

# Trabajo Fin de Máster

## *DEFINICIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE QUIBAS (ALICANTE-MURCIA, ESPAÑA)*

**Intensificación:**

*ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

**Autor:**

*SHEILA PIÑOL ALEMANY*

**Tutor:**

*EDUARDO CASSIRAGA*

**Cotutor/es:**

*LAURA TANCO BALLESTEROS*

**FEBRERO, 2022**



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
<b>Título del TFM en español:</b> Definición, caracterización y evaluación de los recursos hídricos de las masas de agua subterránea de Quibas (Alicante-Murcia, España).
<b>Título del TFM en inglés:</b> Definition, characterization, and evaluation of water resources in the Quibas groundwater bodies (Alicante-Murcia, Spain).
<b>Título del TFM en Valenciano:</b> Definició, caracterització i avaluació dels recursos hídrics de les masses d'aigua subterrània de Quibas (Alacant-Múrcia, Espanya).
<b>Alumno:</b> Sheila Piñol Alemany
<b>Tutor:</b> Eduardo Cassiraga
<b>Cotutor/es:</b> Laura Tanco Ballesteros
<b>Director experimental:</b>
<b>Fecha de Lectura:</b> febrero de 2022

Resumen
<p>La masa de agua subterránea de Quibas 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 mediante la realización de un modelo numérico de flujo con la plataforma ModelMuse (Winston, 2009) y el código MODFLOW (McDonald &amp; Harbaugh, 1984).</p> <p>Por lo que la hidrogeología sugiere, se da como válida la hipótesis de que no existen transferencias laterales entre masas vecinas. Se han identificado un total de cuatro unidades hidrogeológicas de origen carbonatado relevantes para el funcionamiento hidráulico de la masa. Estas son las calizas arrecifales del Eoceno medio, las calizas organógenas del Oligoceno, las calcarenitas del Mioceno y las dolomías y calizas del Liásico. Estas últimas forman parte del alóctono subbético que se superpone al autóctono prebético. Dicha configuración provoca un cambio del funcionamiento predominante del acuífero de tipo libre a semiconfinado debido a la presencia de materiales impermeables en la base de esta unidad suprayacente.</p>

El flujo de dirección y sentido NE-SO preferencial se ve interrumpido por la presencia de fallas estructurales que actúan como barreras hidráulicas que permiten reconocer la masa según cinco dominios hidrogeológicos que presentan cierto grado de conexión hidráulica entre ellos: Umbría, Madara, Chinorlet, Collado del Rey y Chícamo. La alimentación de la masa procede exclusivamente de la recarga producida por la infiltración de lluvia y de excedentes de retorno de riego. No se ha identificado ninguna relación río-acuífero y se reconoce el Manantial del Chícamo como la única salida natural del sistema. En régimen alterado, los bombeos constituyen otra salida del sistema. Para la calibración del modelo se dispone de 14 piezómetros y de una serie del caudal aforado del Manantial del Chícamo. La calibración se realiza en régimen transitorio por la insuficiencia de datos en régimen natural.

La evaluación de los recursos hídricos por demarcación se basa en la realización de balances hídricos en régimen natural y alterado. Según el periodo transitorio 2002/03-2019/20, considerado como representativo de la situación de las extracciones actuales, los recursos disponibles se estiman en 2.25 y 2.21 hm<sup>3</sup>/a para la cuenca del Júcar y Segura, respectivamente. Los resultados del índice de explotación indican que la masa se encuentra en mal estado cuantitativo en ambas demarcaciones, un estado que podría presentar mejoras con la disminución de las extracciones. Por lo que respecta a los recursos totales almacenados, estos se estiman en 963.35 hm<sup>3</sup> para septiembre de 2020. Finalmente, para satisfacer las demandas actuales se necesita una media de 5.11 hm<sup>3</sup>/año, con atribuciones del 63% y 37% para las cuencas del Júcar y del Segura, respectivamente.

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

## Resum

La massa d'aigua subterrània de Quibas presenta continuïtat hidrogeològica entre les demarcacions hidrogràfiques del Xúquer i del Segura, fet que suposa una complexitat afegida en l'avaluació i l'assignació dels recursos hídrics segons la demarcació. Amb la finalitat d'adoptar una gestió eficient i sostenible, el present treball defineix i caracteritza aquesta massa per avaluar els recursos existents mitjançant l'elaboració d'un model de flux amb l'ús de la plataforma ModelMuse (Winston, 2009) i el codi MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984).

Segons la hidrogeologia que configura el sistema, es dona com vàlida la hipòtesis de que no existeixen transferències de flux amb masses veïnes. S'han identificat un total de quatre unitats hidrogeològiques d'origen carbonatat rellevants per al funcionament hidràulic de la massa. Aquestes son les calcàries d'escull del Eocè mig, les calcàries organògenes del Oligocè, les calcarenites del Miocè i les dolomies i calcaries del Liàsic. Estes últimes formen

part del Subbètic al·lòcton que es superposa al Prebètic autòcton. Aquesta configuració provoca un canvi del funcionament predominant de l'aqüífer de tipus lliure a semi-confinat a causa de la presència de materials impermeables a la base d'aquesta unitat suprajacent.

El flux de direcció i sentit NE-SO preferencial, es veu interromput per la presència de falles estructurals que actuen com barreres hidràuliques que permeten reconèixer la massa segons cinc dominis hidrogeològics que presenten certa connexió hidràulica entre ells: Umbria, Madara, Chinorlet, Collado del Rei i Chícamo. L'alimentació del sistema procedeix exclusivament de la recarrega produïda per la infiltració de pluja i dels excedents de retorns agrícoles. No s'ha identificat ninguna relació riu-aqüífer i es reconeix la Font del Chícamo com l'única sortida natural del sistema. En règim alterat, les extraccions constitueixen una altra sortida del sistema. Per al calibratge del model es disposa de 14 piezòmetres i d'una sèrie del caudal aforat en la Font del Chícamo.

El calibratge es du a terme en règim transitori degut a la insuficiència de dades en règim natural. L'avaluació dels recursos hídrics per demarcació es basa en la realització de balanços hídrics en règim natural i alterat. Segons el període transitori 2002/03-2019/20, considerat com representatiu de la situació de les extraccions actuals, els recursos disponibles s'estimen en 2.25 y 2.21 hm<sup>3</sup>/a per a la conca del Xúquer i la del Segura, respectivament. Els resultats de l'índex d'explotació indiquen que la massa es troba en mal estat quantitatiu en ambdues demarcacions, un estat que podria millorar amb la reducció de les extraccions. Amb referència als recursos totals emmagatzemats, aquests s'estimen en 963.35 hm<sup>3</sup> par a setembre 2020. Finalment, per satisfer les demandes actuals es necessiten 5.11 hm<sup>3</sup>/a amb atribucions del 63% i 37% per a la conques del Xúquer i del Segura, respectivament.

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

### Summary

The Quibas groundwater body presents hydrogeological continuity between the Júcar and Segura Basin Districts which is a factor that gives an added complexity in the evaluation and allocation of water resources according to the district. To adopt efficient and sustainable management, this work defines and characterizes this body to assess groundwater resources through the performance of a numerical flow model with the ModelMuse platform (Winston, 2009) and MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984).

According to the hydrogeologic setting, it is validated the hypothesis that there are no lateral flux transfers with other groundwater bodies. The hydrogeological behaviour of the



system is determined by the presence of four hydrogeological units. These are the middle Eocene reef limestones, the Oligocene organogenic limestones, the Miocene calcarenites, and the Liasic dolomites and limestones. This last one is part of the allochthonous Subbetic that overlies the autochthonous Prebetic. This configuration causes a change of the predominant functioning of the aquifer from free to a semi-confined type due to the presence of impermeable materials in the base of this overriding unit.

The preferential NE-SW flow direction is interrupted by structural faults that act as hydraulic barriers. This setting allows the recognition of the groundwater body according to five hydrogeological domains with certain hydraulic connections among them. These domains are called Umbría, Madara, Chinorlet, Collado del Rey and Chícamo. The origin of the resources comes exclusively from the recharge produced by the infiltration of rainfall and irrigation return surpluses. No river-aquifer relationship has been identified. However, the Chícamo spring is acknowledged as the only natural outlet of the system. In an altered regime, the pump extractions configure an additional outlet of the system. Due to the lack of steady-state data, the calibration was performed in the transient state with 14 piezometers and a series of the gauged flow of the Chícamo spring.

The evaluation of water resources by demarcation is based on water balances in steady and transient states. According to the transient period 2002/03-2019/20, which is considered as representative of the current situation of water demands, the annual average available resources are 2.25 and 2.21 hm<sup>3</sup>/year for the Júcar and Segura basins, respectively. The results of the exploitation index indicate that the Quibas groundwater body has a poor quantitative condition in both districts, being a condition that could be improved by a reduction of the abstractions. Regarding the total stored resources, these are estimated at 963.35 hm<sup>3</sup> for September 2020. Finally, to meet the current demands it is needed an average of 5.11 hm<sup>3</sup>/year, with attributions of 63% and 37% for the Jucar and Segura basins, respectively.

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



## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la beca que la Confederación Hidrográfica del Júcar ha concedido a la autora, en el marco del convenio para realizar prácticas empresas que mantiene con la Universitat Politècnica de València.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos del modelo.....	2
1.2	Antecedentes.....	2
2	Contexto.....	5
2.1	Localización del área de estudio.....	5
2.2	Clima, temperatura y precipitación.....	7
2.3	Hidrología.....	8
2.4	Geología.....	9
2.4.1	Unidades litoestratigráficas.....	10
2.5	Usos de agua.....	12
3	Modelo conceptual.....	13
3.1	Unidades hidrogeológicas.....	14
3.2	Geometría y límites.....	14
3.3	Funcionamiento y dominios hidrogeológicos.....	17
3.3.1	Umbría.....	19
3.3.2	Chinorlet.....	20
3.3.3	Madara.....	21
3.3.4	Lo Geta.....	23
3.3.5	Collado del Rey.....	23
3.3.6	Chícamo.....	24
3.4	Captaciones.....	25
3.5	Recarga.....	26
3.5.1	Por precipitación.....	26
3.5.2	Recarga por retornos de riego.....	28
3.6	Flujos.....	29
3.7	Hipótesis y simplificaciones del modelo.....	29
4	Código utilizado.....	30
5	Construcción del modelo.....	31
5.1	Discretización horizontal.....	31
5.2	Discretización vertical.....	32



5.2.1	Base de las calizas arrecifales del Eoceno .....	33
5.2.2	Base de las calizas organógenas del Oligoceno .....	33
5.2.3	Base de las calcarenitas del Mioceno.....	33
5.2.4	Base de las dolomías y calizas del Liásico .....	33
5.2.5	Topografía del terreno .....	33
5.3	Discretización temporal.....	38
5.4	La condición inicial.....	38
5.5	Asignación preliminar de parámetros hidráulicos .....	39
5.6	Las condiciones de contorno .....	41
5.6.1	Paquete de recarga .....	42
5.6.2	Paquete de pozos .....	42
5.6.3	Paquete de drenes .....	43
5.7	Observaciones .....	43
5.7.1	Paquete de observación de alturas piezométricas .....	43
5.7.2	Paquete de observación de drenes.....	44
5.8	Solver .....	44
6	Calibración .....	45
6.1	Parametrización.....	45
6.2	Ajuste de series piezométricas .....	46
6.2.1	Umbría.....	47
6.2.2	Madara .....	49
6.2.3	Collado del Rey.....	51
6.2.4	Chinorlet.....	53
6.2.5	Chícamo.....	54
6.3	Balance hídrico en régimen estacionario .....	55
6.4	Balance hídrico en régimen transitorio .....	58
7	Evaluación de los recursos hídricos .....	62
7.1	Estimación de las reservas.....	62
7.2	Estado cuantitativo.....	62
7.3	Distribución de los recursos hídricos.....	63
7.3.1	Según la cuenca adoptada .....	64
7.3.2	Según origen y forma de drenaje .....	64



8	Discusión de los resultados.....	65
9	Conclusiones y recomendaciones.....	68
10	Referencias.....	71



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Índice de figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio. ....	6
Figura 2. Relieve de la zona de estudio. ....	7
Figura 3. Evolución de las precipitaciones anuales en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). ....	8
Figura 4. Evolución de las temperaturas en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). ....	8
Figura 5. Marco geológico general de la Cordillera Bética y localización del área de estudio. Fuente: modificado de Galdeano & Garrido (2016). ....	10
Figura 6. Mapa geológico escala 1:50.000. Fuente: modificado del mapa geológico escala 1:50.000 del servicio WMS GEODE (s.f.). ....	12
Figura 7. Localización y uso de las captaciones en 2010. ....	13
Figura 8. Mapa cartográfico y cortes hidrogeológicos. Fuente: modificado de IGME (2008b). ....	16
Figura 9. Mapa de isopiezas de abril 1973. Fuente: IGME (1984). ....	17
Figura 10. Mapa de isopiezas de septiembre 1983. Fuente: IGME (1984). ....	18
Figura 11. Piezometría y dominios hidrogeológicos internos. ....	19
Figura 12. Evolución piezométrica en el dominio Umbría. ....	20
Figura 13. Evolución piezométrica en el dominio Chinorlet. ....	21
Figura 14. Evolución piezométrica del dominio de Madara. ....	23
Figura 15. Evolución piezométrica en el dominio Collado del Rey. ....	24
Figura 16. Caudal aforado en el Manantial del Chícamo ....	25
Figura 17. Evolución anual de las extracciones estimadas: totales anuales y por demarcación hidrográfica. ....	26
Figura 18. Sectores de recarga por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL. .	27
Figura 19. Evolución anual de la recarga total por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL. ....	28
Figura 20. Superficies de regadío en el interior de Quibas. ....	29
Figura 21. Capas aflorantes del modelo. ....	32
Figura 22. Modelo Digital del Terreno de resolución 200 m x 200 m. ....	34

Figura 23. Mapa de espesores del acuífero de Quibas. ....	34
Figura 24. Celdas activas en azul para a) la capa 1, b) la capa 2, c) la capa 3 y d) la capa 4. ....	36
Figura 25. Perfiles de las capas del modelo. ....	37
Figura 26. Condiciones iniciales para el modelo en régimen transitorio. ....	39
Figura 27. Dominios hidrogeológicos y ubicación de las barreras hidráulicas en el modelo. .	41
Figura 28. Valores observados versus valores simulados para los pozos de control. ....	47
Figura 29. Calibración piezómetro 08.51.001. ....	47
Figura 30. Calibración piezómetro 08.51.004. ....	48
Figura 31. Calibración piezómetro 08.51.005. ....	48
Figura 32. Calibración piezómetro 08.51.006. ....	49
Figura 33. Calibración piezómetro 08.51.010. ....	49
Figura 34. Calibración piezómetro 08.51.011. ....	50
Figura 35. Calibración piezómetro 08.51.012. ....	50
Figura 36. Calibración piezómetro 08.99.009. ....	51
Figura 37. Calibración piezómetro 08.51.007. ....	51
Figura 38. Calibración piezómetro 08.51.008. ....	52
Figura 39. Calibración piezómetro PA12204. ....	52
Figura 40. Calibración piezómetro PA12198. ....	53
Figura 41. Calibración piezómetro 08.51.002. ....	53
Figura 42. Calibración piezómetro 08.51.009. ....	54
Figura 43. Calibración punto de control 273530001 (Manantial del Chícamo). ....	54
Figura 44. Mapa de isopiezas en régimen estacionario: a) Capa1; b) Capa 2; c) Capa 3; y d) Capa 4. ....	57
Figura 45. Evolución de las transferencias de flujo entre CHJ y CHS. ....	59
Figura 46. Mapa de isopiezas en régimen transitorio (septiembre 2020): a) Capa1; b) Capa 2; c) Capa 3; y d) Capa 4. ....	61



## Índice de tablas

Tabla 1. Espesor estimado máximo, mínimo y medio de las unidades hidrogeológicas de interés (IGME, 1980, 2008b). .....	14
Tabla 2. Características de las superficies de regadío ubicadas en los límites de Quibas. ....	28
Tabla 3. Datos relativos a la generación del mallado del modelo. ....	32
Tabla 4. Asignación preliminar de parámetros hidráulicos. ....	40
Tabla 5. Ubicación de las captaciones en el modelo en régimen influenciado. ....	42
Tabla 6. Posición, cota y conductancia (asignada preliminarmente) del Manantial del Chícamo. ....	43
Tabla 7. Posición y profundidad de los pozos de observación. ....	44
Tabla 8. Resultados de la calibración: unidades hidrogeológicas. ....	45
Tabla 9. Resultados de la calibración: barreras hidráulicas. ....	46
Tabla 10. Resultados de la calibración por dominios hidrogeológicos. ....	46
Tabla 11. Balance hídrico en régimen estacionario. ....	55
Tabla 12. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 1969/70-2019/20 (año hidrológico medio). ....	58
Tabla 13. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 2002/03-20019/20 (año hidrológico medio). ....	59
Tabla 14. Explotaciones, recurso disponible e índice de sobreexplotación según la demarcación hidrográfica (periodo 2002/03-2019/20). ....	63
Tabla 15. Distribución de los recursos hídricos en régimen natural según se adopte la cuenca hidrológica o hidrogeológica. ....	64
Tabla 16. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado considerando la cuenca hidrológica. ....	64
Tabla 17. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 1969/70-2019/2020)...	65
Tabla 18. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 2002/03-2019/2020)...	65



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## 1 Introducción

La delimitación de las masas de agua subterránea realizada en los Planes Hidrológicos de Cuenca actualmente vigentes se adapta a los límites propios de cada demarcación. Esta delimitación propicia a la comprensión de estas masas como masas de agua subterránea compartidas. A pesar de ello, la realidad física es otra dado que las divisorias hidrológicas no suelen coincidir con los límites hidrogeológicos de las masas, por lo que hace que existan masas de agua en demarcaciones contiguas conectadas hidrogeológicamente (DGA-CEDEX, 2017).

En este contexto, la masa de agua subterránea de Quibas, objeto de estudio del presente trabajo, es una de las seis masas que presenta continuidad hidrogeológica entre la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) y la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS). Atendiendo a lo expuesto anteriormente, esta masa se reconoce como masa de agua subterránea compartida con el nombre de Quibas y códigos de identificación 080-209 y 070.029 en la DHJ y DHS, respectivamente (CHJ, 2021b; CHS, 2021b). Su actual estado de sobreexplotación en la DHJ añade cierto requerimiento en mejorar el conocimiento de esta masa con la finalidad de realizar una gestión sostenible, eficiente y coordinada entre las distintas demarcaciones que la comparten y, así, alcanzar el buen estado cuantitativo. Para que sea efectiva dicha coordinación entre Planes Hidrológicos es necesario la identificación de los límites, la caracterización del funcionamiento hidrogeológico y la evaluación de los recursos hídricos presentes, así como la distribución de estos entre las cuencas afectadas.

Este estudio aborda la definición, caracterización y evaluación de los recursos hídricos de la masa de Quibas. La metodología empleada se basa en una primera revisión bibliográfica de toda la información previa existente acerca de la zona de estudio. Seguidamente, con la elaboración de un modelo conceptual, se define y caracteriza el funcionamiento hidrogeológico de la masa a una escala local que, posteriormente, se traduce a un modelo numérico de flujo con el uso de la interfaz de ModelMuse (Winston, 2009) y el código MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984). La aplicación de este modelo permite, finalmente, la evaluación de los recursos hídricos y su posible distribución entre las demarcaciones afectadas de forma coherente y justificada.

Adicionalmente, este modelo constituirá una herramienta que podrá ser utilizada por las administraciones competentes para realizar un seguimiento del comportamiento hidrogeológico en planificaciones futuras que atiendan a cambios en consumos, así como los impactos del cambio climático entre otros aspectos.

## 1.1 Objetivos del modelo

Este trabajo pretende alcanzar los objetivos que se exponen a continuación:

- Mejorar el conocimiento geológico e hidráulico de la masa de agua subterránea de Quibas con la elaboración de un modelo conceptual que defina y caracterice el funcionamiento de la masa en cuestión.
- Desarrollar un modelo numérico de flujo que comprenda el acuífero compartido entre demarcaciones como una masa de funcionamiento hidrogeológico único, y que permita reproducir el comportamiento real del sistema de forma eficiente.
- Analizar, en respuesta a las entradas y salidas del sistema, los recursos de la masa en un régimen natural y alterado por bombeos.
- Evaluar los recursos hídricos existentes y su potencial distribución según las demarcaciones hidrográficas afectadas.
- Proveer de una herramienta útil y competente a las administraciones afectadas que les permita resolver cuestiones sobre el funcionamiento de la masa bajo los distintos escenarios que se propongan y, así, mejorar la gestión de esta masa en planificaciones futuras.

## 1.2 Antecedentes

Las primeras referencias del sistema acuífero de Quibas se encuentran en los trabajos realizados por el Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE) en el año 1972 y, desde entonces, ha sido objeto de estudio hasta la actualidad. Su primer reconocimiento como sistema hidrogeológico, se encuentra en el Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en 1978, e incluye tanto los encuadres geológicos e hidrogeológicos del sistema, como los primeros estudios de cantidad y calidad con los datos registrados desde los inicios de la década de los 70.

En 1982, el IGME en colaboración con la Diputación Provincial de Alicante (DPA) realizan una síntesis de los avances de los estudios hidrogeológicos del acuífero de Quibas (IGME-DPA, 1982), todo ello manteniendo la geometría y los límites ya definidos con anterioridad en el documento del PIAS. Uno de los aspectos relevantes de este estudio es la proposición de una zonificación interna basada en las evoluciones de los niveles piezométricos según los mapas de isopiezas correspondientes a octubre de 1979, septiembre de 1980 y octubre de 1981 que, sin duda, marcan una situación de sobreexplotación. Hasta la fecha, este documento se posiciona como uno de los referentes históricos sobre la hidrogeología provincial de Alicante.

En IGME (1984), se comenta la situación hidrogeológica del área de estudio en cuestión. Adicionalmente, se reporta la relevante influencia que tiene la explotación “El Bilillo” sobre los caudales del Manantial del Chícamo debido a su existente conexión hidráulica con la ayuda de la elaboración de dos mapas de isopiezas correspondientes a abril de 1973 y septiembre de 1983. El primero responde a un funcionamiento de Quibas poco influenciado con un sentido de flujo predominante NE-SO con niveles piezométricos entre 470 y 355 m.s.n.m. que, al cabo de 10 años de explotaciones intensas, se reducen entre 420 y 355 m.s.n.m. con direcciones de flujo que reflejan una compartimentación interna de dominios hidrogeológicos.

En 1987, el IGME, con participación de la Empresa Nacional ADARO de Investigaciones Mineras, S.A., realiza una actualización de los puntos de agua y explotación del acuífero (IGME, 1987a). Para este año, el sistema de Quibas se configura con 18 puntos de extracción que suman un volumen total de 12 hm<sup>3</sup>, del cual un 80% se destina a usos agrícolas, y un punto de drenaje de casi 1 hm<sup>3</sup> correspondiente al Manantial del Chícamo.

A pesar de que ya se habían reconocido respuestas de funcionamiento hidrogeológico compartimentado, en este último trabajo mencionado se contempla oficialmente por primera vez. Los subsistemas de acuíferos reconocidos son La Umbría en el noreste, Madara en la parte central, Collado del Rey en el suroeste y, finalmente, Chícamo en el sureste con la integración del Manantial del Chícamo a cota de surgencia 355 m.s.n.m. Esta compartimentación queda claramente reflejada en el mapa de isopiezas de febrero de 1988 con niveles y direcciones de flujo diferentes en cada dominio.

Los resultados expuestos en IGME (1989), revelan una disminución sistemática de las reservas y niveles piezométricos del acuífero, una reducción de caudal extraído por la disminución del rendimiento de los bombeos, una degradación del estado cualitativo del agua por una progresiva salinización sobre todo en el sur del sistema, y una recuperación paulatina del Manantial del Chícamo. Todas ellas son características que, conjuntamente, hacen que Quibas reúna todas las circunstancias que marca la Ley de Aguas para una resolución favorable de la declaración de la masa en mal estado cuantitativo.

En MOPU-IGME (1990), respaldado con la previa publicación IGME-DGOH (1988), se cataloga a Quibas como una Unidad Hidrogeológica (UH) de carácter intercuenca compartida entre la CHJ y la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) con códigos 08.51 y 07.11, respectivamente.

En ITGE (1993) se evalúan las reservas de 8 acuíferos, entre ellos el de Quibas, con la aplicación de un método gráfico basado en los mapas de isohipsas del techo y muro de la formación permeable principal. Estos estudios propician un ajuste de los límites del acuífero con una modificación importante en la zona central en el que se desagrega del sistema de Quibas la zona oeste del dominio de Madara, hoy en día conocido como Chinorlet.

En MMA (2000), se sintetizan las características de las UH intercuenas desarrolladas en MOPT (1993). La posterior adaptación de la Directiva Marco del Agua de octubre de 2000 divide la masa de agua subterránea de Quibas en dos según el límite entre cuencas hidrológicas: Sierra del Reclot en la CHJ (080.076) y Quibas en la CHS.

En DPA (2002), se modifican de nuevo los límites del acuífero puesto que se detecta que las cotas piezométricas del bloque subbético cabalgante en la zona de la Sierra de Argallet son coincidentes con la piezometría del Acuífero de Argallet y, por tanto, externas al sistema de Quibas. Esta modificación implica, además de cambios geométricos, una reducción de la superficie de recarga por infiltración de lluvia.

En DPA (2008), el Departamento del Ciclo Hídrico de la DPA recoge toda la información hidrogeológica más actual de la masa de agua subterránea de la provincia, incluyendo el acuífero en cuestión. Además, incluye una cuantificación de volúmenes de explotación, recargas, transferencias y salidas por manantiales existentes.

En 2008, se utiliza el código MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000) para la elaboración del primer modelo matemático de flujo del acuífero de Quibas dentro del convenio de colaboración entre el IGME y la DPA (IGME, 2008a) con el fin de mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de estas masas y, a la vez, construir una herramienta para la gestión de los recursos existentes. Sin embargo, la modelización de Quibas no es completa ya que el modelo, tratado como un sistema cerrado, solo tiene en cuenta la parte de la masa de agua subterránea incluida dentro de los límites provinciales de Alicante, cuya continuidad hidrogeológica con la provincia murciana se realiza a través de un límite abierto con unas transferencias laterales.

En 2009, la CHJ incorpora, en el nuevo plan hidrogeológico 09/15 (CHJ, 2009; CHS, 2009), la actualización de los límites de la masa de agua subterránea de la Sierra del Reclot (080.187) y Sierra de Argallet (080.188) acorde con los estudios realizados por la DPA en el 2002.

En INTECSA-DPA (2012), se realiza un nuevo estudio elaborado por la DPA a cargo de la empresa INTECSA-INARSA. Como resultado de este proyecto, la masa de Quibas incorpora un nuevo dominio hidrogeológico de aproximadamente 1 km<sup>2</sup> de extensión ubicado en la Sierra del Coto, en donde se encuentra la cantera de calizas marmóreas comercializadas como “Crema Marfil”. Además, se añade, de nuevo, el bloque subbético cabalgante de la Sierra de Argallet dentro de la delimitación de Quibas con motivo de la aportación de datos del piezómetro 08.51.014 (Barranco del Aire) que pone en contacto el subbético con los carbonatos del Eoceno. Por otra parte, se mantienen los dominios Umbría, Chícamo y Chinorlet como dominios hidrogeológicos prácticamente independientes por la falta de conexión hidráulica con el resto del sistema, donde este último se define como un acuífero colgado.

En 2021, la CHS y CHJ acuerdan cambios de nombre entre masas compartidas para tener el mismo en ambas demarcaciones y, así, reflejar la continuidad hidrogeológica existente. En este caso, la masa de agua subterránea de la Sierra del Reclot (080.187) en la CHJ adquiere el nombre de la CHS y pasa a denominarse Quibas (080-209). Adicionalmente, la CHJ acepta la nueva delimitación realizada por DPA-INTECSA la cual incluye el sector Jurásico de la Sierra del Reclot que antes formaba parte de la masa de la Sierra de Argallet. Todos los cambios mencionados quedan reflejados en el nuevo Plan Hidrogeológico 22-27.

Finalmente, en IGME (2021), recoge un estudio realizado en la masa de agua subterránea de Quibas con las nuevas delimitaciones definidas. Con el soporte del modelo de flujo subterráneo elaborado con el software RENATA, en esta misma memoria se reporta que el sistema se encuentra en un estado de acusada sobreexplotación y, adicionalmente, se indican distintas propuestas de distribución de recursos para uso de los organismos competentes.

## 2 Contexto

### 2.1 Localización del área de estudio

La masa de agua subterránea de Quibas se ubica en el extremo occidental de la provincia de Alicante cuyo desarrollo hidrogeológico tiene continuidad en la Comunidad Murciana (Figura 1). Se trata de un acuífero intercuenca con una extensión total de 272.37 km<sup>2</sup> de los que 138.03 km<sup>2</sup> corresponden a la Demarcación Hidrográfica del Segura y 134.34 km<sup>2</sup> a la del Júcar, identificadas en el Plan Hidrológico 22/27 con los códigos de masas 070.029 y 080-209, respectivamente.

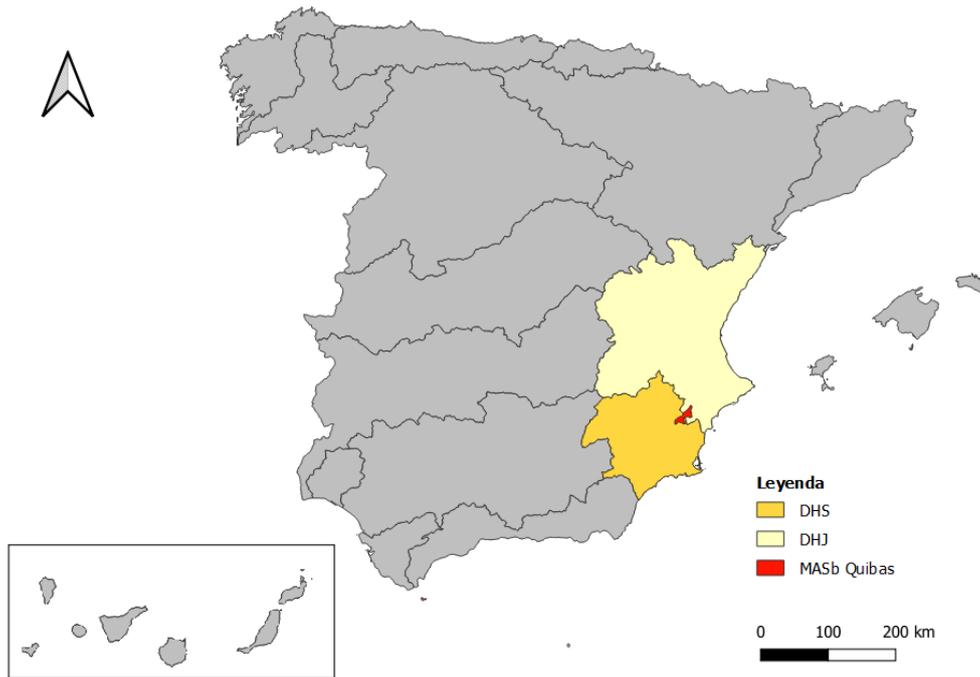


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Dentro de este sistema se encuentran poblaciones como La Romana y La Algueña, entre otras. La orografía de esta zona está claramente marcada por estructuras tectónicas como fallas y pliegues que dan lugar a la Sierras de Quibas y Barinas al Sur, Reclot al Norte y Pedrizas y Umbría al Este y Noreste (Figura 2). La cota más alta es de 1,055 m.s.n.m. correspondiente al Alto de la Teula en la Sierra del Reclot y la más baja es de 347 m.s.n.m. en el nacimiento del río Chícamo, esta última definida en los primeros estudios a 355 m.s.n.m. (IGME, 1984, 1987b, 1989). Este manantial configura el punto de descarga principal y casi único del sistema.

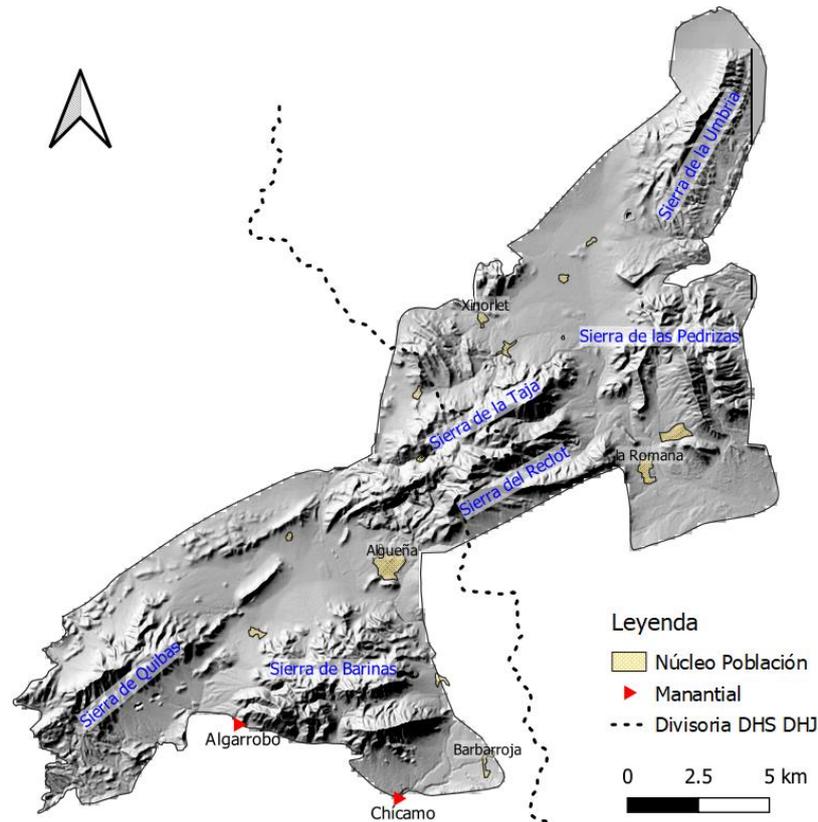


Figura 2. Relieve de la zona de estudio.

## 2.2 Clima, temperatura y precipitación

El clima del área de estudio se puede definir como típico del mediterráneo de carácter semiárido, con precipitaciones de gran irregularidad interanual e intensas sequías estivales.

En la zona de la DHJ, las temperaturas medias anuales rondan los 16°C con estaciones invernales suaves de 9°C y veranos más cálidos de 24°C, aunque a veces de carácter más marcado con mínimos de 4°C en febrero y máximos de 30°C en agosto, pudiendo alcanzar los 37°C en días puntuales. Por lo que respecta a las precipitaciones, esta zona se caracteriza por medias anuales de 340 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.

En la Figura 3 y la Figura 4 se muestran los datos de precipitación y temperatura, esta última variable con la media móvil para 12 meses. Ambas variables se obtienen del modelo de PATRICAL (Pérez Martín, 2005) para el código sector número 8160500, correspondiente a la zona del acuífero dentro de la delimitación de la DHJ.

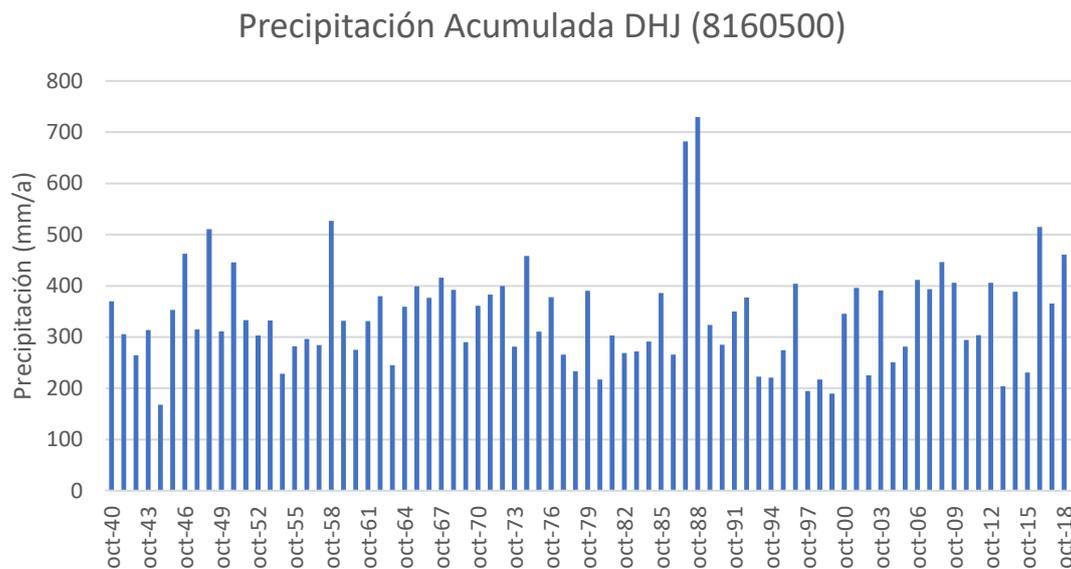


Figura 3. Evolución de las precipitaciones anuales en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).

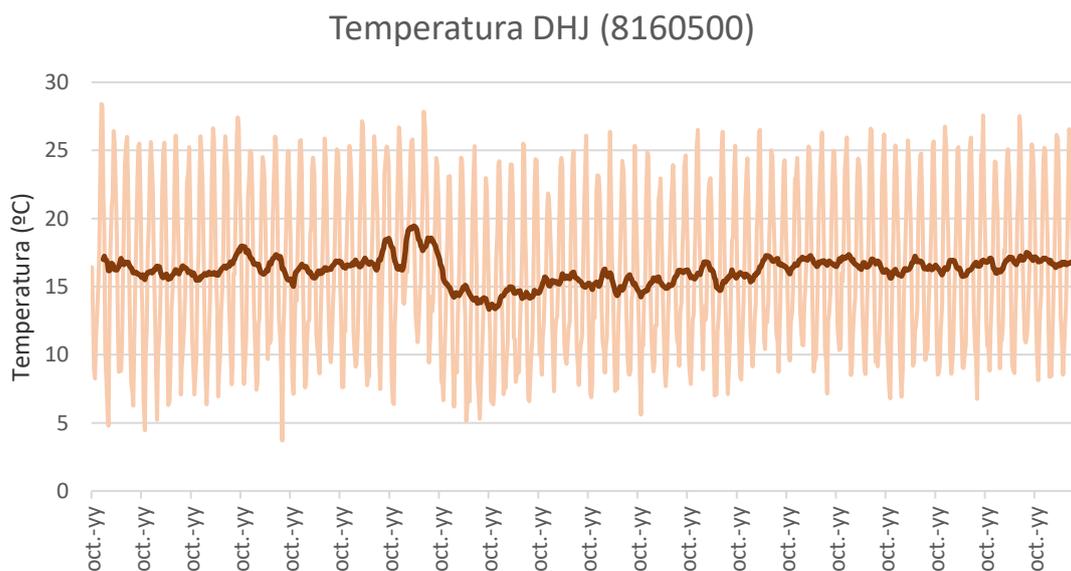


Figura 4. Evolución de las temperaturas en la DHJ. Fuente: elaborado con datos del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).

## 2.3 Hidrología

Los únicos cursos fluviales existentes dentro de los límites de la masa de agua subterránea de Quibas corresponden a ramblas, como por ejemplo son la Rambla del Derramador y la Rambla de la Gorra, ambos afluentes del Río Vinalopó (IGME, 2008a). Por otra parte, cabe destacar la presencia del Manantial del Chícamo y la Fuente del Algarrobo referenciados con los códigos 273530001 y 273520027, respectivamente.

El Manantial del Chícamo, conocido históricamente como el Nacimiento del Río Chícamo, se reconoce como la única salida subterránea natural del acuífero de Quibas que, hasta día de hoy, no ha llegado a secarse a pesar de la fuerte explotación existente. Por lo que respecta a la Fuente del Algarrobo, se trata de una fuente natural ubicada también en la DHS con registros hidrométricos escasos de caudal promedio de 0.8 l/s. Ambas surgencias se ubican en la zona meridional de la DHS (Figura 2), a una cota de 347 y 495 m.s.n.m., respectivamente, originando un espacio natural de mucho interés ambiental (CHS, 2019).

## 2.4 Geología

Dentro del marco geológico regional, la masa de agua subterránea de Quibas se localiza en la zona oriental de la Cordillera Bética, lo cual ocupa gran parte del sur de la península Ibérica (Figura 5). Juntamente con el Rif del norte de África, la cordillera Bética es uno de los elementos más occidentales del conjunto de cadenas alpinas circunmediterráneas (López Geta et al., 2015).

Concretamente en el área de estudio, la génesis de la Cordillera Bética viene marcada por un ambiente tecto-sedimentario en el que el dominio Subbético Medio, de materiales alóctonos, cabalga sobre formaciones neógenas que descansan sobre el Prebético Interno Meridional de materiales paralóctonos. Encima de todas estas formaciones se encuentran los materiales del cuaternario que quedan depositados discordantemente sobre las depresiones topográficas existentes. Esta serie de sucesos viene, además, acompañada de estructuras geológicas que condicionan el funcionamiento hidrogeológico de la masa en cuestión. Los elementos estructurales que configuran el acuífero de Quibas y sus proximidades son los siguientes:

- Cabalgamiento del Subbético: está representado en la Sierra del Reclot y se compone por materiales comprendidos entre edades Jurásicas y del Mioceno Inferior. Con traslación hacia el norte, estos descansan sobre las diferentes unidades del Prebético.
- Pliegues del Prebético: este dominio se caracteriza por la presencia de pliegues sinformes y antiformes de orientación axial dominante N60°-70°E y fallas inversas con cabalgamientos asociados de vergencia hacia el NNO-NO.
- Corredores extensionales y diapiros: las estructuras geológicas del Prebético se ven interrumpidas por fallas transversales de orientación NO-SE que permiten la intrusión de materiales salinos propios de las Facies Keuper del Triásico. Por ejemplo, se encuentran el corredor del Vinalopó en el oeste de Alicante.

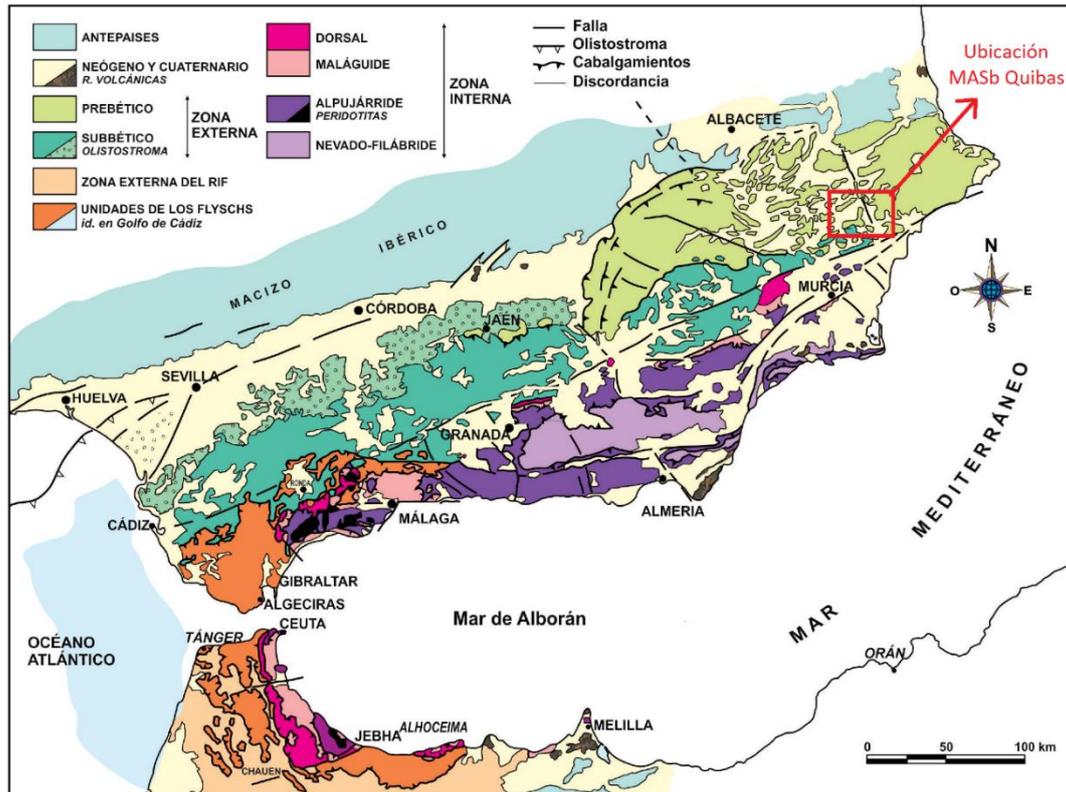


Figura 5. Marco geológico general de la Cordillera Bética y localización del área de estudio. Fuente: modificado de Galdeano & Garrido (2016).

#### 2.4.1 Unidades litoestratigráficas

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, las unidades litoestratigráficas que conforman el acuífero de Quibas pueden agruparse según pertenezcan a formaciones del cuaternario, del neógeno, del dominio subbético o del dominio prebético que, ordenadas de techo a muro, configuran la serie que se describe a continuación (IGME, 2008b). Los afloramientos de estas formaciones en el área de estudio quedan reflejados en la Figura 6.

- Formaciones cuaternarias:
  - Abánicos aluviales del Cuaternario (Q): se compone por depósitos mixtos de arenas, arcillas y conglomerados provenientes de abánicos aluviales. Se estima que tienen una permeabilidad media-baja ( $10^{-4}$  a  $10^{-8}$  m/s).
  - Aluvial del Plioceno-Holoceno (Pl): depósitos mixtos de conglomerados, areniscas y arcillas de permeabilidad media-baja ( $10^{-4}$  a  $10^{-7}$  m/s).
- Dominio subbético:
  - Dolomías y calizas del Jurásico Lías-Dogger (Jcd): se compone por rocas carbonatadas masivas y tableadas de gran importancia hidrogeológica con un

grado de permeabilidad secundario muy elevado (superior a  $10^{-4}$  m/s) asociado a la karstificación y fracturación presente.

- Facies Keuper del Triásico superior (Tk1): se tratan de arcillas yesíferas con intercalaciones de areniscas y carbonatos. No tienen una geometría definida y se caracterizan con una permeabilidad muy baja (inferior a  $10^{-8}$  m/s). Estos materiales configuran la unidad de despegue del encabalgamiento de la secuencia subbética sobre la prebética en el que, su carácter impermeable, genera comportamientos semiconfinados en los acuíferos del dominio prebético. Por tanto, la base de esta unidad descansa discordantemente sobre el dominio prebético.
- Formaciones neógenas:
  - Calizas margosas del Mioceno medio-superior (M3m): unidad con predominio de materiales carbonatados con intercalaciones margosas y bancos arrecifales cuyo conjunto se estima que tiene una permeabilidad media-baja (entre  $10^{-5}$  y  $10^{-7}$  m/s).
  - Calcarenitas y margas arenosas del Mioceno medio-superior (M2c): margas blancas con intercalaciones de estratos más calcáreos o areniscos. Normalmente aparecen laminadas con indicios de bioturbación. En general se estima de baja permeabilidad (entre  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$  m/s).
  - Calizas con algas y biocalcarenitas del Mioceno inferior-medio (M1c): se trata de un estrato de permeabilidad media-alta por fracturación (entre  $10^{-2}$  y  $10^{-6}$  m/s) que forma parte del acuífero principal.
- Dominio prebético:
  - Calcarenitas, conglomerados y margas del Oligoceno (Ocg y O2c): unidad muy heterogénea compuesta por conglomerados, calizas, areniscas, calizas de algas, calcarenitas, margas y arcillas, todas intercaladas entre sí. Aunque esta unidad conjunta se caracteriza con una permeabilidad media-baja debido a la presencia de margas alternantes forma parte del acuífero principal (entre  $10^{-5}$  y  $10^{-8}$  m/s).
  - Calizas arrecifales del Eoceno Ypresiense-medio y Luteciense (Ec): constituyen un acuífero carbonatado en profundidad formado por calizas y biocalcarenitas en bancos con pequeñas intercalaciones de secuencias margosas. Su elevada

permeabilidad (superior a  $10^{-4}$  m/s) viene dada por su génesis y procesos de karstificación y fisuración.

- Arcillas margosas del Paleoceno y Eoceno Ypresiense (Em y Psm): se trata de un conjunto margoso con sucesiones de arcillas masivas y yesos esporádicos de permeabilidad muy baja (entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  m/s).
- Margocalizas del Cretácico (C'm): unidad esencialmente margosa y calizas arenosas de permeabilidad muy baja (entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  m/s).
- Fácies Keuper del Triásico superior (Tk2): constituidos por limonitas rojizas con intercalaciones de areniscas y dolomías en el que también se encuentran laminaciones de formaciones yesíferas y margas. Materiales que, conjuntamente, dan un comportamiento prácticamente impermeable a la unidad (menor a  $10^{-8}$  m/s).

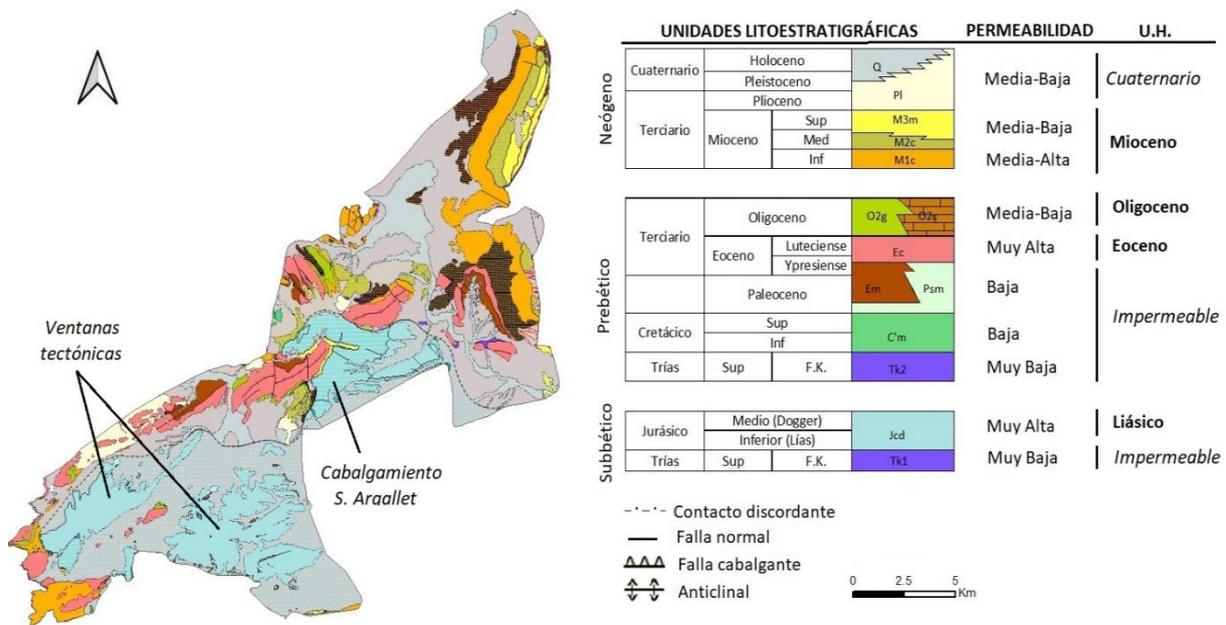


Figura 6. Mapa geológico escala 1:50.000. Fuente: modificado del mapa geológico escala 1:50.000 del servicio WMS GEODE (s.f.).

## 2.5 Usos de agua

El sistema de Quibas está altamente influenciado por la presencia de extracciones de agua a través de captaciones. Estos bombeos se caracterizan de uso intensivo a partir del año 1969/70 (IGME, 2021), cuya evolución histórica ha provocado continuos descensos piezométricos que han supuesto una disminución progresiva del caudal surgente en el

Nacimiento del Río Chícamo. Antiguamente, el caudal de este manantial desarrollaba un papel muy importante ya que suponía un volumen de agua que podía ser utilizado para el riego de superficies agrícolas próximas a este cauce. Se trata de un uso tradicional que quedó altamente afectado por estas extracciones.

El continuo descenso piezométrico, junto a la degradación de la calidad química del agua en algunas zonas por problemas de salinización y alcalinización como consecuencia de que los diapiros triásicos contienen gran cantidad de sal común (IGME, 1986), ha supuesto que muchos de los pozos se vean obligados a realizar cambios en la ubicación y profundidad de la captación a lo largo de los años.

En 2010, el acuífero de Quibas estaba expuesto a un total de 28 pozos activos de uso variado, 12 de ellos pertenecientes a la DHS (Figura 7). En esta demarcación, el volumen explotado ascendió a 2.57 hm<sup>3</sup>/a del cual el 84% fue destinado a usos industriales y el resto a usos agrícolas y urbanos, este último tratándose de una demanda inferior al 0.05%. Por lo que respecta a la DHJ, el volumen explotado en 2010 alcanzó los 3 hm<sup>3</sup>/a del cual el 96% fue destinado a demandas agrícolas, el 3% a demandas urbanas y el resto a demandas ganaderas.

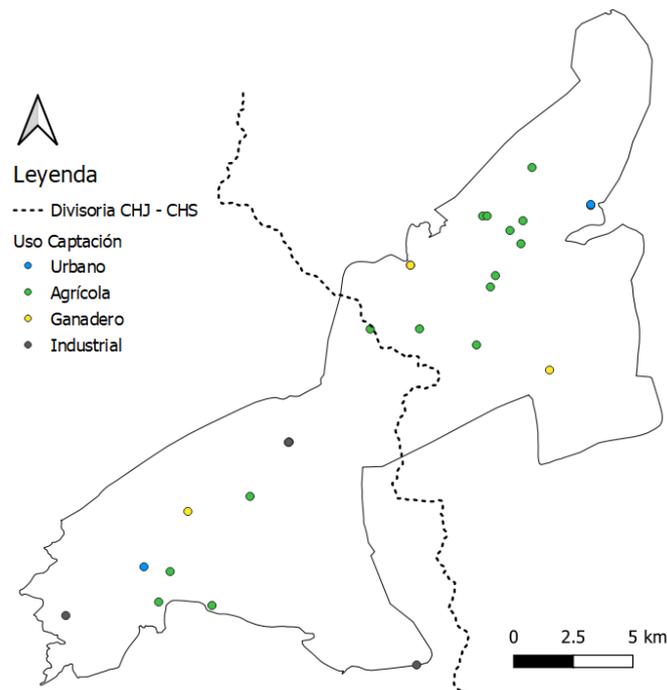


Figura 7. Localización y uso de las captaciones en 2010.

### 3 Modelo conceptual

Previo a la elaboración de un modelo matemático de flujo es de suma importancia disponer de un modelo conceptual que recoja todas aquellas características que permitan caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema tales como la revisión de piezometría,

identificación de unidades hidrogeológicas y condiciones de contorno. Por consiguiente, en este apartado se exponen todas aquellas particularidades que permitan abordar la modelización matemática de la masa de agua subterránea en cuestión.

### 3.1 Unidades hidrogeológicas

A partir de la agrupación de unidades litoestratigráficas contiguas y de comportamiento hidráulico similar, el acuífero de Quibas queda configurado por un total de cuatro unidades hidrogeológicas que descansan sobre el impermeable de base, a excepción de las dolomías y calizas del Liásico correspondientes a la serie subbética que reposan sobre los materiales triásicos de despegue impermeables (IGME, 1980).

En base a datos de ensayos de bombeo realizados en estudios precedentes, en el trabajo realizado por el IGME (2008b) se recopilan los rangos de permeabilidades hidráulicas que conforman dichas unidades hidrogeológicas. Sin embargo, no es mucha la información existente sobre la porosidad eficaz o coeficientes de almacenamiento de estas unidades. Durante la elaboración del modelo de 2008 por el IGME, se reporta que el único dato encontrado corresponde a una transmisividad de 6000 m<sup>2</sup>/d y un 2% de porosidad eficaz (IGME, 2008a), aunque sin mención alguna a que unidad se refiere.

En base a la bibliografía consultada, la Tabla 1 se presenta, de techo a muro, las características de las unidades hidrogeológicas que configuran el acuífero de Quibas.

Tabla 1. Espesor estimado máximo, mínimo y medio de las unidades hidrogeológicas de interés (IGME, 1980, 2008b).

Materiales	Espesor (m)			Rangos de permeabilidad (m/d)
	Mínimo	Máximo	Medio	
Dolomías y calizas (Liásico)	-	250	130	$K > 8.64$
Calcarenitas (Mioceno)	-	-	250	$0.0864 > K > 864$
Calizas organógenas (Oligoceno)	-	-	200	$0.000864 > K > 8.64$
Calizas arrecifales (Eoceno)	100	300	200	$K > 8.64$

### 3.2 Geometría y límites

Los límites exteriores del acuífero vienen definidos por estructuras geológicas que configuran laterales impermeables por la presencia de materiales arcillosos, margosos y yesíferos normalmente presentes en Facies Keuper. En detalle, el acuífero queda delimitado horizontalmente por los siguientes materiales y/o estructuras tectónicas (ITGE, 1993):

- Al norte, los afloramientos de Trías diapíricos de Pinoso y Casas del Señor y de impermeable de base.

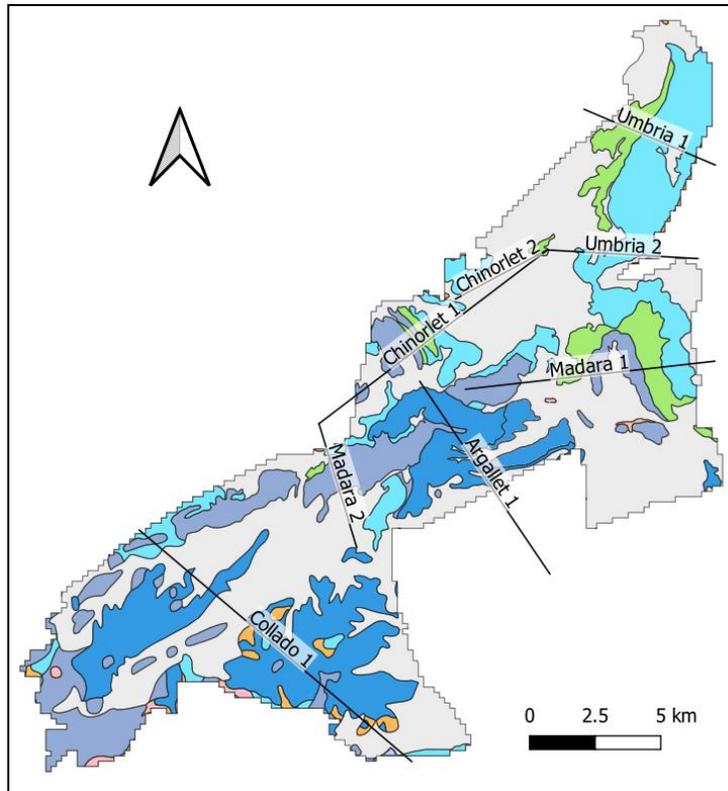


- Al noroeste el impermeable de base que aflora o que se pone en contacto lateral, mediante una falla normal, con el acuífero principal.
- Al este, afloramientos y subafloramientos del Trías diapírico del valle de Vinalopó.
- Al sureste, subafloramientos del Trías subbético de “suela” que se ponen en contacto lateral con las dolomías y calizas Jurásicas, mediante fallas normales.
- Al suroeste, afloramientos del impermeable de base.

En profundidad, las capas acuíferas de Quibas descansan sobre el impermeable de base que está constituido por materiales margosos del Eoceno y arcillas yesíferas del Triásico.

Por lo que respecta a la geometría interna, esta queda determinada por la presencia de pliegues caóticos, fallas estructurales y encabalgamientos internos de orientación predominante NE-SO cuyo origen ya se ha mencionado anteriormente en la sección 2.4.

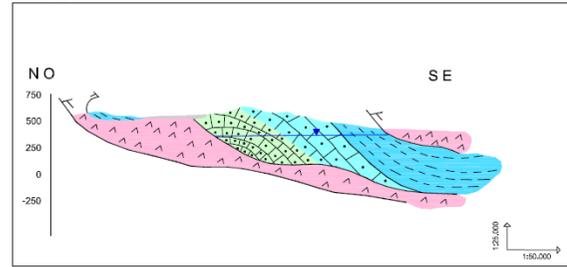
Esta configuración queda recogida en la Figura 8 la cual recopila los cortes geológicos desarrollados en el documento elaborado por el IGME (2008b).



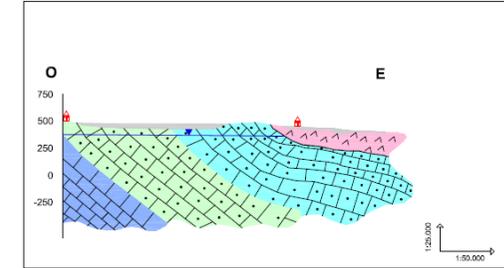
**LEYENDA**

	Formaciones Cuaternarias		Calizas Arrecifales (Eoceno)
	Calizas Margosas (Mioceno)		Margas Arcillosas (Eoceno)
	Calcarenitas (Mioceno)		Dolomías y Calizas (Liásico)
	Calizas Organógenas (Oligoceno)		Facies Keuper (Impermeable)

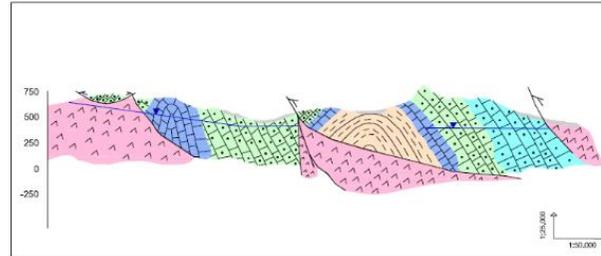
UMBRIA 1



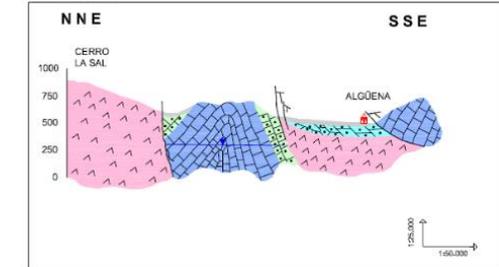
UMBRIA 2



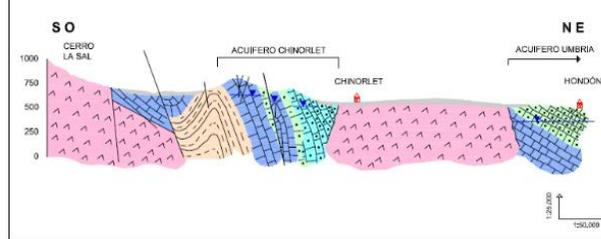
MADARA 1



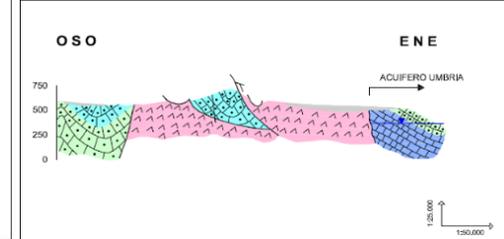
MADARA 2



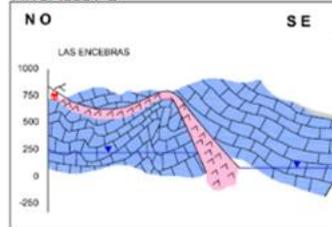
CHINORLET 1



CHINORLET 2



ARGALLET 1



COLLADO 1

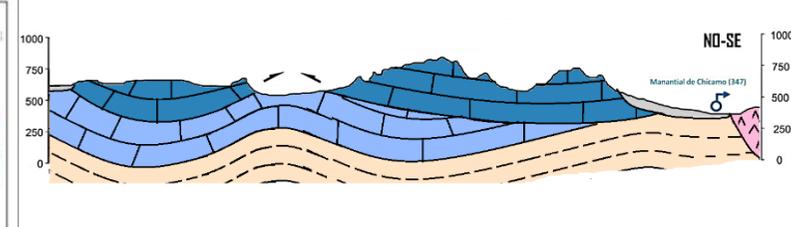


Figura 8. Mapa cartográfico y cortes hidrogeológicos. Fuente: modificado de IGME (2008b).

### 3.3 Funcionamiento y dominios hidrogeológicos

La configuración de las unidades hidrogeológicas del sistema de Quibas responde a un acuífero de funcionamiento libre en toda su extensión, a excepción de las zonas en que la serie subbética cabalga sobre Quibas que, en un régimen no influenciado, responde a un comportamiento semiconfinado.

Dando como válida la hipótesis de que no existen transferencias laterales con otras masas de agua subterránea, cosa muy verosímil desde un punto de vista geológico, en un régimen natural la alimentación de este sistema proviene únicamente de la lluvia útil, siendo su principal descarga el caudal natural del Manantial del Chícamo.

La inexistencia de datos históricos imposibilita la definición exacta del inicio del régimen influenciado. A pesar de ello, este se define en 1969/70, catalogando el sistema con un funcionamiento hidrogeológico casi natural o poco influenciado con explotaciones prácticamente insignificantes en años anteriores a este (IGME, 2021).

El mapa de isopiezas de abril 1973 (IGME, 1984) ilustra un estado del sistema muy próximo a lo que correspondería al inicio de este régimen influenciado, en el que la dirección y sentido de circulación principal del flujo tiene una componente noroeste a suroeste con cotas piezométricas comprendidas entre 460 y 347 m.s.n.m., esta última refiriéndose a la cota del Manantial del Chícamo (Figura 9).

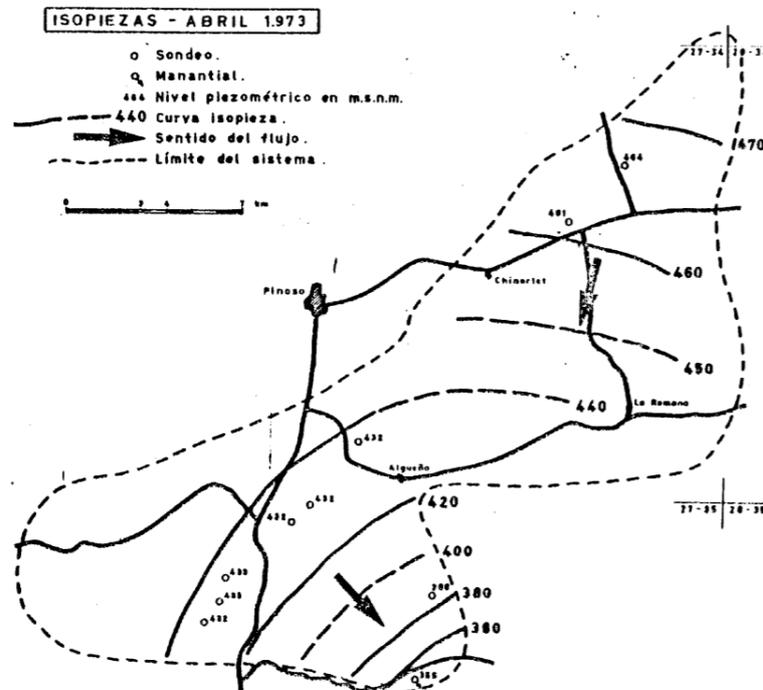


Figura 9. Mapa de isopiezas de abril 1973. Fuente: IGME (1984).

Mientras en abril de 1973 el funcionamiento hidráulico se asume como un sistema único el mapa de isopiezas de septiembre de 1983 refleja la existencia de varios dominios de funcionamiento autónomo (Figura 10). En este trabajo se cuestiona el funcionamiento como un sistema único en un régimen no influenciado, pues el origen de dicha compartimentación deriva de la complejidad tectónica y estructural que presenta el acuífero. A pesar de que en un régimen alterado estos subsistemas son más notables por las progresivas explotaciones que el acuífero de Quibas ha sufrido a lo largo de los años, en un régimen estacionario no deberían desaparecer.

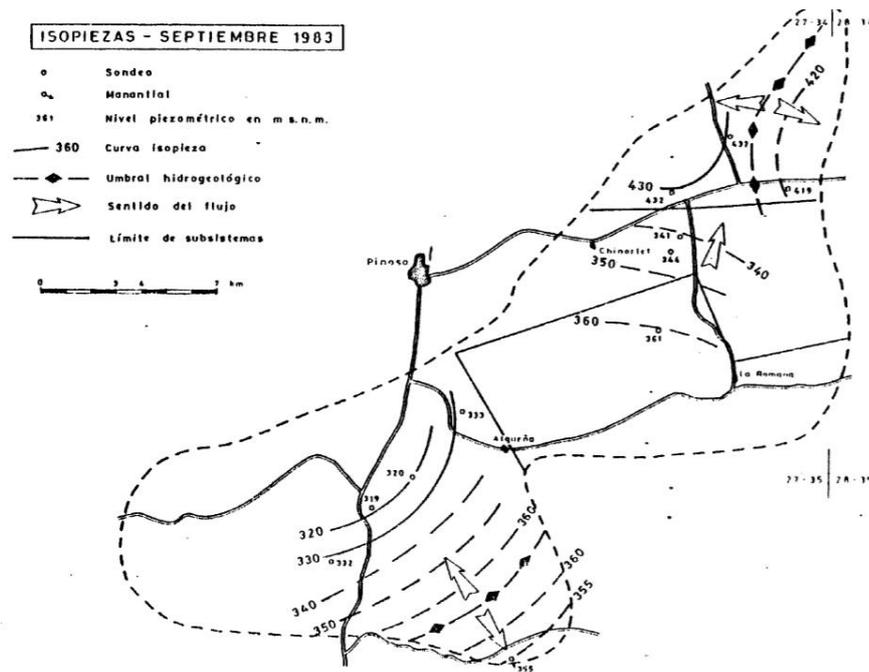


Figura 10. Mapa de isopiezas de septiembre 1983. Fuente: IGME (1984).

En base a la delimitación actual del acuífero, se identifican un total de seis dominios hidrogeológicos denominados Umbría, Chinorlet, Madara, Lo Geta, Collado del Rey y Chícamo (Figura 11) (IGME, 2021). La evolución piezométrica de estos dominios queda representada por un total de 16 puntos de control distribuidos en toda la masa, uno de ellos correspondiente al aforo del Manantial del Chícamo. Cabe mencionar la existencia de otros piezómetros que, debido al secado de estos por el importante grado de sobreexplotación que el sistema de Quibas ha soportado (IGME, 1987a), no se consideran representativos de la masa por la escasez de datos registrados.

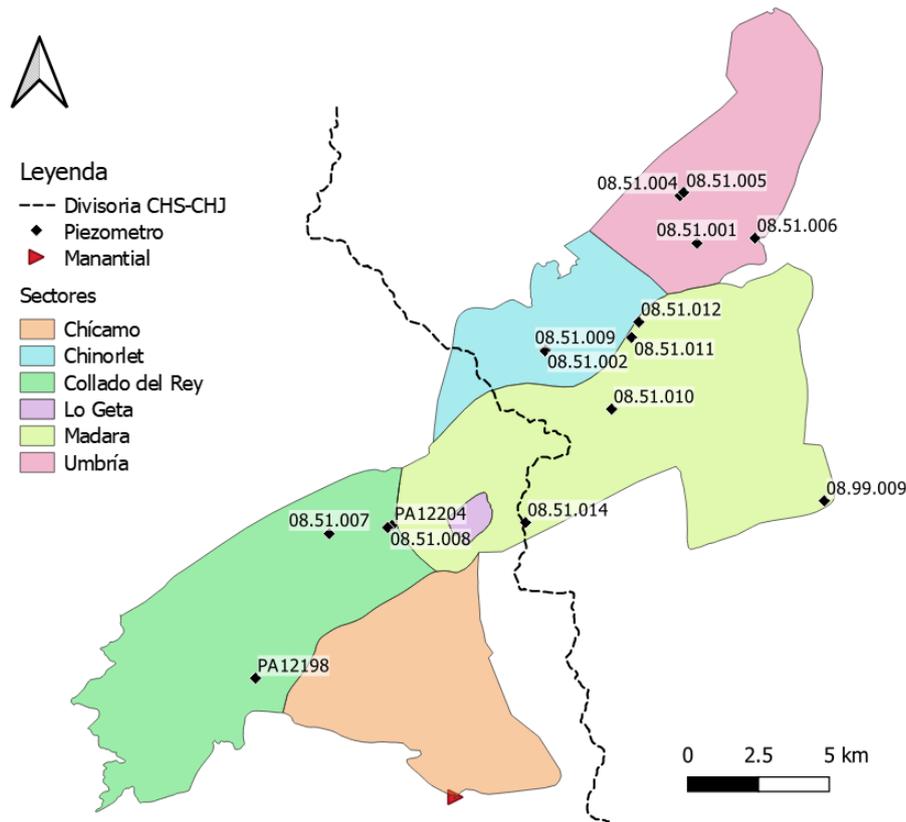


Figura 11. Piezometría y dominios hidrogeológicos internos.

### 3.3.1 Umbría

Se localiza en la zona septentrional del acuífero y lo constituye el anticlinal de eje NE-SE que configura la sierra de La Umbría. Las unidades hidrogeológicas que lo conforman son las calcarenitas del Mioceno, las Calizas del Oligoceno y las Calizas del Eoceno. Hacia el sur existe una falla normal de dirección NE-SO de 100 m de salto aproximadamente que produce una desconexión con el siguiente bloque colindante, el acuífero de Madara. Por otro lado, el bloque de Umbría queda también desconectado con el dominio Chinorlet a causa de la presencia de afloramientos de Trías diapíricos y de impermeable de base que se extienden hasta Casas del Señor (ver corte Umbría 1 y 2 de la Figura 8).

La evolución piezométrica en esta zona tiene una tendencia claramente negativa con descensos de hasta 80 m entre 1971 y 2005. Desde 2006 hasta la actualidad los niveles piezométricos tienen una tendencia hacia el equilibrio en torno los 380 m.s.n.m., una repuesta que se asocia a una disminución del caudal bombeado en esta zona (Figura 12).

### Dominio Umbría

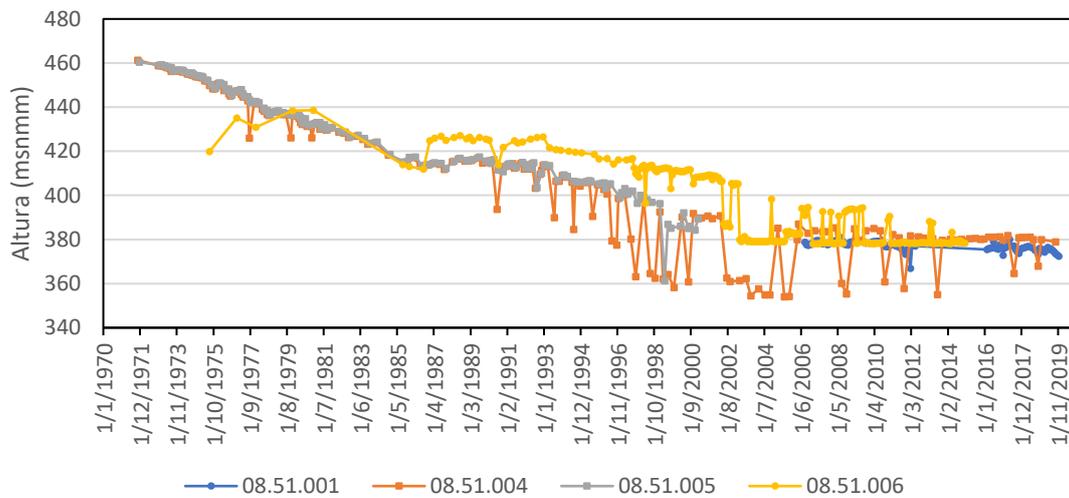


Figura 12. Evolución piezométrica en el dominio Umbría.

### 3.3.2 Chinorlet

Se ubica en la zona occidental y comprende los cerros de El Chinorlet y Mosen Chuan. Los límites de este dominio están definidos por materiales impermeables presentes en las Facies Keuper. Su geometría interna la definen pliegues de dirección NO-SE con flancos de buzamientos muy marcados que disponen los estratos casi verticalmente con grados de fracturación elevados. Adicionalmente, este subsistema se caracteriza por la presencia de un tramo acuífero aislado y colgante ubicado en el extremo suroeste (ver corte Chinorlet 1 y 2 de la Figura 8).

La tendencia piezométrica general es negativa, aunque con interrupciones con niveles de cota ascendentes. Entre 1977 y 1986 se registró un descenso global de 75 m, aproximadamente, alcanzando niveles cerca los 500 m.s.n.m. Posteriormente, los niveles muestran una tendencia recuperativa asociada a un aumento de recarga del acuífero por infiltración de lluvia que permiten acercarse a las cotas iniciales registradas en 1975 en menos de 5 años (570 m.s.n.m.). Tras esta recuperación, los niveles piezométricos vuelven a adoptar una tendencia descendente hasta la última década registrada en que se puede apreciar una estabilidad de las cotas que oscilan entre 525 y 545 m.s.n.m. (Figura 13).

### Dominio Chinorlet

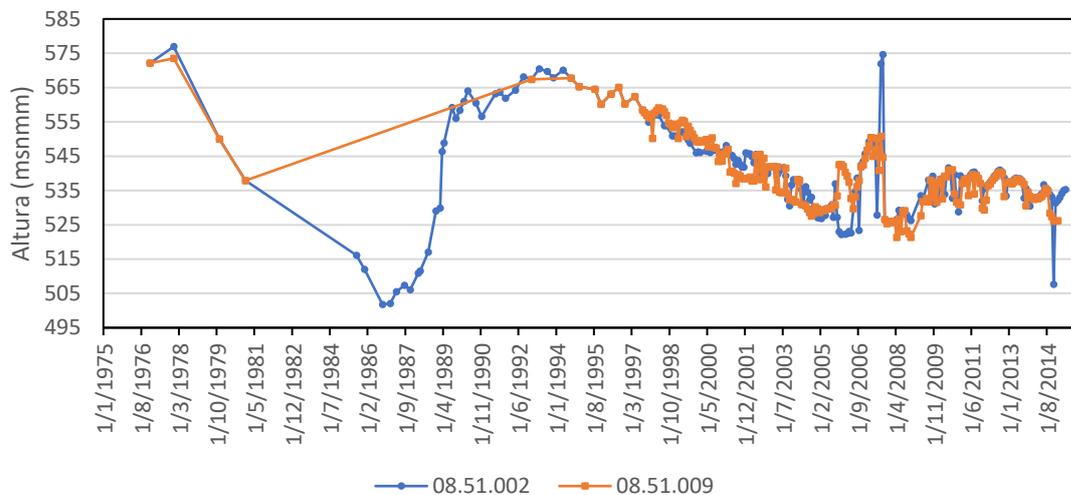


Figura 13. Evolución piezométrica en el dominio Chinorlet.

### 3.3.3 Madara

Ocupa el sector central del sistema de Quibas, incluyendo la Sierra de las Pedrizas y de los Beltranes en la parte nororiental y los afloramientos de la Sierra del Reclot y Taja. Se trata de una de las zonas más complicadas ya que incluye la superposición del bloque subbético de edad Jurásica desde la Sierra de Argallet hasta las proximidades del municipio de las Encebras, en el que afloran los materiales triásicos margosos de muy baja permeabilidad que conforman la superficie de despegue (ver corte 2 de la Figura 8). El cabalgamiento, por tanto, supone el límite geométrico S-E que pone parte de la zona de Madara por debajo de la Sierra de Argallet.

Esta configuración provocaba en un régimen no influenciado la distinción de dos funcionamientos hidrogeológicos. Por una parte, los materiales prebéticos subyacentes quedan confinados en profundidad y, por otra, la unidad cabalgante suprayacente con un comportamiento libre. Este bloque superior de superficie irregular y extensión de casi 22 km<sup>2</sup> se identificaba, en anterioridad, como parte del Acuífero de la Sierra de Argallet por la presencia de fallas y materiales impermeables aislantes (Figura 6). Sin embargo, estudios más recientes lo reconocen como parte de Quibas debido al desarrollo erosivo superficial que pone en contacto ambas unidades con un funcionamiento semiconfinado (INTECSA-DPA, 2012).

Actualmente, los carbonatos jurásicos que descansan sobre las calizas del Eoceno se encuentran generalmente secos por varios motivos. Primero, estas formaciones ocupan cotas elevadas en la sierra y están desenraizadas y, segundo, las explotaciones existentes han provocado el descenso piezométrico a cotas entre 330 y 420 m.s.n.m. (ITGE, 1993).

Geoméricamente, los esfuerzos tectónicos de este cabalgamiento provocaron la formación de una estructura antiformal de eje NE-SO en los cerros del Coto y Gorgori, y de dirección N-S

en la sierra de Las Pedrizas. Este último queda trucado en el sur por la presencia de una falla directa y se caracteriza por el afloramiento del impermeable de base que actúa como núcleo de este anticlinal (ver corte Madara 1 Figura 8).

Cabe mencionar la presencia de dos manantiales que actuaban como puntos de descarga en un régimen del sistema natural o no influenciado. Estos son, según la base de datos del IGME, los puntos 2734-8-0013 y 2734-7-0035 con cota de surgencia 405 y 670 m.s.n.m., respectivamente.

En este dominio se encuentran un total de cinco puntos de control de cantidad: 08.51.010, 08.51.011, 08.51.012, 08.51.014 y 08.99.009. Los tres primeros, con comportamientos similares, reflejan una tendencia general a la baja con fuertes descensos entre los años 1975-1977, 1985-1996 y 1993-1999 asociados a importantes sequías en el sistema, aunque con unas recuperaciones notables en los años que les siguen como consecuencia de importantes recargas por infiltración de lluvia. Con registros más actuales, el piezómetro 08.99.009 remarca una tendencia más estable en torno los 345 m.s.n.m. el cual refleja una recuperación de 30 m.s.n.m. desde los últimos datos registrados en los otros piezómetros en 1999 (Figura 14).

Por lo que respecta al piezómetro 08.51.014, este tiene un comportamiento claramente diferente al resto con cotas entre 370 y 395 m.s.n.m. La estructura geológica responsable de este comportamiento es la presencia de una falla inversa en el oeste de este piezómetro que pone cabalgando, a través de los materiales impermeables del Triásico, la unidad subbética sobre la prebética (ver corte Argallet 1 de la Figura 8). La litología de esta zona puede contrastarse por proximidad con el sondeo Barranco del Aire número 273470052 de la base de datos del IGME, el cual reporta la presencia de materiales de edad Jurásica hasta 500 m de profundidad.

Por tanto, los registros de este piezómetro no se tienen en cuenta en este proyecto ya que se considera que no pertenecen a Quibas, sino a la masa de agua subterránea de la Sierra de Argallet.

### Dominio Madara

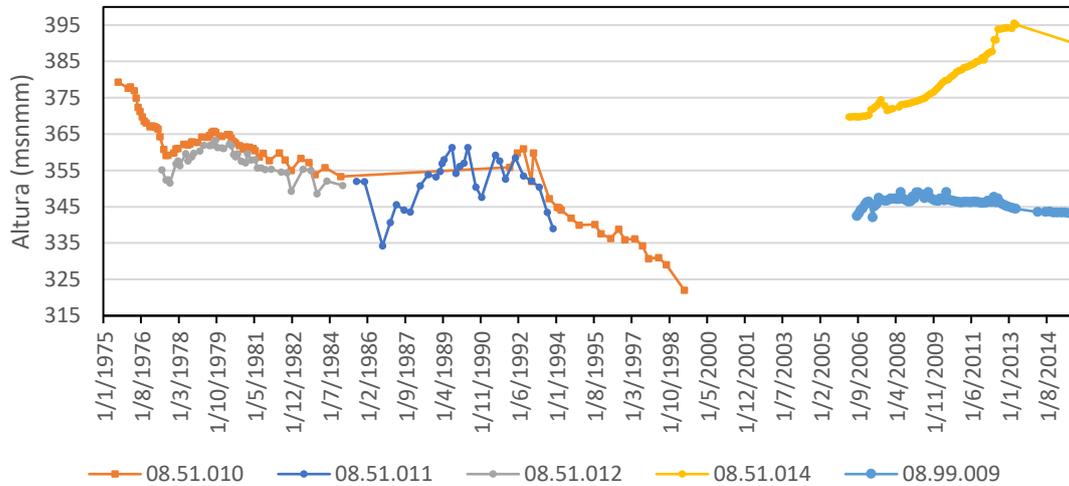


Figura 14. Evolución piezométrica del dominio de Madara.

#### 3.3.4 Lo Geta

Se trata de un dominio de extensión superficial de 1 km<sup>2</sup> aproximadamente ubicado a la altura del municipio de Algueña y en el interior del dominio de Madara. Este dominio, no contemplado en el anterior Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2009/15 (CHS, 2009), se integra como un nuevo dominio hidrogeológico dentro del sistema de Quibas. Hidrogeológicamente está constituido por los mismos materiales miocenos y oligocenos de la serie hidrogeológica descrita en anterioridad y su independencia con el resto del sistema queda caracterizada por el cierre de un sinforme y por la presencia del Trías Keuper impermeable en los laterales.

A pesar de no existir ningún punto de control de cantidad en este acuífero, se reportan niveles piezométricos en torno a los 540 m.s.n.m. con un drenaje continuo de caudales entre 2 y 4 l/s por medio de una galería kárstica (CHS, 2013).

El presente proyecto no considera la diferenciación de este dominio hidrogeológico debido a la falta de caracterización hidrogeológica y control piezométrico del mismo y, por tanto, se modela como parte de Madara. Se considera que esta hipótesis no afecta al funcionamiento del acuífero dadas las dimensiones que presenta.

#### 3.3.5 Collado del Rey

Este dominio hidrogeológico engloba la sierra de Quibas y parte de la sierra del Reclot, ambas marcadas con eje de dirección NE-SO, típico de la serie prebética. Presente en esta zona se encuentran ventanas tectónicas de extensión total en superficie de 34 km<sup>2</sup> originadas por la desconexión lateral de este cabalgamiento debido a la presencia de fallas normales y/o una

erosión diferencial (Figura 6). Similar a Madara, estos isleos tectónicos subbéticos se encuentran secos por su ubicación en las partes altas de la sierra y por el hecho de que los niveles piezométricos se encuentran por debajo de estas formaciones debido a las intensas explotaciones. Estas series responden a geometrías distintas, pues mientras el Eoceno prebético responde a una estructura sinforme, en superficie la serie subbética cabalgante presenta una estructura de antiforme (ver corte Collado 1 de la Figura 8).

Este dominio es el más afectado por la sobreexplotación. Con una altura de 465 m.s.n.m., el subsistema sufre de un importante descenso piezométrico de más de 120 m situando el nuevo nivel piezométrico en torno los 330 m.s.n.m. en 1982. Desde entonces, el nivel ha ido oscilando entre 310 y 340 m.s.n.m. En la actualidad los datos registrados muestran una tendencia recuperativa cuyo inicio podría marcarse después de la sequía de 2005 (Figura 15).

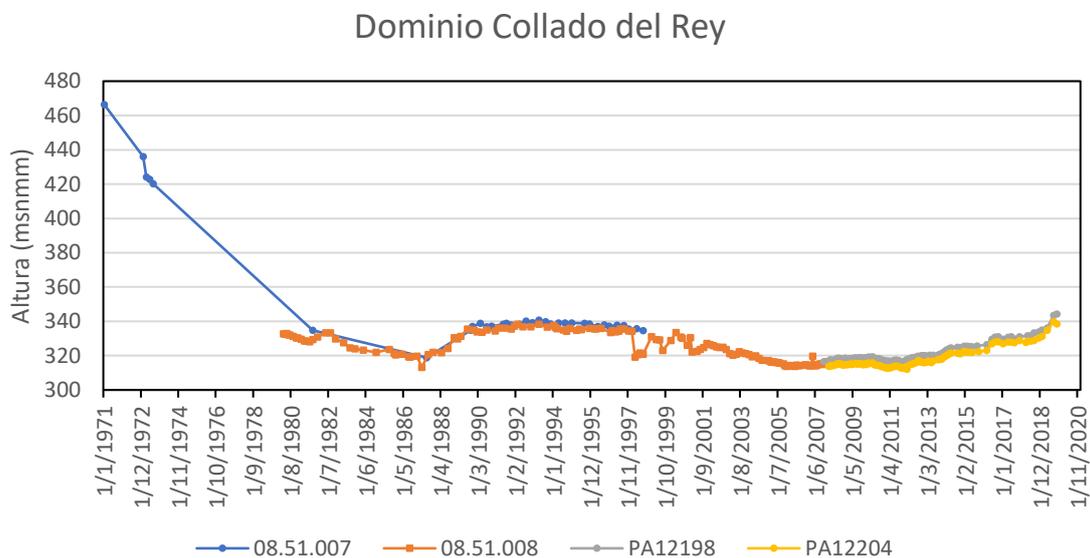


Figura 15. Evolución piezométrica en el dominio Collado del Rey.

### 3.3.6 Chícamo

El dominio de Chícamo se ubica en el sector SE de Quibas y comprende los afloramientos de la sierra de Barinas con estructuras geológicas similares a la zona de Collado del Rey. En la zona más meridional del dominio se encuentra el Nacimiento del Río Chícamo, conocido como el punto de drenaje natural más importante de todo el sistema. Este dominio se independiza de los dominios colindantes por la presencia de fallas normales que provocan el hundimiento del bloque oriental.

En esta zona no se encuentra ningún piezómetro representativo. A pesar de ello, se encuentra el aforo del Manantial del Chícamo con registros desde mayo de 1952 en el que se aforó un caudal de 80 l/s, un caudal que actualmente está en torno a los 28 l/s debido a la influencia de las captaciones existentes (Figura 16).

### Manantial del Chícamo

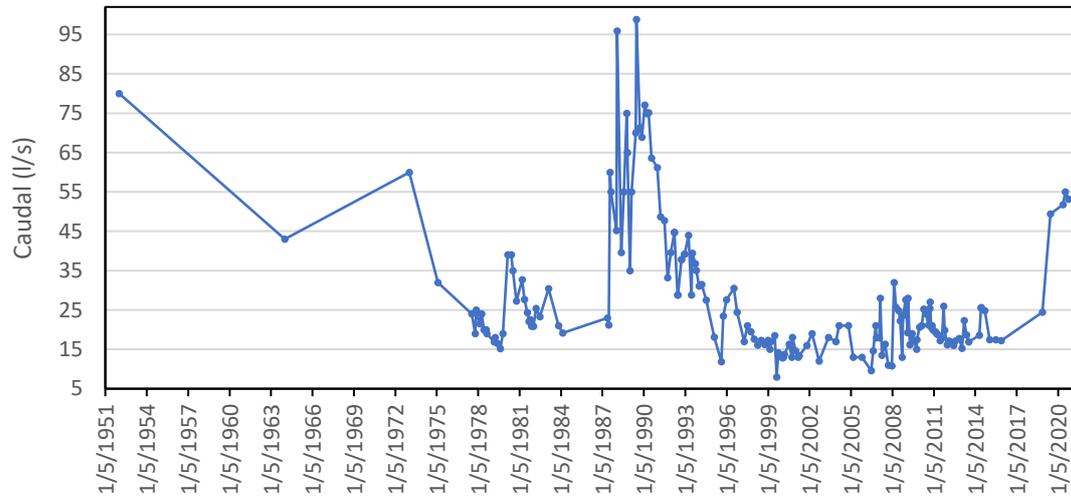


Figura 16. Caudal aforado en el Manantial del Chícamo

### 3.4 Captaciones

Según la revisión piezométrica anterior, se asume que la afección de las captaciones en el sistema de Quibas 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 (IGME, 2008a), salvo a partir de 2005 en que los trabajos previos realizados por el IGME (IGME, 2008b) y la disponibilidad de información de contadores permitieron la reproducción y obtención de datos mensuales de dichas explotaciones.

Para el desarrollo del presente modelo se asumen válidas las series anuales reportadas en el último trabajo de Quibas elaborado por el IGME (IGME, 2021) para el periodo comprendido entre octubre de 1969 y septiembre de 2005, aunque con modificaciones que merecen especial mención, ya que los bombeos en dicho modelo se agrupan por dominios hidrogeológicos con la intención de simplificar su procesado. Estas modificaciones son:

1. Discretización de las series zonificadas en captaciones puntuales ubicadas según las mostradas en la Figura 7.
2. Reducción del volumen extraído en la CHJ debido a que la suma total de los derechos en 1970 no supera los 7 hm<sup>3</sup>.
3. Distribución porcentual de los volúmenes anuales según el promedio bombeado en los años de datos conocidos por contadores (periodo 2005-2019).
4. 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. A partir de octubre 2005 la serie se completa con información proporcionada por la CHJ y CHS, 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 17 la cual responde a un volumen variado y de tendencia decreciente. 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 hm<sup>3</sup>/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.

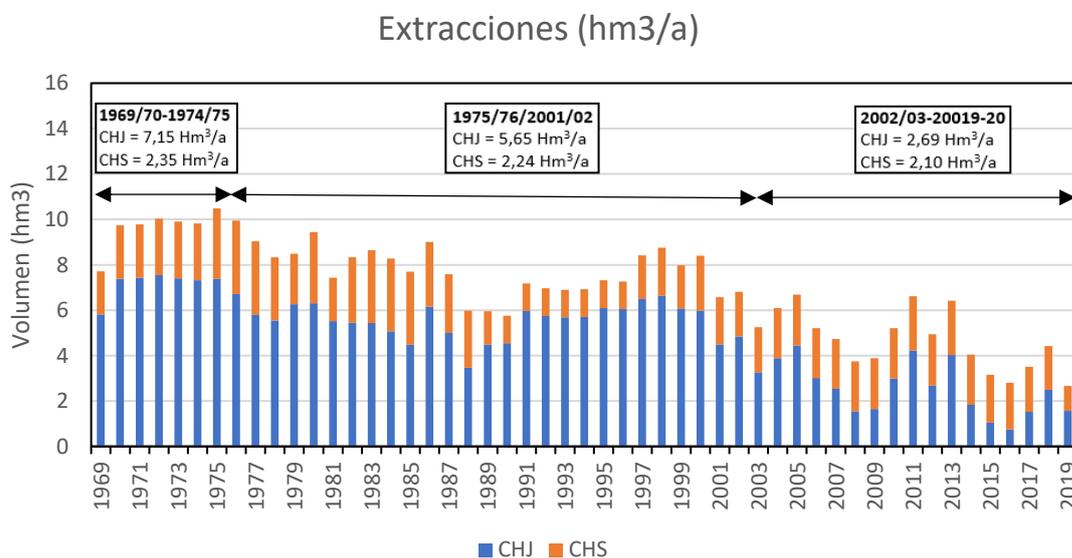


Figura 17. Evolución anual de las extracciones estimadas: totales anuales y por demarcación hidrográfica.

### 3.5 Recarga

En el sistema de Quibas 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.

#### 3.5.1 Por precipitación

Los datos correspondientes a la recarga del acuífero por infiltración de lluvia han sido proporcionados por la CHJ, obtenidos del modelo PATRICAL (Pérez Martín, 2005). Según este modelo, la recarga en Quibas se distribuye temporal y espacialmente según los sectores con código 8160500 y 7102900 (Figura 18).

A efectos del modelo, ambos sectores han sido modificados tal que la recarga por metro cuadrado se ha reducido proporcionalmente al área del cabalgamiento de la serie subbética sobre la prebética en la Sierra del Reclot, pues se considera válida la hipótesis de que la infiltración en esta zona no llega directamente a las capas acuíferas subyacentes por la presencia de materiales impermeables correspondientes a la capa de despegue de dicho cabalgamiento. Esta reducción ha supuesto una disminución de  $0.5 \text{ hm}^3/\text{a}$  de promedio de la serie original, resultando la serie temporal de la recarga de ambos sectores la mostrada en la Figura 19.

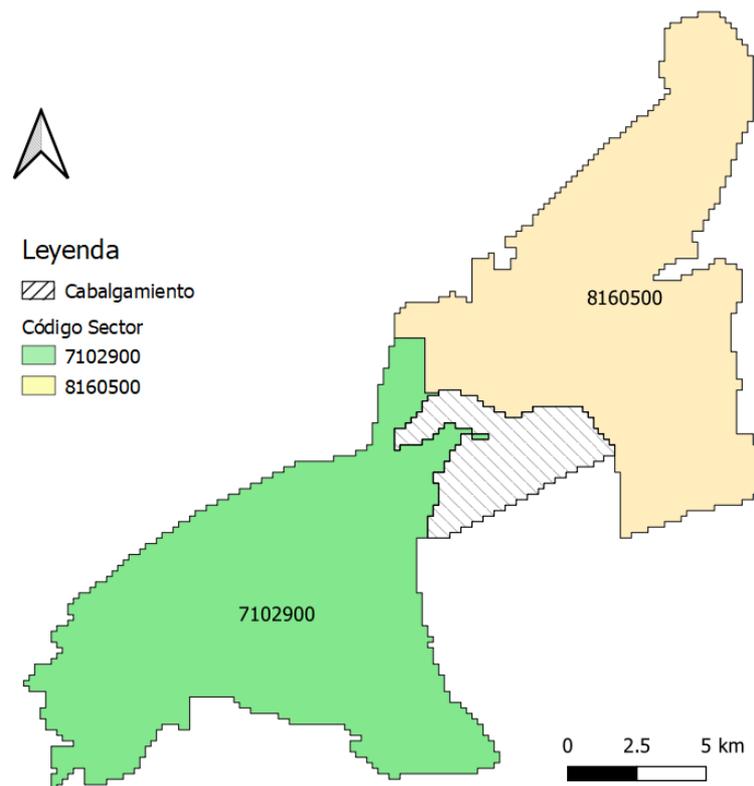


Figura 18. Sectores de recarga por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL.

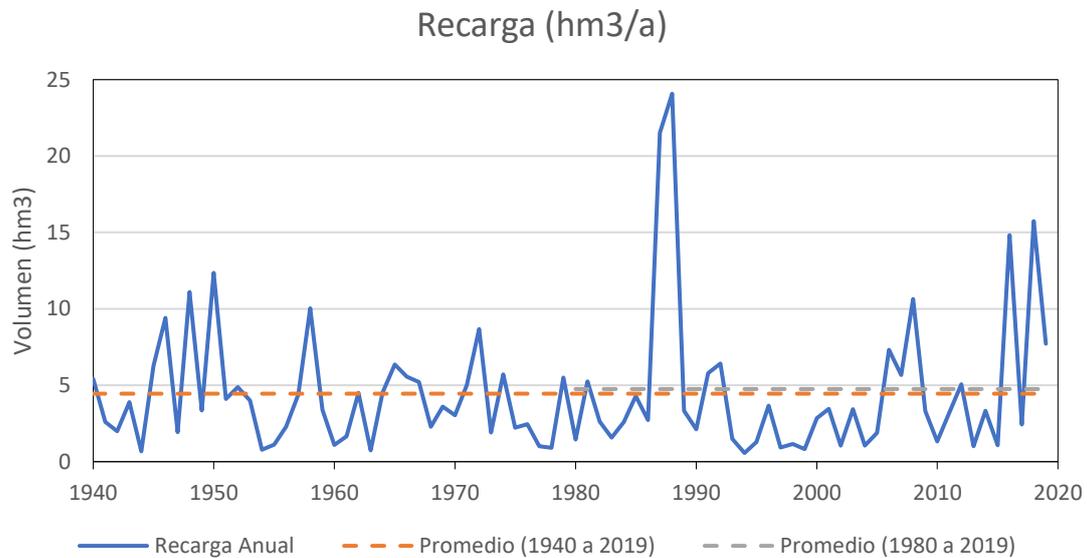


Figura 19. Evolución anual de la recarga total por infiltración de lluvia. Fuente: modificado de PATRICAL.

### 3.5.2 Recarga por retornos de riego

Las características de las Unidades de Demanda Agraria (UDA) ubicadas en el interior de los límites del acuífero de Quibas son las que se muestran en la Tabla 2. La metodología empleada para la determinación de los retornos de riego varía según la demarcación gestora de la UDA.

Tabla 2. Características de las superficies de regadío ubicadas en los límites de Quibas.

Código UDA	Demarcación	Superficie bruta (km <sup>2</sup> )	Origen
UDA6	DHS	20.12	Subterráneo
A9035	DHJ	4.93	Subterráneo
A9045	DHJ	55.00	Mixto
A9050	DHJ	4.05	Subterráneo

Los retornos en la DHS se estiman con un coeficiente del 2% sobre la demanda bruta agraria (CHS, 2015). Con un promedio de 1 hm<sup>3</sup>/a bombeado para fines agrarios, existe una recarga artificial en el sistema de Quibas del orden de 0.02 hm<sup>3</sup>/a.

Los retornos de riego subterráneos correspondientes a las UDAs de la DHJ se obtienen del modelo PATRICAL los cuales son facilitados por la CHJ. Correlacionando estos retornos con los bombeos existentes, se estima que con una demanda bruta agraria promediada de 4.15 hm<sup>3</sup>/a retorna cerca del 24% del volumen bombeado.

Por lo que respecta a la distribución espacial, se asume que en ambas demarcaciones los retornos son constantes en toda la superficie de regadío. Cabe mencionar que todos los datos utilizados corresponden a los publicados en los planes hidrológicos 22/27 (CHJ, 2021b; CHS, 2021b) y, por tanto, no se tienen en cuenta las posibles variaciones de retorno espaciales asociados a cambios de superficie.

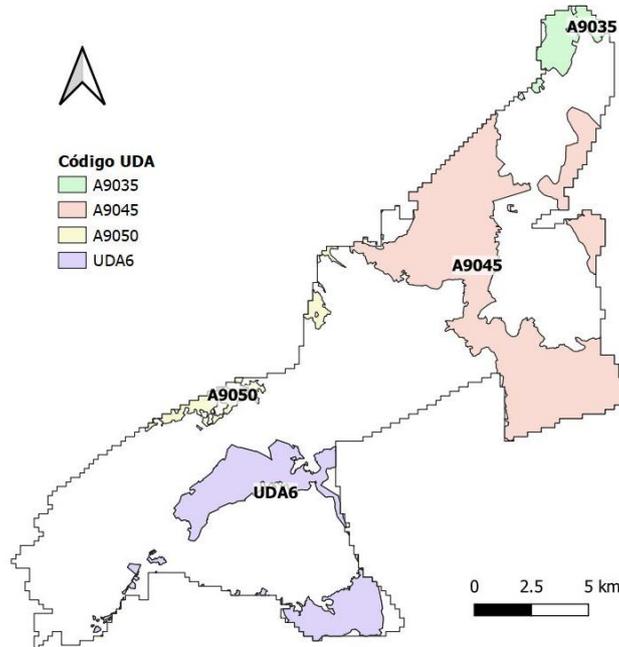


Figura 20. Superficies de regadío en el interior de Quibas.

### 3.6 Flujos

La inexistencia de transferencias laterales con otras masas y cursos fluviales permanentes permite considerar que el Manantial del Chícamo es la única salida natural del sistema. A efectos del modelo se desprecia la Fuente de Algarrobo por la escasez de datos hidrométricos, además de tratarse de un flujo de poca importancia comparado con el Manantial del Chícamo. También se desprecian las posibles ramblas existentes por su carácter efímero y, por tanto, no relevantes para el funcionamiento del acuífero.

### 3.7 Hipótesis y simplificaciones del modelo

La simulación de la masa de agua subterránea de Quibas está sujeta a una serie de hipótesis y simplificaciones inherentes al modelo conceptual. Estas asunciones se relacionan con la incertidumbre existente en la caracterización hidrogeológica de algunas zonas, y la falta de registros de captaciones y niveles piezométricos que permitan mejorar el conocimiento hidráulico de este acuífero a un nivel más detallado. Las principales hipótesis realizadas son:

- La definición de un régimen poco influenciado como régimen estacionario que finaliza en octubre de 1969 debido a la inexistencia de datos relativos al inicio real de las explotaciones.
- La no diferenciación del dominio Lo Geta y modelación de este como continuación de Madara por falta de caracterización hidrogeológica de la geometría y potencia de las capas que conforman este dominio y su conexión con dominios adyacentes.
- La consideración de recargas por infiltración de lluvia y retornos agrarios uniformes en el espacio en todo el periodo de modelización con el fin de simplificar su procesado.
- Mantener la localización, profundidad y uso de las captaciones constante. A pesar de que en la bibliografía revisada se reportan cambios debido al secado de pozos y/o degradación de la calidad del agua, la insuficiencia de datos correspondientes a estos no permite su modelización e integración en el modelo conceptual.
- Asumir que las unidades hidrogeológicas son de espesor constante en toda la extensión. La complejidad estructural del sistema junto a la escasez de sondeos y mapas cartográficos a escala más local imposibilitan realizar una revisión más exhaustiva de las unidades que componen cada dominio hidrogeológico.
- 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 dominio 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, 2021b).
- La integración del Manantial del Chícamo como única salida del sistema y la no consideración de la existencia de más surgencias en un régimen natural por la falta de datos hidrométricos y posibles ubicaciones de estas.

## 4 Código utilizado

El modelo de flujo del acuífero de Quibas se realiza con 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.

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

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

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

El código MODFLOW resuelve la Ecuación 1 a través de diferencias finitas. En el método de las diferencias finitas el sistema descrito de forma continua por la Ecuación 1, es sustituido por un número finito de puntos en el espacio y el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por diferencias entre los valores de las variables en esos puntos. Este proceso conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas lineales que permiten conocer el valor de la altura en función del espacio y el tiempo, es decir,  $h = h(x, y, z, t)$ .

En MODFLOW el acuífero se discretiza espacialmente en filas, columnas y capas generando una serie de bloques o celdas. En esta formulación se asume que las celdas son rectangulares horizontal y verticalmente, y que cada capa definida corresponde a una unidad hidrogeológica dispuesta horizontalmente.

Por otro lado, la interfaz gráfica de usuario ModelMuse facilita la entrada de datos del modelo de flujo en base al uso de objetos, bases de datos y fórmulas. Los objetos son colecciones de puntos, líneas o polígonos que se dibujan en la ventana principal de ModelMuse o se importan. Son utilizados para modificar los valores por defecto de los conjuntos de datos y para definir las condiciones de contorno, aunque también sirven para generar una malla. Los conjuntos de datos son utilizados en ModelMuse para representar datos distribuidos en el espacio, por ejemplo: la componente de la conductividad hidráulica en la dirección  $x$ . Las fórmulas son utilizadas para definir la distribución de valores de los conjuntos de datos.

## 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

Se adopta una resolución de celda constante de 200 m x 200 m que permite discretizar la masa de agua subterránea de Quibas con un mallado de 142 filas y 134 columnas del cual 6935 celdas son activas (Tabla 3).

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

Xmax, Ymax	Xmin, Ymin	Filas/Columnas	Tamaño celda
688300, 4264900	661500, 4236500	142/134	200 m x 200 m

## 5.2 Discretización vertical

De acuerdo con las capas hidrogeológicas descritas en el apartado “Unidades hidrogeológicas”, el acuífero se divide verticalmente en un total de cuatro capas. El rango de espesores de cada una de ellas se obtiene a partir de datos bibliográficos existentes sobre los espesores de las unidades litoestratigráficas que configuran el acuífero de Quibas recogidos en la Tabla 1. El espesor final se calcula a partir de un método de prueba y error en el que se verifica que las capas aflorantes en el modelo (Figura 21) se aproximen con los afloramientos del mapa hidrogeológico real (Figura 8). Cabe mencionar la no incorporación del cuaternario como capa, pues se trata de la unidad hidrogeológica más superficial de espesor medio de 30 m no saturada y, por tanto, sin relevancia alguna para el funcionamiento del acuífero de Quibas. A pesar de ello, este se incorpora en la Figura 21 con la finalidad de facilitar una mejor comparación visual entre los dos mapas cartográficos mencionados. Los espesores y obtención de las superficies de las capas utilizadas se desarrollan a continuación.

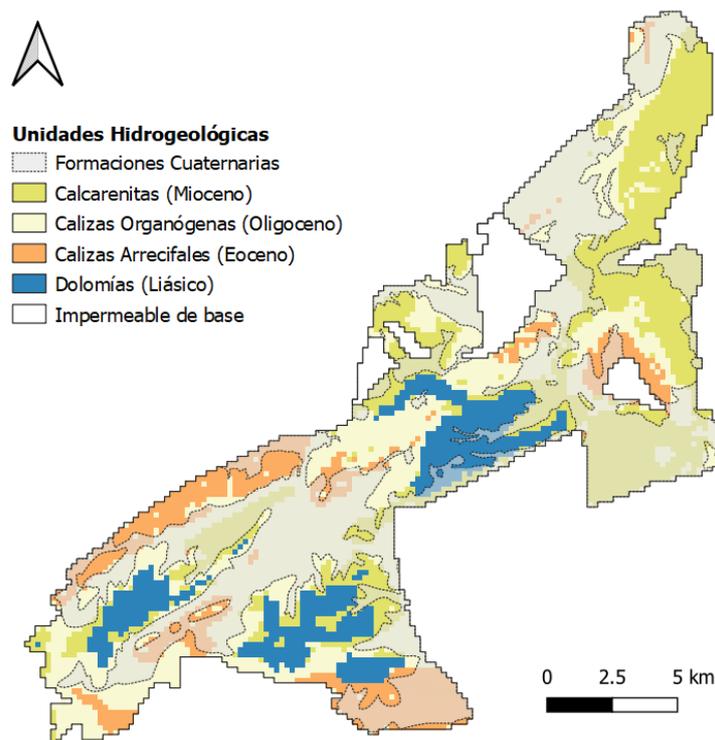


Figura 21. Capas aflorantes del modelo.

### 5.2.1 Base de las calizas arrecifales del Eoceno

El muro del Eoceno corresponde a la base impermeable del acuífero y se obtiene a partir del mapa de isohipsas del muro del acuífero de Quibas elaborado por el ITGE, el cual fue construido en base a información de campañas geofísicas existentes (ITGE, 1993). Con la ayuda del programa SURFER® (Golden Software Inc., 2021) se digitalizaron las curvas de nivel más representativas adaptando su extensión a los límites horizontales actuales. Las interrupciones de las isohipsas debido a fallas estructurales se han representado a través de saltos significativos de cota. En las zonas donde aflora el muro se define un espesor mínimo de 1 m correspondiente a 0.25 m de espesor de cada una de las capas existentes con el propósito de mantener una continuidad de las capas a efectos de cálculo del modelo. La obtención de esta superficie ha sido vital para la construcción de las capas superiores.

### 5.2.2 Base de las calizas organógenas del Oligoceno

La base del Oligoceno o techo del Eoceno se obtiene asumiendo que la capa del Eoceno tiene un espesor máximo de 300 m sobre el muro, pudiendo ser inferior si la topografía de la zona impide que se alcance.

### 5.2.3 Base de las calcarenitas del Mioceno

A pesar de que la base del Mioceno es discordante con el Oligoceno, en el modelo se simplifica asumiendo lo contrario. Esta superficie se obtiene asumiendo que la capa del Mioceno tiene un espesor máximo de 250 m sobre el techo del Oligoceno, pudiendo ser inferior si la topografía de la zona impide que se alcance.

### 5.2.4 Base de las dolomías y calizas del Liásico

La base del Liásico corresponde al contacto de falla cabalgante que pone la unidad subbética sobre la prebética y formaciones neógenas. A partir del mapa cartográfico y la topografía de la zona, se calculó la orientación y buzamiento del muro de la capa en las zonas aflorantes. A pesar de que las formaciones del cuaternario se superponen encima de esta capa, no se incorpora dado que no forma parte de las capas acuíferas. Por ello, el espesor de la capa del Liásico es el resultado de restar, al Modelo Digital del Terreno (MDT), la superficie del muro obtenido.

### 5.2.5 Topografía del terreno

La topografía del terreno corresponde al techo absoluto del acuífero y se define a partir del MDT de 200 m x 200 m y, por tanto, de resolución coincidente con la discretización horizontal utilizada (Figura 22).

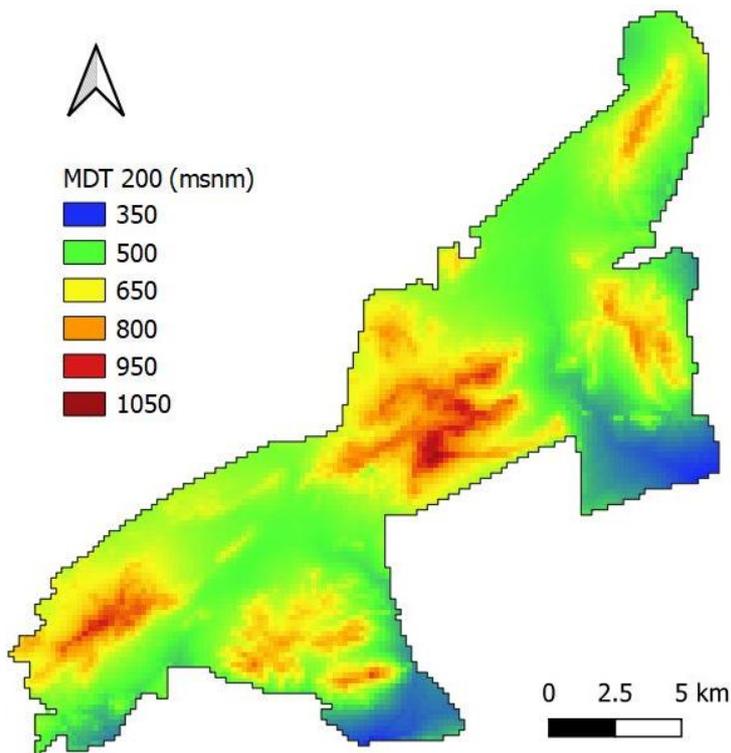


Figura 22. Modelo Digital del Terreno de resolución 200 m x 200 m.

La Figura 23 representa el espesor total del acuífero de Quibas el cual se obtiene restando el muro al MDT de misma resolución.

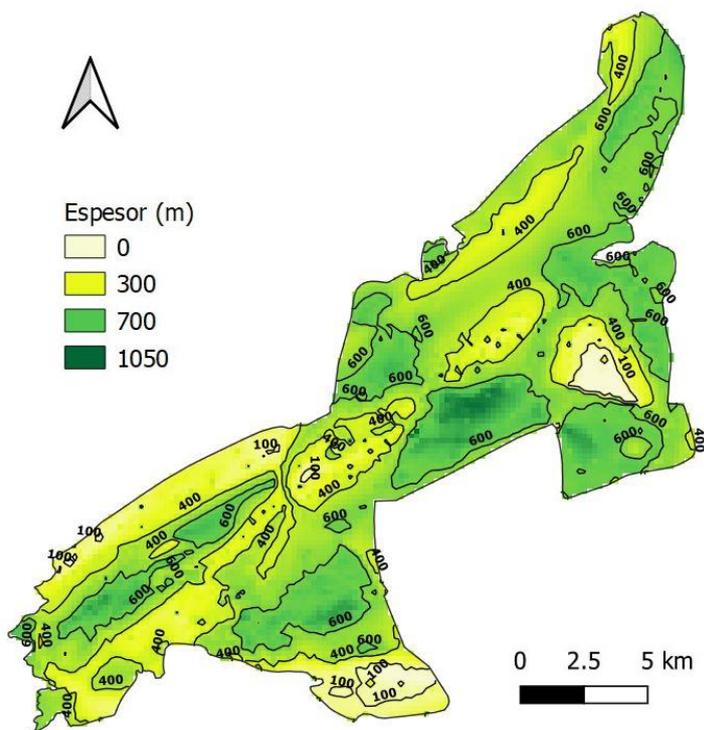


Figura 23. Mapa de espesores del acuífero de Quibas.

Partiendo de esta discretización, cada capa se ha visto modificada con el fin de incorporar aquellas zonas en que la geología remarca la presencia de materiales impermeables y, por tanto, de carácter inactivo para el modelo. Común a las cuatro capas se desactivan las celdas correspondientes al afloramiento del muro del impermeable en el núcleo del anticlinal que conforma la Sierra de las Pedrizas y, por otra parte, los diapiros triásicos que afloran en la zona de Chinorlet. Individualmente, en la capa 1 se desactivan las celdas correspondientes al cabalgamiento de la masa de agua subterránea de la Sierra de Argallet ubicadas en el dominio de Madara. La definición de esta zona se ha realizado con la interpretación del mapa hidrogeológico y el corte de Argallet 1 (ver Figura 8). Y, por último, en la capa 4 se desactiva la zona suroeste del dominio Chinorlet con el fin de disminuir el espesor de las capas acuíferas superiores y, así, representar la presencia de una zona acuífera colgante (ver corte Chinorlet 1 de la Figura 8).

Según esta discretización, la primera capa del acuífero queda definida con un total de 6137 celdas activas y un área de 245.48 km<sup>2</sup>, la capa 2 y 3 con un total de 6379 celdas activas y un área de 255.16 km<sup>2</sup> y, por último, la capa 4 con 6291 celdas activas y un área de 251.64 km<sup>2</sup>. La Figura 24 muestra las celdas activas (color azul) que configuran cada una de las capas del modelo.

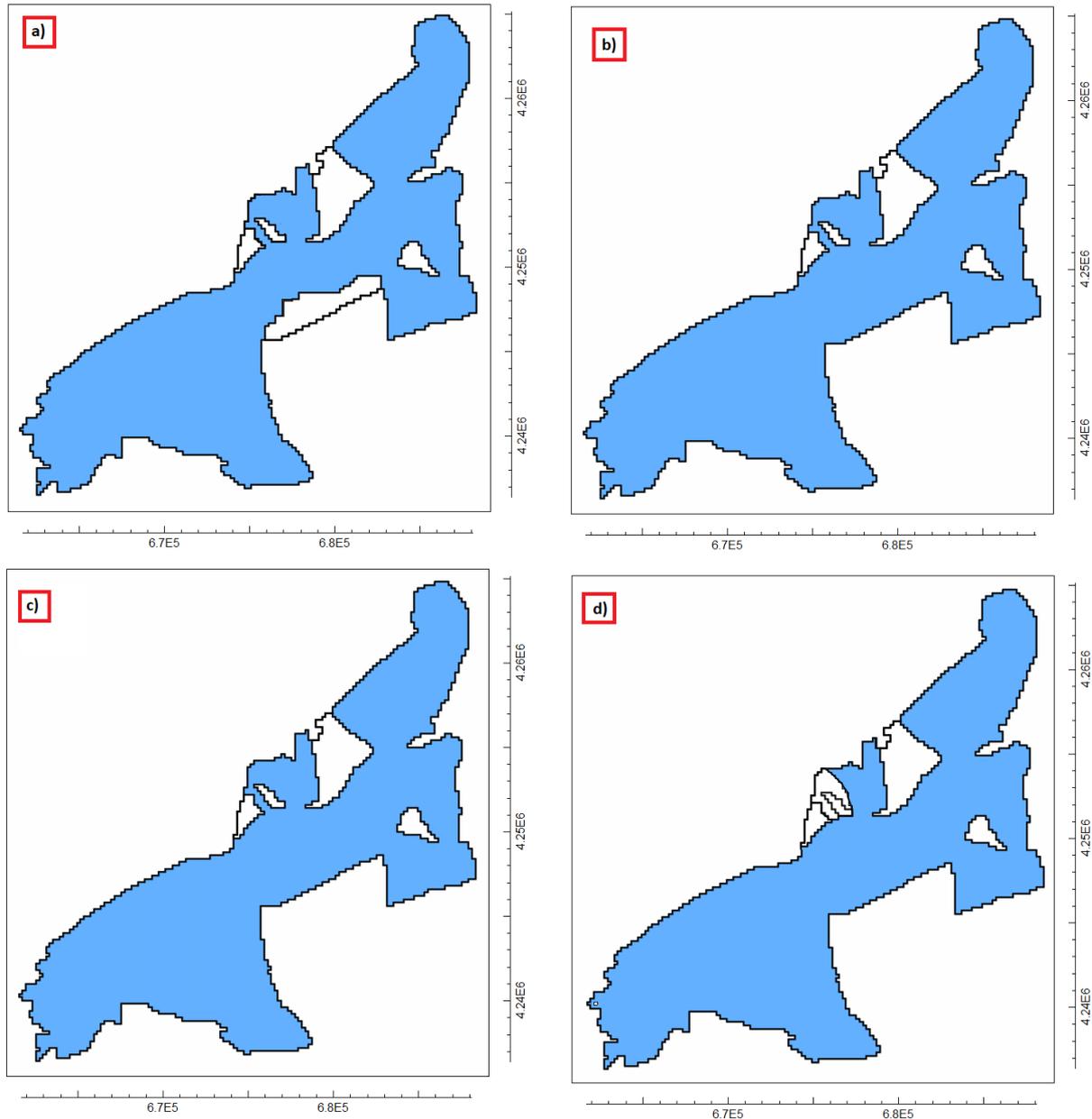


Figura 24. Celdas activas en azul para a) la capa 1, b) la capa 2, c) la capa 3 y d) la capa 4.

La Figura 25 muestra, en perfiles, la discretización adoptada. En los cortes D-D' y E-E' se ve reflejada la aproximación que se realiza para la zona del cabalgamiento del subbético correspondiente al acuífero de la Sierra de Argallet y, por tanto, de carácter inactivo para este modelo. Otra peculiaridad que merece especial mención es la incorporación de capas acuíferas colgantes presentes en el dominio de Chinorlet (corte C-C').

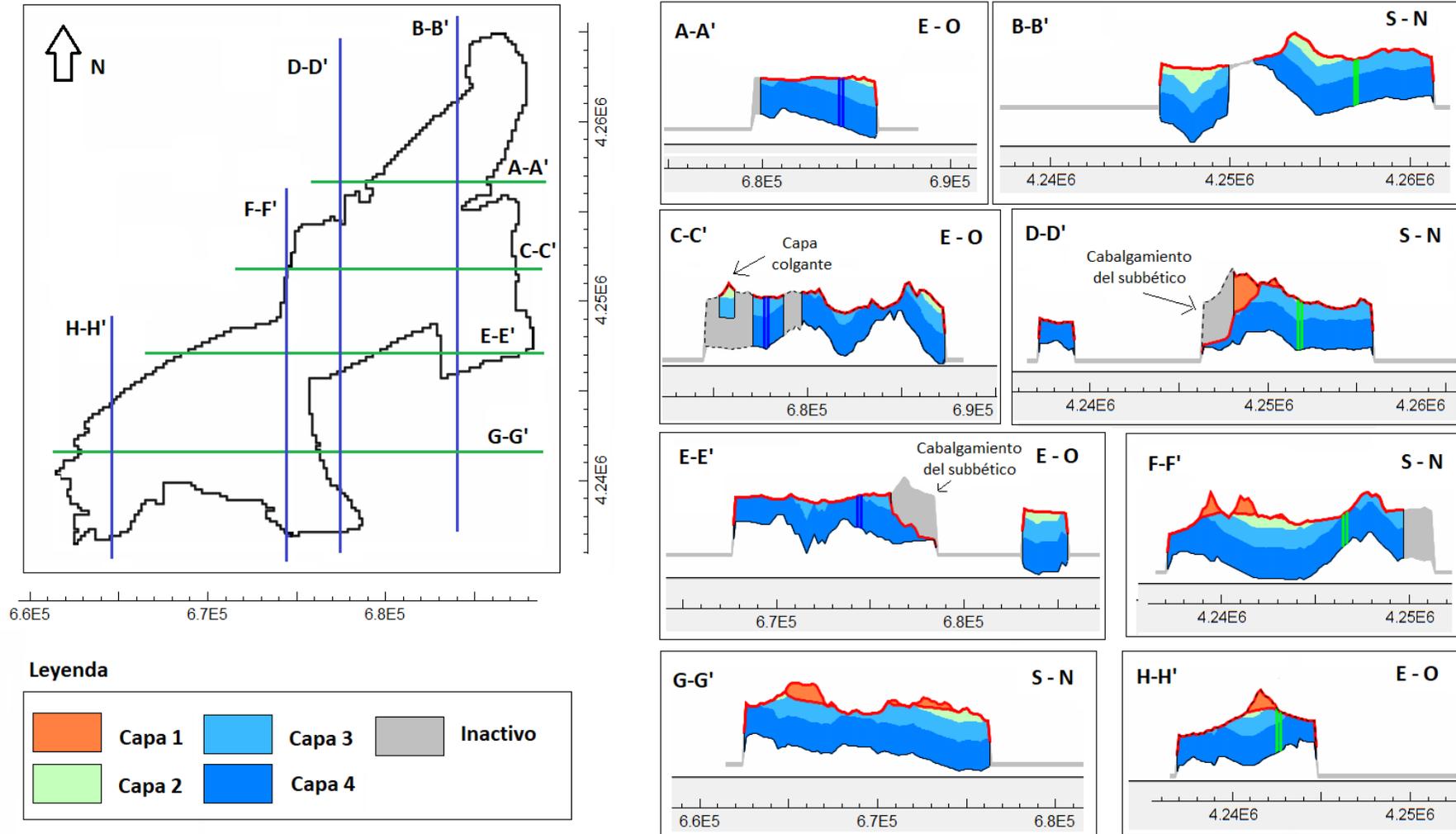


Figura 25. Perfiles de las capas del modelo.

### 5.3 Discretización temporal

El paso de tiempo adoptado para la simulación del acuífero de Quibas es mensual y abarca un total de 79 años hidrológicos que se dividen en dos periodos según el régimen del acuífero. Los años simulados según el funcionamiento hidráulico del acuífero son los siguientes:

- Régimen estacionario o no influenciado: desde octubre de 1940 hasta septiembre de 1968.
- Régimen transitorio o influenciado: desde octubre de 1969 hasta septiembre de 2019.

La diferencia entre ambos es la inclusión en el segundo de los bombeos.

### 5.4 La condición inicial

La inexistencia de datos piezométricos anteriores a lo que se define como “inicio” del régimen influenciado, imposibilita la validación del modelo en régimen estacionario y, por tanto, de la generación de una primera superficie piezométrica como condición inicial. Por este motivo, se definen niveles constantes que, según el dominio hidrogeológico, se consideran representativos y próximos a las cotas piezométricas registradas en los primeros años del régimen influenciado. Se utilizan cotas de 540, 470, 380, 355, 350 m.s.n.m. para Chinorlet, Umbría, Madara, Collado y Chícamo, respectivamente. En las celdas que dichas cotas resulten inferiores al muro absoluto del acuífero, se les asigna un valor de 1 m superior a este con el fin de que MODFLOW no las considere inactivas (Figura 26).

Con esta superficie piezométrica se ha podido realizar la calibración del modelo en régimen transitorio y, posteriormente, reproducir el estado del sistema en un supuesto régimen estacionario.

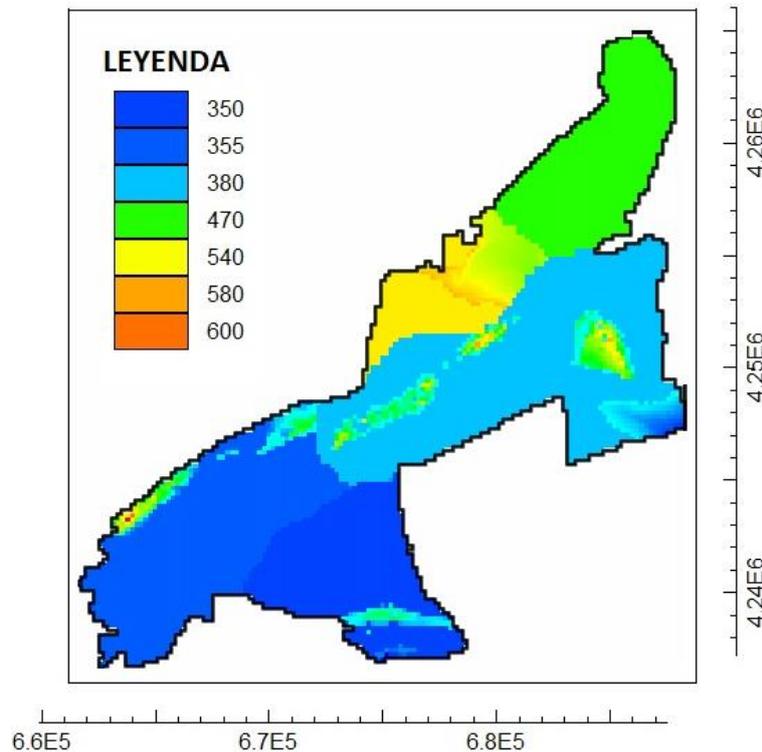


Figura 26. Condiciones iniciales para el modelo en régimen transitorio.

## 5.5 Asignación preliminar de parámetros hidráulicos

Los parámetros necesarios para la resolución del modelo de Quibas son:

1. Los correspondientes a las propiedades hidráulicas de las capas acuíferas tales como las componentes de la conductividad hidráulica ( $K_x$ ,  $K_y$  y  $K_z$ ), el rendimiento específico ( $S_y$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $S_s$ ).
2. Las conductividades hidráulicas y espesores de las barreras de flujo horizontal que permiten representar fallas estructurales que dificultan el paso del flujo entre los distintos dominios hidrogeológicos.
3. La conductancia del Manantial del Chícamo.

A pesar de que en la realidad el medio es anisótropo y heterogéneo, la insuficiencia de datos hidráulicos no permite la caracterización exhaustiva y detallada de la distribución de los parámetros que configuran cada una de las unidades hidrogeológicas que componen el acuífero. Por ello, la metodología adoptada en este trabajo corresponde a la asignación de parámetros hidráulicos en base a la zonificación definida en el apartado dedicado al modelo conceptual (sección 3.3). Esta zonificación es análoga a la que se adopta en modelos previos (CHS, 2013; IGME, 2008a, 2021). En cada dominio se asume que la distribución de las conductividades hidráulicas es homogénea en cada una de las cuatro capas con  $K_x=K_y$ , 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 por capa y dominio hidrogeológico.

Según los rangos bibliográficos de los parámetros hidráulicos presentados en la Tabla 1 de la sección 3.1, los valores preliminares de los parámetros del modelo son los presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Asignación preliminar de parámetros hidráulicos.

Dominio	Capa	$K_x$ (m/d)	$K_z$ (m/d)	$S_s$ (1/m)	$S_y$ (-)
Umbría	1	80	8.0	1E-05	0.10
	2	50	5.0	1E-05	0.15
	3	2	0.2	1E-05	0.20
	4	95	9.5	1E-05	0.10
Chinorlet	1	50	5.0	1E-05	0.01
	2	50	5.0	1E-05	0.01
	3	50	5.0	1E-05	0.01
	4	50	5.0	1E-05	0.01
Madara	1	120	12.0	1E-05	0.04
	2	45	4.5	1E-05	0.18
	3	6	0.6	1E-05	0.12
	4	90	9.0	1E-05	0.05
Collado	1	55	5.5	1E-05	0.04
	2	65	6.5	1E-05	0.20
	3	5	0.5	1E-05	0.06
	4	120	12.0	1E-05	0.04
Chícamo	1	100	10.0	1E-05	0.04
	2	65	6.5	1E-05	0.14
	3	8	0.8	1E-05	0.10
	4	130	13.0	1E-05	0.05

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, 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 100 m de espesor y un valor de 1E-05 m/d de conductividad hidráulica.

La altura y posición de las fallas se determinan a partir del mapa cartográfico (plano nº4) elaborado por el ITGE (1993) en el Estudio de las reservas de los embalses subterráneos de la unidad del prebético de Murcia. Conocida la elevada complejidad tectónica que el sistema de Quibas presenta, únicamente se han incorporado aquellas barreras hidráulicas que, a efectos

del modelo, han sido relevantes para alcanzar las alturas observadas en cada dominio. La Figura 27 muestra los dominios hidrogeológicos y posición de las barreras hidráulicas adoptadas.

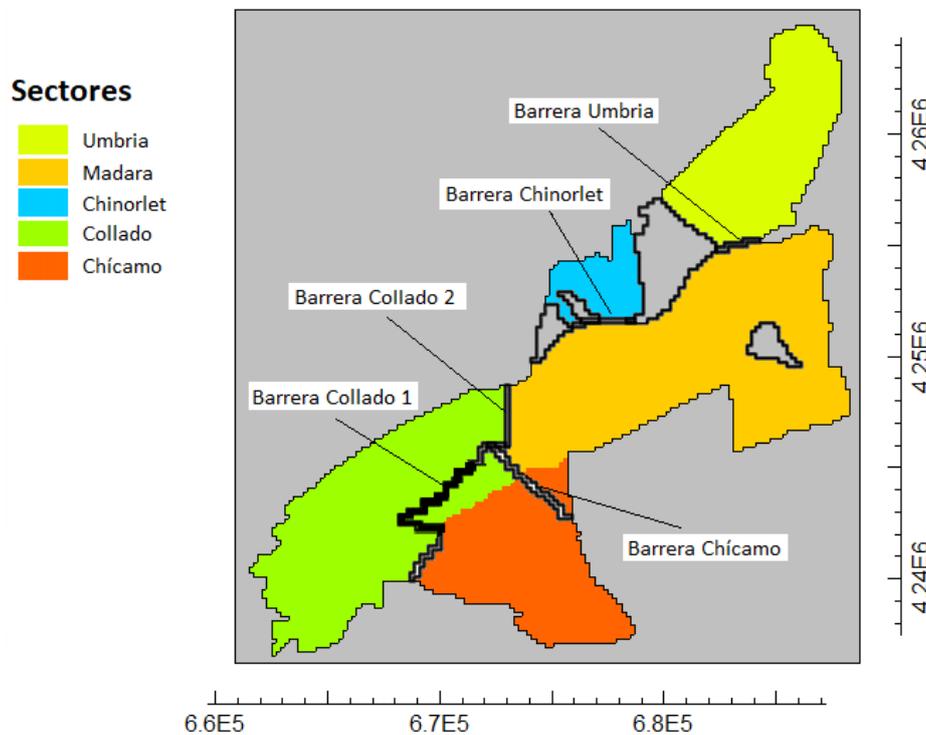


Figura 27. Dominios hidrogeológicos y ubicación de las barreras hidráulicas en el modelo.

## 5.6 Las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno representan los flujos que entran y/o salen del modelo debido a factores externos como por ejemplo la recarga, las extracciones de bombeo o relaciones entre ríos-acuífero y lago-acuífero (Harbaugh, 2005). Estos factores se introducen en el modelo a través de los paquetes específicos de MODFLOW los cuales permiten informar al modelo matemático acerca de la interacción entre el sistema analizado y el medio exterior. En un modelo de flujo existen tres clases de condiciones de contorno:

1. Condición de Dirichlet: la altura es prescrita y conocida en el tiempo. El flujo en estas celdas se simula para mantener dicha altura. En este modelo no existe ninguna condición de este tipo.
2. Condición de Neumann: el flujo o el gradiente de la altura es prescrito y, por tanto, las alturas varían según este. Esta condición permite representar en el modelo acciones tales como bordes impermeables, recarga por precipitación o retornos de riego, y los efectos de los bombeos.

3. Condición de Cauchy: se trata de una condición de borde en el que el flujo depende del nivel piezométrico, es decir, varía en respuesta a los cambios de altura en la celda del límite. Es una combinación de las condiciones de Dirichlet y de Neumann.

Las condiciones de contorno que se definen en el sistema de Quibas son la recarga por infiltración y retornos, las extracciones de agua por captaciones y el caudal drenado por el Manantial del Chícamo.

#### 5.6.1 Paquete de recarga

Permite introducir la recarga producida por la infiltración de precipitación y/o por retornos de riego en unidades de m/d. Ambas acciones son entradas de flujo que se distribuyen constantemente en las celdas que intersecan con las áreas de recarga expuestas en la sección 3.3. En MODFLOW, estas tasas son multiplicadas por el área horizontal de las celdas asignadas para calcular el flujo volumétrico.

#### 5.6.2 Paquete de pozos

Este paquete 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, según la profundidad de la captación, la capa acuífera de la cual se extrae agua. En rojo se marcan los pozos sin información relativa a la profundidad los cuales se asumen a 200 m.

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

Código	UTM X	UTM Y	Profundidad (m)	Columna	Fila	Capa
VI1564	678169	4251481	200	84	68	3
VI1352	681355	4253737	350	100	56	4
VI1098	681964	4255648	300	103	47	4
VI1097	681143	4253259	255	99	59	4
VI1096	680558	4250799	317	96	71	4
VI1095	682891	4258318	235	107	33	4
VI0987	680818	4256261	155	97	44	4
VI0984	681006	4256265	200	98	44	4
VI0813	677789	4254175	200	82	54	4
VI0432	685356	4256709	130	120	41	3
VI0427	685354	4256750	160	120	41	3
VI0179	682424	4255086	210	105	50	3
V00129	682508	4256062	200	106	45	3
1996IP0924	683627	4249737	200	111	76	3
1994IP0365	677789	4254175	200	82	54	4
273530020	678047	4237243	183	83	139	4
273520062	667218	4239910	170	29	125	4

273520061	666600	4241400	200	26	118	3
273520057	668442	4243746	140	35	106	3
273520054	671052	4244383	270	48	103	4
273520027	669457	4239765	200	40	126	3
273520011	667700	4241200	183	31	119	4
273510024	663319	4239335	110	10	128	3
273470029	676100	4251471	200	74	68	3
273460113	672681	4246685	289	56	92	4
273460112	672663	4246672	330	56	92	4
273460107	672695	4246687	200	56	92	4

### 5.6.3 Paquete de drenes

La incorporación del Manantial del Chícamo se realiza a través del paquete de drenes de MODFLOW. Dado de que se trata de una surgencia natural, este paquete se mantiene activo tanto en régimen natural como alterado a una cota de surgencia constante tal que el agua subterránea pueda salir cuando la altura es mayor a ésta. Teóricamente, esta cota se define bibliográficamente a 347 m.s.n.m., sin embargo, a efectos del modelo esta se define a 340 m.s.n.m. ya que permite obtener resultados más satisfactorios y representativos del funcionamiento real del sistema.

Por lo que se refiere a la conductancia del manantial, este parámetro se determina por calibración y representa el factor que relaciona la diferencia de altura con el caudal. La Tabla 6 muestra la posición del manantial y los valores de cota de surgencia y conductancia que se asignan preliminarmente.

Tabla 6. Posición, cota y conductancia (asignada preliminarmente) del Manantial del Chícamo.

Código	UTM X	UTM Y	Cota (m.s.n.m.)	Conductancia (m <sup>2</sup> /d)
273530001	674959.38	4236910.50	340	1000

## 5.7 Observaciones

Los paquetes de observación en MODFLOW permiten comparar los valores simulados con los observados. Estas comparaciones son necesarias para la calibración del modelo.

### 5.7.1 Paquete de observación de alturas piezométricas

Tras la revisión de los datos piezométricos existentes, el funcionamiento del acuífero de Quibas queda representado por un total de 14 puntos piezométricos con registros desde los inicios de 1970. La inexistencia de suficientes datos piezométricos anteriores a esta fecha imposibilita la identificación de alturas piezométricas en un supuesto estado estacionario y,

por tanto, la incorporación de puntos de observación en el modelo de régimen natural. Por tanto, este paquete solo se utiliza en el modelo de régimen influenciado.

Los datos necesarios para utilizar este paquete son la profundidad del pozo y los pasos de tiempo que contienen registros en unidades de m.s.n.m. La Tabla 7 muestra la posición y la profundidad de los pozos de control. En rojo se marcan las profundidades de los pozos de los cuales no se dispone de información y que, a efectos del modelo, se les asigna un valor de 200 m.

Tabla 7. Posición y profundidad de los pozos de observación.

Código	UTM X	UTM Y	Profundidad	Columna	Fila
PA12204	672718.50	4246584.10	267	57	92
PA12198	667897.40	4241144.20	280	33	119
08.51.001	683493.58	4256626.00	205	110	42
08.51.002	678139.54	4252850.05	160	84	61
08.51.004	682892.00	4258318.00	200	107	33
08.51.005	683022.60	4258440.01	200	108	33
08.51.006	685543.59	4256810.99	166	121	41
08.51.007	670499.46	4246287.09	330	45	94
08.51.008	672565.46	4246506.09	200	56	93
08.51.009	678126.54	4252795.05	200	84	61
08.51.010	680479.52	4250723.04	306	95	71
08.51.011	681181.54	4253272.02	300	99	59
08.51.012	681440.00	4253825.00	200	100	56
08.99.009	687993.00	4247457.00	200	133	88

### 5.7.2 Paquete de observación de drenes

En este paquete se introducen los datos registrados correspondientes a los datos hidrométricos aforados en el Manantial del Chícamo en m<sup>3</sup>/d. Los datos que se requieren son similares al paquete mencionado anteriormente los cuales son la profundidad a la que se encuentra la surgencia y los pasos de tiempo con los datos registrados asociados.

### 5.8 Solver

Para la solución del modelo matemático se ha comprobado que el paquete GMG (*Geometric Multigrid Package*) ha resultado ser el “solver” más eficiente que ha proporcionado mejores resultados de convergencia.

## 6 Calibración

### 6.1 Parametrización

La modelación de esta masa de agua subterránea requiere de la calibración de los valores de la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico de cada capa; el espesor y la conductividad hidráulica de las barreras hidráulicas; y, por último, de la conductancia del Manantial del Chícamo. La calibración se realizó buscando la mejor reproducción de las series piezométricas y de caudales aforados en el Manantial del Chícamo.

Los valores preliminares presentados en la Tabla 4 se modifican siguiendo una metodología de prueba y error. Los cambios realizados en los valores de la conductividad hidráulica de las capas acuíferas han permanecido, en todo momento, dentro de los rangos bibliográficos reportados en la sección 3.1. Los valores finalmente calibrados son los presentados en la Tabla 8 y en la Tabla 9 para las capas acuíferas y barreras hidráulicas, respectivamente.

Tabla 8. Resultados de la calibración: unidades hidrogeológicas.

Dominio	Capa	Kx (m/d)	Ss (1/m)	Sy (-)
Umbría	1	15	3E-05	0.01
	2	4	3E-05	0.015
	3	1	5E-05	0.018
	4	10	3E-05	0.011
Chinorlet	1	0.5	1E-06	0.004
	2	0.5	1E-06	0.004
	3	0.5	1E-06	0.004
	4	0.5	1E-06	0.004
Madara	1	12	1E-06	0.01
	2	2	3E-06	0.02
	3	0.08	2E-06	0.015
	4	10	1E-06	0.01
Collado	1	10	1E-06	0.009
	2	0.05	1E-06	0.01
	3	0.001	1E-06	0.008
	4	8.6	1E-06	0.006
Chícamo	1	25	5E-06	0.007
	2	11	5E-06	0.01
	3	4	5E-06	0.007
	4	30	5E-06	0.006

Tabla 9. Resultados de la calibración: barreras hidráulicas.

Barrera Hidráulica	Espesor (m)	Conductividad Hidráulica (m/d)
Umbría	100	3.1E-3
Chinorlet	100	1.3E-3
Collado 1	100	6.0E-2
Collado 2	100	1.0E-6
Chícamo	100	2.0E-2

## 6.2 Ajuste de series piezométricas

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 14 piezómetros introducidos en MODFLOW (ver sección 5.7.1), cuyo ajuste global ha resultado en un error cuadrático medio (RMSE) de 8.10 m (Figura 28). La calibración del caudal aforado en el Manantial del Chícamo ha resultado en un RMSE de 10.23 l/s. La Tabla 10 sintetiza los resultados de la calibración por dominios.

En el siguiente apartado se muestran, según los dominios hidrogeológicos, los resultados obtenidos para los puntos de control utilizados (Figura 29 a Figura 43).

Tabla 10. Resultados de la calibración por dominios hidrogeológicos.

Dominio	Puntos de Control	Nº datos	RMSE
Umbría	4	720	8.82 m
Collado	4	376	6.01 m
Madara	4	400	7.48 m
Chinorlet	2	326	9.18 m
Chícamo	1	157	10.23 l/s

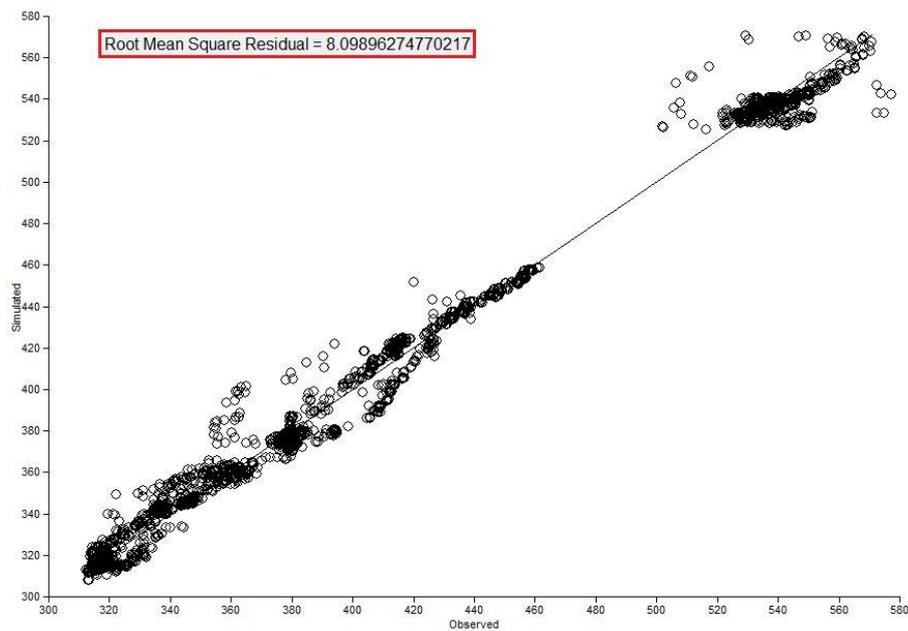


Figura 28. Valores observados versus valores simulados para los pozos de control.

### 6.2.1 Umbría

08.51.001

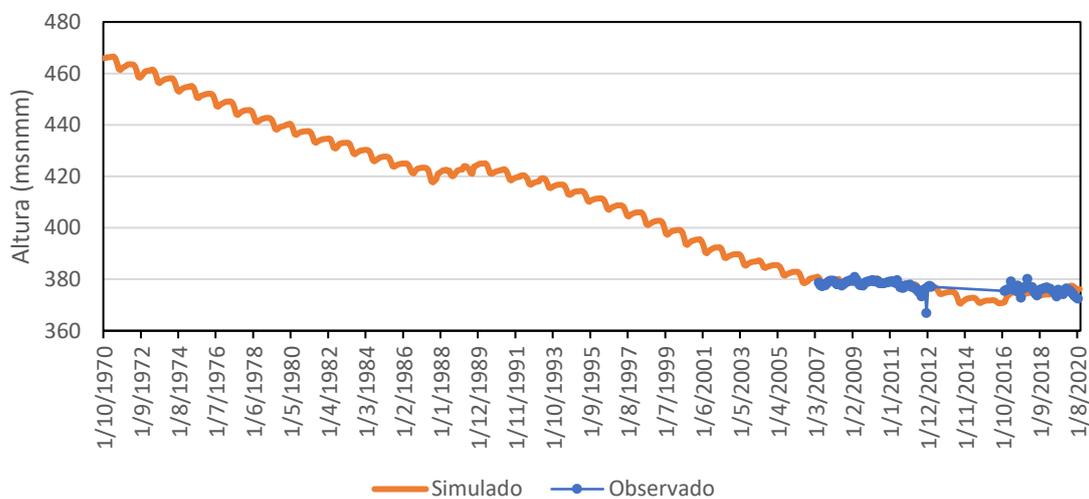


Figura 29. Calibración piezómetro 08.51.001.

### 08.51.004

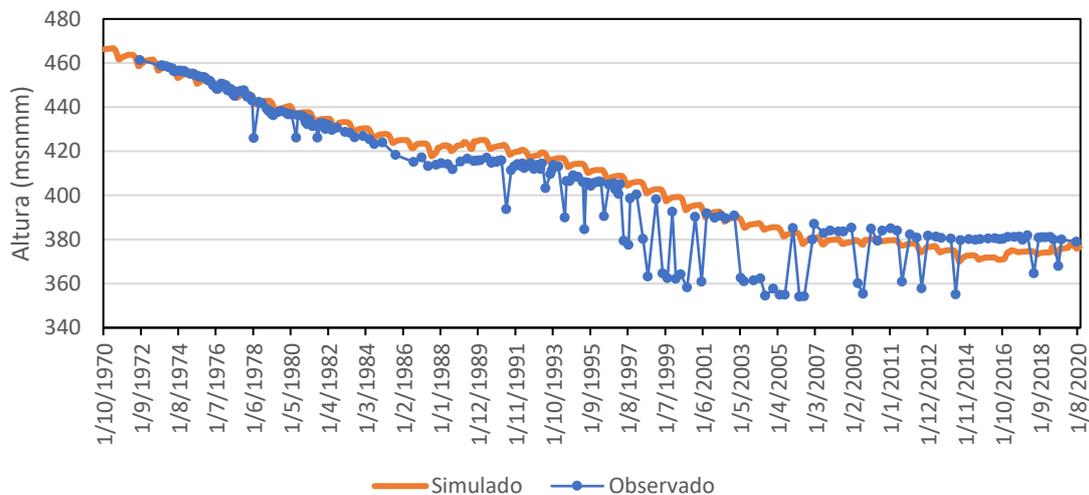


Figura 30. Calibración piezómetro 08.51.004.

### 08.51.005

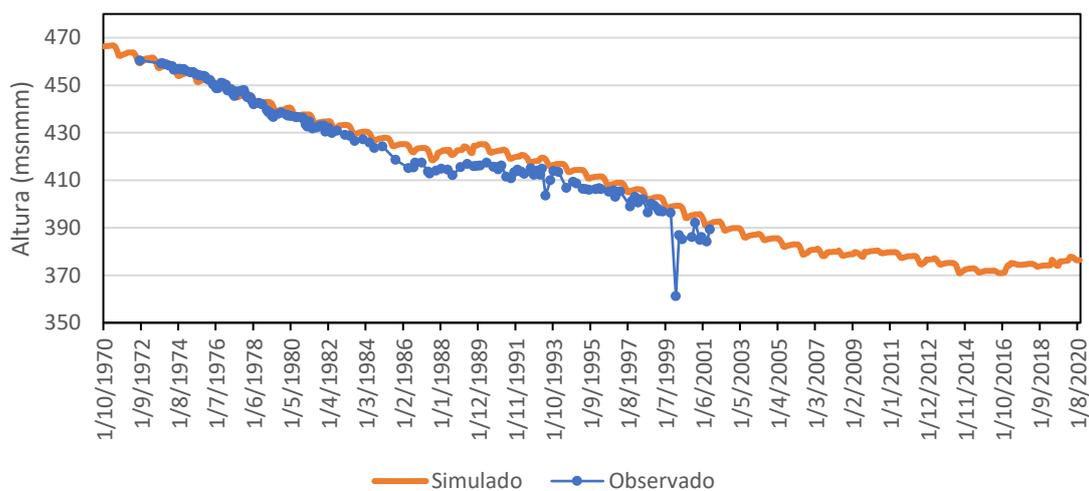


Figura 31. Calibración piezómetro 08.51.005.

08.51.006

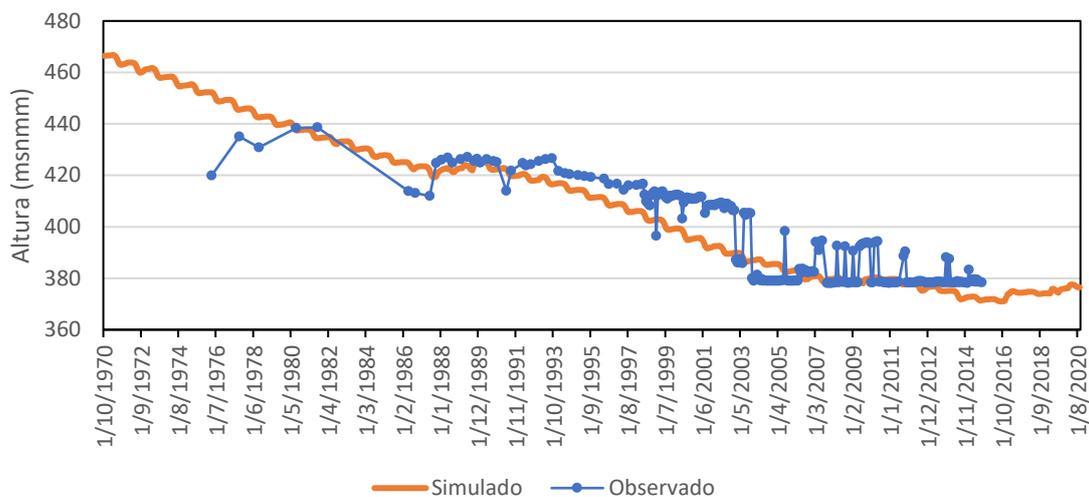


Figura 32. Calibración piezómetro 08.51.006.

## 6.2.2 Madara

08.51.010

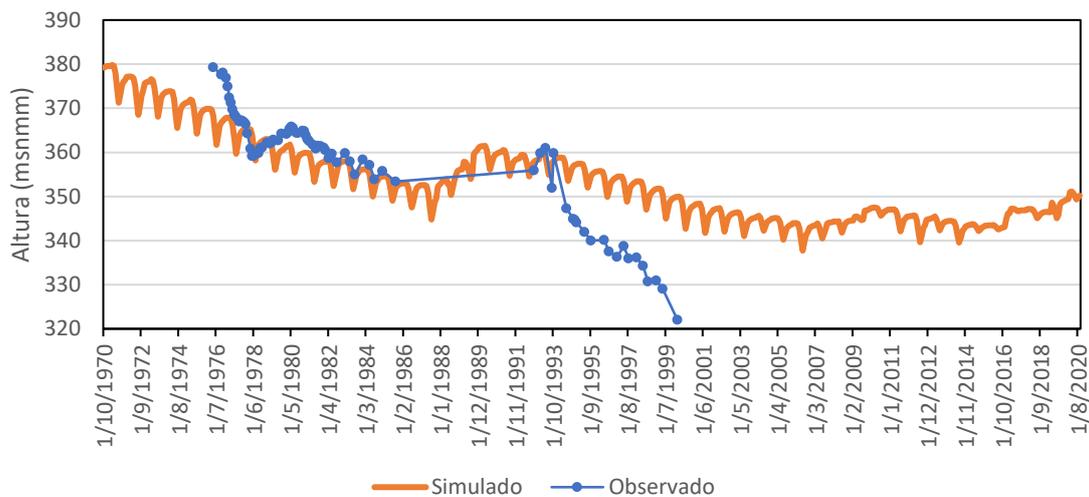


Figura 33. Calibración piezómetro 08.51.010.

### 08.51.011

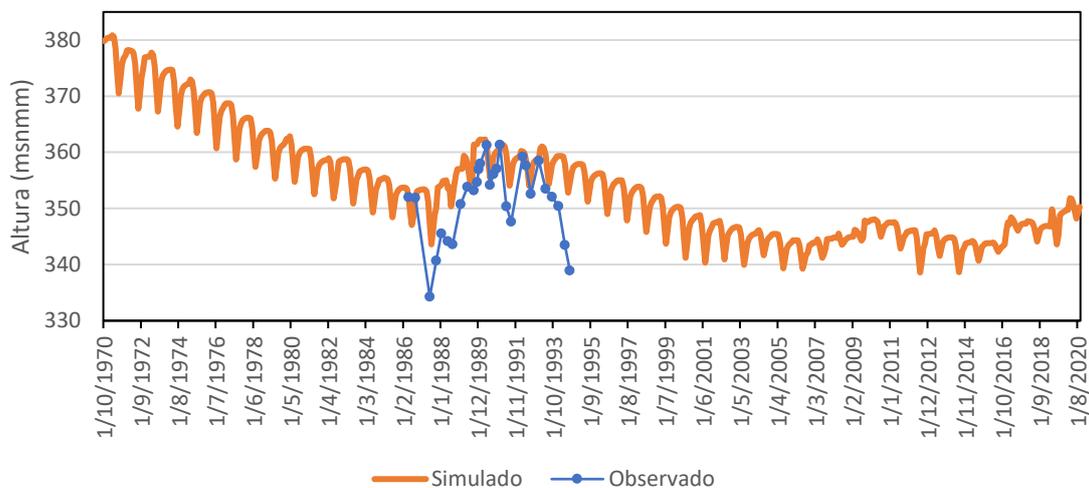


Figura 34. Calibración piezómetro 08.51.011.

### 08.51.012

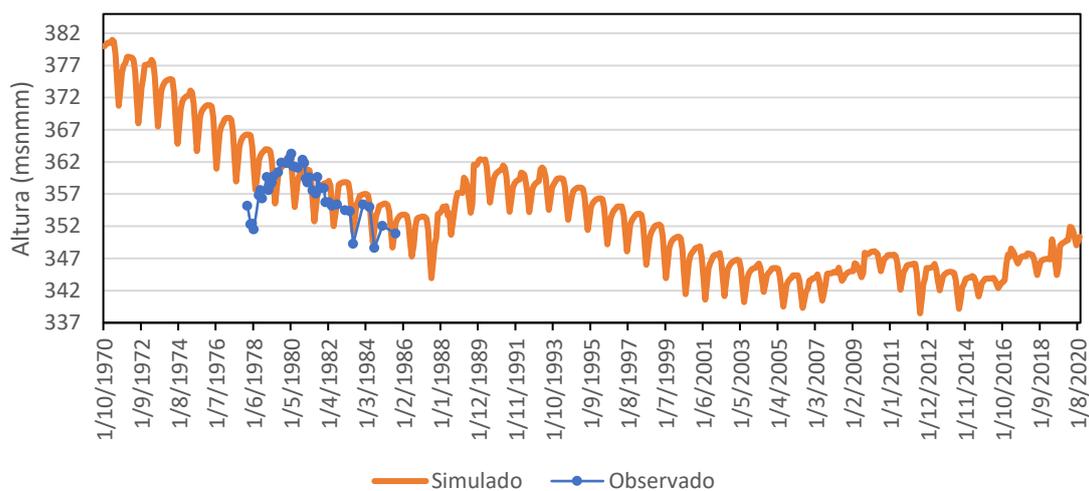


Figura 35. Calibración piezómetro 08.51.012.

08.99.009

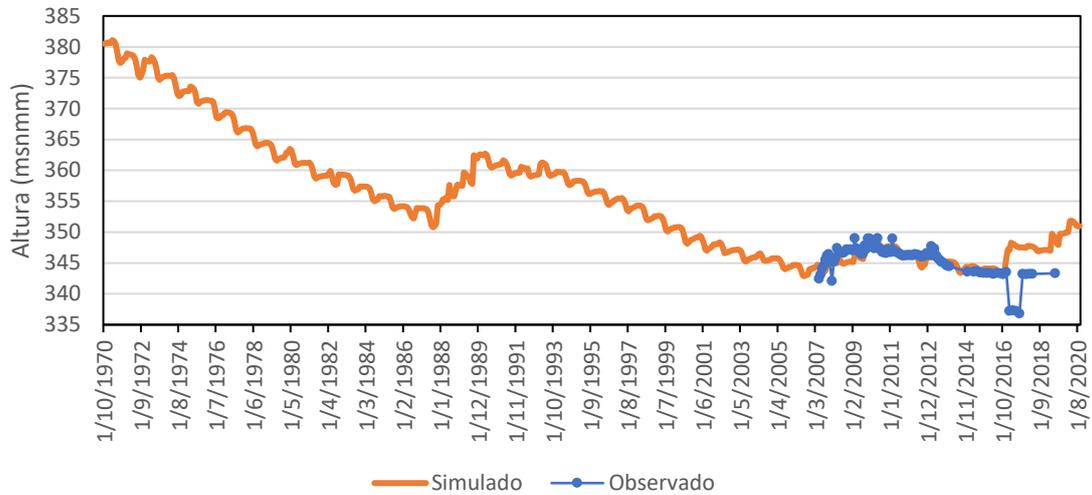


Figura 36. Calibración piezómetro 08.99.009.

### 6.2.3 Collado del Rey

08.51.007

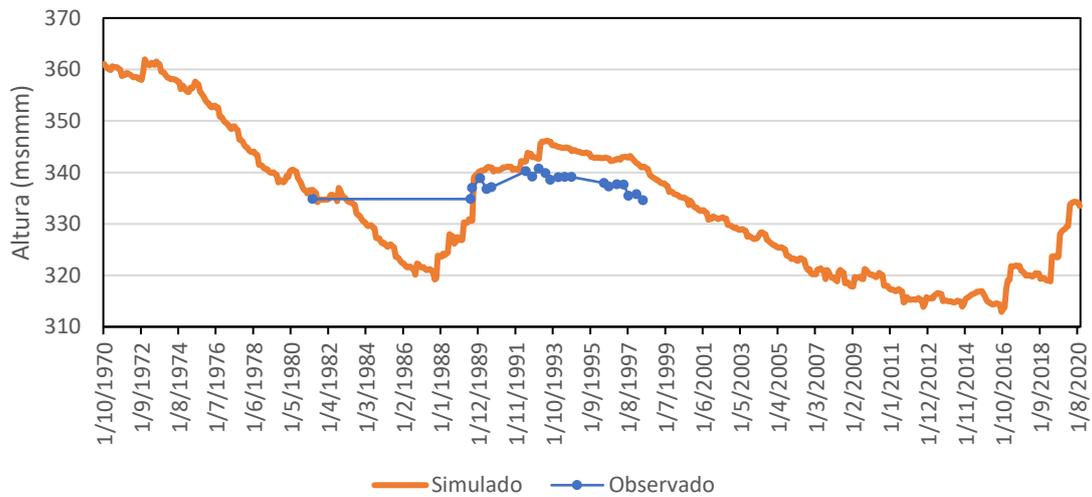


Figura 37. Calibración piezómetro 08.51.007.

08.51.008

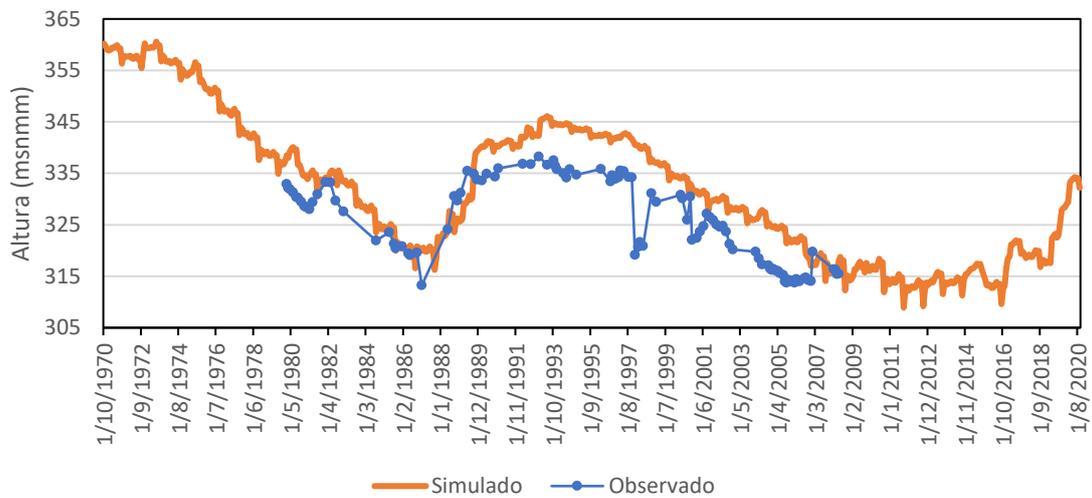


Figura 38. Calibración piezómetro 08.51.008.

PA12204

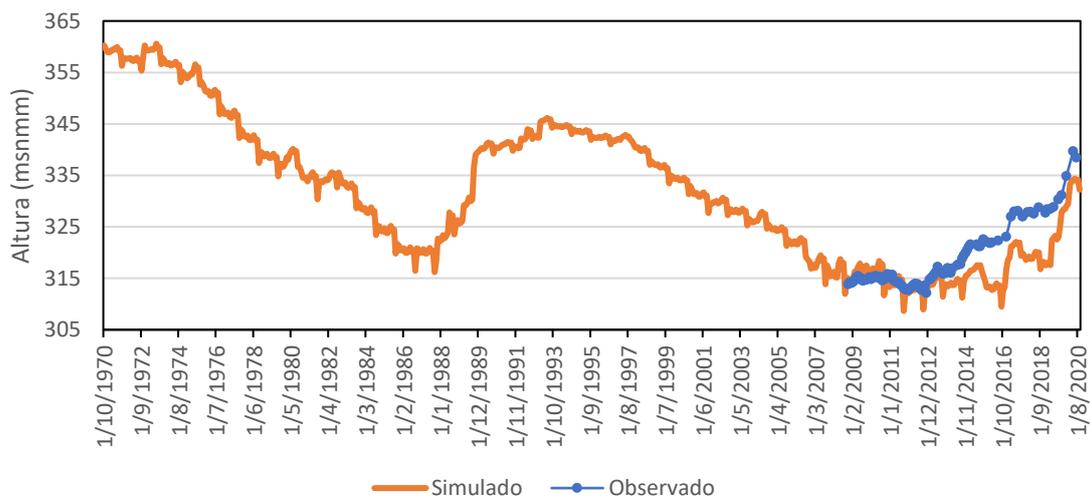


Figura 39. Calibración piezómetro PA12204.

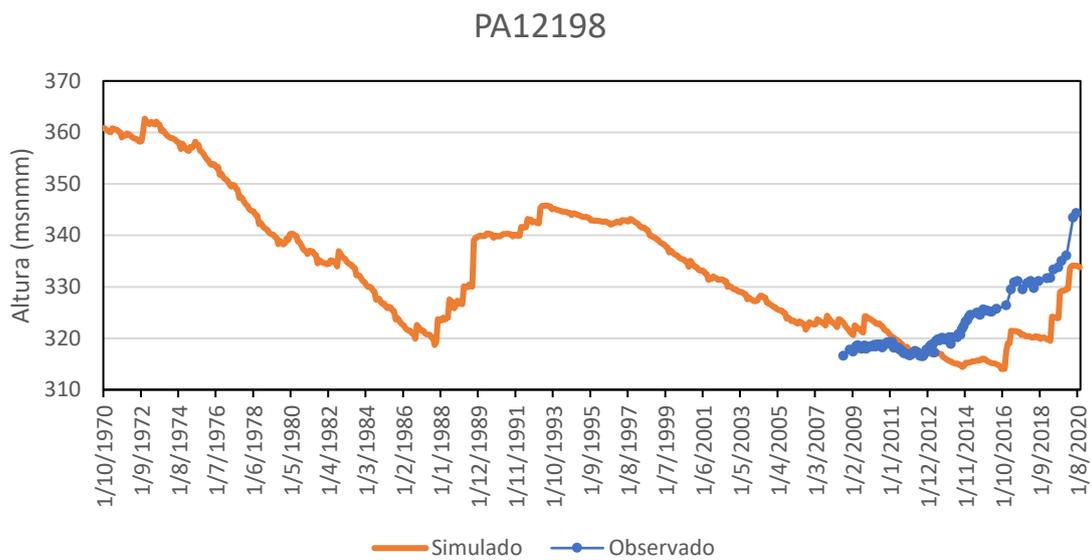


Figura 40. Calibración piezómetro PA12198.

#### 6.2.4 Chinorlet

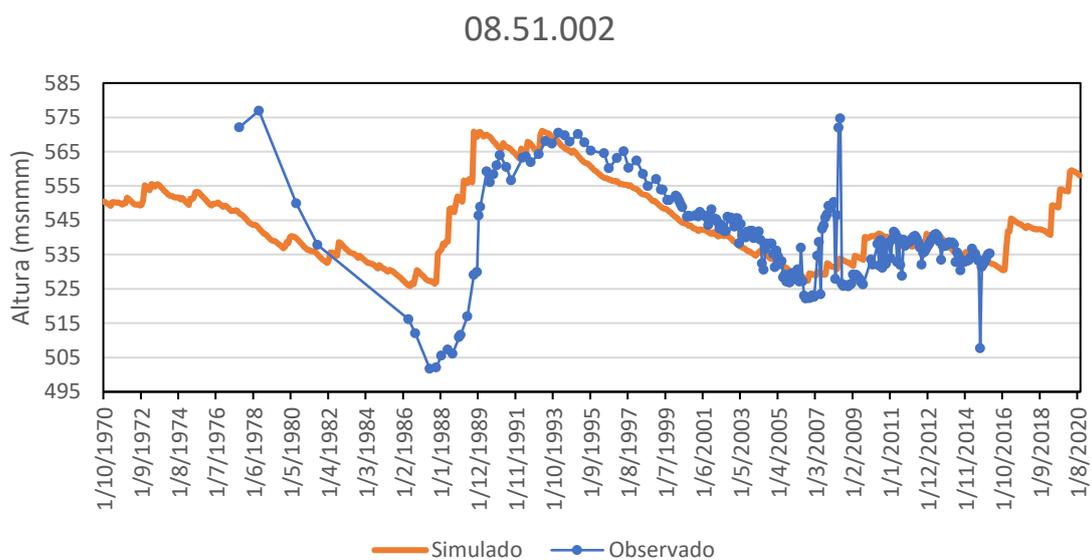


Figura 41. Calibración piezómetro 08.51.002.

08.51.009

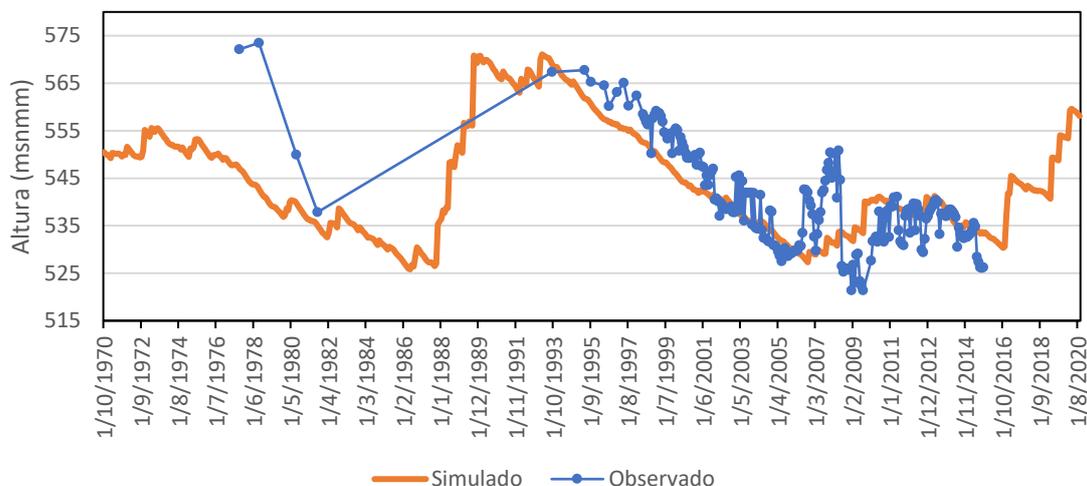


Figura 42. Calibración piezómetro 08.51.009.

## 6.2.5 Chícamo

### Manantial del Chícamo

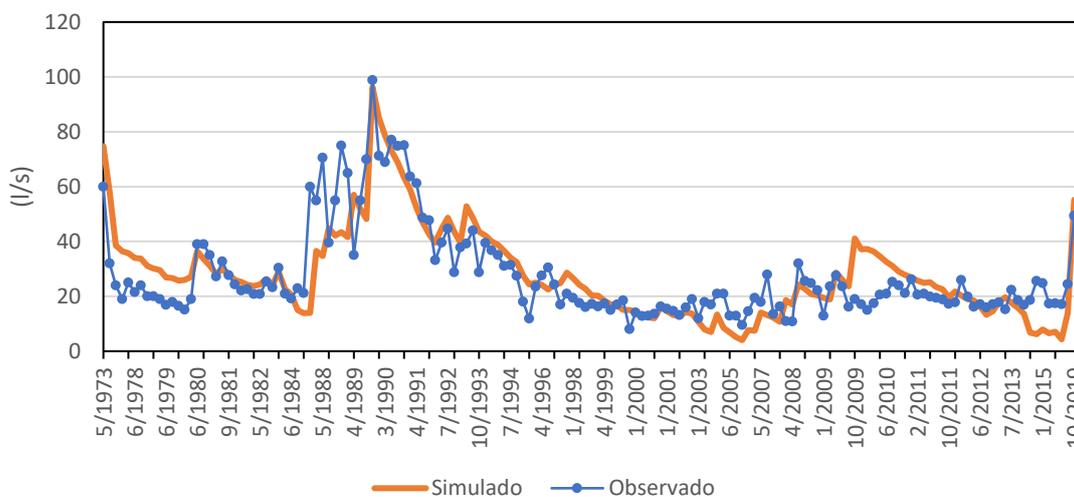


Figura 43. Calibración punto de control 273530001 (Manantial del Chícamo).

Como puede observarse, con excepción del piezómetro 08.51.010, los niveles son adecuadamente representados. 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 apartamientos no suelen ser registros realistas. En este trabajo no se han eliminado dichos puntos. En cuanto al manantial hay algunos periodos que podrían mejorarse, aunque la tendencia se consigue adecuadamente.

### 6.3 Balance hídrico en régimen estacionario

El modelo en régimen estacionario intenta representar una situación del sistema en la que no existe ninguna influencia humana y, por tanto, sin la presencia de bombes y/o retornos agrarios causados por la explotación. Se trata de un estado en el que las entradas son equivalentes a las salidas y, por tanto, no hay variaciones de almacenamiento en el sistema.

Dicho modelo se ha construido basado en las hipótesis recogidas en secciones anteriores, en las que se indicaba que las entradas corresponden a la recarga por infiltración de lluvia y las salidas al drenaje por el Manantial del Chícamo. Al no disponer de datos piezométricos ni de caudales del manantial, el modelo no puede ser calibrado. Los valores de los parámetros que se han utilizado para este modelo corresponden al modelo calibrado en régimen transitorio.

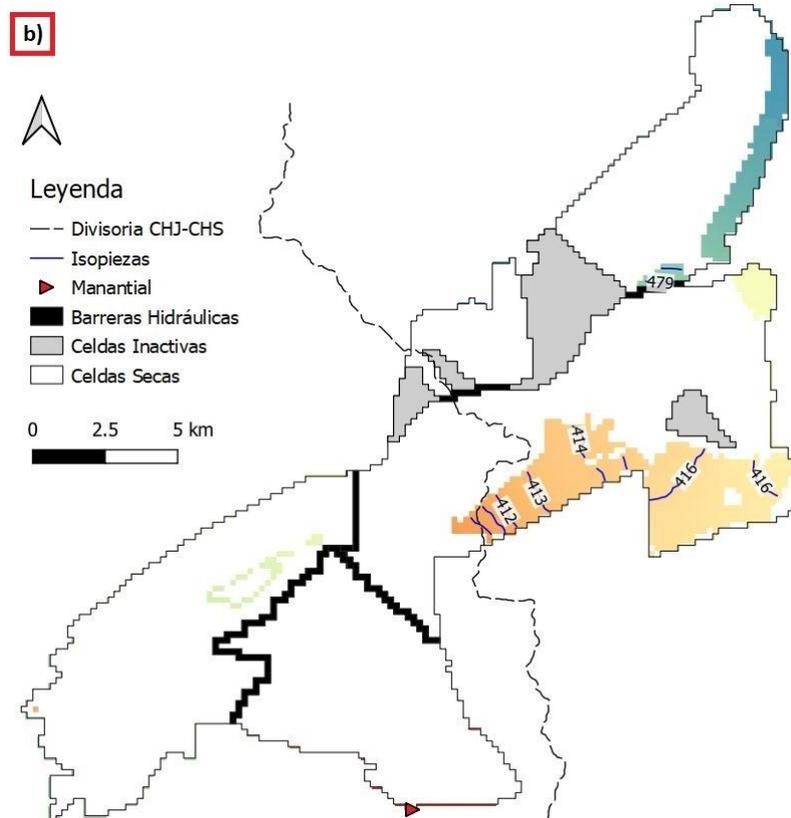
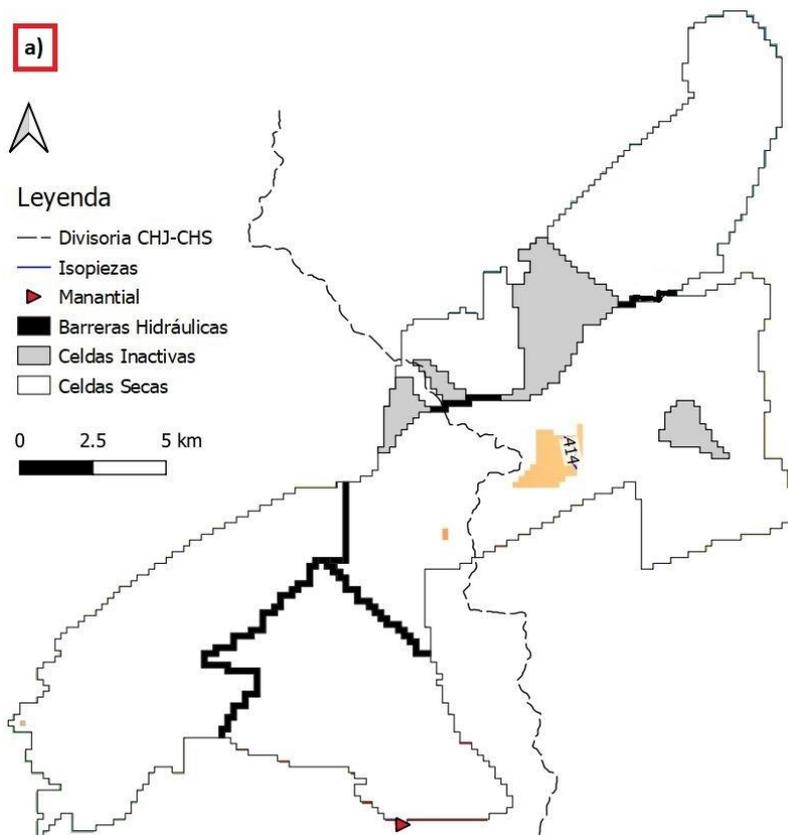
Asumiendo una recarga total de 4.12 hm<sup>3</sup>/a, correspondiente al promedio de los años hidrológicos comprendidos entre 1940 y 1968, la Figura 44 muestra el resultado para las cuatro capas de la superficie piezométrica en un régimen no influenciado.

Analizando los resultados por demarcaciones (Tabla 11), el 44% (1.81 hm<sup>3</sup>/a) de las entradas se generan en la DHJ. El flujo tiene una dirección preferencial suroeste. La totalidad de la descarga se realiza a través del Manantial del Chícamo ubicado en la DHS con un caudal de 130.50 l/s (4.12 hm<sup>3</sup>/a).

Tabla 11. Balance hídrico en régimen estacionario.

	<b>Recarga lluvia (hm<sup>3</sup>/a)</b>	<b>Transferencias (hm<sup>3</sup>/a)</b>	<b>Descarga por manantiales (hm<sup>3</sup>/a)</b>
<b>DHJ</b>	1.81	-1.81	0.00
<b>DHS</b>	2.31	1.81	4.12
<b>Total</b>	4.12		4.12

A continuación, se muestran las superficies piezométricas resultantes del modelo en régimen no influenciado para las cuatro capas que configuran el modelo.



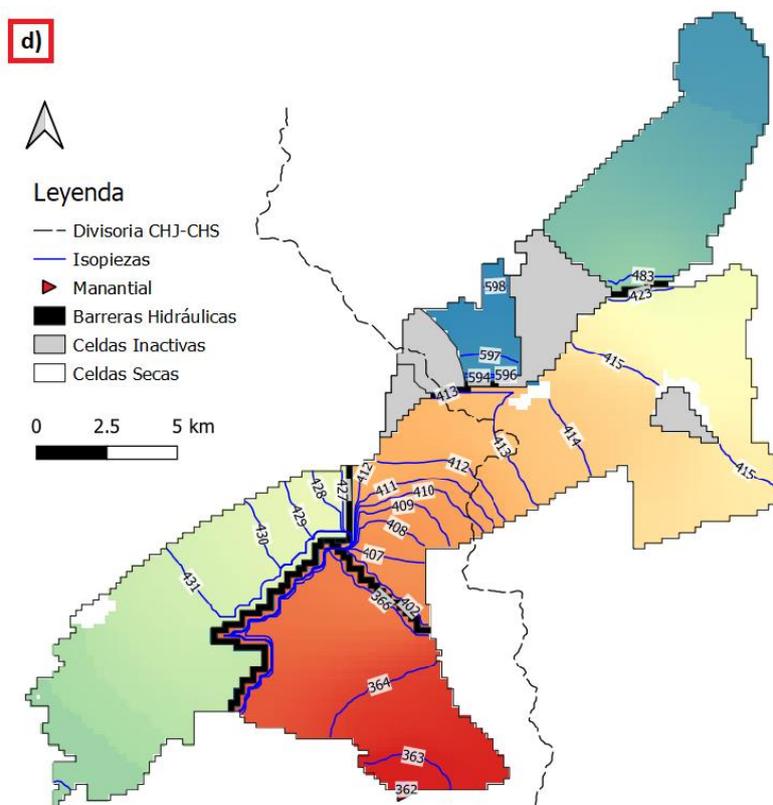
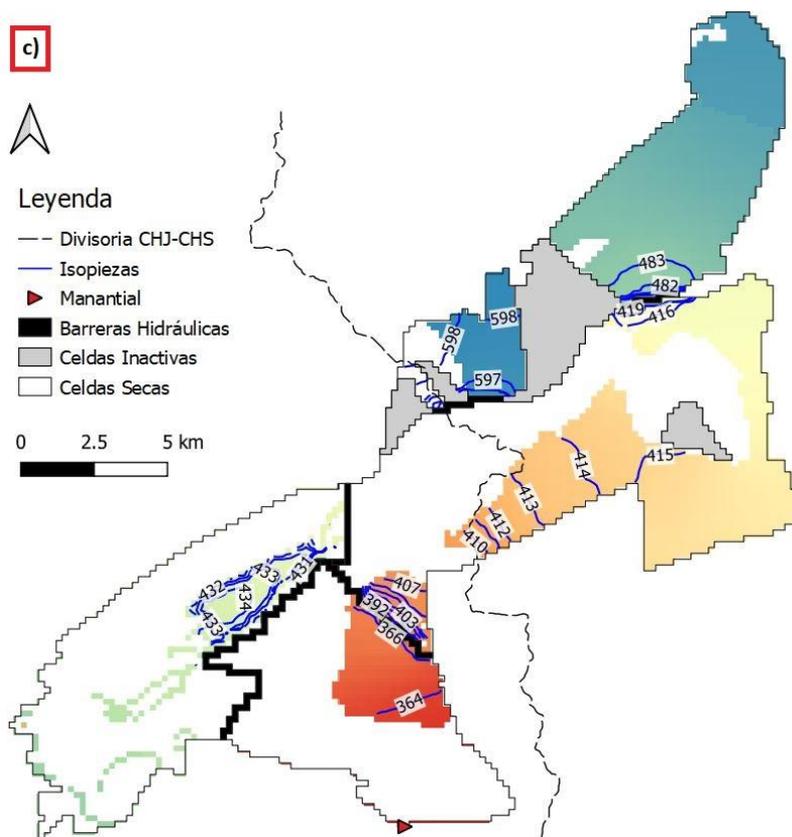


Figura 44. Mapa de isopiezas en régimen estacionario: a) Capa 1; b) Capa 2; c) Capa 3; y d) Capa 4.

#### 6.4 Balance hídrico en régimen transitorio

El modelo en régimen influenciado incluye la influencia de los bombeos y los retornos correspondientes al uso agrario de estas extracciones en los años hidrológicos comprendidos entre 1969 y 2019.

La Tabla 12 recoge los resultados del balance hídrico del modelo en régimen influenciado para un año medio. Durante el análisis de las transferencias existentes entre ambas demarcaciones se ha podido contrastar la existencia de flujos en ambas direcciones según la piezometría que se presente. A pesar de ello, el balance final muestra que la CHJ es perdedora en todo el periodo simulado con transferencias de flujo hacia la CHS que se estiman en 0.79 hm<sup>3</sup>/a de promedio. La evolución de dichas transferencias puede verse reflejada en la Figura 45 en la que los valores negativos indican salidas de flujo de la cuenca del Júcar. Debe obviarse el valor del primer año ya que corresponde al periodo de calentamiento del modelo.

La existencia de explotaciones superiores a la recarga provoca que, en ambas demarcaciones, se realice un consumo de reservas del acuífero que resultan en 2.19 hm<sup>3</sup>/a en la CHJ y 0.26 hm<sup>3</sup>/a en la CHS. Consecuentemente, se han producido descensos generalizados de los niveles piezométricos que han afectado notablemente al Manantial del Chícamo. En este régimen, la serie del manantial afora un caudal medio de 30.59 l/s (0.97 hm<sup>3</sup>/a).

Tabla 12. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 1969/70-2019/20 (año hidrológico medio).

(hm <sup>3</sup> /a)	Recarga Total	Consumo reservas	Aportes demarcación	Transferencia DHJ a DHS	Manantiales	Explotación
DHJ	2.95	2.19	5.14	-0.79	0.00	4.35
DHS	1.99	0.26	2.25	0.79	0.97	2.07
Total	4.94	2.45	7.39		0.97	6.92

El mismo balance se realiza para el periodo considerado como representativo de las condiciones más actuales (2002/03-2019/20). Las extracciones medias anuales son de 2.62 hm<sup>3</sup>/a y 1.93 hm<sup>3</sup>/a en la DHJ y DHS, respectivamente. Estos configuran unos volúmenes notablemente menores al periodo anterior analizado que, en consecuencia, resultan en un consumo menor de reservas. Para el caso de la DHS, los resultados presentados en la Tabla 13 demuestran que las salidas del sistema son inferiores al recurso renovable el cual se traduce con un aumento de las reservas estimado en 0.28 hm<sup>3</sup>/a. A pesar de ello, la media aforada en el Manantial del Chícamo es de 17.80 l/s (0.56 hm<sup>3</sup>/a), un caudal que sigue siendo muy inferior al reportado en régimen natural.

Tabla 13. Balance hídrico en régimen influenciado del periodo 2002/03-20019/20 (año hidrológico medio).

(hm <sup>3</sup> /a)	Recarga Total	Consumo reservas	Aportes demarcación	Transferencia DHJ a DHS	Manantiales	Explotación
DHJ	2.85	0.37	3.22	-0.60	0.00	2.62
DHS	2.17	-0.28	1.89	0.60	0.56	1.93
<b>Total</b>	<b>5.02</b>	<b>0.09</b>	<b>5.11</b>		<b>0.56</b>	<b>4.55</b>

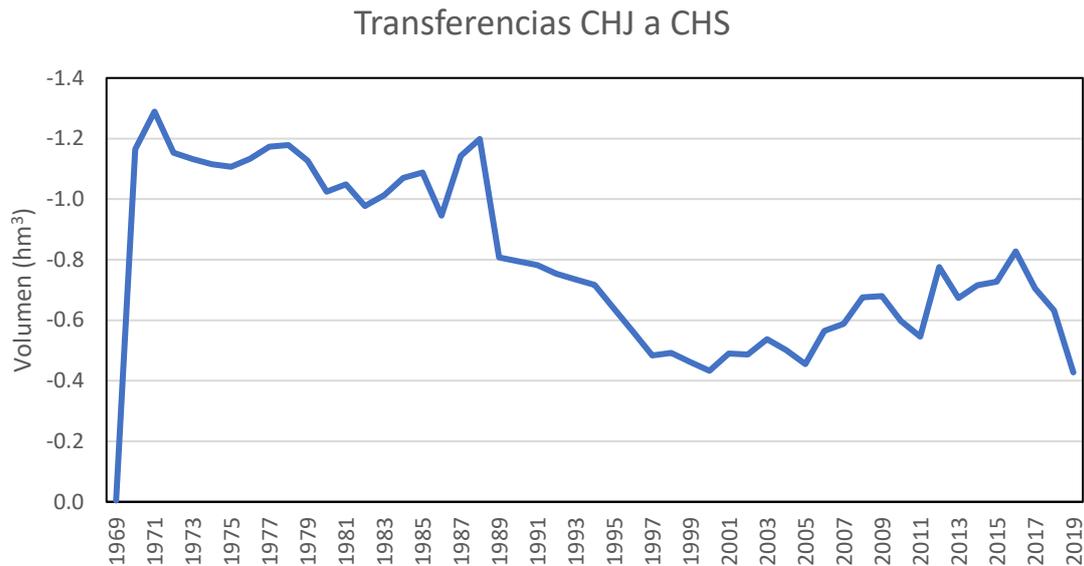
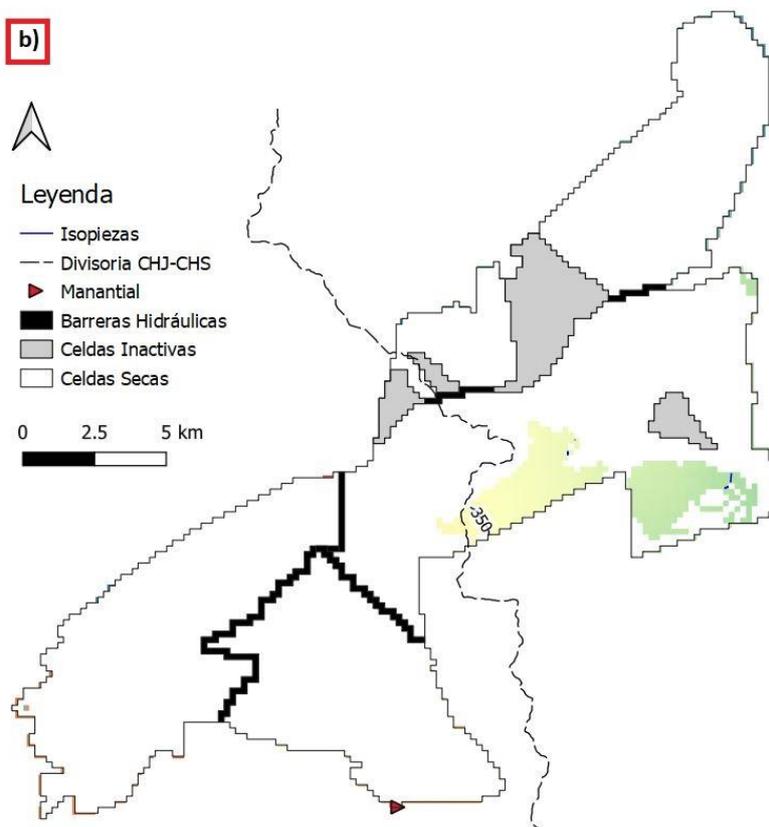
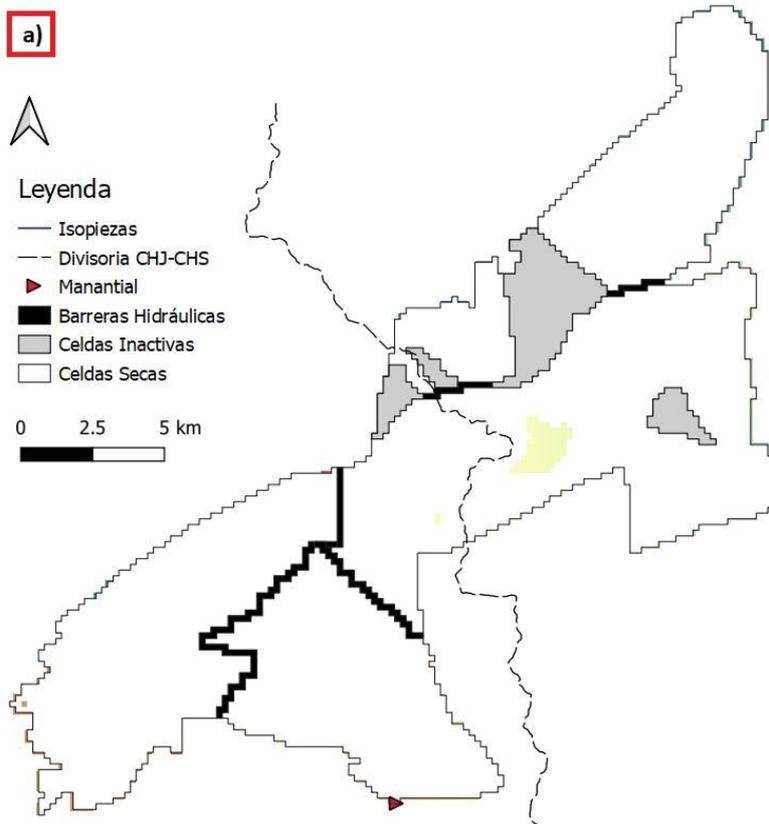


Figura 45. Evolución de las transferencias de flujo entre CHJ y CHS.

La Figura 46 representa las superficies piezométricas de las cuatro capas correspondientes al último paso de tiempo modelado (septiembre de 2020). La dirección preferencial de flujo es similar a la situación estacionaria. Sin embargo, el descenso de los niveles piezométricos ha provocado el secado de un mayor número de celdas cuya ubicación depende de la localización de las extracciones y la geometría interna de las capas que configuran el sistema de Quibas.



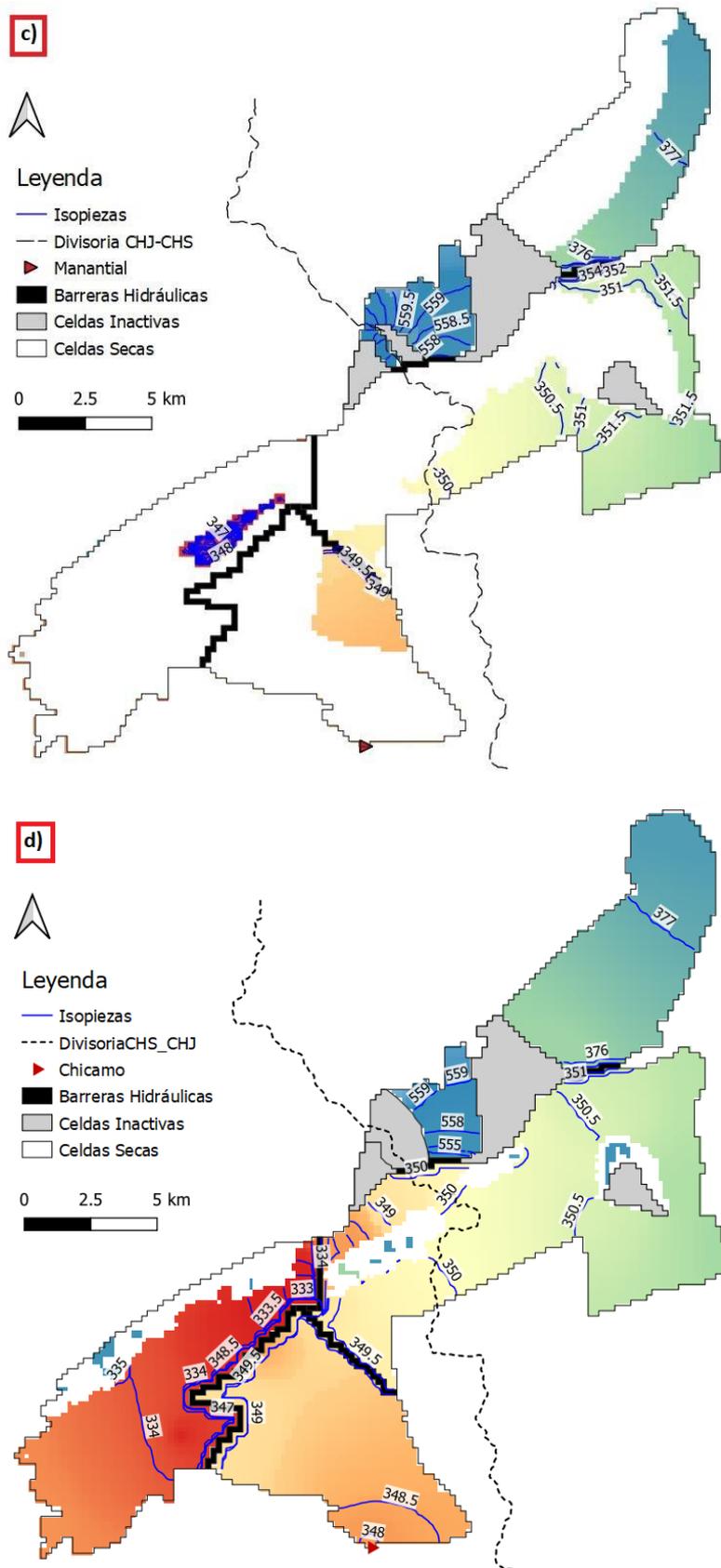


Figura 46. Mapa de isopiezas en régimen transitorio (septiembre 2020): a) Capa1; b) Capa 2; c) Capa 3; y d) Capa 4.

## 7 Evaluación de los recursos hídricos

### 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 2020, siendo este el último paso de tiempo simulado en régimen influenciado. Con la ayuda de herramientas SIG, el procedimiento adoptado es el siguiente:

1. Obtención de archivos ráster de resolución 200 m x 200m correspondientes a las superficies piezométricas obtenidas por ambos modelos, coeficientes de almacenamiento y muros de las capas.
2. Cálculo del volumen por celda y capa con la aplicación de la Ecuación 2:

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

donde  $V_{ac}$  es el volumen de agua ( $L^3$ ),  $P_C$  es la cota piezométrica (m.s.n.m.),  $M_C$  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. Suma de volúmenes de todas las celdas resultantes.

El volumen total de agua existente en la masa de agua subterránea de Quibas para el estado piezométrico de septiembre de 2020 se estima en 963.35 hm<sup>3</sup> que, adoptando los límites de las demarcaciones hidrográficas, 709.80 hm<sup>3</sup> corresponden a la CHJ. Las reservas calculadas para un régimen estacionario (sin afecciones en el sistema) se estiman en 1,294.79 hm<sup>3</sup>, un volumen de reservas que, en comparación con las de septiembre de 2020, se han visto reducidas en un 25.60%.

### 7.2 Estado cuantitativo

La evaluación del estado cuantitativo de la masa de Quibas se realiza a través del análisis de las explotaciones, recursos disponibles e índice de explotación en base al balance hídrico 2002/03-2019/20, el cual se considera representativo de la situación actual de los suministros existentes. Estos tres elementos son propios del test del balance hídrico el cual permite detectar si las extracciones superan a las recargas después de descontar las necesidades ambientales. Este test es el que se recoge en la guía para la evaluación del estado de las aguas subterráneas y que se utiliza en la elaboración de los Planes Hidrológicos con una caracterización adicional de las tendencias piezométricas en puntos representativos de la masa (MITERD, 2020).

El carácter intercuenca de esta masa de agua subterránea añade cierta complejidad ya que la evaluación debe realizarse tanto en la DHS como DHJ. El cálculo del recurso disponible (RD) e índice de explotación (IE) se realiza según la Ecuación 3 y Ecuación 4, respectivamente.

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

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

Se considera que una masa se encuentra en mal estado cuantitativo cuando el índice de explotación es mayor de 0.8. La Tabla 14 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 14. Explotaciones, recurso disponible e índice de sobreexplotación según la demarcación hidrográfica (periodo 2002/03-2019/20).

(hm <sup>3</sup> /a)	Explotaciones	Recurso disponible	Índice de explotación
DHJ	2.62	2.25	1.16
DHS	1.93	2.21	0.87
<b>TOTAL</b>	4.55	4.46	1.02

Los resultados del índice de explotación indican que el sistema de Quibas se encuentra en estado de sobreexplotación en ambas demarcaciones. Partiendo de los recursos disponibles promediados en este periodo, el buen estado cuantitativo podría alcanzarse con una disminución global de las explotaciones de un 22% que, según el origen de los recursos, correspondería a un 31% en la DHJ y un 8% en la DHS. A pesar de ello, la respuesta del sistema ante una disminución de las extracciones según la demarcación debería evaluarse en el modelo ya que se espera que atienda a cambios en el recurso disponible debido a cambios en las transferencias entre la CHJ y CHS.

### 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, 2021):

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 1940-1968) o transitorio (años hidrológicos 1969-2019 o 2002-2019 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 45% de los recursos de la masa de Quibas se generan en la DHJ y el 55% en la DHS. Con respecto a los límites de la cuenca hidrogeológica, el 100% del recurso drena por la DHS a través del Manantial del Chícamo (Tabla 15).

Tabla 15. Distribución de los recursos hídricos en régimen natural según se adopte la cuenca hidrológica o hidrogeológica.

Criterio	DHJ (hm <sup>3</sup> /a)	DHS (hm <sup>3</sup> /a)	Total (hm <sup>3</sup> /a)
(A1) Cuenca hidrológica	1.81 (44%)	2.31 (56%)	4.12 (100%)
(A2) Cuenca hidrogeológica	0.00 (0%)	4.12 (100%)	

La distribución de recursos en régimen alterado es más compleja debido a que se produce un consumo de las reservas del sistema y la creación de varios umbrales piezométricos. En este caso, no se incluye la distribución por cuencas hidrogeológicas ya que se mantiene una componente de flujo de dirección y sentido predominante noreste-suroeste, sin originarse divisorias hidrogeológicas que permitan diferenciar un reparto del recurso entre la DHJ y DHS. En consideración a los límites de las cuencas hidrológicas, el 68% del recurso procede de la DHJ y el 32% de la DHS (Tabla 16).

Tabla 16. Distribución de los recursos hídricos en régimen alterado considerando la cuenca hidrológica.

Criterio	DHJ (hm <sup>3</sup> /a)	DHS (hm <sup>3</sup> /a)	Total (hm <sup>3</sup> /a)
(A1) Cuenca hidrológica	5.14 (70%)	2.25 (30%)	7.39 (100%)

### 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 1969/70-2019/20 y 2002/03-2019/20 se recogen en la Tabla 17 y Tabla 18, respectivamente. Los datos referidos al régimen estacionario corresponden al periodo 1940/41-1968/69.

Tabla 17. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 1969/70-2019/2020).

Criterio	Régimen hídrico	Tipo/subcriterio	DHJ (hm <sup>3</sup> /a)	DHS (hm <sup>3</sup> /a)	Total (hm <sup>3</sup> /a)
(B1) Origen	Estacionario	B1.1	1.81 (45%)	2.31 (55%)	4.12 (100%)
	Transitorio	B1.2	2.95 (60%)	1.99 (40%)	4.94 (100%)
		B1.3	5.14 (70%)	2.25 (30%)	7.39 (100%)
(B2) Drenaje	Estacionario	B2.1	0.00 (0%)	4.12 (100%)	4.12 (100%)
	Transitorio	B2.2	5.14 (70%)	2.25 (30%)	7.39 (100%)

Tabla 18. Distribución de los recursos hídricos por demarcaciones hidrográficas según el origen y forma de drenaje del recurso (régimen transitorio periodo 2002/03-2019/2020).

Criterio	Régimen hídrico	Tipo/subcriterio	DHJ (hm <sup>3</sup> /a)	DHS (hm <sup>3</sup> /a)	Total (hm <sup>3</sup> /a)
(B1) Origen	Estacionario	B1.1	1.81 (45%)	2.31 (55%)	4.12 (100%)
	Transitorio	B1.2	2.85 (57%)	2.17 (43%)	5.02 (100%)
		B1.3	3.22 (63%)	1.89 (37%)	5.11 (100%)
(B2) Drenaje	Estacionario	B2.1	0.00 (0%)	4.12 (100%)	4.12 (100%)
	Transitorio	B2.2	3.22 (63%)	1.89 (37%)	5.11 (100%)

## 8 Discusión de los resultados

Las hipótesis realizadas en el modelo conceptual controlan o influyen, en gran parte, los resultados obtenidos del modelo. Todas estas hipótesis están ligadas a la falta de datos e incertidumbres en la definición de las capas acuíferas, condiciones de contorno y distribución de los parámetros. A pesar de ello, la modelización de la masa de Quibas se considera globalmente satisfactoria dada la complejidad estructural que presenta.

Durante la calibración del modelo se ha podido contrastar que el funcionamiento hidrogeológico responde a un sistema por dominios hidrogeológicos que presentan conexión hidráulica entre ellos. Pues según varían los niveles piezométricos de cualquier de estos dominios, el caudal aforado en el Manantial del Chícamo variaba significativamente.

La metodología adoptada en este proyecto permite justificar que el funcionamiento en régimen estacionario sigue respondiendo a un sistema basado en dominios hidrogeológicos y no de comportamiento continuo como se reporta en estudios previos (IGME, 1984, 2008a, 2021). Dicha compartimentación está fundamentada en la existencia de fallas estructurales que dificultan el paso del flujo entre zonas que, posteriormente, han adoptado un carácter más notorio por las fuertes explotaciones que el acuífero ha sufrido a lo largo de los años.

Los ajustes obtenidos en todos los dominios han resultado con errores cuadráticos medios similares. A pesar de ello, los resultados de calibración están expuestos a puntos piezométricos cuya tendencia se aleja de la que se mide en cada piezómetro y, por tanto, no realistas del funcionamiento del sistema. El filtrado y supresión de dichos puntos reflejarían una notable disminución del error.

El dominio de Chinorlet es el que presenta mayor error (9.18 m). Geológicamente, este dominio se caracteriza por la disposición de unidades hidrogeológicas verticales y por la presencia de una capa acuífera colgante. Aunque se ha tratado de reproducir dicha configuración, la modelización de todas estas características está ligada a un alto grado de incertidumbre. Los parámetros finalmente asignados reflejan que se trata de una zona de permeabilidad media-baja (0.5 m/d) y porosidad eficaz muy baja (0.004) que se puede asociar a la alta presencia de materiales triásicos impermeables.

Si bien el funcionamiento libre del acuífero y la geología que lo conforma sugiere valores de porosidad eficaz alrededor de 0.02, algunas capas de los dominios de Collado del Rey y Chícamo se han calibrado con valores inferiores a este. Lo anterior se puede asociar a una sobrestimación de la recarga en la DHS que, geológicamente, podría relacionarse con la presencia de las ventanas tectónicas que dan lugar a las Sierras de Quibas y Barinas. A efectos del modelo, estas deberían traducirse en una disminución de la tasa de recarga que se infiltra directamente a las formaciones acuíferas prebélicas subyacentes debido a la presencia de materiales impermeables de la unidad de despegue que separa el subbético del prebético.

Esta respuesta del sistema es la que se ha tratado de imitar en la zona de la Sierra del Reclot ubicada en el acuífero de Madara. En consecuencia, los valores de porosidad eficaz y coeficientes de almacenamiento asignados se consideran representativos de las unidades hidrogeológicas existentes (entre 0.01 y 0.02). Sin embargo, los resultados en este dominio no han sido capaces de reproducir correctamente las afecciones del sistema que originan

significativos descensos piezométricos como es el caso de los que se registran entre 1993-2000 de hasta 40 m.

Tras la caracterización geológica realizada, los resultados del modelo obtenidos en este mismo dominio permiten confirmar que los registros del piezómetro 08.51.014 no son representativos de la masa de Quibas, sino de la masa de la Sierra de Argallet por su localización en materiales jurásicos. A pesar de ello, sería necesario mejorar el reconocimiento geológico de esta zona ya que podrían existir posibles transferencias de flujo entre estas masas vecinas.

Coherente con la asignación de parámetros hidráulicos adoptada los cuales son homogéneos por capa y dominio, la evolución piezométrica simulada es prácticamente la misma en todos los puntos de observación que se ubican dentro de un mismo dominio. Una aproximación a un medio más anisótropo y heterogéneo podría darse con la aplicación de una zonificación interna más detallada que permitiera reproducir las discrepancias existentes entre piezómetros ubicados en un mismo dominio. Por ejemplo, en el dominio hidrogeológico de Umbría, el piezómetro 08.51.006 registra cotas mayores en comparación al resto de piezómetros que podrían asociarse a una zona de conductividad hidráulica inferior causada por una mayor presencia de intercalaciones margo-arcillosas en la unidad calcárea del Oligoceno.

Por lo que se refiere al Manantial del Chícamo, este ha supuesto una complejidad añadida en el proceso de calibración. Una mejora en la simulación de los registros hidrométricos aforados en el manantial suponía un empeoramiento de la calibración piezométrica de otros dominios hidrogeológicos y viceversa. La calibración final ha resultado con un error cuadrático medio de 10.23 l/s, un error que podría reducirse con la incorporación de mejoras en el modelo tales como las que se han ido mencionando a lo largo de esta discusión. En cualquier caso, la tendencia de los caudales es adecuadamente reproducida.

De acuerdo con estos resultados, en régimen natural se estiman unas reservas de 1,294.79 hm<sup>3</sup> que, en comparación con la situación piezométrica obtenida para septiembre de 2020, se ven reducidas en 331.44 hm<sup>3</sup> y, por tanto, reflejando un consumo del 26% de las reservas totales en la masa de Quibas. Sin duda se trata de un porcentaje que, atendiendo a unos consumos superiores a las recargas naturales del sistema, se espera que se incremente. Las incertidumbres inherentes a esta posible evolución de las reservas pueden estudiarse con los modelos resultantes de este proyecto. Estos constituyen una herramienta que permitirá realizar un seguimiento del comportamiento hidrogeológico en planificaciones futuras que atiendan a cambios en consumos, así como los impactos del cambio climático entre otros. A pesar de ello, hay que tener en cuenta que el carácter renovable de estas reservas varía según las circunstancias y condiciones climáticas que se presenten, las cuales están altamente ligadas con la recarga natural o gestión de los recursos que se realice.

Los resultados de la evaluación del estado cuantitativo de la masa según el periodo 2002/03-2019/20 determinan que el recurso disponible es de 2.25 y 2.21 hm<sup>3</sup>/a para la DHJ y DHS, respectivamente. Atendiendo un promedio de explotaciones de 2.62 y 1.93 hm<sup>3</sup>/a, se evalúa que la masa se encuentra en mal estado cuantitativo en ambas demarcaciones con índices de sobreexplotación de 1.16 en el Júcar y 0.87 en el Segura. Según los criterios expuestos en MITERD (2020), el análisis debería complementarse con el correcto estudio de las tendencias piezométricas en zonas representativas del acuífero. Este análisis se realiza en los Proyectos de Propuestas de Plan Hidrológico 2022-2027 que resultan de tendencia descendente en el Júcar y sin impactos en el Segura (CHJ, 2021a; CHS, 2021a).

Finalmente, los recursos totales de la masa de Quibas pueden distribuirse de acuerdo con las distintas propuestas recogidas en IGME (2021) y mencionadas en la 7.3. Técnicamente, el criterio B1.3 es el más eficiente ya que atiende al origen del recurso y la explotación existente en cada demarcación. Este criterio distribuye el recurso total (5.11 hm<sup>3</sup>/a evaluado según el balance 2002/03-2019/20) en un 63% y 37% para la CHJ y CHS. No obstante, este criterio no está fundamentado para conseguir el buen estado cuantitativo de la masa. Para ello, el recurso a distribuir debería hacer referencia al recurso disponible en cada demarcación. Se estima que el buen estado podría alcanzarse con una reducción de las extracciones de un 22% repartido en un 31% para la DHJ y un 8% para la DHS. Este escenario debería ser objeto de evaluación con uso del modelo desarrollado en este trabajo ya que esta disminución podría suponer cambios en las transferencias existentes entre la CHJ y CHS, pues se trata de una componente que configura un papel fundamental para la determinación del recurso disponible en ambas demarcaciones.

## 9 Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se ha desarrollado un modelo de flujo de la masa de agua subterránea de Quibas con la interfaz ModelMuse y el código MODFLOW. La revisión bibliográfica preliminar a la definición de un modelo conceptual ha permitido estudiar en detalle los límites que definen el sistema acuífero, así como la caracterización del funcionamiento hidrogeológico de la masa. La aplicación final del modelo ha permitido evaluar, de forma justificada y coherente, el volumen de las reservas, el estado cuantitativo de la masa según el cálculo de los recursos disponibles e índices de explotación y, finalmente, las posibles distribuciones de recurso en base a los criterios expuestos en IGME (2021). Entre todos los aspectos que se recogen durante la discusión de los resultados, merecen especial mención los siguientes puntos:

- El piezómetro 08.051.014 no debería considerarse como representativo del sistema de Quibas por su ubicación en formaciones Jurásicas correlativas estructuralmente con las formaciones aflorantes en la masa de agua subterránea de la Sierra de Argallet.

- Los dominios hidrogeológicos no configuran zonas acuíferas de comportamiento autónomo puesto que se ha podido comprobar que existen relevantes conexiones hidráulicas entre ellas, tanto en un régimen alterado como influenciado.
- El cálculo del recurso disponible de la masa y su distribución según la demarcación debe realizarse atendiendo a un estudio previo que estime las transferencias existentes entre ambas demarcaciones. Pues, según estas, la distribución de los recursos puede variar significativamente ya que dependen de las condiciones de contorno tales como las salidas por el Manantial del Chícamo y extracciones por bombeos.
- El uso del modelo desarrollado supone una herramienta útil que debería ser utilizada por las administraciones competentes con el fin de realizar una buena gestión de los recursos presentes en la masa.

Finalmente, se concluye que se han alcanzado los objetivos establecidos en el inicio de este proyecto. A continuación, se detallan algunas de las posibles mejoras y/o estudios que se podrían llevar a cabo en líneas futuras.

- Evaluación del volumen de explotaciones máximas permisibles por demarcación que permitan el alcance del buen estado cuantitativo de la masa.
- Incorporación de una mayor heterogeneidad y anisotropía en la hidrogeología que configuran el acuífero: espesores variables, zonificaciones locales y distribución espacial de la recarga.
- Evaluar las condiciones de contorno que supondrían el secado del Manantial del Chícamo y su consecuente afección en otros ámbitos por el espacio natural que este configura.
- Realizar un estudio más detallado de las extracciones existentes en periodos sin información que permitan reproducir con mayor precisión los consecuentes descensos piezométricos.
- Caracterizar la posible conexión hidráulica entre la serie Prebética y Subbética en las zonas de la Sierra del Reclot, Quibas y Barinas por la presencia de materiales impermeables entre estas unidades que condicionan la recarga real del sistema.
- Realizar una caracterización hidrogeológica del nuevo dominio Lo Geta más detallada con su posterior incorporación en el modelo.
- Evaluar el impacto cambio climático sobre los recursos de la masa y el caudal aforado en el Manantial del Chícamo.



## 10 Referencias

- CHJ. (2009). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2009 – 2015. Memoria.*
- CHJ. (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2015 – 2021. Memoria.*
- CHJ. (2021a). *Plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Júcar: Evaluación del estado de las masas de agua superficial y subterránea. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021. Anejo 12: Evaluación del estado de las masas de agua superficial y subterránea.*
- CHJ. (2021b). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2022 – 2027. Memoria.*
- CHS. (2009). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Ciclo de planificación hidrológica 2009 – 2015. Memoria.*
- CHS. (2013). *Estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación de los acuíferos de las masas de agua subterráneas: 070.028 Baños de Fortuna, 070.029 Quibas, 070.030 Sierra de Argallet, 070.031 Sierra de Crevillente y 070.035 Cuaternario de Fortuna.*
- CHS. (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Ciclo de planificación hidrológica 2022 – 2027. Anejo 3: Usos y demandas de agua.*
- CHS. (2019). *Trabajos de medida de caudales en manantiales y niveles hidrométricos y piezométricos en humedales de la cuenca del segura.*
- CHS. (2021a). *Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Revisión para el tercer ciclo:2022-2027. Anexo III del Anejo X: Caracterización de los objetivos medioambientales, evaluación del estado y propuesta de medidas en las mas.*
- CHS. (2021b). *Propuesta del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Revisión para el tercer ciclo: 2022-2027. Memoria.*
- De Galdeano, C. S., & Garrido, A. C. L. (2016). Transcurrencia y mélangé tectónica en el área de Sierra Arana (Cordillera Bética, NE de Granada). En *Estudios Geológicos* (Vol. 72). <https://doi.org/10.3989/egeol.42468.415>
- DGA-CEDEX. (2017). *Síntesis de los Planes Hidrológicos Españoles. Segundo ciclo de la DMA (2015-2021).*
- 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.*
- Golden Software, I. (2021). *Golden Software, SURFER V23: Reference Manual.* Golden, Colorado.

- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model — the ground-water flow process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.*
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., McDonald, M. G., Groat, C. G., Harbaugh, B. A. W., ... McDonald, M. G. (2000). *Modflow-2000 , the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model User Guide To Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, Tech. Rep. 00-92.*
- IGME-DGOH. (1988). *Estudio de delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características. Informe 2505 Servicio Geológico.*
- IGME-DPA. (1982). *Las Aguas Subterráneas de la Provincia de Alicante.*
- IGME. (1978). *Investigación hidrogeológica de la Cuenca Baja del Segura. Informe técnico 9: Sistema hidrogeológico de Quibas. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS).*
- IGME. (1980). *Acuíferos subterráneos de la Comunidad Valenciana. Características hidrogeológicas e hidroquímicas. Sistema acuífero nº 49. Complejo Calizo-Dolomítico Prebético.*
- IGME. (1984). *Informe relativo al sistema acuífero de quibas y la explotación del sondeo «El Bilillo» Murcia.*
- IGME. (1986). *Calidad de las aguas subterráneas en la Cuenca del Segura. (Vol. 4).*
- IGME. (1987a). *Actualización del inventario de puntos de agua y explotación en el sistema acuífero de Quibas (Murcia) en 1987.*
- IGME. (1987b). *Informe sobre la red hidrométrica de las aguas subterráneas en las provincias de Murcia y Alicante (Enero 1986-Septiembre 1987).*
- IGME. (1989). *Informe técnico para la declaración provisional del acuífero sobreexplotado relativa al sistema acuífero de Quibas (Murcia y Alicante).*
- IGME. (2008a). *Análisis y optimización de los modelos matemáticos aplicados al estudio de acuíferos carbonatados. Aplicación a los acuíferos de Crevillente y de Quibas (Alicante).*
- IGME. (2008b). *Asistencia Técnica para la Delimitación Física de los Límites Geológicos de los Acuíferos de Crevillente y Quibas, en la Provincia de Alicante, con vista a la Realización de un Modelo Matemático de Flujo de los mismos.*
- IGME. (2021). *Definición y caracterización de masas de agua subterránea compartidas entre demarcaciones hidrográficas. Júcar-Segura. Quibas. Versión borrador.*
- INTECSA-DPA. (2012). *Servicio para la Determinación de los Límites Hidrogeológicos en Diversos Acuíferos Provinciales.*

- ITGE. (1972). *Estudio hidrogeológico Alto Júcar - Alto Segura*.
- ITGE. (1993). *Estudio de las reservas de los embalses subterráneos de la unidad del prebético de Murcia*.
- López Geta, J. A., Morales García, R., Vega Martín, L., Rodríguez Hernández, L., Hernández Bravo, J. A., & Fernández Mejuto, M. (2015). *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Alicante* (IGME 84-78).
- 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)
- MITERD. (2020). *Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas*.
- MMA. (2000). *Plan Hidrológico Nacional. Delimitación y asignación de recursos en acuíferos compartidos*.
- MOPT. (1993). *Delimitación y síntesis de las características de las unidades hidrogeológicas intercuencas*.
- MOPU-IGME. (1990). *Unidades hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares. Vol. Síntesis de sus características y mapa a escala 1:1.000.000. Informaciones y Estudios, nº 52*.
- 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*.
- Servicio WMS GEODE. (s. f.). Mapa Geológico Continuo de España a escala 1:50.000 ©Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado 2 de febrero de 2022, de [http://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia\\_Geologica/IGME\\_Geode\\_50/MapServer/WMSserver](http://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Geologica/IGME_Geode_50/MapServer/WMSserver)
- Winston, R. B. (2009). *A graphical user interface for MODFLOW – 2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6 – A29*.