidráulica, porosidad, etc. Las fórmulas se emplean para definir la distribución de valores en los conjuntos de datos. En resumen, ModelMuse es una herramienta eficiente para la entrada de datos en el modelo de flujo, lo que permite una mayor precisión en los resultados obtenidos y una mayor velocidad en la creación del modelo.

5 Construcción del modelo

El modelo conceptual descrito en la sección 3 se traduce a un modelo numérico de MODFLOW con la ayuda de la interfaz ModelMuse.

5.1 Discretización horizontal

Para la discretización horizontal, se adopta una discretización de celdas constantes de 200 m x 200 m, coincidente con el tamaño de celda del MDT utilizado, que permite discretizar la masa de agua subterránea en 5644 celdas activas con un mallado de 68 filas y 83 columnas del cual 3436 celdas son activas. En la Figura 21 podemos apreciar las celdas activas (azules) e inactivas (rojas):

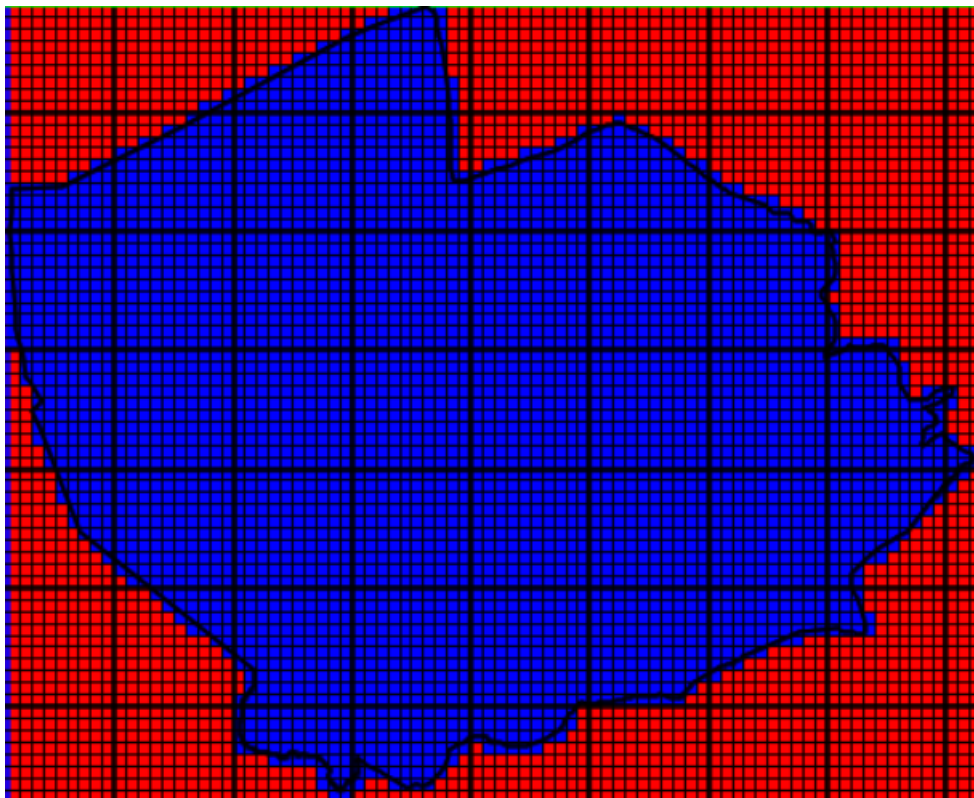


Figura 21: Celdas activas (azules) y celdas inactivas (rojas)

La Tabla 3 resume los datos relativos a la construcción del mallado utilizado en el modelo.

Tabla 3. Datos relativos a la generación del mallado del modelo.

Xmax, Ymax	Xmin, Ymin	Filas/Columnas	Tamaño celda
675500, 4248900	692100, 4235300	68/83	200 m x 200 m

5.2 Discretización vertical

De acuerdo con la bibliografía y a la descripción hidrogeológica, la masa de agua subterránea puede modelarse como una capa tanto para el sector Argallet como Crevillente. Los límites del modelo serán el modelo digital del terreno como techo y la base del acuífero.

5.2.1 Topografía del terreno

La parte superior del acuífero corresponde a la superficie del terreno y se describe mediante un MDT con una resolución de 200 m x 200 m, lo que significa que la discretización horizontal utilizada es equivalente a esta resolución. Es importante tener en cuenta que el techo del acuífero puede tener una forma distinta a la de la superficie del terreno, ya que está determinado por la posición del nivel freático en la zona saturada del subsuelo (Figura 22).

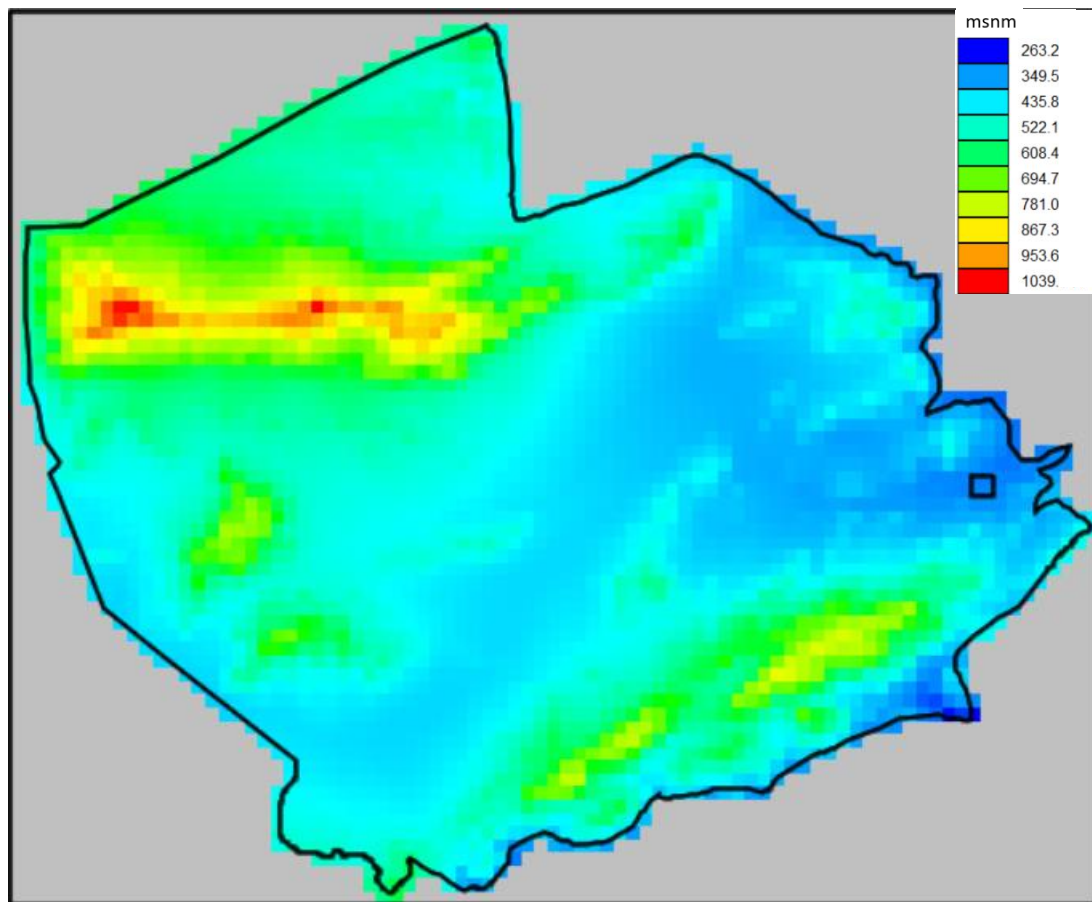


Figura 22: Límite superior del modelo

5.2.2 Base del acuífero

Acorde a los descrito en la Sección 2.5, la información bibliográfica, e iterando en la simulación buscando que los pozos no se sequen en determinados sectores (ya que MODFLOW considera la celda inactiva a partir del momento en que el nivel piezométrico

coincide con la base), se toma como hipótesis que el muro esté a una profundidad que varía entre -200 msnm y -250 msnm, que es la profundidad media a la que pudiera estar el muro del acuífero jurásico (IGME, 2020). La variación entre -200 msnm y -250 msnm se hace para disminuir la cota del muro en las zonas donde, según bibliografía (Andreu, 1997), hay un aumento de espesor como es en el sector Tolomó y Galería de los Suizos.

5.3 Discretización temporal

La simulación del acuífero de Crevillente se ha realizado con una resolución temporal mensual, cubriendo un total de 80 años hidrológicos. Estos años se dividen en dos periodos que corresponden al régimen del acuífero:

- En el primer periodo, desde octubre de 1940 hasta septiembre de 1969, se ha simulado el régimen estacionario o no influenciado del acuífero.
- En el segundo periodo, desde octubre de 1969 hasta septiembre de 2020, se ha simulado el régimen transitorio o influenciado, el cual incluye los bombeos.

Con respecto al primer periodo, el régimen estacionario o no influenciado del acuífero se refiere a un estado de equilibrio hidráulico en el que el flujo de agua subterránea que entra en el acuífero es igual al flujo que sale. Es decir, la recarga y la descarga se mantienen en equilibrio a largo plazo. Este periodo se ha simulado para poder entender el comportamiento natural del acuífero sin la influencia humana.

En cambio, en el segundo periodo se refiere al régimen transitorio o influenciado, el cual incluye la influencia de las actividades humanas, especialmente los bombeos de agua para uso agrario principalmente. Durante este periodo, se espera un cambio en la dinámica hidráulica del acuífero, con un aumento en la extracción de agua y una disminución en los niveles piezométricos y de almacenamiento.

5.4 La condición inicial

El modelo en régimen estacionario ha sido generado bajo la hipótesis de funcionamiento hidrogeológico descrita en el apartado del modelo conceptual. De acuerdo con dicha hipótesis, la única fuente de entrada de agua en el sistema es la recarga generada por el agua de lluvia. Asimismo, el drenaje tiene lugar mediante descargas puntuales a través de manantiales situados en el límite este del sistema (Figura 23). En consecuencia, la superficie piezométrica inicial no puede ser inferior a la cota del manantial, ya que este se alimentaba del acuífero.

El manantial, según bibliografía, estaría localizado en los puntos situados topográficamente más bajos, alrededor de la cota 300 msnm, la cual será la condición inicial para el modelo.

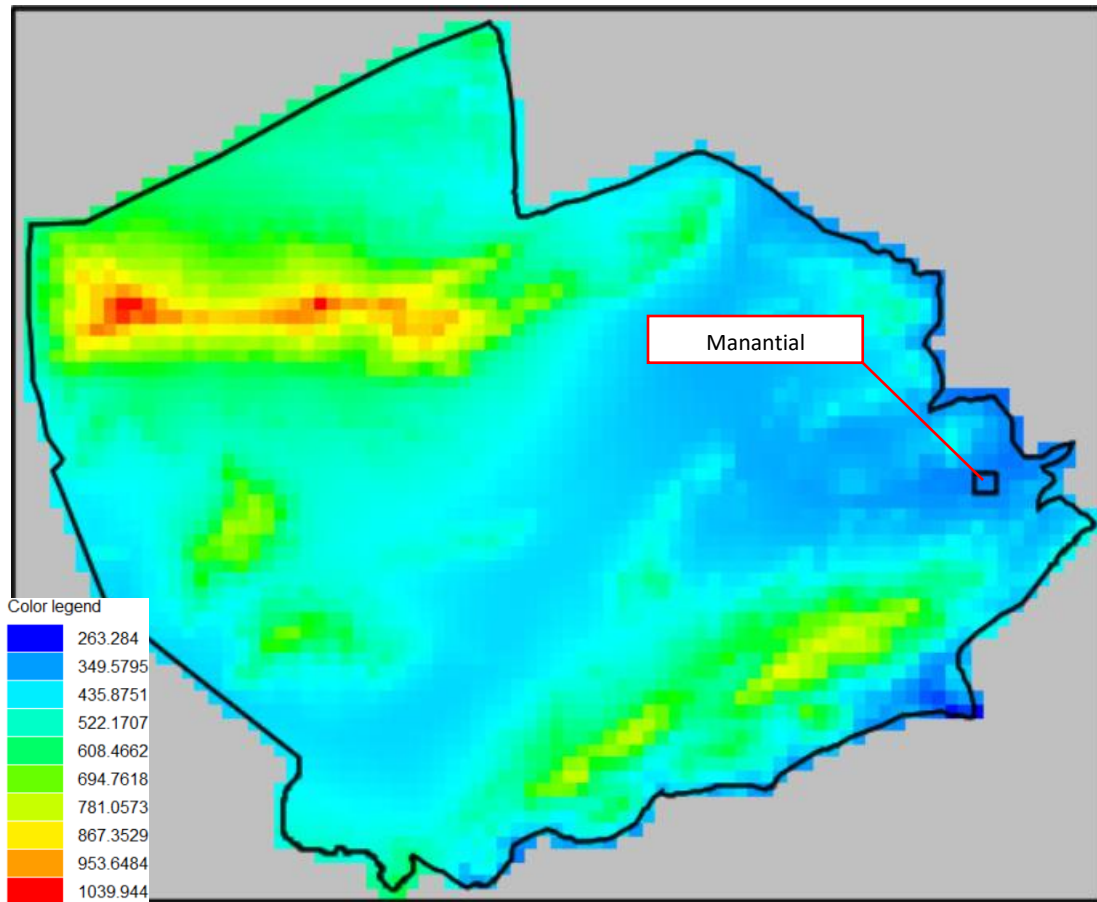


Figura 23: Ubicación del manantial

Para el régimen influenciado, se establecen niveles iniciales mediante iteraciones en la calibración del modelo y se utilizan valores que se consideran representativos y cercanos a las cotas piezométricas registradas en los primeros años del período de régimen influenciado, basándose en la información hidrogeológica disponible en el área de estudio. Es importante tener en cuenta que la definición de los niveles iniciales puede ser un proceso iterativo y requiere una evaluación cuidadosa para lograr una simulación precisa del acuífero.

Se utilizan cotas variables entre 120 y 50 msnm (Figura 24) y con esta superficie piezométrica se ha podido realizar la calibración del modelo en régimen transitorio.

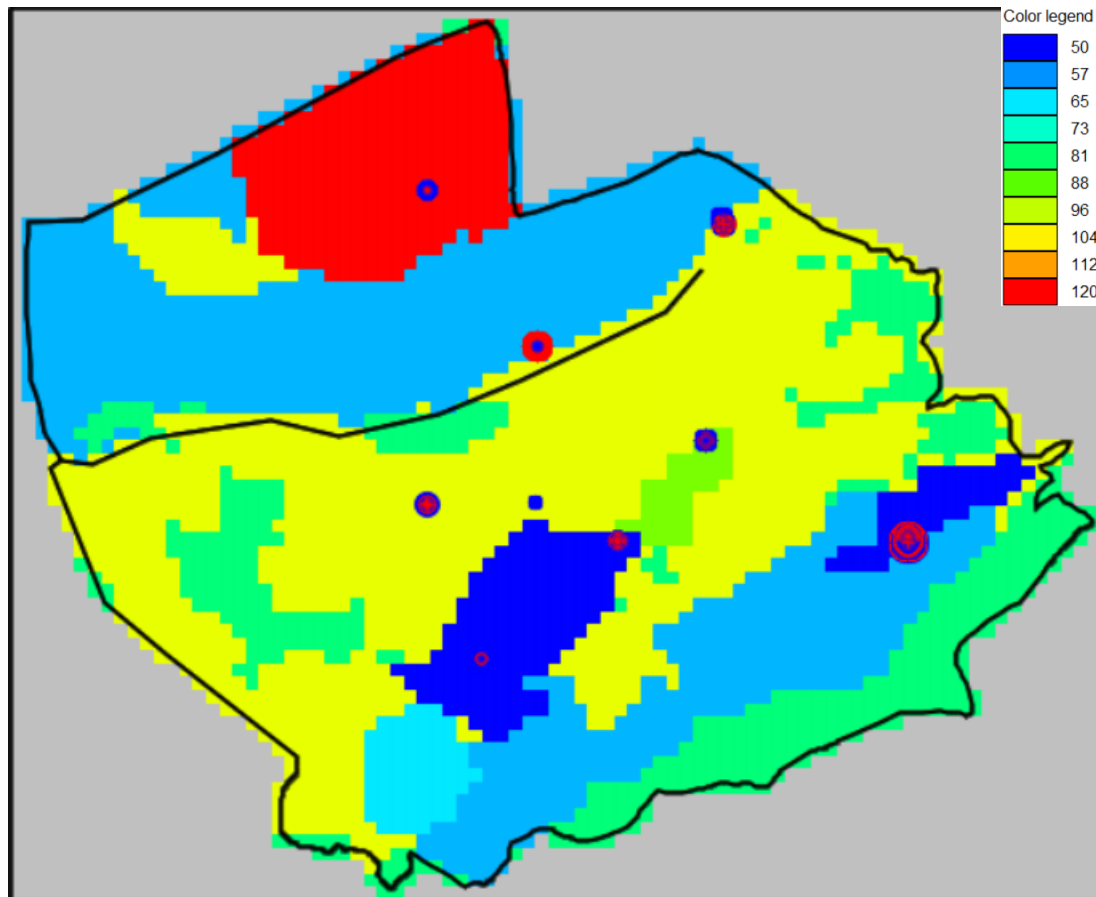


Figura 24. Condiciones iniciales para el modelo en régimen transitorio.

5.5 Asignación preliminar de parámetros hidráulicos

Para resolver el modelo hidrogeológico se necesitan ciertos parámetros hidráulicos, como la conductividad hidráulica (K_x , K_y y K_z), el rendimiento específico (S_y) y el coeficiente de almacenamiento (S_s), así como la conductividad hidráulica y espesor de la barrera de flujo horizontal que representa una falla estructural que dificulta el paso del flujo entre Argallet y Crevillente.

Aunque el medio en realidad es anisótropo y heterogéneo, la falta de datos hidráulicos exhaustivos y detallados impide caracterizar adecuadamente la distribución de los parámetros que conforman la unidad hidrogeológica. Por lo tanto, la metodología utilizada en este trabajo consiste en asignar los parámetros hidráulicos en base a la zonificación definida en el apartado dedicado al modelo conceptual (sección 3.3).

En cada dominio se asume que la distribución de las conductividades hidráulicas es horizontalmente homogénea tal que $K_x=K_y$, y anisótropa en el eje vertical considerando la relación $K_z=K_x/10$. Por lo que respecta a los parámetros S_s y S_y , se asumen constantes en todo el dominio hidrogeológico.

Según los rangos bibliográficos de los parámetros hidráulicos presentados en la Tabla 1 de la sección 3.3, los valores preliminares de los parámetros del modelo son los presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Asignación preliminar de parámetros hidráulicos.

Dominio	Permeabilidad	K_x (m/d)	K_z (m/d)	S_s (1/m)	S_y (-)
Dominio 1	Muy alta	1000	100	2.00E-03	0.1
Dominio 2	Alta	450	45	2.00E-03	0.1
Dominio 3	Media	1	0.1	2.00E-03	0.1
Dominio 4	Baja	0.01	0.001	2.00E-03	0.1
Dominio 5	Muy Baja	0.0001	0.00001	2.00E-03	0.1

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, espesor y conductividad hidráulica de la barrera, siendo estos dos últimos parámetros determinados por calibración. La inexistencia de datos bibliográficos que caractericen el grado de impermeabilidad o espesor de estas estructuras dificulta la asignación inicial de estos parámetros por lo que todas las barreras se asumen inicialmente de 200 m de espesor y con un valor de $1E-10$ m/d de conductividad hidráulica.

La posición de la falla se determina a partir del límite entre los acuíferos de Crevillente y Argallet, dejando una franja en su extremo oriental que permite la conectividad hidrogeológica. La falla va de muro a techo del sistema, influyendo en toda la vertical. La Figura 25 muestra los dominios hidrogeológicos y posición de la barrera hidráulica adoptadas.

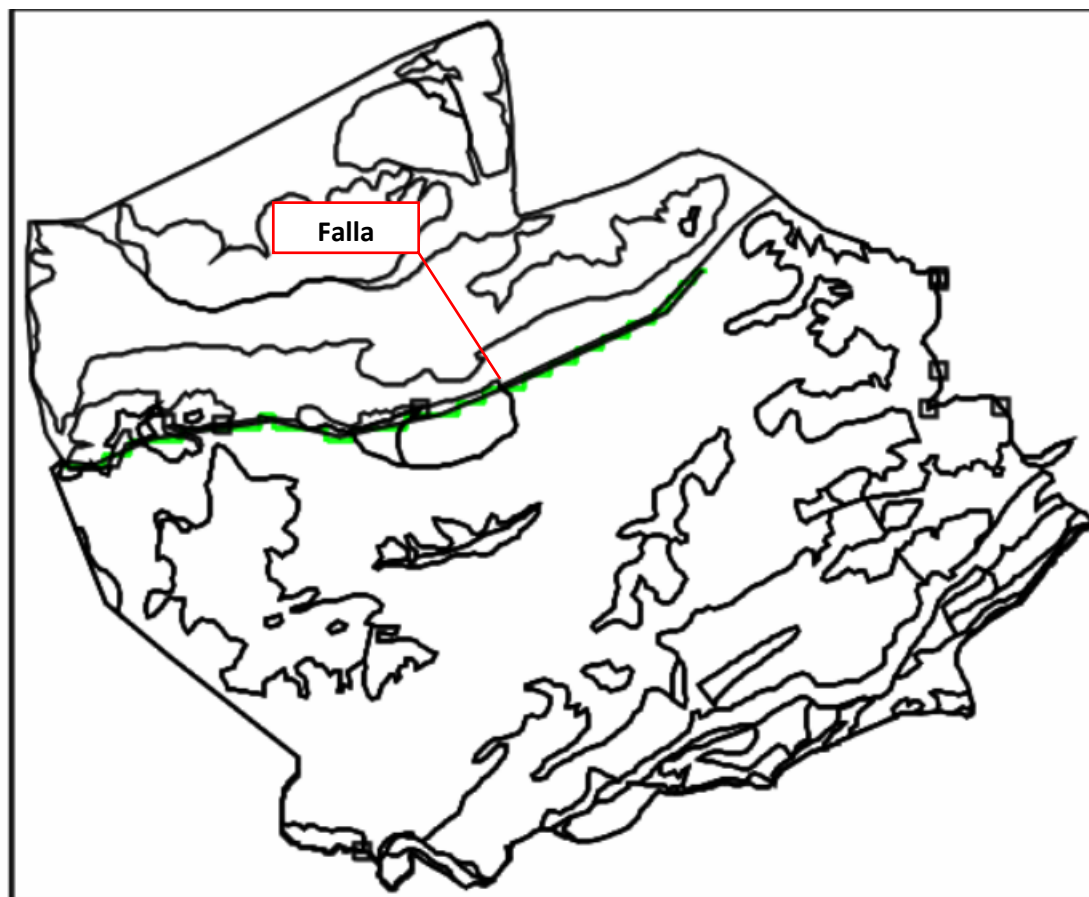


Figura 25. Dominios hidrogeológicos y ubicación de las barreras hidráulicas en el modelo.

Los dominios en la imagen anterior corresponden a los mismos de la Figura 14. En algunos casos, se ha optado por subdividir estos dominios con el fin de mejorar la calibración y el rendimiento del modelo.

5.6 Las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son esenciales en un modelo de flujo ya que permiten representar las interacciones entre el sistema hidrogeológico y el medio exterior. En el modelo de Crevillente se utilizan paquetes específicos de MODFLOW para incorporar la recarga, las extracciones de agua y otras relaciones entre el acuífero y el medio ambiente.

Existen tres tipos de condiciones de contorno en un modelo de flujo: la condición de Dirichlet, la condición de Neumann y la condición de Cauchy. En este modelo no se utiliza la condición de Dirichlet (altura prescrita). En cambio, se utilizan las condiciones de Neumann (el flujo o el gradiente de la altura es prescrito) para representar acciones como bordes impermeables, recarga por precipitación o retornos de riego, y los efectos de los bombeos. Por otro lado, las condiciones de Cauchy para representar la variación del flujo en respuesta a los cambios de altura en la celda del límite tampoco son utilizadas.

En el sistema de Crevillente, se definen las condiciones de contorno para la recarga por infiltración y retornos, así como las extracciones de agua por captaciones.

5.6.1 Paquete de recarga

El paquete de recarga de MODFLOW es utilizado para simular la recarga del acuífero a partir de las precipitaciones, la infiltración y los retornos de riego. Este paquete permite representar la recarga natural del acuífero y también la recarga artificial que se produce como resultado de la gestión del agua en la zona.

Para utilizar este paquete, se debe especificar la distribución espacial y temporal de la recarga en el modelo. Esto se hace mediante la definición de una matriz que contiene los valores de recarga en cada celda del modelo para cada periodo de tiempo.

En este caso, se considera la incorporación de la recarga como resultado de la infiltración de precipitación y/o los retornos de riego, en unidades de metros por día. Ambos procesos se consideran como entradas de flujo que se distribuyen de forma constante en las celdas que interceptan con las áreas de recarga definidas en la sección 3.5. Las tasas de recarga se multiplican por el área horizontal de las celdas asignadas para calcular el flujo volumétrico entrante correspondiente.

5.6.2 Paquete de pozos

El paquete de pozos en MODFLOW se utiliza para representar las extracciones de agua en un modelo de flujo de aguas subterráneas. El paquete permite especificar las ubicaciones de los pozos y las tasas de extracción (o inyección).

El paquete de pozos funciona mediante la creación de celdas de extracción, celdas del modelo a las que se les ha asignado una tasa de bombeo específica. Las tasas de extracción pueden ser especificadas como una tasa constante en el tiempo o como una función que varía con el tiempo.

En este caso, se utiliza para simular las extracciones volumétricas de los pozos definidos en la sección 3.4 en régimen influenciado. La Tabla 5 muestra la posición de las captaciones en el modelo y a que acuífero pertenece.

Tabla 5. Ubicación de las captaciones en el modelo en régimen influenciado.

Código pozo	Nombre Pozo	UTMX_ETRS89	UTMY_ETRS89	Masa
VI0245	Rollo nº 3	686420	4245660	Argallet
VI02542	TOLOMÓ ALTO Nº2	689677	4241068	Crevillent
VI0316	G-407	682119	4237233	Crevillent
VI0317	D-403	681933	4237469	Crevillent

VI0318	C-406	681855	4237700	Crevillent
VI0319	F-404	681999	4237000	Crevillent
VI1493	Rollo nº 4	686780	4245286	Argallet
VI1494	Tolomó nº 6	689060	4240715	Crevillent
VI1496	Bejerano	689334	4241205	Crevillent
VI1498	Tolomó nº 10	689609	4240974	Crevillent
VI1500	Tolomó nº 13	689086	4240706	Crevillent
VI1502	Galiana	683073	4238861	Crevillent
VI1816	La Cuesta	685991	4242310	Crevillent
VI2631	Pozo nº 3	689718	4240997	Crevillent
A_007	CASAS DE GALIANA ABASTECIMIENTO	682663	4238978	Crevillent
A_011	TOLOMO 2	689577	4240957	Crevillent
VI0636	La Solana_Hondón	683636	4243958	Argallet
VI1690	Rambla Honda o "1 / Boquera"	681989	4246318	Argallet
283510020	La cata	688249	4238495	Crevillent
273540028	La Canalosa	681815	4241343	Crevillent

5.6.3 Paquete de drenes

El paquete de drenes en MODFLOW se utiliza para simular los efectos de los sistemas de drenaje en el modelo. Los drenes son estructuras diseñadas para eliminar el exceso de agua del suelo y disminuir el nivel freático. En el modelo de MODFLOW, los drenes se representan como celdas con flujo saliendo del modelo y se especifica una conductancia de drenaje para cada celda del dren. La conductancia representa la facilidad con la que el agua fluye desde el acuífero hacia el drenaje.

En este caso, se utiliza el paquete de drenes de MODFLOW para incorporar el manantial en régimen no influenciado. Este paquete se mantiene activo tanto en el régimen natural como alterado, y se define a una cota de surgencia constante que permite que el agua subterránea salga cuando la altura es mayor a esta cota. Aunque la bibliografía establece esta cota en 300 m.s.n.m., para obtener resultados más precisos y representativos del sistema se ha definido en 280 msnm.

En lo que respecta a la conductancia del manantial, esta se refiere a la facilidad con la que el agua puede fluir a través del dren. Es decir, es una medida de la capacidad del dren para permitir que el agua fluya a través de él. Se expresa en unidades de longitud por tiempo, como metros por día (m/d). Una conductancia más alta significa que el agua puede fluir más fácilmente a través del dren y, por lo tanto, se drena más rápidamente. La Tabla 6 muestra la posición del manantial y los valores de cota de surgencia y conductancia que se asignan.

Tabla 6. Posición, cota y conductancia del manantial

Columna	Fila	Cota (msnm)	Conductancia (m/d)
75	37	280	100

5.7 Observaciones

El paquete de observaciones (OBS) de MODFLOW se utiliza para configurar pozos de observación de niveles piezométricos utilizados durante la fase de calibración del mismo. Esto se logra mediante la comparación de los valores simulados con las observaciones reales.

Además, el paquete de observaciones también puede utilizarse para calcular estadísticos de ajuste del modelo, como la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2), lo que permite una evaluación cuantitativa de la calibración del modelo.

5.7.1 Paquete de observación de alturas piezométricas

Una vez revisados los datos de niveles piezométricos existentes, se han identificado un total de 10 puntos de control en el acuífero de Crevillente, con registros desde la década de los años 80 (Figura 26). De manera que, debido a la falta de datos anteriores a esta fecha, no es posible determinar las alturas piezométricas en estado estacionario y, por lo tanto, no se pueden incorporar puntos de observación en el modelo de régimen natural o no influenciado. En consecuencia, este conjunto de datos solo se utiliza en el modelo de régimen influenciado.

Para utilizar este conjunto de datos, se requiere conocer la ubicación y el intervalo de tiempo en el que se tomaron los registros, expresados en metros sobre el nivel del mar. La Tabla 7 proporciona información sobre la posición y características de los pozos de control.

Tabla 7. Posición de los pozos de observación.

Cód. Punto	Nombre	Municipio	Cód. Masa PHJ15	Masa Subterránea PHJ15	UTM ETRS89 X	UTM ETRS89 Y
08.51.013	Pozo La Boquera (TEL)	Romana, la	080.188	Sierra de Argallet	681845.4397	4246123.051
08.52.002	Casas Galiana	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.189	Sierra de Crevillente	681852.3882	4241340.058
08.52.003	Tolomo Alto	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.189	Sierra de Crevillente	689147.3651	4240849.95
08.52.004	La Cuesta	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.189	Sierra de Crevillente	686081.3814	4242293.999
08.52.006	POZO GALIANA	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.189	Sierra de Crevillente	682677.3631	4238972.056
08.52.007	CASAS DE REGAN	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.189	Sierra de Crevillente	683490.3802	4241360.044
08.52.009	La cuesta 2	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.189	Sierra de Crevillente	684759.3711	4240781.013
08.99.003	ROLLO 2	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.188	Sierra de Argallet	686342.4206	4245690.023
08.99.004	ROLLO 1	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.188	Sierra de Argallet	686363.4191	4245604.024
08.99.008	Pozo Collado Machos/Met (Telemedida Dip. Alicante)	Fondó de les Neus, el/Hondón de las Nieves	080.188	Sierra de Argallet	683514.4016	4243749.046

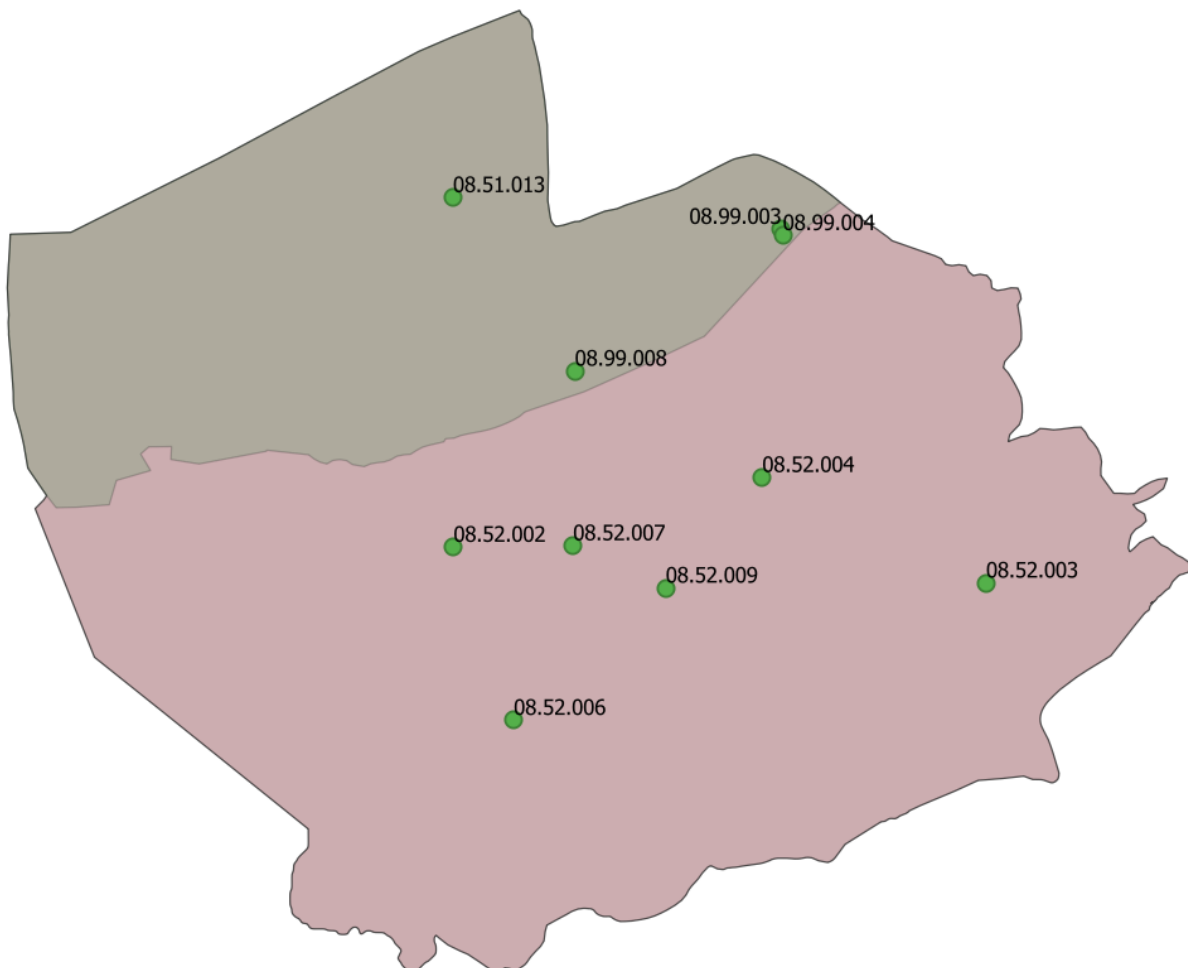


Figura 26: Ubicación de los piezómetros de control

5.8 Solver

El solver es el algoritmo que se encarga de resolver las ecuaciones de flujo de agua subterránea. En este trabajo se ha seleccionado el algoritmo PCG (Preconditioned Conjugate Gradient). PCG es un método iterativo que utiliza una técnica de gradiente conjugado para encontrar la solución de un sistema de ecuaciones lineales. Este método es particularmente eficiente para resolver sistemas grandes y dispersos de ecuaciones lineales, como los que se presentan en la simulación de flujo de agua subterránea en MODFLOW.

El método PCG utiliza una matriz de coeficientes simétrica y definida positiva, que es la matriz de coeficientes que se obtiene al discretizar las ecuaciones de flujo. Para hacer más eficiente la solución de esta matriz, se utilizan técnicas de preconditionamiento, que consisten en transformar la matriz original en una matriz equivalente más fácil de resolver. Esto permite acelerar la convergencia del algoritmo y reducir el número de iteraciones necesarias para encontrar la solución.

6 Calibración y balance hídrico

La calibración es un proceso fundamental en todo modelo. En caso de un modelo de flujo de aguas subterránea, a través de la calibración se ajustan los parámetros del modelo, las condiciones de contorno y las acciones externas para que éste reproduzca de manera precisa el comportamiento del sistema hidrogeológico estudiado. De esta manera, se pueden realizar predicciones confiables y tomar decisiones informadas en cuanto a la gestión y uso de los recursos hídricos subterráneos.

La calibración de un modelo de flujo de aguas subterráneas con MODFLOW implica comparar los resultados simulados con datos observados del sistema hidrogeológico. En el caso del sistema de Crevillente este proceso se lleva a cabo principalmente comparando los niveles piezométricos observados con los simulados, ya que no se cuenta con otra información que pueda ser útil como el caudal del manantial o conexiones con cuerpos de agua superficial. A partir de esta comparación, se pueden identificar las áreas del modelo que necesitan ajustes y modificar los parámetros correspondientes para lograr una mejor concordancia entre los resultados simulados y los datos observados.

Una vez calibrado el modelo, es posible realizar un balance hídrico global o, si fuera necesario, zonal. En términos generales, un balance hídrico en un acuífero se puede expresar como la diferencia entre las entradas y las salidas, más los cambios en el agua almacenada en un período determinado de tiempo. Si la cantidad de agua que entra en el acuífero es mayor que la cantidad que sale, el nivel del agua subterránea aumentará, mientras que si la cantidad de agua que sale es mayor que la cantidad que entra, el nivel del agua subterránea disminuirá.

6.1 Calibración de series piezométricas

Para la calibración de este modelo solo se modificarán los valores de los parámetros, esto es, la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico. La calibración se realizó buscando la mejor reproducción de las series piezométricas.

Los valores preliminares presentados en la Tabla 4 se modifican siguiendo una metodología de prueba y error (calibración manual). Se siguen criterios visuales y, también, mediante formulaciones que permiten cuantificar la calibración. Los cambios realizados en los valores de la conductividad hidráulica han permanecido, en todo momento, dentro de los rangos bibliográficos reportados en la Tabla 1. Se debe destacar que, en algunas zonas, especialmente aquellas de gran extensión, la zonificación se amplió para mejorar la calibración.

El análisis del grado de bondad del ajuste de los datos piezométricos se ha realizado mediante la comparación entre los niveles reales observados y los simulados por el modelo en régimen transitorio. El proceso de calibración ha tenido en cuenta los registros de los 10 piezómetros

de control (ver sección 5.7.1), cuyo ajuste global ha resultado en un Error Cuadrático Medio (ECM) de 13.55 m (Figura 27) y un coeficiente de Nash de 0.93. La Tabla 8 sintetiza los resultados de la calibración para cada pozo.

El error cuadrático medio (ECM) es una medida de la diferencia entre los valores predichos y los valores observados. El ECM se calcula sumando los cuadrados de las diferencias entre los valores predichos y los valores observados, dividiendo por el número de observaciones y tomando la raíz cuadrada del resultado.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NASH) es una medida estadística que se utiliza para evaluar la calidad de las predicciones en modelos. El valor de NASH varía entre -infinito y 1, donde un valor de 1 indica una predicción perfecta y un valor de 0 indica que la predicción no es mejor que la media de los datos observados. Un valor negativo indica que la predicción es peor que la media.

Si los valores predichos se acercan a los valores observados, entonces se espera que el NASH sea alto y el ECM sea bajo. Por lo tanto, un NASH alto y un ECM bajo indican una buena calibración.

Tabla 8. Resultados de la calibración por pozo observado.

Código	Nº Datos	ECM	Coord_X	Coord_Y
08.51.013	40	12.99	681845.44	4246123.05
08.52.002	92	9.79	681852.388	4241340.06
08.52.003	301	16.18	689147.365	4240849.95
08.52.004	183	9.47	686081.381	4242294
08.52.006	89	10.05	682677.363	4238972.06
08.52.007	15	4.32	683490.38	4241360.04
08.52.009	182	9.59	684759.371	4240781.01
08.99.003	3	20.95	686342.421	4245690.02
08.99.004	73	10.95	686363.419	4245604.02
08.99.008	60	27.07	683514.402	4243749.05

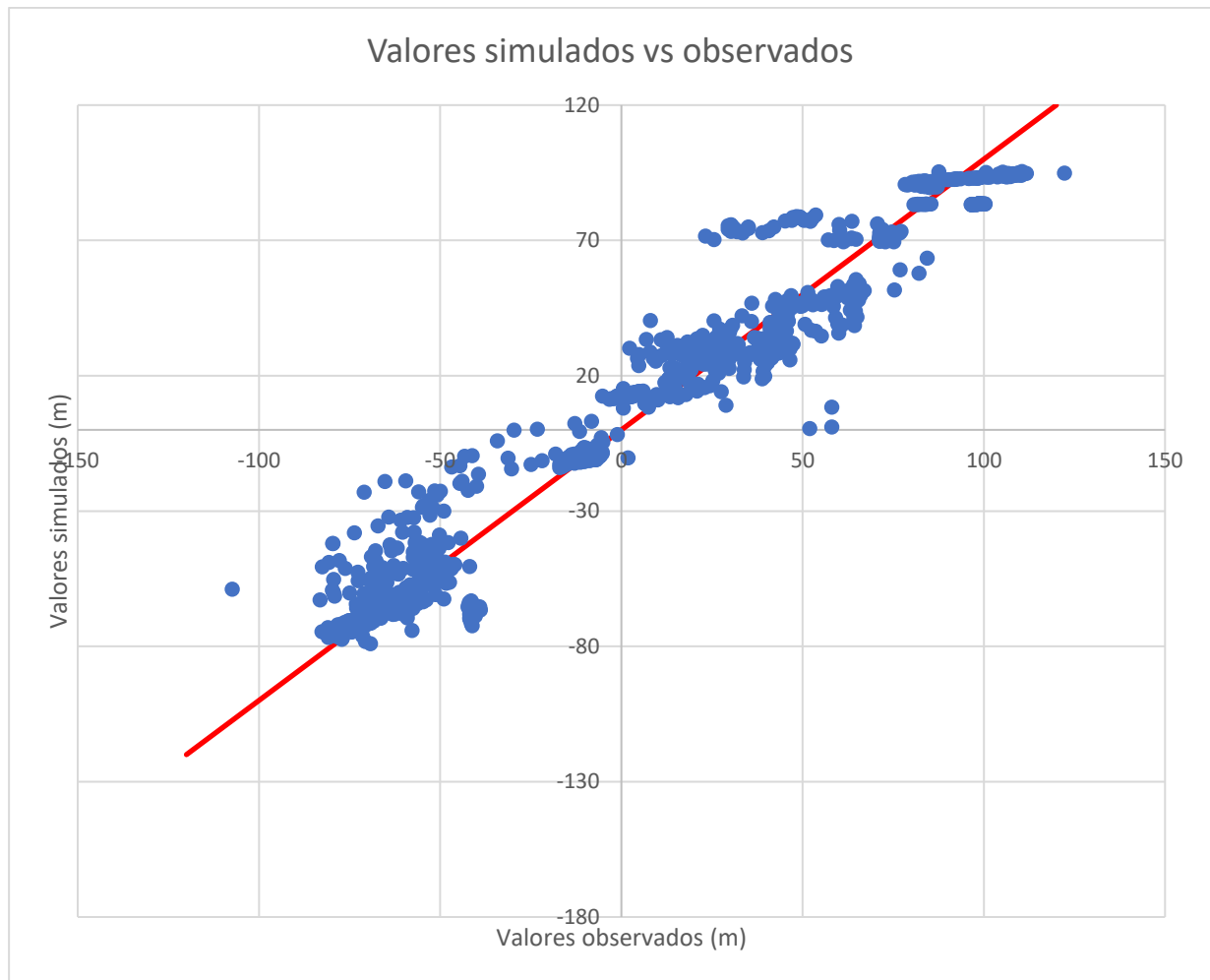


Figura 27. Valores observados versus valores simulados para los pozos de control

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos para cada punto de control utilizado (Figura 28 a Figura 37):

6.1.1 Crevillente

08.52.002

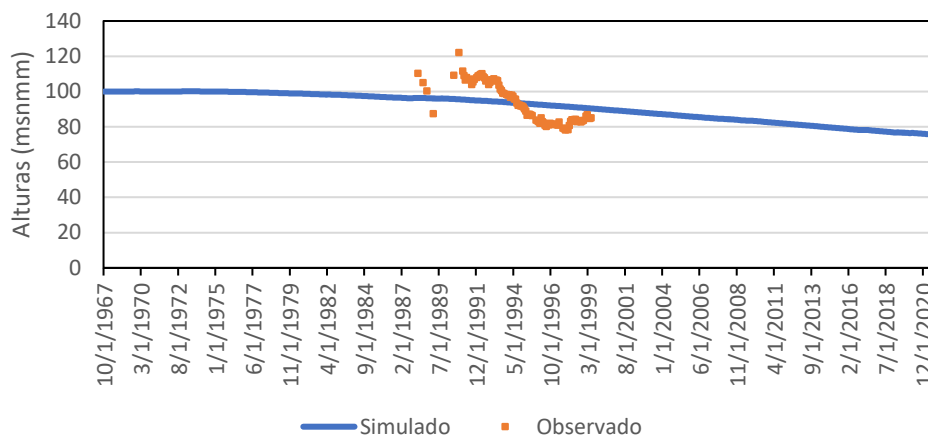


Figura 28. Calibración piezómetro 08.52.002

08.52.003

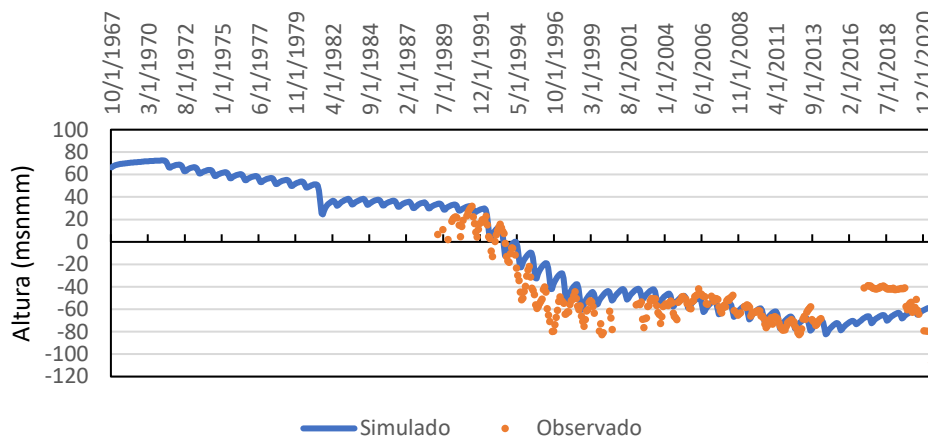


Figura 29. Calibración piezómetro 08.52.003

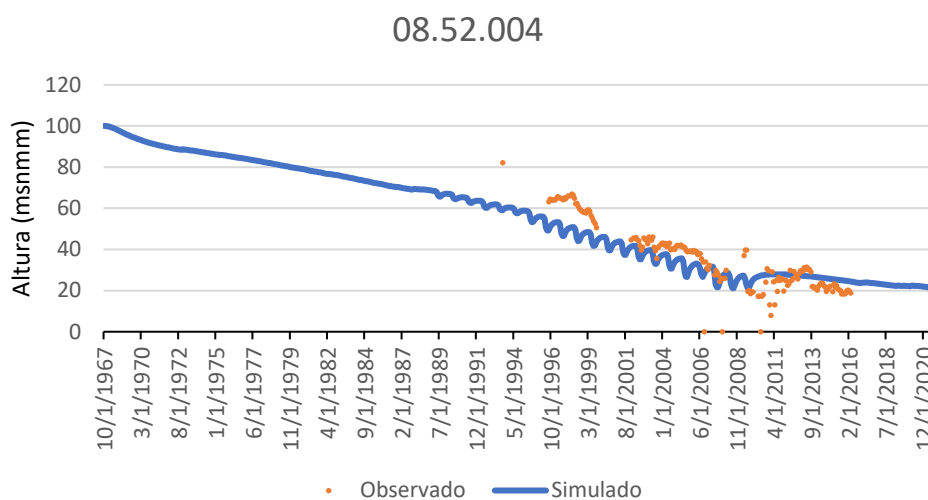


Figura 30. Calibración piezómetro 08.52.004

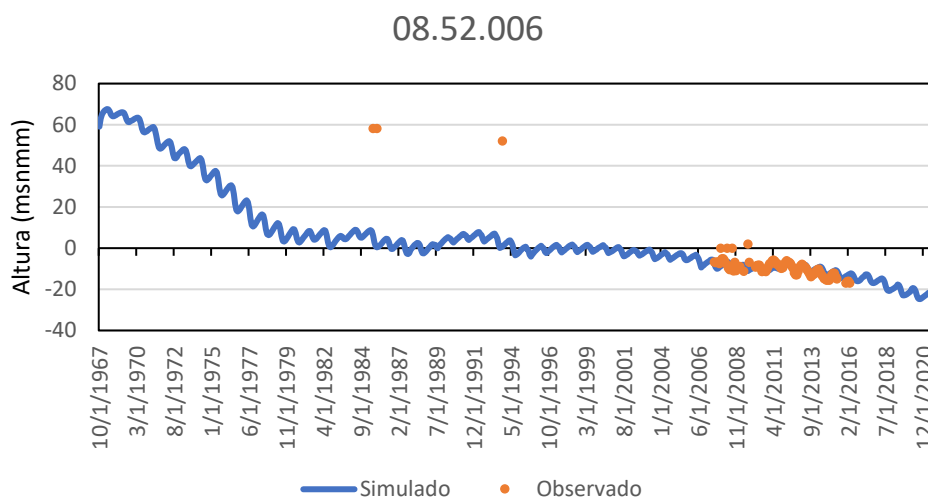


Figura 31. Calibración piezómetro 08.52.006

08.52.007

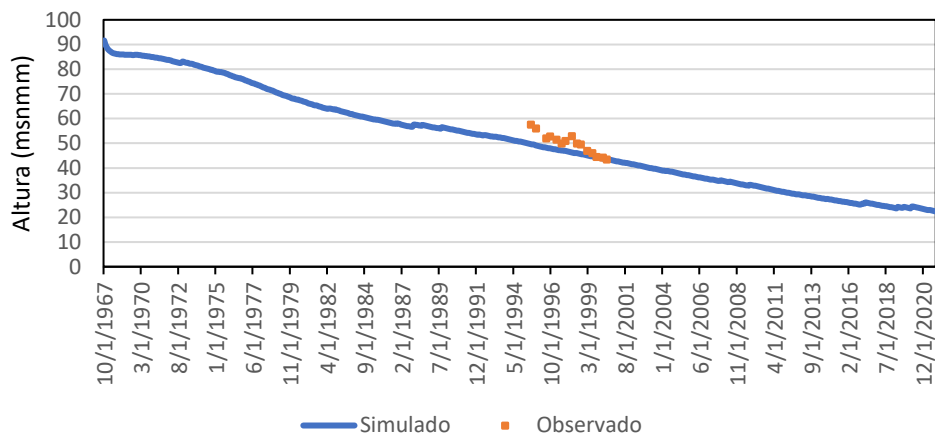


Figura 32. Calibración piezómetro 08.52.007

08.52.009

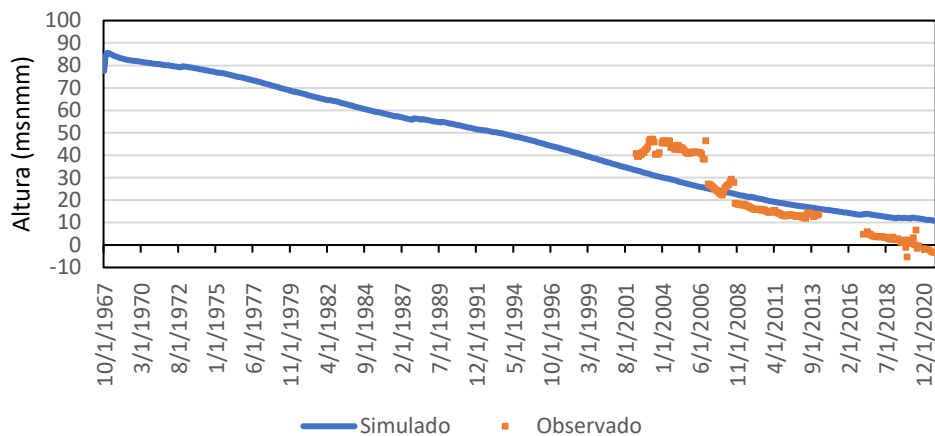


Figura 33. Calibración piezómetro 08.52.007

6.1.2 Argallet

08.51.013

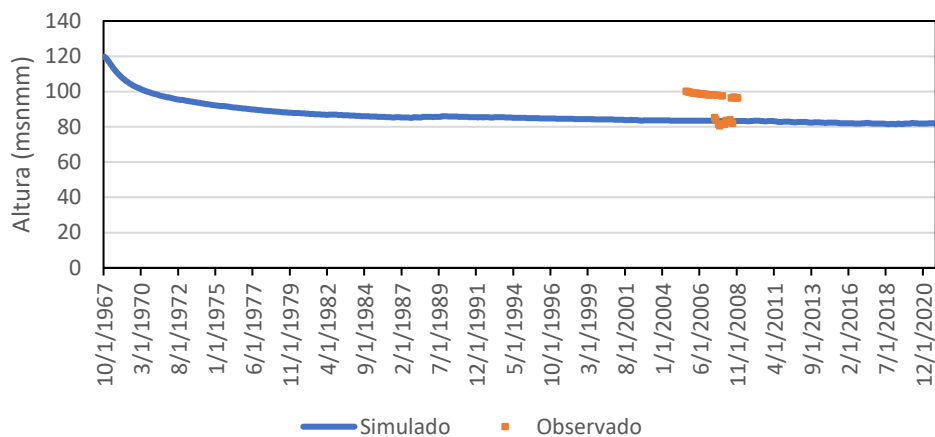


Figura 34. Calibración piezómetro 08.51.001.

08.99.003

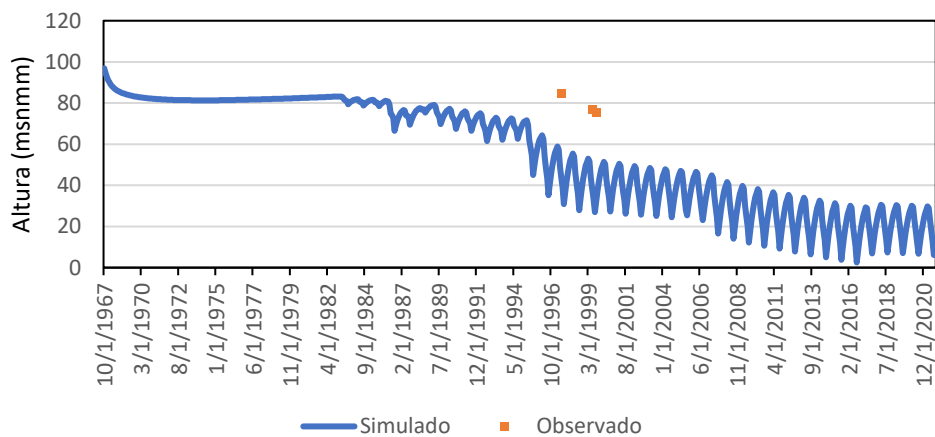


Figura 35. Calibración piezómetro 08.99.003

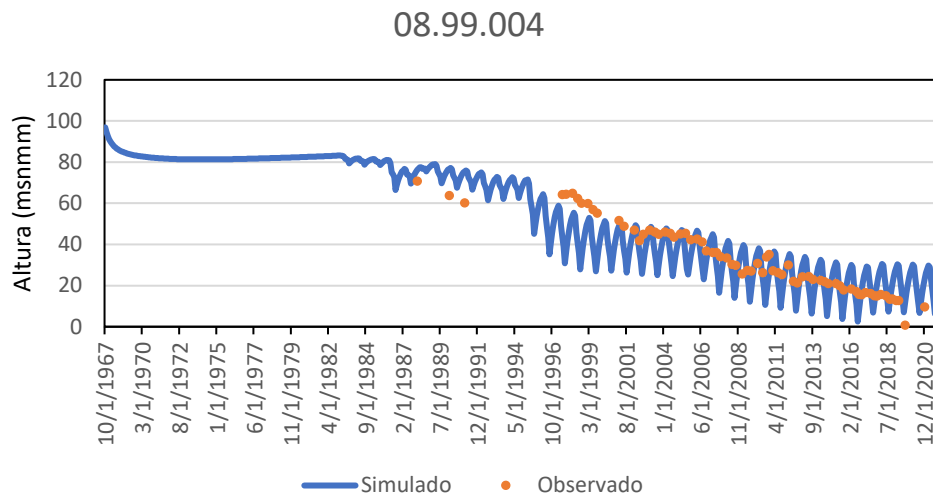


Figura 36. Calibración piezómetro 08.99.004

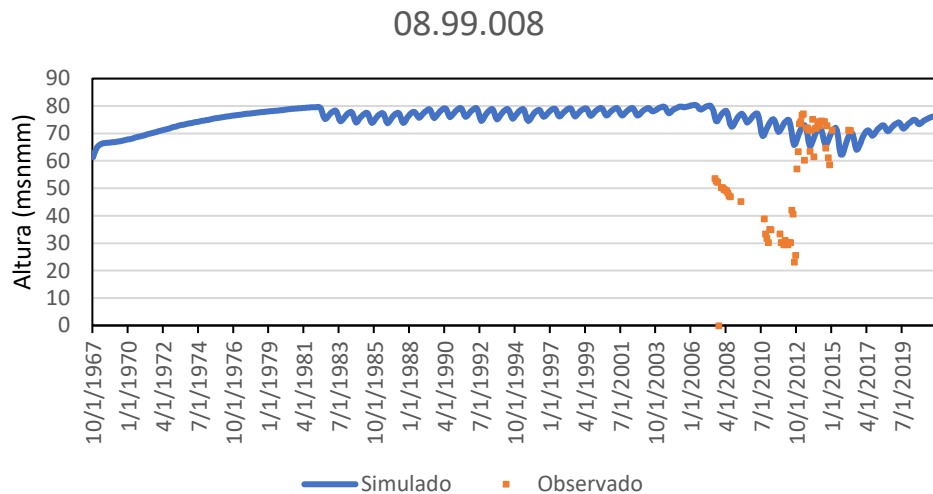


Figura 37. Calibración piezómetro 08.99.008

Podemos observar que:

- Con excepción de los piezómetros 08.99.008 y 08.99.003, los niveles piezométricos son representados adecuadamente por el modelo.
- El piezómetro 08.99.003 corresponde a la misma celda que el piezómetro 08.99.004, el cual contiene más datos, por lo que el error en este piezómetro es alto debido a que se priorizó la calibración del que tiene más datos.
- Los errores medios cuadráticos disminuirán notablemente si se eliminan de su cálculo los puntos que se alejan claramente de la tendencia medida por cada piezómetro. La

mayoría de estos apartamentos no suelen ser registros realistas. En este trabajo no se han eliminado dichos puntos.

- Las oscilaciones en los datos reales de algunos piezómetros, como puede ser en el 08.52.033, también genera que haya un ECM alto, por lo que en estos casos es de interés seguir la tendencia general y no cada punto. Estas oscilaciones pueden deberse a errores de medición o eventos puntuales que las hipótesis o simplificaciones del modelo no logran tener en cuenta.
- Vemos que el NASH es cercano a 1, es decir, es un modelo confiable para generar predicciones futuras.

6.2 Balance hídrico en régimen estacionario

El modelo en régimen estacionario es una herramienta útil para entender el comportamiento de un acuífero en una situación en la que no existe ninguna influencia humana, es decir, sin la presencia de actividades como la extracción de agua para uso doméstico, industrial o agrícola. En este estado, las entradas de agua subterránea al acuífero son equivalentes a las salidas, lo que implica que no hay ninguna variación en el almacenamiento del agua subterránea a lo largo del tiempo.

El modelo ha sido desarrollado utilizando las suposiciones establecidas en secciones previas, las cuales establecen que las entradas de agua subterránea son resultado de la infiltración de la lluvia y que las salidas se dan por medio del drenaje de algún manantial. Sin embargo, debido a la falta de datos piezométricos y de caudales del manantial, no ha sido posible llevar a cabo la calibración del modelo. Los parámetros utilizados para este modelo han sido tomados del modelo calibrado en régimen transitorio.

La Figura 38 muestra el resultado de la superficie piezométrica en un régimen no influenciado asumiendo una recarga total de $2.14 \text{ hm}^3/\text{a}$, correspondiente al promedio de los años hidrológicos comprendidos entre 1940 y 1967.

Analizando los resultados por demarcaciones (Tabla 9), el 75% ($1.61 \text{ hm}^3/\text{a}$) de las entradas se generan en la DHJ. La totalidad de la descarga se realiza a través del manantial ubicado en la DHJ en la zona de Crevillente con un caudal de 67.9 l/s ($2.14 \text{ hm}^3/\text{a}$). Además, dependiendo de la piezometría, hay transferencias en ambas direcciones.

Tabla 9. Balance hídrico en régimen estacionario por demarcación.

	Recarga lluvia (hm ³ /a)	Transferencia hacia DHJ (hm ³ /a)	Transferencia hacia DHS (hm ³ /a)	Descarga por manantiales (hm ³ /a)
DHJ	1.61	+2.06	-1.53	2.14
DHS	0.53	-2.06	+1.53	0
Total	2.14			2.14

Por otro lado, analizando los resultados por acuífero (Tabla 10), el 68% de las entradas y la totalidad de la descarga por el manantial se dan en Crevillente. También, la totalidad del flujo subterráneo se dirige hacia la cota superficial más baja localizada en el extremo oriental de la masa subterránea y de Crevillente.

Tabla 10: Balance hídrico en régimen estacionario por acuífero.

	Recarga lluvia (hm ³ /a)	Transferencias hacia Crevillente (hm ³ /a)	Transferencias hacia Argallet (hm ³ /a)	Descarga por manantiales (hm ³ /a)
Crevillente	1.46	+0.83	-0.15	2.14
Argallet	0.68	-0.83	+0.15	0
Total	2.14			2.14

A continuación, se muestra la superficie piezométrica resultantes del modelo en régimen no influenciado.

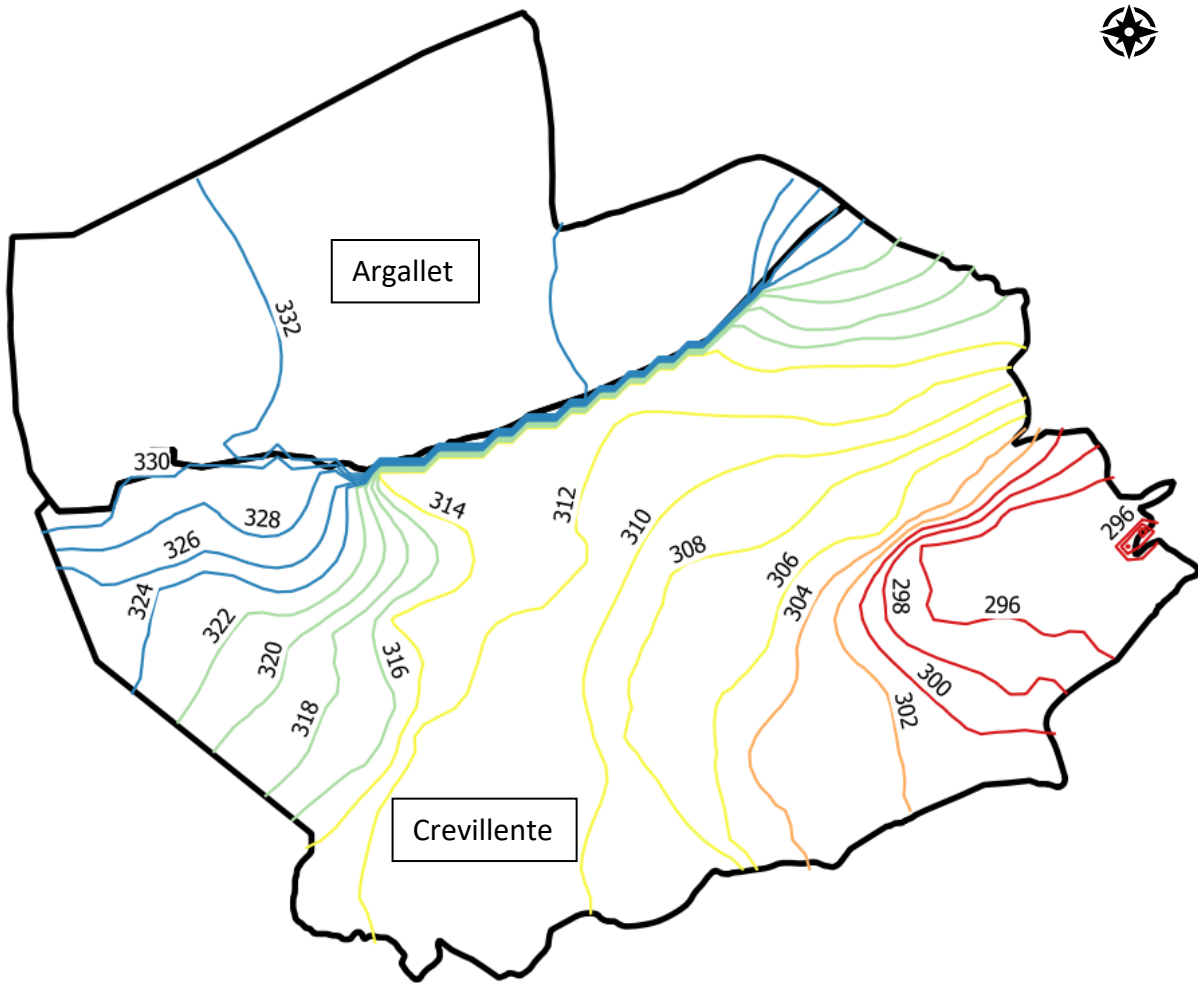


Figura 38. Superficie piezométrica en régimen estacionario

6.3 Balance hídrico en régimen transitorio

El modelo en régimen influenciado tiene en cuenta la influencia de las extracciones de agua mediante bombeo y los retornos asociados al uso agrícola de dichas extracciones durante los años hidrológicos comprendidos entre 1967 y 2021.

En la Tabla 11 se presentan los resultados del balance hídrico del modelo en régimen influenciado para un año promedio. Durante el análisis de las transferencias existentes entre ambas demarcaciones se ha observado la presencia de flujos hacia la CHJ, dependiendo de la piezometría presente. Observando el balance final, se puede ver que la CHS pierde en todo el periodo simulado con transferencias de flujo hacia la CHJ, las cuales se estiman en un promedio de $4.72 \text{ hm}^3/\text{a}$. La evolución de estas transferencias se muestra en la Figura 39, en la que los valores negativos indican que el flujo se dirige hacia la CHJ.

La extracción de agua por encima de la recarga del acuífero ha ocasionado un consumo de reservas en ambas demarcaciones, con una cantidad de 5.31 hm³/a en la CHJ y 6.35 hm³/a en la CHS. Esto ha generado una disminución generalizada de los niveles piezométricos, provocando que el manantial se haya secado y ya no tenga influencia en el modelo.

Tabla 11. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 1967/68-2020/21 (año hidrológico medio) por demarcación

	Recarga (hm ³ /a)	Transferencia hacia DHJ (hm ³ /a)	Transferencia hacia DHS (hm ³ /a)	Extracciones (hm ³ /a)	Consumo de reservas (hm ³ /a)
DHJ	2.83	+4.72	-1.77	14.63	5.31
DHS	0.60	-4.72	+1.77	0.44	6.35
Total	3.43			15.07	11.64

El mismo balance se realiza para el periodo considerado como representativo de las condiciones más actuales (2005/06-2020/21). Las extracciones medias anuales son de 13.23 hm³/a y 0.00 hm³/a en la DHJ y DHS, respectivamente. Los volúmenes de extracción de agua en ambas demarcaciones son menores en comparación con el periodo anterior analizado, o nulos en el caso de la CHS, lo que resulta en un menor consumo de reservas. Sin embargo, los resultados presentados en la Tabla 12 muestran que las salidas del sistema siguen siendo significativamente mayores que las entradas, lo que indica que todavía se está consumiendo reservas, aunque en menor cantidad que en la serie histórica.

Tabla 12. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 2005/06-2020/21 (año hidrológico medio).

	Recarga (hm ³ /a)	Transferencia hacia DHJ (hm ³ /a)	Transferencia hacia DHS (hm ³ /a)	Extracciones (hm ³ /a)	Consumo de reservas (hm ³ /a)	Aporte por demarcación (hm ³ /a)
DHJ	3.24	+4.24	-1.27	13.23	4.48	7.72
DHS	0.75	-4.24	+1.27	0.00	4.76	5.51
Total	3.99			13.23	9.24	13.23

En esta situación, la DHJ aporta un total de 7.72 hm³/a, procedente tanto de la recarga (3.24 hm³/a) como del vaciado de reservas (4.48 hm³/a). Por su parte, la DHS aporta 5.51 hm³/a, procedente también de la recarga (0.75 hm³/a) y del vaciado de reservas (4.76 hm³/a). De lo anterior se deduce que en régimen influenciado el balance entre aportaciones y explotaciones está algo desequilibrado a favor de la DHJ, con una transferencia media desde la DHS de 4.24 hm³/a.

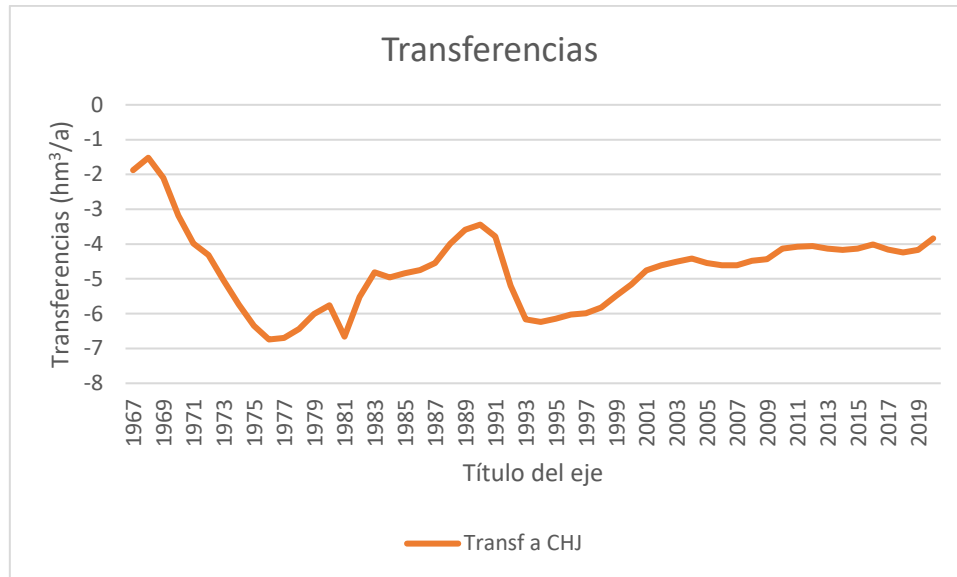


Figura 39. Evolución de las transferencias de flujo entre CHJ y CHS

La Figura 40 muestra la superficie piezométrica correspondiente al último paso de tiempo modelado, que corresponde a septiembre de 2021. La dirección preferencial del flujo es similar a la situación estacionaria, aunque se dirige hacia las zonas con mayores extracciones, como Tolomó y Galería de los Suizos. En estas áreas se encuentran las mayores depresiones con cotas muy por debajo de las de otras zonas de la masa de agua subterránea.

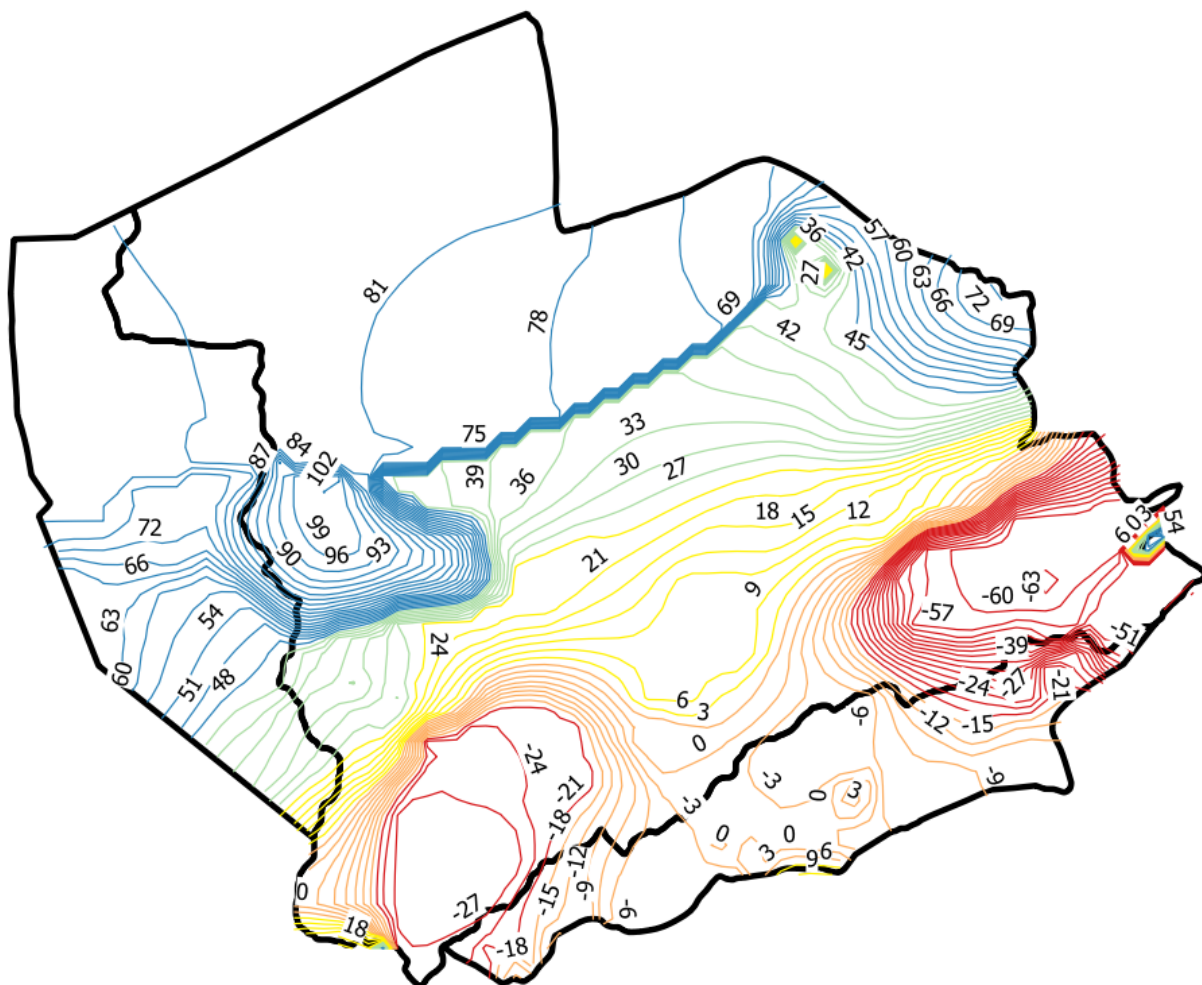


Figura 40. Mapa de isopiezas en régimen transitorio (septiembre 2021)

7 Análisis de los resultados

7.1 Estimación de las reservas

Con los resultados obtenidos en ambos modelos, se procede a calcular las reservas para el estado estacionario (anterior a la explotación de bombeos) y para la situación piezométrica de septiembre de 2021, siendo este el último paso de tiempo simulado en régimen influenciado.

Con la ayuda de herramientas SIG, el procedimiento adoptado es el siguiente:

1. Se obtienen los archivos ráster de resolución 200 m x 200 m correspondientes a las superficies piezométricas obtenidas por ambos modelos, coeficientes de almacenamiento y cota del muro.
2. Se calcula el volumen en cada celda como:

$$V_{ac} = [(P_C - M_C) * S_C] * A_C \quad \text{Ecuación 2}$$

donde V_{ac} es el volumen de agua (L^3), 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 (L^2).

3. Se suman los volúmenes de todas las celdas para obtener el volumen total de agua almacenado en la masa de agua subterránea.

El volumen total de agua existente en la masa de agua subterránea de Crevillente para el estado piezométrico de septiembre de 2021 se estima en 161 hm^3 que, adoptando los límites de las demarcaciones hidrográficas, 125 hm^3 corresponden a la CHJ. Las reservas calculadas para un régimen estacionario (sin afecciones en el sistema) se estiman en 359 hm^3 , un volumen de reservas que, en comparación con las de septiembre de 2021, se han visto reducidas en un 45%.

Cabe destacar que para establecer las reservas de una masa de aguas subterránea es necesario tener información precisa de la geometría y la porosidad ya que influyen directamente en el volumen. Como vimos anteriormente, estos parámetros en el modelo fueron estimados por lo que los valores representados anteriormente son una estimación aproximada.

7.2 Estado cuantitativo

El test del balance hídrico es una herramienta utilizada para evaluar el estado cuantitativo de la masa, es decir, la disponibilidad de agua subterránea en una determinada masa de agua subterránea. Se basa en comparar las extracciones con las recargas y descontar las necesidades ambientales para determinar si el uso del agua subterránea es sostenible o si se

está produciendo una explotación intensiva de la masa de agua subterránea. En el caso de la masa de Crevillente, se realiza un análisis de las explotaciones, recursos disponibles e índice de explotación en base al balance hídrico desde el año 2005/06 hasta el 2020/21.

La evaluación del estado cuantitativo de la masa de agua subterránea de Crevillente presenta cierta complejidad debido a su carácter intercuenca, lo que implica la necesidad de realizar la evaluación en ambas demarcaciones (DHS y DHJ). Sin embargo, como no hay extracciones en la zona correspondiente a la DHS, se realiza el análisis de la masa completa considerando tanto la recarga como las extracciones en toda la zona.

El cálculo del recurso disponible (RD, Ecuación 3) e índice de explotación (IE, Ecuación 4) se realiza de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

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

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

Se considera que una masa se encuentra en mal estado cuantitativo cuando el índice de explotación es mayor de 0.8.

La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones anteriores según los límites de las demarcaciones hidrográficas y el conjunto global de la masa.

Tabla 13. Explotaciones, recurso disponible e índice de sobreexplotación según la demarcación hidrográfica (periodo 2005/06-2020/21).

(hm ³ /a)	Explotaciones	Recurso disponible	Índice de explotación
DHJ	13.23	3.99	3.32

Según los resultados del índice de explotación, la masa de agua subterránea de Crevillente se encuentra en estado de sobreexplotación. Si se consideran los recursos disponibles promediados en el periodo de 2005/06-2020/21, se podría alcanzar un buen estado cuantitativo reduciendo globalmente las extracciones a 3.20 hm³/a. Sin embargo, es importante evaluar la respuesta del sistema ante esta disminución de extracciones, ya que se espera que el cambio climático tenga efectos en la recarga del sistema.

7.3 Distribución de los recursos hídricos

El carácter compartido de esta masa de agua subterránea conlleva a que la atribución de recursos hídricos pueda realizarse en base a dos criterios (IGME, 2020)

1. Según la cuenca adoptada: hidrológica (A1) o hidrogeológica (A2).
2. Según el origen de los recursos (B1) o forma de drenaje del recurso (B2).

Adicionalmente, estos criterios deben referirse al régimen del acuífero: estacionario (valores medios de los años hidrológicos 1940-1967) o transitorio (años hidrológicos 1967-2021 o 2005/06-2020/21 en base al balance hídrico que se analice).

7.3.1 Según la cuenca adoptada

En régimen natural y atendiendo las delimitaciones de las cuencas hidrográficas, el 75% de los recursos de la masa de Crevillente se generan en la DHJ y el 25% en la DHS. 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 14).

Tabla 14. Distribución de los recursos hídricos en régimen natural según se adopte la cuenca hidrológica o hidrogeológica

Criterio	DHJ (hm ³ /a)	DHS (hm ³ /a)	Total (hm ³ /a)
(A1) Cuenca hidrológica	1.61 (75%)	0.53 (25%)	2.14 (100%)
(A2) Cuenca hidrogeológica	2.14 (100%)	0.00 (0%)	

En el régimen alterado actual (influenciado), la asignación de recursos es más compleja debido al consumo de reservas del sistema y la creación de varios umbrales piezométricos, siendo los más significativos los ubicados en las explotaciones de El Tolomó y de la Galería de Los Suizos, ambos en la DHJ. Para analizar la distribución de recursos, se considerará el último periodo de 15 años (2005/06-2020/21), que se considera más representativo de la situación actual y futura de la MASb. Cabe destacar que el régimen de explotación ha experimentado numerosas modificaciones a lo largo del periodo analizado (1967/68-20/21).

En esta situación, si se tiene en cuenta el consumo de reservas, considerando los límites de las cuencas hidrológicas, el 58% del recurso procede de la DHJ y el 42% de la DHS. Por otro lado, considerando los límites hidrogeológicos, el 100% de los recursos corresponderían a la DHJ (Tabla 15).

Tabla 15. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado considerando la cuenca hidrológica

Criterio	DHJ (hm ³ /a)	DHS (hm ³ /a)	Total (hm ³ /a)
(A1) Cuenca hidrológica	7.72 (0.58%)	5.51 (42%)	13.23 (100%)
(A2) Cuenca hidrogeológica	13.23 (100%)	0.00 (0%)	

7.3.2 Según origen y forma de drenaje

En base al origen del recurso y el régimen hídrico del sistema, el recurso puede atribuirse teniendo en cuenta la recarga del acuífero en régimen natural (B1.1), la recarga del acuífero en régimen transitorio (B1.2) o atendiendo a la recarga y consumo de reservas en régimen transitorio (B1.3). Según el drenaje, este puede distribuirse según las salidas naturales (manantiales, ríos...) (B2.1) o las salidas naturales y artificiales (bombeos) (B2.2).

Los resultados para los periodos 1967/68-2020/21 y 2005/06-2020/21 se recogen en la Tabla 16 y en la Tabla 17, respectivamente. Los datos referidos al régimen estacionario corresponden al periodo 1940/41-1966/67.

Tabla 16. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 1967/68-2020/2021)

Criterio	Régimen hídrico	Tipo/subcriterio	DHJ (hm ³ /a)	DHS (hm ³ /a)	Total (hm ³ /a)
(B1) Origen	Estacionario	B1.1	1.61 (75%)	0.53 (25%)	2.14 (100%)
		B1.2	2.83 (83%)	0.58 (17%)	3.43 (100%)
	Transitorio	B1.3	8.14 (54%)	6.93 (46%)	15.07 (100%)
(B2) Drenaje	Estacionario	B2.1	2.14 (100%)	0.00 (0%)	2.14 (100%)
	Transitorio	B2.2	15.07 (100%)	0.00 (0%)	15.07 (100%)

Tabla 17. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 2005/06 - 2020/2021).

Criterio	Régimen hídrico	Tipo/subcriterio	DHJ (hm ³ /a)	DHS (hm ³ /a)	Total (hm ³ /a)
(B1) Origen	Estacionario	B1.1	1.61 (75%)	0.53 (25%)	2.14 (100%)

	Transitorio	B1.2	3.24 (81%)	0.75 (19%)	3.99 (100%)
		B1.3	7.72 (58%)	5.51 (42%)	13.23 (100%)
(B2) Drenaje	Estacionario	B2.1	2.14 (100%)	0.00 (0%)	2.14 (100%)
	Transitorio	B2.2	13.23 (100%)	0.00 (0%)	13.23 (100%)

7.4 Escenario futuro

Uno de los usos más valiosos y prácticos de un modelo es la predicción del futuro, es decir, conocer la respuesta del sistema bajo diferentes supuestos o hipótesis. Es importante tener en cuenta que los resultados de dichas predicciones se encuentran sujetas a un grado de incertidumbre que es necesario considerar.

El objetivo de esta sección es conocer la respuesta del sistema bajo los términos establecidos en el programa de actuación de las masas del Vinalopó declaradas en riesgo de no alcanzar el buen estado en 2027 sujetas a un escenario de cambio climático que afecta la recarga de este en un horizonte temporal de 2039.

En su reunión del 22 de septiembre de 2020, la Junta de Gobierno de la Confederación Hidrográfica del Júcar tomó varias decisiones, incluyendo la declaración de seis masas de agua subterránea en riesgo de no alcanzar un buen estado cuantitativo (BOE 71/2009, 2020). Entre dichas masas se encuentra la de Sierra de Crevillente. Con el fin de lograr un buen estado cuantitativo, se ha establecido un límite máximo anual de extracción para cada uno de los titulares de derechos. Este valor se reducirá durante el primer año hasta alcanzar un volumen de extracción equivalente a 1,2 veces el volumen establecido en el Plan Hidrológico del Júcar, y posteriormente se reducirá de manera lineal hasta alcanzar una explotación racional de los recursos disponibles y una recuperación de los niveles piezométricos. En la Tabla 18 y en la Figura 41, se muestran los objetivos año a año en la reducción de los derechos.

Tabla 18: Plan de actuación de la CHJ (BOE 71/2009, 2020)

Año	Inicio	2021/22	2022/23	2023/24	2024/25	2025/26	2026/27
Derechos	17.36	9.72	8.23	6.74	5.26	3.77	2.28
Objetivos extracciones	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28
Extracciones actuales	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10	8.10



Figura 41: Evolución de los derechos en las extracciones

Por otro lado, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) llevó a cabo un estudio que evaluó el impacto del cambio climático en la recarga de las masas de agua subterránea en España (CEDEX, 2021). Los resultados del estudio se actualizaron recientemente y se aplican al horizonte temporal de 2039, considerando cada una de las cuatro estaciones meteorológicas. En concreto, en Crevillente, no da porcentajes dado el bajo volumen de recarga. De todas maneras, en el Plan Hidrológico del Júcar (CHJ, 2023), se ha supuesto una reducción del 17.74%, en base a los valores de Argallet y otras masas del entorno para el escenario RCP 8.5.

Es preciso recordar que, los escenarios RCP (Representative Concentration Pathways) son modelos utilizados para simular diferentes trayectorias futuras de emisiones de gases de efecto invernadero y su impacto en el clima. Se utilizan para evaluar los posibles impactos del cambio climático en el futuro y para informar sobre políticas de mitigación y adaptación.

Cada escenario RCP se caracteriza por un valor numérico que indica la cantidad de radiación solar que se retendrá en la atmósfera y el calentamiento global proyectado para el año 2100. Cuanto mayor sea el valor numérico, mayor será el calentamiento global proyectado.

El escenario RCP 8.5 es el más extremo de los cuatro escenarios RCP y se basa en la suposición de que las emisiones de gases de efecto invernadero seguirán aumentando en el futuro sin ninguna acción significativa para mitigarlas. Este escenario representa un mundo en el que no se han tomado medidas significativas para abordar el cambio climático y se espera que el

calentamiento global supere los 4°C con respecto a los niveles preindustriales para finales del siglo XXI.

Por lo tanto, se toman 20 años de la serie de recarga pasada buscando que haya periodos secos y húmedos, y se reduce linealmente hasta alcanzar el porcentaje de reducción mencionado anteriormente.



Figura 42: Serie de recarga proyectada

En resumen, se plantea un escenario futuro con horizonte temporal 2039 en el cual se verán reducidas las entradas (recarga) y salidas (extracciones) del sistema. Debido a que el programa de actuación de la CHJ plantea un objetivo de extracciones sólo hasta 2027 y no hasta el 2039, las extracciones a partir del año 2027 se suponen constantes e iguales a 2.28 Hm³/año.

Introduciendo las nuevas entradas en MODFLOW y realizando la correspondiente simulación, se obtienen los mapas de alturas piezométricas de las Figura 43, Figura 44 y Figura 45.

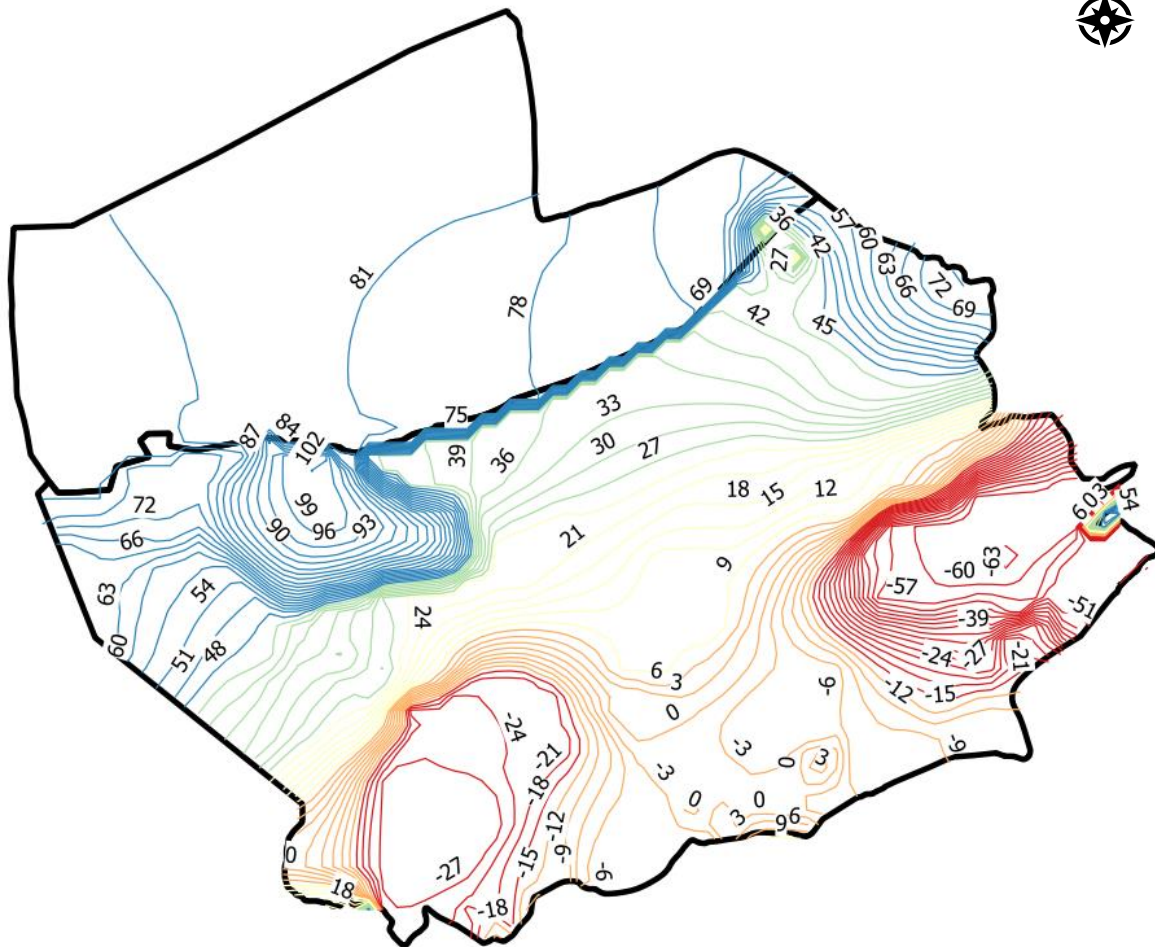


Figura 43: Mapa de isopiezas en septiembre 2021

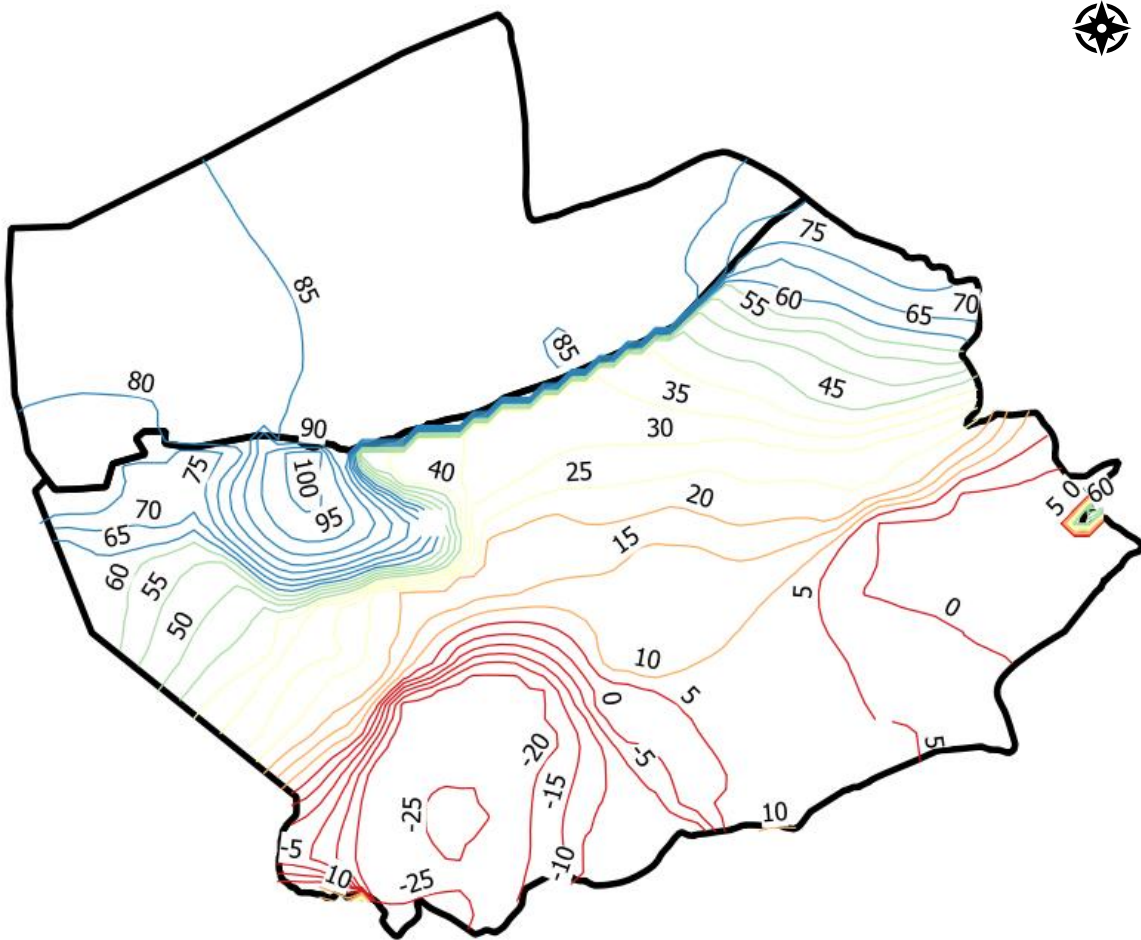


Figura 44: Mapa de isopiezas en septiembre 2027

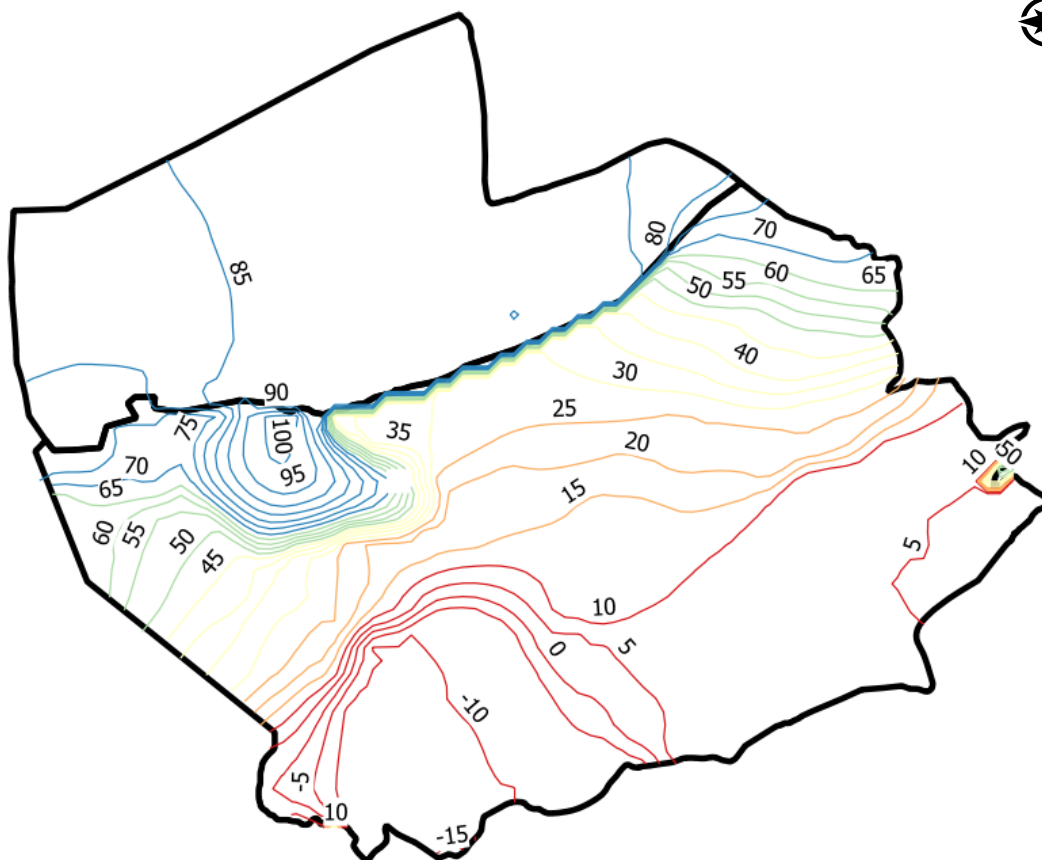


Figura 45: Mapa de isopiezas en septiembre 2039

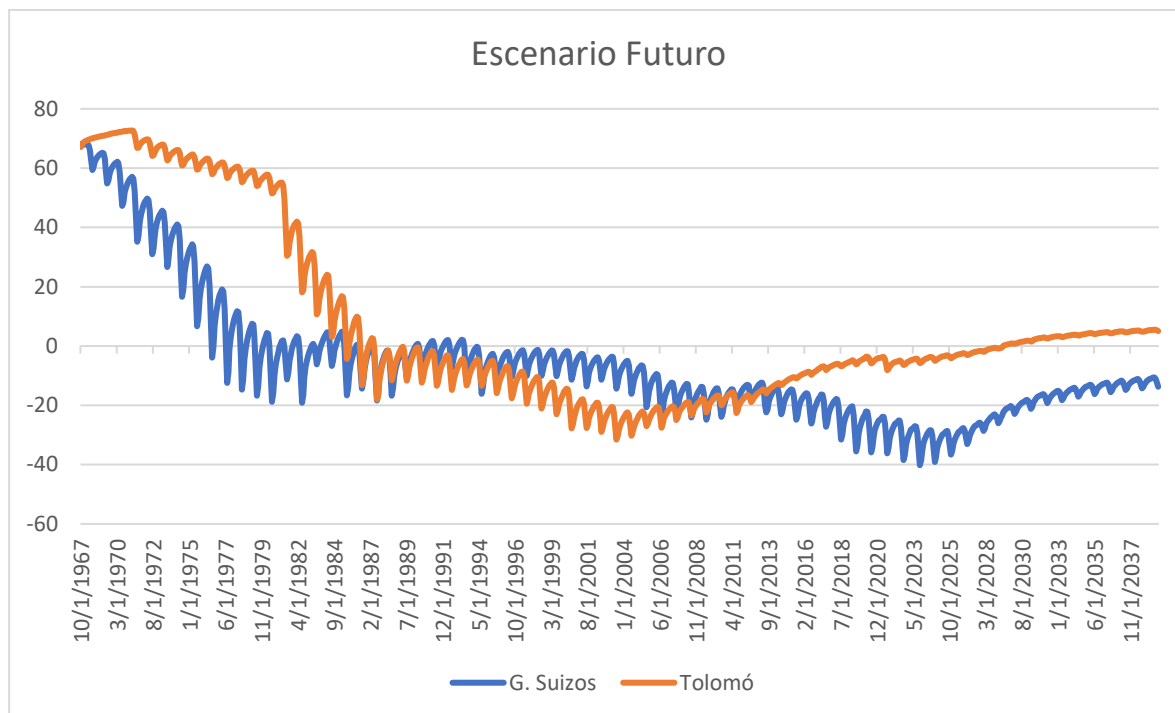


Figura 46: Evolución de niveles piezométricos en los sectores más críticos.

En la Figura 46 se ha representado la evolución de los niveles piezométricos en En las imágenes anteriores, se puede ver como con las medidas aplicadas en el programa de actuación propuesto por la CHJ junto a un escenario de cambio climático de RCP 8.5 con periodos húmedos y secos, los niveles piezométricos se recuperan y, en especial, en las zonas más críticas que son La Galería de los Suizos y el sector Tolomó.

Se puede ver que en Tolomó los niveles ya se estaban recuperando desde el año 2003 y para el año 2027 alcanza niveles piezométricos cercanos a 0 msnm. Esto quiere decir que se recuperan los valores que se tenían en los años 1980. En el caso de La Galería de los Suizos, para el año 2025 se alcanza su cota más baja para luego recuperar sus niveles hasta aproximadamente -13 msnm, niveles próximos a los de los años 2000.

Replicando el procedimiento realizado en la sección 7.2 para evaluar el estado cuantitativo del sistema entre los años 2027 y 2039 obtenemos:

Tabla 19. Índice de explotación para el periodo de 2027-39

(hm ³ /a)	Explotaciones	Recurso disponible	Índice de explotación
DHJ	2.28	3.62	0.63

Como se mencionó en dicha sección, se considera que una masa se encuentra en mal estado cuantitativo cuando el índice de explotación es mayor de 0.8. Por lo tanto, se puede ver que para el año 2039 la masa dejaría de estar sobreexplotada según los criterios del plan hidrológico. Hay que remarcar que, si se toma todo el periodo futuro simulado, es decir, del



2021 al 2039, el índice de explotación sería mayor y todavía seguiría entrando en categoría de mal estado cuantitativo.

Es importante tener en cuenta que, en los estudios futuros sobre cambio climático, debido a la incertidumbre inherente a los fenómenos climatológicos y al cambio climático, se deberían considerar varios escenarios de recarga para obtener múltiples resultados. A partir de estos resultados, se podría asignar estadísticamente la probabilidad de que ocurran distintos escenarios, lo que permitiría una evaluación más precisa de los posibles impactos del cambio climático en las masas de agua subterránea.

8 Discusión y conclusiones

El propósito de este trabajo consistió en desarrollar un modelo de flujo subterráneo para la masa de agua de Crevillente con la interfaz ModelMuse y el código MODFLOW. Previo a la definición de un modelo conceptual, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica que permitió estudiar en detalle los límites del sistema, así como la caracterización hidrogeológica del funcionamiento de la masa de agua.

Tras construir el modelo y evaluar su bondad de ajuste mediante indicadores estadísticos, se concluye que este reproduce de manera adecuada la piezometría del sistema. Además, su aplicación ha permitido realizar una estimación de las reservas, evaluar el estado cuantitativo y la distribución de los recursos hídricos, y poder realizar una predicción a futuro al simular un escenario hasta el año 2039/40, bajo diferentes suposiciones de recarga y explotación.

A continuación, se citan las principales conclusiones extraídas de los resultados del modelo. Ellas son:

- En régimen estacionario, analizando los resultados por demarcaciones, el 75% (1.61 hm³/a) de las entradas se generan en la DHJ. La totalidad de la descarga se realiza a través del manantial ubicado en la DHJ en la zona de Crevillente con un caudal de 67.9 l/s (2.14 hm³/a). Además, dependiendo de la piezometría, hay transferencias en ambas direcciones. Por otro lado, analizando los resultados por acuífero, el 68% de las entradas y la totalidad de la descarga por el manantial se dan en Crevillente. También, la totalidad del flujo subterráneo se dirige hacia la cota superficial más baja localizada en el extremo oriental de la masa subterránea y de Crevillente.
- En régimen influenciado (alterado por las extracciones) se producen descensos piezométricos generalizados de más de 300 m respecto al régimen no influenciado. Este fenómeno produce cambios significativos en el comportamiento hidrodinámico del sistema, con la aparición de direcciones preferentes del flujo subterráneo hacia las depresiones generadas por la concentración de captaciones.
- En cuanto al régimen transitorio, durante el análisis de las transferencias existentes entre ambas demarcaciones se ha observado la presencia de flujos hacia la CHJ, dependiendo de la piezometría presente. Observando el balance final, se puede ver que la CHS pierde en todo el periodo simulado con transferencias de flujo hacia la CHJ, las cuales se estiman en un promedio de 4.72 hm³/a.
- Las reservas calculadas para un régimen estacionario (sin afecciones en el sistema) se estiman en 359 hm³, un volumen de reservas que, en comparación con las de septiembre de 2021, se han visto reducidas en un 45%. Esto ha generado una disminución generalizada de los niveles piezométricos, provocando que el manantial se haya secado.

- Según los resultados del índice de explotación, la masa de agua subterránea de Crevillente se encuentra en estado de sobreexplotación. Si se consideran los recursos disponibles promediados en el periodo de 2005/06-2020/21, se podría alcanzar un buen estado cuantitativo reduciendo globalmente las extracciones a 3.20 hm³/a.
- La distribución de los recursos hídricos depende del régimen y criterio adoptado. En régimen natural y atendiendo las delimitaciones de las cuencas hidrográficas, el 75% de los recursos de la masa de Crevillente se generan en la DHJ y el 25% en la DHS. 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. Por otro lado, en régimen influenciado, considerando los límites de las cuencas hidrológicas, el 58% del recurso procede de la DHJ y el 42% de la DHS. Por otro lado, considerando los límites hidrogeológicos, el 100% de los recursos corresponderían a la DHJ.
- Para un escenario futuro con horizonte temporal 2039, en el cual se verán reducidas las entradas (recarga) y salidas (extracciones) del sistema según el escenario RCP 8.5 y con las medidas aplicadas en el programa de actuación propuesto por la CHJ, los niveles piezométricos aumentan en general y, en especial, en las zonas más críticas que son La Galería de los Suizos y el sector Tolomó. Además, la masa de agua subterránea dejaría de estar sobreexplotada según los criterios del plan hidrológico.
- De los resultados obtenidos en el escenario futuro, se debe destacar el hecho de que el plan de actuación fija un objetivo de extracción hasta el año 2027 pero no menciona como va a continuar luego de ese año. Se puede notar que, si bien según los resultados se pueden recuperar los niveles piezométricos y tener índices de explotación favorables, esto tarda varios años como todo proceso hidrogeológico. Por lo tanto, es imprescindible generar planes de actuación a largo plazo (coherentes con los tiempos de respuesta del acuífero) que no puedan verse modificados cuando se vea la mejoría parcial de la masa subterránea.
- En base al proceso de calibración, se puede observar que el coeficiente de eficiencia NASH se acerca a 1, lo cual indica que el modelo es confiable para generar predicciones futuras. Esto significa que el modelo desarrollado se convierte en una herramienta útil que las autoridades competentes pueden utilizar para llevar a cabo una gestión efectiva de los recursos disponibles en la masa de agua.

Por otro lado, las hipótesis formuladas en el modelo conceptual tienen un impacto en los resultados obtenidos del modelo. Estas hipótesis están estrechamente relacionadas con la falta de datos y las incertidumbres asociadas en la definición de las condiciones de contorno y la distribución de los parámetros. Por lo tanto, dichas limitaciones del modelo y los resultados son:

- Las oscilaciones en los datos reales de algunos piezómetros generan que haya un error cuadrático medio alto. Estas oscilaciones pueden deberse a errores de medición o



eventos puntuales que las hipótesis o simplificaciones del modelo no logran tener en cuenta.

- Debido a la resolución del DEM y la discretización del modelo, hay piezómetros con medidas observadas distintas que se encuentran en la misma celda, por lo que no se puede representar correctamente a ambos.
- Para establecer las reservas de una masa de aguas subterránea es necesario tener información precisa de la geometría y la porosidad ya que influyen directamente en el volumen.
- En los estudios futuros sobre cambio climático, debido a la incertidumbre inherente a los fenómenos climatológicos y al cambio climático, se deberían considerar varios escenarios de recarga para obtener múltiples resultados.

9 Recomendaciones

Se proponen las siguientes mejoras o estudios que se podrían llevar a cabo en el futuro:

- Incluir en el proceso de modelación una mayor heterogeneidad y anisotropía en la definición del acuífero, incluyendo variaciones en el espesor de capas, zonificaciones locales y una distribución espacial variable de la recarga.
- Evaluar el volumen de explotaciones máximas por demarcación que permitan el alcance del buen estado cuantitativo de la masa.
- Llevar a cabo una investigación exhaustiva de las extracciones existentes durante períodos sin información, con el fin de poder reproducir con mayor precisión los descensos piezométricos resultantes. Así como mejorar la modelización de la localización y profundidad de los pozos.
- Caracterizar la posible conexión hidráulica en las zonas de la Sierra del Reclot ya que puede condicionar la recarga real del sistema.
- Evaluar el impacto del cambio climático con distintos escenarios RCP y generar series estocásticas de recarga futura basado en la serie histórica con el fin de obtener varios escenarios probables y poder generar conclusiones basadas en estadística.

10 Referencias

- Andreu. (1997). *CONTRIBUCIÓN DE LA SOBREEXPLOTACIÓN AL CONOCIMIENTO DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS DE CREVILLENTE, CID Y CABEZO D'OR (PROVINCIA)*.
- BOE 71/2009. (2020). Boletón Oficial del Estado. *Boletín Oficial Del Estado*, 61561–61567.
- CEDEX. (2021). *Impacto del cambio climático en la recarga de acuíferos*. 1–33.
- CHJ. (2009). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2009 – 2015*.
- CHJ. (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria. Ciclo de planificación hidrológica 2015 – 2021*.
- CHJ. (2021). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2022 – 2027*.
- CHJ. (2023). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria. Ciclo de planificación 2022-2027*. 1–357.
- CHS. (2023). Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura. *Confederación Hidrográfica Del Segura, Ministerio de Medioambiente, Madrid*, 226 pp.
- De Galdeano, C. S., & Garrido, A. C. L. (2016). Transcurrencia y mélangé tectónica en el área de Sierra Arana (Cordillera Bética, NE de Granada). In *Estudios Geologicos* (Vol. 72). <https://doi.org/10.3989/egeol.42468.415>
- DPA. (2002). *Propuesta de Perímetro de Protección del Pozo de Abastecimiento Público a La Romana "Rambla Honda"*.
- DPA. (2008). *Mapa de Aguas de la Provincia de Alicante*.
- IGME. (2008). *Actualización del modelo matemático de flujo del acuífero de crevillente*.
- IGME. (2020). *JÚCAR-SEGURA SIERRA DE CREVILLENTE*.
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1984). *A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90106-x](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90106-x)
- MITECO. (2000). Libro blanco del agua en España. In *Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente*. Retrieved from http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos_Descargas/LB_LibroBlancoAgua.htm
- Pérez Martín, 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*.
- Winston, R. B. (2009). *A graphical user interface for MODFLOW – 2005 and PHAST: U.S.*



Geological Survey Techniques and Methods 6 – A29. Virginia.

IGME (1971-75). *Programa Nacional de Investigación de Aguas subterráneas (PIAS).*