

**ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA DESARROLLAR DIVERSOS TRABAJOS  
RELACIONADOS CON EL INVENTARIO DE RECURSOS HÍDRICOS  
SUBTERRÁNEOS Y CON LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS  
COMPARTIDOS ENTRE DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS**



**DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA  
COMPARTIDAS ENTRE DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS**

Guadalquivir-Cuencas Mediterráneas Andaluzas

**Informe nº 10 (TEJEDA-ALMIJARA-LAS GUÁJARAS)**

**13. Tejeda septentrional**

**14. Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas**



---

## ÍNDICE GENERAL

### MEMORIA

Pág.

### PRESENTACIÓN

<b>1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>4</b>
<b>3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA</b>	<b>10</b>
3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	10
3.2. GEOMETRÍA, ESTRUCTURA Y LÍMITES	14
3.3. GEOMORFOLOGÍA	19
3.4. FORMACIONES HIDROGEOLÓGICAS	21
3.5. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL. RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO	25
3.6. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA. HIDRODINÁMICA	28
3.6.1. Manantiales	28
3.6.2. Sondeos. Evoluciones piezométricas	35
3.7. PIEZOMETRÍA EN RÉGIMEN NATURAL E INFLUENCIADO	42
3.8. PARÁMETROS HIDRÁULICOS E HIDROGEOLÓGICOS	47
3.9. INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS	48
3.10. USOS DEL AGUA	49
3.11. FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO	50
3.12. IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA CON CONTINUIDAD HIDROGEOLÓGICA (MASCH) ENTRE DIFERENTES ÁMBITOS DE PLANIFICACIÓN	54
<b>4. CLIMATOLOGÍA</b>	<b>56</b>
4.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	56
4.2. ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL	57
<b>5. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE EL CÓDIGO RENATA</b>	<b>63</b>
5.1. GENERACIÓN DE LA MALLA Y ESTABLECIMIENTO DEL PERIODO DE CÁLCULO	65
5.2. MÓDULO DE BALANCE HÍDRICO	66
5.3. MÓDULO DE CALIBRACIÓN. MODELO DE FLUJO	68
<b>6. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN NATURAL</b>	<b>73</b>
<b>7. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN ALTERADO</b>	<b>75</b>
<b>8. DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS</b>	<b>80</b>
<b>9. RESUMEN Y CONCLUSIONES</b>	<b>84</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS</b>	

Anexo I. Balances hídricos mensuales generados por RENATA

## ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1. Las MASCHs en el esquema de los sistemas de explotación de las Demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir y de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (PHG, 2015 y PH DHCMA, 2009).....	2
Figura 3.1. Mapa hidrogeológico de las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul con modelo digital de elevaciones .....	11
Figura 3.2. Cortes hidrogeológicos de las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul. La trayectoria de los cortes se puede ver en la figura 3.1.....	17 y 18
Figura 3.3. Esquema hidrogeológico de las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul. Nótese que la línea blanca y roja marca los límites administrativos de las masas de agua subterránea y la línea blanca y negra los límites hidrogeológicos de los acuíferos. Isopiezas tomadas de ITGE (1998) e IGME-DPM-UMA (2007).....	24
Figura 3.4. Hidrograma del manantial de La Fájara y precipitación durante el periodo 2003 - 2009 .....	32
Figura 3.5. Hidrograma del manantial del Río Alhama y precipitación durante el periodo 2003 - 2015 .....	33
Figura 3.6. Hidrograma del manantial de Maro y precipitación durante el periodo 1987 - 2015 .....	34
Figura 3.7. Hidrograma del manantial de Cijancos y precipitación durante el periodo 1986 - 2015 .....	34
Figura 3.8. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en el punto P.06.24.001-B (Sierra Tejeda).....	38
Figura 3.9. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en los puntos P.06.24.002-B, P.06.24.003-B, P.06.24.004-B, P.06.24.002-S, P.06.24.001-S y P.06.24.005-B del macizo de Sierra Almijara .....	39
Figura 3.10. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en los puntos P.06.24.006-B y P.06.24.007-B del macizo de la sierra de Los Guájares.....	42
Figura 3.11. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en los puntos P.05.42.001, P.06.24.008-B, P.06.24.009-B, P.06.17.001-B y P.05.65.002-B situados en los macizos de la sierra de Albuñuelas y Padul .....	43
Figura 3.12. Esquemas piezométricos orientativos del sector de Cerro Gordo, correspondientes a situaciones de aguas bajas (noviembre de 2009, mapa A) y aguas altas (mayo de 2010, mapa B). Tomado de INTECSA-INARSA (2009) .....	45
Figura 4.1. Distribución temporal de la precipitación media anual en el área de estudio durante el periodo 1985/86 - 2014/15. En azul, años de tipo húmedo, en blanco de tipo medio y en amarillo, años de tipo seco .....	58
Figura 4.2. Mapa de isoyetas correspondiente al año más húmedo (1996/97) del periodo histórico en el ámbito de estudio, con una precipitación media obtenida por planimetría de 1.063 mm. La precipitación media aritmética es 985 mm. La equidistancia entre las isoyetas es de 100 mm .....	60
Figura 4.3. Mapa de isoyetas correspondiente al año medio del periodo 1985/86 – 2014/15 en el área de estudio, con una precipitación media obtenida por planimetría de 636 mm. El valor medio (aritmético) es 539 mm. La equidistancia entre las isoyetas es de 100 mm.....	61
Figura 4.4. Mapa de isoyetas correspondiente al año 1994/95, el más seco del periodo histórico en el área de estudio, con una precipitación media obtenida por planimetría de	



---

301 mm. La precipitación media (aritmética) registrada fue 197 mm). La equidistancia entre las isoyetas es de 100 mm .....62

Pág.

Figura 5.1. Diagrama de flujo del código RENATA.....	63
Figura 5.2. Diagrama de flujo del código RENATA detallando los datos que se tienen que aportar al programa .....	64
Figura 5.3. Mallado y límites del modelo para la determinación de la recarga y del funcionamiento hidráulico mediante el código RENATA (en gris las celdas inactivas) .....	65
Figura 5.4. Sectores climáticos por polígonos de Thiessen ajustados al mallado.....	66
Figura 5.5. Sectores de suelo aplicados en el código RENATA.....	67
Figura 5.6. Condiciones en los límites del modelo de flujo. Las celdas grises son inactivas .....	68
Figura 5.7. Sectores de parámetros hidráulicos .....	70
Figura 5.8. Localización de los bombeos impuestos en RENATA.....	71
Figura 5.9. Evolución de piezometría medida y simulada en captaciones representativas.....	72
Figura 6.1. Funcionamiento hidrodinámico de las MASCHs en régimen natural. La línea azul de trazos y puntos indica la divisoria hidrológica, la roja de trazos la divisoria hidrogeológica y las flechas el sentido del flujo subterráneo. Las flechas rellenas indican las transferencias subterráneas medias entre demarcaciones.....	74
Figura 7.1. Funcionamiento hidrodinámico de las MASCHs en régimen influenciado. La línea azul de trazos y puntos indica la divisoria hidrológica, la roja de trazos la divisoria hidrogeológica y las flechas el sentido del flujo subterráneo. Las flechas rellenas indican las transferencias subterráneas medias entre demarcaciones.....	77
Figura 8.1. Situación de la superficie piezométrica de las MASCHs en régimen natural permanente y en el 2014/15, último año del periodo de simulación.....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Pág

Tabla 2.1. Cambios en la denominación administrativa de las masas de agua subterránea incluidas en la MASCH .....	5
Tabla 3.1. Características de los principales manantiales de las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul .....	28
Tabla 3.2. Características de los principales sondeos de las MASb .....	36
Tabla 4.1. Estaciones climáticas utilizadas con sus principales características (Datum ETRS89) .....	56
Tabla 4.2. Precipitación anual (mm) durante el periodo 1985/86 – 2014/15 en el ámbito de estudio y áreas próximas. Años tipo: azul (húmedo), amarillo (seco) y blanco (año de tipo medio) .....	59
Tabla 5.1. Características de los sectores climáticos (1985/86-2014/15) .....	67
Tabla 5.2. Sectores de suelo: parámetros utilizados .....	68
Tabla 5.3. Parámetros usados en los ríos .....	69
Tabla 5.4. Sectores de parámetros hidráulicos .....	70
Tabla 6.1. Balance hídrico en régimen natural estacionario de la MASCH Tejeda septentrional por demarcaciones hidrográficas .....	73
Tabla 6.2. Balance hídrico en régimen natural estacionario de la MASCH Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas por demarcaciones hidrográficas .....	73
Tabla 7.1. Balance hídrico por demarcaciones hidrográficas de la MASCH Tejeda septentrional en régimen influenciado. Periodo 1985/86-2014/15 .....	75
Tabla 7.2. Balance hídrico por demarcaciones hidrográficas de la MASCH Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas en régimen influenciado. Periodo 1985/86-2014/15 .....	75
Tabla 7.3. Porcentajes de recarga, tasa de explotación y variación del almacenamiento por demarcaciones hidrográficas en régimen influenciado (1985/86-2014/15) para la MASCH Tejeda septentrional .....	76
Tabla 7.4. Porcentajes de recarga, tasa de explotación y variación del almacenamiento por demarcaciones hidrográficas en régimen influenciado (1985/86-2014/15) para la MASCH Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas .....	76
Tabla 9.1. Comparativa de la distribución de los recursos hídricos subterráneos renovables en régimen natural y en régimen influenciado en la MASCH Tejeda septentrional según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a la Cuenca del Guadalquivir y las Cuencas Mediterráneas Andaluzas .....	81
Tabla 9.2. Comparativa de la distribución de los recursos hídricos subterráneos renovables en régimen natural y en régimen influenciado en la MASCH Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a la Cuenca del Guadalquivir y las Cuencas Mediterráneas Andaluzas .....	82

---

El presente documento técnico-científico se integra dentro de los estudios que la Dirección General del Agua ha encargado al CN-Instituto Geológico y Minero de España, a través de una Encomienda de Gestión para desarrollar diversos trabajos relacionados con el Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos y con la Caracterización de Acuíferos Compartidos entre Demarcaciones Hidrográficas.

## PRESENTACIÓN

*Los Planes Hidrológicos de cuenca definen las masas de agua subterránea (MASb) dentro de los límites de su propia demarcación, por lo que formal y administrativamente no existen masas de agua subterránea compartidas. Sin embargo, la realidad física de los acuíferos no se ajusta a lo expuesto, ya que masas de agua subterránea contiguas, pero pertenecientes a demarcaciones hidrográficas diferentes, tienen acuíferos conectados hidráulicamente entre sí. En consecuencia, una de las medidas necesarias de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca es la definición y delimitación de dichos acuíferos compartidos, así como la asignación de recursos de cada acuífero compartido entre las cuencas afectadas.*

*En cumplimiento del Artículo 9.2 del Reglamento de la Planificación Hidrológica, los planes hidrológicos realizan una propuesta de masas de agua subterránea compartidas con otras demarcaciones. Para la definición de dichas masas de agua y la asignación de sus recursos, se ha de tomar como referencia lo previsto en la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (PHN), que establece en su Anexo 1 un listado de unidades hidrogeológicas compartidas y su correspondiente asignación de recursos a los distintos ámbitos de planificación.*

*Desde la aprobación del PHN se han aprobado los planes hidrológicos de cuenca de varios ciclos sucesivos de planificación. En estos planes se han delimitado y caracterizado masas de agua subterránea conforme a la Directiva Marco del Agua, hecho que progresivamente ha convertido al Anexo I del PHN antes mencionado en algo carente de utilidad por su evidente desactualización. El avance en el conocimiento de los acuíferos españoles que se pone en evidencia a través de los contenidos incorporados en los planes hidrológicos de cuenca ha sido notable, identificando casos de acuíferos compartidos no considerados en el vigente PHN y mejorando la definición y delimitación de los contemplados.*

*Con el objeto de disponer de un trabajo que sirva como referencia técnica a considerar para actualizar los contenidos coordinadores del Plan Hidrológico Nacional respecto a los acuíferos compartidos, la Dirección General del Agua encargó al Instituto Geológico y Minero de España un trabajo técnico armonizado y actualizado de caracterización, mejora del conocimiento y reducción de incertidumbres para estos acuíferos compartidos.*

*Este trabajo ha partido de la información recogida en los planes hidrológicos del segundo ciclo. A este respecto, el IGME ha analizado las propuestas incluidas en dichos planes y elaborado una metodología común que permite su aplicación a todas las masas de agua subterránea con continuidad hidrogeológica (MASCH). Esta metodología se ha justificado técnicamente, al igual que el empleo de otras sistemáticas necesarias para analizar situaciones o escenarios que precisen de un tratamiento excepcional o diferenciado.*

*En concordancia con los objetivos perseguidos, esta memoria contempla la identificación de las **MASCH Tejeda septentrional y Almjara septentrional-Padul-Albuñuelas**, fruto del estudio realizado en las MASb Tejeda-Almjara-Las Guájaras (ES050MSBT000054200) de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir y Sierra del Padul Sur (ES060MSBT060-017), Depresión de Padul (ES060MSBT060-023), Sierra de Albuñuelas (ES060MSBT060-061) y Sierra Tejeda (ES060MSBT060-064) de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, que presentan continuidad hidrogeológica, de manera que los resultados que se obtengan se puedan incluir en los diferentes planes hidrológicos afectados de forma coherente y justificada.*

## 1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO

En el pliego de prescripciones técnicas de la Encomienda de Gestión **PARA DESARROLLAR DIVERSOS TRABAJOS RELACIONADOS CON EL INVENTARIO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS Y CON LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS COMPARTIDOS ENTRE DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS**, encargada por la Dirección General del Agua (DGA) al Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CN IGME-CSIC), se contemplan 3 potenciales masas de agua subterránea compartidas o con continuidad hidrogeológica (MASCH) en el área que abarcan las sierras de Tejeda, Almajara, las Guájaras, Padul y Albuñuelas.

La primera de estas MASCH, que responde al nombre de Tejeda-Almajara-Las Guájaras, se contempla en el Anexo I del Plan Hidrológico Nacional (PHN) de 2005 bajo la denominación de Unidad Hidrogeológica Compartida. Esta MASCH está constituida por las MASbES050MSBT000054200 Tejeda - Almajara - Las Guájaras, de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG) y las MASb de ES060MSBT060-027 Sierra de Almajara, ES060MSBT060-062 Sierra de las Guájaras y ES060MSBT060-0&4 Sierra de Tejeda.

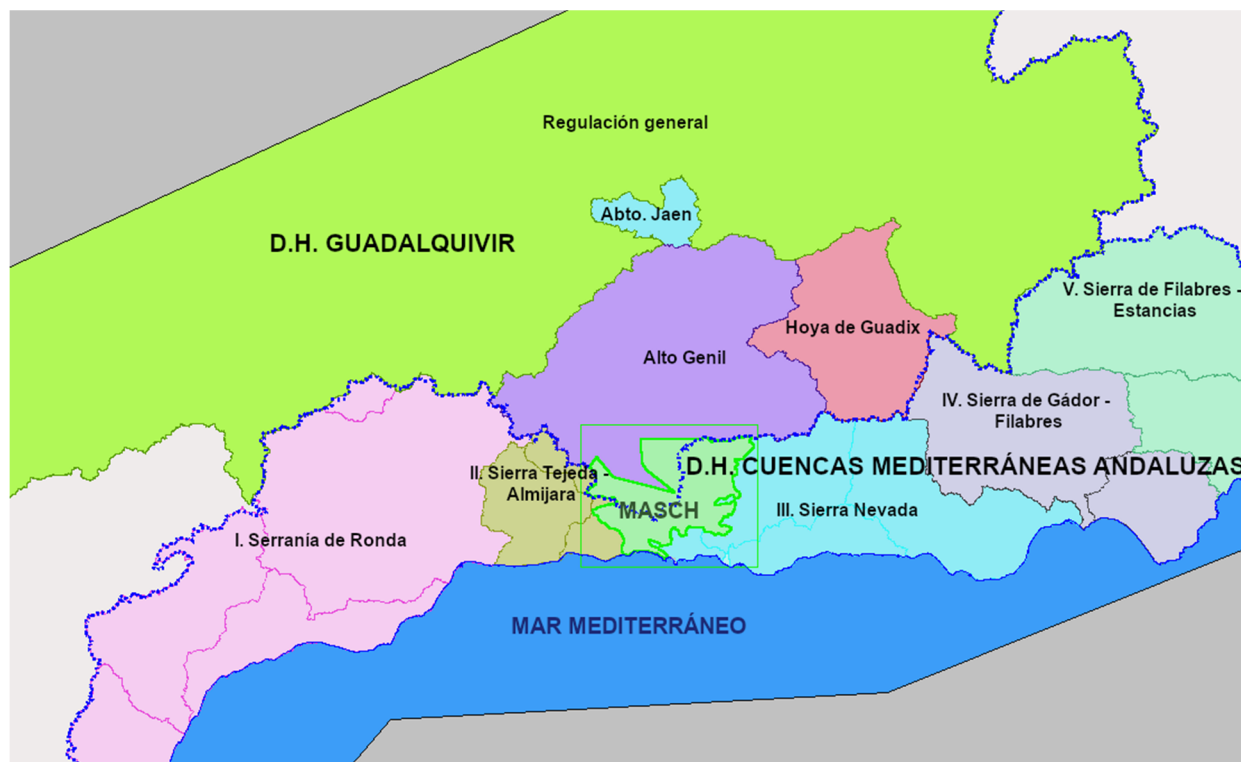
Las otras dos MASCH a las que se hace referencia “no están catalogadas dentro del PHN”. La primera de ellas está compuesta por las MASbES050MSBT000054200 Tejeda - Almajara - Las Guájaras, de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG), y la MASb ES060MSBT060-017 Sierra del Padul Sur perteneciente a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA). En dicha MASCH, aunque el pliego de prescripciones técnicas no la incluye, también habría que contemplar la MASb ES060MSBT060-023 Depresión de Padul.

La segunda MASCH “no catalogada dentro del PHN” la conforman la MASbES050MSBT000054200 Tejeda - Almajara - Las Guájaras, de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG) y la MASb ES060MSBT060-061 Sierra de Albuñuelas que se encuentra adscrita a las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA).

Las MASb a las que se han hecho referencia queda enmarcada en los respectivos planes hidrológicos del Sistema Alto Genil de la DHG y sistemas II. Sierra Tejeda - Almajara y III. Sierra Nevada de la DHCMA (Figura 1.1).

Desde el punto de vista administrativo, el ámbito de estudio se encuentra dividido en siete masas de agua subterráneas (MASb) que agrupan cerca de 700 km<sup>2</sup> de superficie total. La denominada “Tejeda - Almajara - Los Guájares” es la única MASb que pertenece a la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG). El resto están adscritas a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA). La descripción de las características hidrogeológicas y el análisis del funcionamiento de todas las masas de agua subterránea inicialmente implicadas en el estudio se han efectuado de manera conjunta dentro de los capítulos 2. ANTECEDENTES y 3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA, dado que la MASb “Tejeda - Almajara - Los Guájares” parece que en principio presenta continuidad hidrogeológica con las otras seis.

En el apartado 3.12 se delimitan e identifican las nuevas masas de agua subterránea compartidas o con continuidad hidrogeológica (MASCH), entre diferentes ámbitos de planificación, que resultan tras la caracterización geológica e hidrogeológica realizada a lo largo del capítulo 3. En el capítulo 5 se determina la recarga de estas mediante la aplicación del código RENATA.



**Figura 1.1. Las MASCHs en el esquema de los sistemas de explotación de las Demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir y de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (PHG, 2015 y PH DHCMA, 2009).**

Los relieves que componen las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul se distribuyen entre el extremo oriental de la provincia de Málaga y la parte suroccidental de la de Granada, hasta las estribaciones de Sierra Nevada. Todos ellos presentan una orientación geográfica preferente NO-SE y se extienden desde las localidades de Alcaucín y Nerja, en los límites O y S, respectivamente, hasta los municipios de El Pinar, en el extremo E-NE, y Padul y Agrón, por el borde N. Otros municipios localizados en el interior o en la periferia de estos macizos son Cómpeta, Canillas de Aceituno y Frigiliana, entre otros, en la provincia de Málaga, y Játar, Otívar, Albuñuelas, Dúrcal y Nigüelas en la de Granada. Fuera de los límites, pero muy próximos, se sitúan las localidades de Alhama de Granada, en el borde NO, y Almuñécar, en el extremo SE. Dentro del ámbito de estudio se encuentra la depresión intramontañosa de Padul, formada por sedimentos detríticos terciarios y cuaternarios. La región se caracteriza por presentar una topografía escarpada, que incluye valles profundos en forma de V, especialmente en las laderas orientadas hacia el sur, y un rango altitudinal comprendido entre 0 m s.n.m. (litoral costero del mar Mediterráneo) y 2.065 m s.n.m. del pico Maroma, en Sierra Tejeda. El suelo apenas está desarrollado como consecuencia de la topografía y el tipo de litologías que conforman estas sierras.

La alineación montañosa formada por las sierras Tejeda y Almijara representa el principal accidente orográfico de la región y la línea de cumbres marca el límite entre las provincias de Málaga y Granada, además de constituir la divisoria hidrográfica natural entre las demarcaciones hidrográficas de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (al SO) y la del Guadalquivir (en la vertiente NE). Hacia el mar Mediterráneo discurren un significativo número de ríos y arroyos, de los cuales destacan el río Alcaucín (tributario del río Vélez), en el borde occidental, los ríos Algarrobo, Higuera, Chillar y Verde hacia el S, y los ríos de La Toba y Albuñuelas, en la zona más oriental, y Torrente y Dúrcal, al NE; los cuatro últimos son afluentes del río Guadalfeo por su margen derecha. Los principales ejes de drenaje hacia el océano Atlántico son los ríos Alhama y Cacán y el arroyo Salado de La Malahá. Los tres discurren por la vertiente septentrional del ámbito de estudio y son

tributarios del río Genil por su margen izquierda. La vertiente septentrional de Sierra Tejeda forma parte de la cuenca endorreica del arroyo de La Madre (DHCMA), que recoge la escorrentía que termina infiltrándose en los sumideros existentes en el polje de Zafarraya.

Las sierras Tejeda y Almijara se encuentran dentro del Parque Natural de las Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama (40.657 ha), declarado como tal el 12 de noviembre de 1999. Parte de la sierra del Padul, en el extremo oriental del ámbito de estudio, se incluye dentro del Parque Natural de Sierra Nevada (85.883 ha), que fue declarado el 14 de enero de 1999.

## 2. ANTECEDENTES

Las sierras de Tejeda, Almirajara, Los Guájares, Abujuelas y Padul tienen un alto potencial desde el punto de vista de las aguas subterráneas. No obstante, el conocimiento hidrogeológico de la región era reducido hasta la década de 1970, cuando se efectuaron los primeros trabajos específicos. En estos estudios se trataron, entre otros temas, cuestiones generales sobre la hidrogeología de la sierra de Los Guájares, la cabecera del río Verde y la depresión de Padul (IGME, 1977; Romero, 1977; Benavente, 1981; 1982; Benavente y Romero, 1981). De entre todos, destacan el estudio de Pulido Bosch (1980) centrado en el funcionamiento hidrogeológico de la sierra de Padul y otros afloramientos alpujarrides del borde occidental de Sierra Nevada, y los de Castillo y Fernández-Rubio (1984) y Castillo et al. (1984), cuyo objetivo fue caracterizar el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico de la depresión de Padul. Estos últimos autores propusieron unas entradas totales de 37 - 53 hm<sup>3</sup>/año a la turbera, de los que 28 - 44 hm<sup>3</sup>/año estarían asociadas a transferencias subterráneas de recursos procedentes de materiales limítrofes: 3 hm<sup>3</sup>/año por su borde O, 9 hm<sup>3</sup>/año por el límite SO y entre 16 - 32 hm<sup>3</sup>/año de los bordes septentrional y oriental. Igualmente cifraron en 10 - 26 hm<sup>3</sup>/año los valores medios de las salidas subterráneas (ocultas) del sistema endorreico.

El primer estudio hidrogeológico de carácter regional fue llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en el marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), con la colaboración de la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras (ENADIMSA). En sus etapas iniciales (desde mediados de la década de 1970), los trabajos se centraron en el estudio de la capacidad de las sierras Tejeda, Almirajara y Los Guájares para satisfacer las demandas de abastecimiento urbano y usos agrícolas de los municipios cercanos. Para ello se estableció una superficie total permeable de 340 km<sup>2</sup> dividida en dos acuíferos (IGME-ADARO, 1975): Sierra Tejeda (90 km<sup>2</sup>) y Sierra Almirajara (250 km<sup>2</sup>). En el primero se analizaron especialmente las salidas, que fueron estimadas entre 20 y 25 hm<sup>3</sup>/año, admitiéndose que eran iguales a las entradas para el año 1970/71 (24 hm<sup>3</sup>). Ello permitió deducir un coeficiente de infiltración del 30 %. En el caso de Sierra Almirajara, se admitió el mismo coeficiente de infiltración con el que calcularon unos recursos de 45 hm<sup>3</sup>/año y un caudal total drenado por surgencias visibles en torno a 35 - 40 hm<sup>3</sup>/año. Se estimó que el resto de salidas hasta cuadrar el balance debieron corresponder a descargas ocultas, sobre todo hacia el mar Mediterráneo.

Varios años más tarde el IGME (1983), también en el marco del PIAS, realizó otros trabajos de cuantificación de los recursos hídricos, cuya información relativa al ámbito de estudio aparece recogida concretamente en el Informe técnico nº 10: "Sistema Acuífero nº 41, Calizas y Dolomías Triásicas de la Sierra de Almirajara-Sierra de Lújar" (Tabla 2.1, columna A). El marco geográfico de este trabajo incluyó, además, otros macizos carbonáticos existentes hacia el E, como la sierra de Lújar. Los recursos totales de los acuíferos que son objeto del presente informe se estimaron en 194 hm<sup>3</sup>/año, para una superficie de 790 km<sup>2</sup>. A partir de dicha investigación, se caracterizaron varios parámetros hidrológicos, así como la geometría, funcionamiento, hidroquímica y recursos de las unidades hidrogeológicas existentes.

En el trabajo "Delimitaciones de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características", realizado por el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (SGOP) y el IGME en 1988 (MOPU-IGME, 1988), se individualizó la "Unidad Hidrogeológica de Tejeda-Almirajara-Los Guájares", asignándole el código 05.42 dentro del ámbito de la Cuenca del Guadalquivir, y el código 06.24 para el sector adscrito a la Cuenca Sur (Tabla 2.1, columna B). En este documento se definió también la unidad "Depresión de Padul" (06.23) y las unidades "Padul- La Peza", con sus respectivos códigos administrativos según el ámbito de planificación: 05.31 (DHG) y 06.17 (DHCMA). A partir de este trabajo y de los datos del



IGME (1983), las diputaciones provinciales de Málaga y Granada publicaron sus respectivos atlas hidrogeológicos provinciales. Debido a su extensión, la información hidrogeológica de los afloramientos permeables que ocupan este informe fue sintetizada en dos apartados del Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Granada (Diputación Provincial de Granada - ITGE, 1990) y uno del de Málaga (Diputación Provincial de Málaga, 1988). En este último se describieron los rasgos generales de los macizos de las sierras Tejeda y Almirajara –incluida Las Alberquillas–, mientras que los dos capítulos dedicados a la provincia de Granada se centraron en el resto de relieves, conjuntamente con otras unidades geológicas alpujarrides que presentan materiales permeables localizadas en el borde occidental de Sierra Nevada. En ambos documentos se asignaron 26 hm<sup>3</sup>/año de recursos hídricos medios al macizo de Sierra Tejeda, a los que habría que sumar 2,5 hm<sup>3</sup>/año de recarga producida sobre los afloramientos permeables de Los Rodaderos, situados al N del relieve anterior (Figura 3.1). De ellos, 20-25 hm<sup>3</sup>/año corresponderían a salidas visibles por manantiales y el resto, hasta completar las entradas, a salidas no controladas y a la descarga subterránea hacia los materiales detríticos de la depresión de Granada.

**Tabla 2.1. Cambios en la denominación administrativa de las masas de agua subterránea incluidas en las MASCHs.**

Demarcación Hidrográfica	A IGME (1983)		B MOPU-IGME (1988)		C CHG-IGME (2001a y b); CHS-IGME-GHUMA (2004)	D IGME-DGA (2010); DGA (2005)	E Planes Hidrológicos del 2º ciclo
	Sistema Acuífero	nº	Unidad Hidrogeológica	nº	Unidad Hidrogeológica Redefinida [nº]	Masa de Agua Subterránea (M.A.S.) [nº]	Masa de Agua Subterránea (MASb) [código]
Guadalquivir				05.42	Tejeda - Almirajara - Las Guájaras [U.H. 05.42]	Tejeda - Almirajara - Las Guájaras [051.042]	Tejeda - Almirajara - Las Guájaras [ES050MSBT000054200]
					Sierra Tejeda [U.H. 06.24]	Sierra Tejeda [060.064]	Sierra Tejeda [ES060MSBT060-064]
					Sierra Almirajara [U.H. 06.57]	Sierra Almirajara [060.024]	Sierra Almirajara [ES060MSBT060-024]
				06.24	Tejeda- Almirajara-Los Guájares	Las Alberquillas [060.063]	Las Alberquillas [ES060MSBT060-063]
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	Calizas y Dolomías Triásicas de la Sierra de Almirajara- Sierra de Lújar 41					Sierra de Las Guájaras [060.062]	Sierra de Las Guájaras [ES060MSBT060-062]
						Sierra de Albuñuelas [060.061]	Sierra de Albuñuelas [ES060MSBT060-061]
				06.23	Depresión de Padul [U.H. 06.23]	Depresión de Padul [060.023]	Depresión de Padul [ES060MSBT060-023]
				06.17	Sierra de Padul [U.H. 06.17]	Sierra de Padul Sur [060.017]	Sierra de Padul Sur [ES060MSBT060-017]
Guadalquivir			Padul – La Peza	05.31	Sierra de Padul [U.H. 05.65]	Sierra de Padul [051.065]	Sierra de Padul [ES050MSBT000056500]

Con respecto al acuífero de Sierra Almirajara, el Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga (Diputación Provincial de Málaga, 1988) cifraba en 20 hm<sup>3</sup>/año el valor de los recursos correspondientes a la vertiente meridional. En estos cálculos no se incluyó la superficie perteneciente al acuífero de Las Alberquillas (60 km<sup>2</sup> y 14 hm<sup>3</sup>/año). Para el acuífero de las sierras de Almirajara - Las Guájaras, se asignaron 90 hm<sup>3</sup>/año de recursos (Diputación Provincial de Granada

- ITGE, 1990): 44 hm<sup>3</sup>/año de salidas medias por manantiales y el resto como transferencias laterales subterráneas hacia formaciones adyacentes más o menos permeables o salidas no controladas. En el mismo documento se asignaron 40 hm<sup>3</sup>/año de recursos hídricos medios al acuífero de la sierra de Albuñuelas, de los que 15,8 hm<sup>3</sup>/año constituían las salidas visibles. Finalmente, en Diputación Provincial de Granada - ITGE (1990) se atribuyó al acuífero de la sierra de Padul unos recursos medios de 21 hm<sup>3</sup>/año por infiltración directa y unas salidas de 20 hm<sup>3</sup>/año producidas, en su mayoría, hacia el acuífero detrítico de la depresión de Padul.

El Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas (SGOP, 1991) elaboró un estudio general sobre la hidrogeología de las sierras Tejeda, Almijara y la mitad occidental de la sierra de Los Guájares (415,5 km<sup>2</sup>). En dicho trabajo se realizó una labor de inventario y control de puntos de agua, así como balances hidrogeológicos y estimación de recursos de la Unidad Hidrogeológica de Tejeda-Almijara-Guájares (06.24). En dicha unidad se identificaron tres subunidades hidrogeológicas: Sierra Tejeda (91,5 km<sup>2</sup>), Sierra Almijara (260 km<sup>2</sup>) y Las Alberquillas (64 km<sup>2</sup>). Dentro de ellas se delimitaron, a su vez, diversos compartimentos acuíferos con funcionamiento más o menos independiente. En la subunidad de Sierra Tejeda se diferenció un compartimento meridional, drenado por el manantial de La Fájara y el barranco del Alcázar, y otro al N, cuya descarga se produce por los manantiales del Río Alhama y de Játar. En Sierra Almijara también se planteó una divisoria hidrogeológica, cuya traza es similar a la divisoria hidrográfica entre cuencas, lo que dio lugar a la definición de dos acuíferos: uno al N y otro al S de la línea de cumbres. De la misma manera, se consideró al sector meridional de Guájara Alto como un compartimento de Sierra Almijara, al igual que el sector del río Verde. Por último, cabe mencionar la subunidad de Las Alberquillas, situada al S de Sierra Almijara, sobre la que se contempló la posibilidad de alimentación subterránea desde esta última. Los recursos hídricos fueron calculados para un año hidrológico de tipo húmedo, concretamente el 1989/90, para el que se obtuvo un valor conjunto de 188 hm<sup>3</sup>, similar al estimado por el IGME (1983), aunque con prácticamente la mitad de superficie permeable. Esto pudo deberse a que el SGOP (1991) consideró un 40% de porcentaje de infiltración (un 10% más que IGME, 1983) para uno de los años más húmedos de la serie histórica de precipitación. El informe del SGOP (1991) también es relevante porque fue el primero que planteó la posibilidad de que existiera conexión hidrogeológica entre los mármoles de Sierra Tejeda y los que afloran en el área de Los Rodaderos.

El Instituto Andaluz de Reforma Agraria (IARA, 1991) llevo a cabo un estudio hidrogeológico similar, aunque centrado en el sector comprendido dentro de la provincia de Málaga. Con ello se intentó profundizar en el conocimiento de los acuíferos para mejorar su aprovechamiento y poder realizar una gestión más eficiente de los recursos.

La subunidad de Las Albuñuelas fue motivo de un estudio hidrogeológico por parte del Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas (SGOP, 1992). En este trabajo se realizó una evaluación de las descargas mediante aforos directos en manantiales y acequias y mediante aforos diferenciales en los cursos de agua. Las descargas totales para el año hidrológico 1991/92 ascendieron a 35,3 hm<sup>3</sup>, a las que habría que añadir 1,5 hm<sup>3</sup> correspondientes a las extracciones por bombeo en la subunidad.

Los problemas de abastecimiento que sufrieron muchos municipios de la Axarquía, como consecuencia de la situación de sequía extrema padecida en 1995, motivaron la ejecución de varios sondeos de emergencia en la vertiente meridional de Sierra Almijara. La información obtenida de las 13 perforaciones realizadas fue recopilada en un informe elaborado por el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga GHUMA (1997). El análisis de los datos permitió avanzar en el conocimiento de la relación hidrogeológica entre la subunidad de Sierra Almijara y la de Las

Alberquillas. Así, por ejemplo, a partir de medidas piezométricas se constató la existencia de conexión hidrogeológica entre ambas unidades y, por tanto, de que funcionan como un único acuífero.

Los acuíferos de la sierra de Padul y de la sierra de Albuñuelas fueron estudiados desde el punto de vista hidrogeológico en el marco del Plan Integral de los Recursos Hídricos Subterráneos en los Sistemas de Abastecimiento Público de Andalucía (ITGE, 1998). Las entradas fueron evaluadas mediante los métodos de Kessler (1964) y balance de agua en el suelo (Thorntwaite, 1948), aunque los resultados más satisfactorios se obtuvieron con este último. Los porcentajes de infiltración calculados fueron del 34 % para la subunidad de la sierra de Albuñuelas y 54,3 % para la de Padul. A la primera le asignaron unos recursos de 55,7 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 42,3 hm<sup>3</sup>/año corresponden al drenaje por manantiales y extracciones por bombeos y los restantes a transferencias laterales subterráneas hacia los materiales neógenos de la depresión de Granada y la de Padul (ITGE, 1998). En el caso de la subunidad de la sierra de Padul, el valor de infiltración por precipitación ascendió a 27,5 hm<sup>3</sup>/año: 8,5 hm<sup>3</sup>/año drenados por el río Dúrcal, 3,9 hm<sup>3</sup>/año por el río Dílar, 4,4 hm<sup>3</sup>/año en bombeos y el resto como transferencias laterales subterráneas hacia formaciones detríticas de la depresión de Padul.

A partir de todos los trabajos previos efectuados en la región, el IGME y la Junta de Andalucía publicaron el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (ITGE-Junta de Andalucía, 1998), uno de cuyos apartados está dedicado a las sierras de Almirajara - Padul y Lújar. Este documento cifraba los valores de recursos medios en 195 hm<sup>3</sup>/año de recarga autóctona para los afloramientos carbonáticos triásicos, más 25,5 hm<sup>3</sup>/año de recursos para el acuífero detrítico de la depresión de Padul. Las salidas totales ascendían a 123 hm<sup>3</sup>/año, por lo que existe un claro desajuste que se achacaba a transferencias subterráneas hacia otros acuíferos vecinos.

Desde el punto de vista administrativo, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el IGME (CHG-IGME, 2001a y b) procedieron a la redefinición de la poligonal envolvente de las unidades U.H. 05.42 "Tejeda - Almirajara - Las Guájaras" y U.H. 05.65 "Sierra de Padul" (Tabla 2.1, columna C), en el marco del Plan de revisión y actualización de las normas de explotación de las unidades hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete - Barbate. Los límites fijados en el primer documento se mantuvieron durante la adaptación a la nueva figura administrativa de Masa de Agua Subterránea (M.A.S.), en virtud de la Directiva Marco Europea del Agua, salvo por la superficie de Sierra Tejeda perteneciente a la DHOMA (Tabla 2.1, columna D). Estos últimos límites son los que conserva la actual MASb ES050MSBT000054200 "Tejeda - Almirajara - Los Guájaras" (Tabla 2.1, columna E). En el caso del segundo documento, se incluía dentro de la unidad a los afloramientos de carbonatos alpujarrides que se extienden desde la depresión de Padul hasta el río Monachil. El balance hídrico mostrado en el primer documento se basó en los cálculos realizados por el SGOP (1991; 1992), mientras que el segundo se apoyaba en los resultados del ITGE (1998). Posteriormente, la antigua Confederación Hidrogeográfica del Sur, con la colaboración del IGME y del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CHS-IGME-GHUMA, 2004) realizaron la primera modificación significativa de las poligonales de las unidades hidrogeológicas de la Cuenca Sur desde MOPU-IGME (1988). A partir de estos trabajos se estableció la Unidad Hidrogeológica Redefinida como unidad de gestión (Tabla 2.1, columna C), como paso previo en la adaptación del marco legislativo español a la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea.

La información relativa a las nuevas masas de agua subterránea, derivada de trabajos previos, fue recogida y sintetizada en una nueva y actualizada versión del Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga (IGME-DPM-UMA, 2007). En este documento se dedicó un capítulo a la M.A.S. Sierra Tejeda (060.064) – donde se incluía la superficie correspondiente a la cuenca del Guadalquivir- y

otro para las de Sierras Almijara (060.024) y Alberquillas (060.063) (Tabla 2.1, columna D). El balance hidrogeológico de la primera cifra los recursos hídricos medios en 37 hm<sup>3</sup>/año, correspondientes a una infiltración eficaz de 45-50% de la precipitación media sobre una superficie de 87 km<sup>2</sup>. Las salidas producidas por manantiales fueron de 12 hm<sup>3</sup>/año hacia la DHCMA (provincia de Málaga) y de 21 hm<sup>3</sup>/año hacia DHG (provincia de Granada). En cuanto a las masas de agua subterránea de Sierra Almijara y Las Alberquillas, se estudiaron conjuntamente (165 km<sup>2</sup>), ya que funcionan como un único acuífero. El resultado del balance presentado en el Atlas Hidrogeológico fue negativo; es decir, las salidas fueron superiores a las entradas para el periodo de control considerado (2003-2006), lo que era coherente con una tendencia negativa en la evolución de los niveles piezométricos en las proximidades de Nerja. Concretamente, los recursos medios se estimaron próximos a 50 hm<sup>3</sup>/año y las salidas sumaban 53 hm<sup>3</sup>/año: 38 hm<sup>3</sup>/año por manantiales y otras descargas naturales y 15 hm<sup>3</sup>/año por bombeos.

INTECSA-INARSA (2009), con el apoyo del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, realizó una investigación hidrogeológica en el sector meridional de Sierra Almijara-Las Alberquillas con el fin de evaluar la descarga submarina que se produce entre las localidades de Nerja-La Herradura. Los resultados de esta investigación, que incluía medidas de radioisótopos (<sup>222</sup>Rn y <sup>224</sup>Ra) y un balance hidrogeológico para el acuífero de las sierras de Almijara y Las Alberquillas, fueron publicados en Andreo et al. (2018). En dicho balance se estimaron 44,7 hm<sup>3</sup>/año de recursos hídricos medios para el periodo 1942/43 y 2005/06 (63 años hidrológicos). El porcentaje de infiltración medio fue calculado mediante los métodos de balance de agua en el suelo, Kessler y APLIS, a partir de la información registrada en las estaciones meteorológicas cercanas. Los resultados más satisfactorios se consiguieron con el método APLIS, con el que se obtuvo una tasa de infiltración media del 42 % de la precipitación. Las descargas totales estimadas por Andreo et al. (2018) ascendieron a 44,9 hm<sup>3</sup>/año, que excede ligeramente la recarga calculada. Alrededor de la mitad de las salidas (22,7 hm<sup>3</sup>/año) tendría lugar de forma difusa hacia los principales ríos que drenan el acuífero, 11,5 hm<sup>3</sup>/año como descarga natural a través de manantiales, y 10,7 hm<sup>3</sup>/año serían extraídos mediante bombeo. El cierre de balance dejó muy poco margen para salidas en forma de descarga subterránea hacia el mar Mediterráneo (alrededor de 1 hm<sup>3</sup>/año como máximo).

La evaluación de la descarga submarina que tiene lugar hacia el mar en el sector suroriental de este acuífero ha sido objeto de varios estudios, con valores comprendidos entre 1 hm<sup>3</sup>/año (Ollero-Robles et al., 1988) y 4 hm<sup>3</sup>/año (Montiel et al., 2018), en función de la metodología usada y las condiciones climáticas e hidrodinámicas en el momento de la toma de los datos. El trabajo en el que más directamente se aborda el tema de las descargas submarinas es el "Inventario de surgencias de aguas de origen continental en el litoral Mediterráneo del sur de España, mediante utilización de sensores térmicos aeroportados con apoyo de técnicas oceanográficas e hidrogeológicas" (Espejo et al., 1988). En dicho informe se trataron de relacionar ciertas anomalías térmicas y salinas observadas en la zona de Nerja-La Herradura, con surgencias de origen continental. De este modo, se citan los puntos situados frente a los cabos de Cerro Gordo y Punta de la Mona (Figura 3.1) como los que presentan una mayor probabilidad de estar relacionados con descargas directas del acuífero de Sierra Almijara.

Los informes técnicos más recientes corresponden, por un lado, a la Actividad nº 4 de la "Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas" de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, realizado por el IGME para la Dirección General del Agua (IGME-DGA, 2010). En la actividad mencionada se procedió a la identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas superficiales y las aguas subterráneas en la MASb ES050MSBT000054200.

Por otro, el informe titulado “Propuesta de uso sostenible de los sectores acuíferos (MASb 06.23, 06.17, 06.61) relacionados con la depresión de Padul con objeto de mantener los ecosistemas asociados al humedal-turbera” fue ejecutado bajo la dirección del IGME por encargo de la Agencia Andaluza del Agua (IGME-AAA-EGMASA, 2009). En este segundo informe se propone un balance basado en el estudio del ITGE (1998), aunque se actualiza el dato de las extracciones mediante bombeo en la depresión a 1,7 hm<sup>3</sup>/año. El resultado del balance hídrico del humedal de Padul es 21,4 - 21,9 hm<sup>3</sup>/año de entradas totales (4,8 - 5,3 hm<sup>3</sup>/año de infiltración del agua de lluvia, 12,7 hm<sup>3</sup>/año descargas de manantiales de la sierra de Padul, y 3,9 hm<sup>3</sup>/año como descargas de manantiales de la sierra de Albuñuelas); y 21,4 - 21,9 hm<sup>3</sup>/año de salidas totales (13,1 hm<sup>3</sup>/año descargas por la madre de la laguna, 1,74 hm<sup>3</sup>/año mediante bombeos, y 6,6 - 7,1 hm<sup>3</sup>/año como transferencias subterráneas al resto del acuífero).

Otras obras de contenido hidrogeológico general, en las que se hace referencia al área de estudio, son los trabajos de Castillo et al. (1986), Fernández del Río et al. (1992), Castillo y Carmona (2000), Castillo et al. (2001), Benavente et al. (2001), Benavente e Hidalgo (2002), o el de Pérez-Ramos et al. (2004), los cuales se centraron básicamente en la evaluación de recursos hídricos, así como algunas consideraciones sobre la hidrodinámica y compartimentación de acuíferos. Castillo et al. (2001), por ejemplo, efectuaron una cuantificación de los recursos hídricos de la vertiente meridional de Sierra Almijara. En dicho trabajo calculan unas salidas ocultas de 6 hm<sup>3</sup>/año, entre transferencias laterales a acuíferos formados por materiales postorogénicos y descargas hacia el mar, aunque sin entrar en mayores precisiones. Otros estudios de interés son los de Andreo y Carrasco (1993) o Carrasco et al. (1996), en los que se investigó la hidrogeología del entorno de la Cueva de Nerja desde el punto de vista del karst. También destaca el trabajo efectuado en la depresión de Padul por el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CMA-GHUMA, 2006), cuyo fin era comprender el contexto hidrogeológico de los humedales asociados a esa zona.

Entre las últimas publicaciones relativas a la hidrogeología del ámbito de estudio se podría mencionar la de Sanz de Galdeano et al. (2019) sobre el sector septentrional de Sierra Tejeda y su relación hidrogeológica con los afloramientos carbonáticos Alpujárrides del área de Los Rodaderos (Figura 3.1). Este trabajo demuestra, a partir de análisis de datos estructurales e hidrogeológicos, la conexión hidrogeológica entre los mármoles de la ladera N de Sierra Tejeda y los que aparecen más al N, en la zona de Los Rodaderos, y que previamente habían sido consideradas como unidades tectónicas diferentes.

### 3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

#### 3.1. Contexto geológico e hidrogeológico

Los materiales que conforman las sierras de Tejeda, Almirajara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul se sitúan geológicamente en el Complejo Alpujárride de la Zona Interna de la Cordillera Bética. Dentro de este dominio principal se pueden observar varias unidades tectónicas superpuestas formadas por rocas metamórficas, pero que en conjunto comparten una secuencia litológica similar, constituida por metapelitas de edad Paleozoico-Triásico Inferior, en la parte baja de la serie, y mármoles de edad Triásico Medio y Superior hacia techo (Aldaya et al., 1979; Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2003). En este último tramo se puede identificar, a su vez, dos formaciones compuestas esencialmente por materiales carbonáticos de naturaleza dolomítica separadas por intercalaciones de calcoesquistos y mármoles calizos.

La principal diferencia entre las distintas unidades tectónicas alpujárrides estriba en el grado de metamorfismo alcanzado por cada una de ellas, de modo que las unidades que ocupan una posición estructural más alta presentan mayor grado que las inferiores (Sanz de Galdeano, 2019).

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se han distinguido las siguientes unidades tectónicas según la posición estructural que ocupan en el ámbito de estudio (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999; 2003):

- Unidad Inferior (Víboras)
- Unidad Intermedia (Almirajara, Unidad de Trevenque en el sector de la sierra de Padul)
- Unidad Superior (Los Guájares)

#### **Unidad Inferior (Víboras)**

Los afloramientos pertenecientes a esta unidad son escasos en el ámbito de estudio y se restringen a la sierra de Padul. En general, el grado de metamorfismo es bajo o incluso ausente, pues se conservan las características sedimentarias originales en las rocas. La serie consiste en un conjunto carbonático formado mayoritariamente por dolomías y calizas, con frecuentes intercalaciones de calcoesquistos, superpuesto a filitas y a otras metapelitas que constituyen el sustrato impermeable (de hasta 150 m de potencia reconocida). Las dolomías son más comunes en la base y en la parte alta de la serie, mientras que las calizas aparecen en los tramos intermedios.

Todo el paquete permeable tiene 700 m de espesor, aunque las superficies de cabalgamiento pueden limitar sustancialmente la potencia. Su edad es Triásico Medio - Superior (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999).

#### **Unidad Intermedia (Almirajara; Trevenque en la sierra de Padul)**

Las metapelitas basales de la Unidad de Almirajara afloran principalmente al S de Sierra Tejeda y también en los bordes S y E de las sierras de Almirajara y de Los Guájares. Se trata de micaesquistos del Paleozoico Superior (Aldaya et al., 1979), de colores oscuros y tonos marrones (rojizos en superficie, por alteración). Hacia techo pasan progresivamente a esquistos del Trías Inferior (Delgado et al., 1981) con tonos más claros, con algunas intercalaciones de cuarcitas y, sobre estos, niveles de calcoesquistos.





La potencia máxima de la serie está en torno a los 500 m, aunque podría ser mayor debido a los importantes cambios de espesor observados, probablemente por causas tectónicas (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2003). Al S de la sierra de Los Guájares, entre los ríos de La Toba y Verde, el espesor de la serie no parece superar los 300 m de potencia.

Encima de las formaciones anteriores se encuentra una potente serie de mármoles dolomíticos, conocidos como “mármoles inferiores”, los cuales pueden llegar a tener hasta 800 m de espesor en algunos sectores. Son de color blanco, muy recristalizados, de aspecto sacaroideo. Presentan intercalaciones de calcoesquistos, de color más oscuro, poco potentes y de escasa continuidad lateral. Estos materiales carbonáticos constituyen la principal formación con interés acuífero del ámbito de estudio. Afloran extensamente en la vertiente septentrional de Sierra Tejeda (incluida el área de Los Rodaderos), en la vertiente meridional de Sierra Almijara y en la sierra de Los Guájares. La edad estimada es Trías Medio (Sanz de Galdeano y Lopez-Garrido, 2003).

A techo del conjunto anterior se sitúan esquistos, calcoesquistos y cuarcitas con abundantes intercalaciones mármoles de naturaleza caliza. Estos últimos son de color más oscuro, grisáceo a azulado, por lo que ofrecen un marcado contraste con los mármoles inferiores. El espesor medido es muy variable por condicionantes tectónicos y sedimentarios. En algunos casos pueden alcanzar varios centenares de metros de potencia, mientras que hay lugares donde tienen del orden de 50 ó 60 m o incluso menos, hasta casi desaparecer. Se le atribuye una edad Trías Medio-Superior (Sanz de Galdeano y Lopez-Garrido, 2003).

El tramo superior de la Unidad de Almijara lo forma mármoles dolomíticos de color grisáceo en el muro y blanco hacia techo, muy triturados, con 300 - 400 m de espesor medio (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2003). Se pueden observar en las cumbres de Sierra Almijara (pico Navachica) y en la vertiente N de Sierra Tejeda. Sin embargo, donde afloran más extensamente es en la sierra de Albuñuelas, donde prácticamente la totalidad de la misma está constituida por esta formación. La edad tradicionalmente asignada es Trías Superior (Delgado et al., 1981).

El espesor de las formaciones carbonáticas y de las intercalaciones metapelíticas disminuye hacia sectores orientales del ámbito geográfico del presente informe, hacia la sierra de Padul, donde la Unidad de Almijara pasa a llamarse Unidad de Trevenque (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999). En esta zona se reconocen 450 m de dolomías triásicas seguidas por 225 m de calcoesquistos, calizas y esquistos del Triásico Superior. La base impermeable de esta unidad está formada por calcoesquistos con intercalaciones de mármoles.

### **Unidad Superior (Los Guájares)**

La Unidad de Los Guájares queda estructuralmente por encima de la Unidad de Almijara y presenta una sucesión litológica algo más simple. El tramo basal, que es el que mejor se puede observar en el ámbito de estudio, corresponde a esquistos grafitosos de color oscuro, con niveles de cuarcitas. Su potencia puede llegar a 600 m y son de edad Paleozoico. En algunos puntos se aprecian, hacia la base, diferenciaciones feldespáticas que marcan la transición hacia materiales gneísicos, lo que no se ha constatado en la Unidad de Almijara.

A techo de la unidad aparecen esquistos de colores claros y tonos verdosos con una potencia aproximada de 300 m, que se asignan al Trías Inferior y, por correlación, a las metapelitas de base de la Unidad de Almijara (Sanz de Galdeano, 1990). Encima de los esquistos pueden observarse algunos afloramientos de mármoles dolomíticos de colores claros, pero son escasos y generalmente de reducidas dimensiones. El de mayor extensión se encuentra al NO de Sierra Tejeda, en el sector de Las Majadas (Figura 3.1).



Los materiales de la Unidad de Los Guájares aparecen en cartografía de manera discontinua y en afloramientos aislados (klippe) situados en las sierras de Albuñuelas y Los Guájares. Los más continuos se encuentran al N de Sierra Tejeda (donde reciben el nombre local de Unidad de Robledal; Sanz de Galdeano et al., 2019) y, sobre todo, a lo largo del borde suroccidental de la sierra de Almirajara.

En el ámbito de estudio se pueden observar también afloramientos de materiales post-orogénicos, con edades comprendidas entre el Mioceno y el Cuaternario. Estas formaciones sedimentarias, marinas o lacustres, dispuestas en capas poco inclinadas y sin apenas deformación, fueron depositadas -de manera discordante- sobre el sustrato Alpujárride. Se encuentran principalmente en los bordes de las depresiones de Granada y Padul, en los límites septentrional y nororiental del área de estudio, y de manera dispersa en distintos puntos de la sierra de Albuñuelas y en la de Los Guájares (Figura 3.1). Es posible reconocerlos también cerca de Nerja, en la costa mediterránea.

La litología predominante de la serie miocena es la de conglomerados con clastos dolomíticos y parcialmente cementados, más o menos discontinuos, a los que siguen calcarenitas y calizas lacustres. Sobre ellos se dispone un conjunto de arcillas, limos y calcarenitas de edad Mioceno superior. En el borde N de Sierra Almirajara y O de la de Albuñuelas se reconocen calcarenitas bioclásticas que fueron depositadas en un ambiente marino somero, como indican las estructuras sedimentarias y los restos fósiles. Encima aparecen limos y arenas, cuyo origen es marino en la base y continental en el techo. La secuencia continúa con calizas, margas y limos poco potentes, de origen lacustre y de edad Plioceno inferior.

Por su parte, la depresión de Padul y otras cuencas cercanas constituyen fosas tectónicas en las que se han depositado materiales neógenos esencialmente, y donde predominan los conglomerados con arenas. La serie estratigráfica de la depresión de Padul está formada, de muro a techo, por conglomerados basales, calizas bioclásticas, limos y arcillas con algunos niveles intercalados de areniscas, y conglomerados de edad Plioceno. En conjunto, estos depósitos terciarios alcanzan 200 m de espesor (Castillo et al., 1984).

En cuanto a los materiales más recientes, son especialmente llamativos los depósitos detríticos que conforman abanicos aluviales, conos de deyección y pie de monte, más o menos cementados, de diversas generaciones y edades comprendidas entre el Plioceno y el Cuaternario. Los afloramientos más destacados se encuentran en el borde septentrional de la sierra de Almirajara, en la depresión de Padul y en la costa mediterránea (Figura 3.1). En estos lugares, sobre las formaciones terciarias previas o sobre los materiales alpujárrides descansan, de manera discordante, conglomerados y/o brechas de cantos metamórficos con arcillas y arenas, relacionados con el desmantelamiento de los relieves alpinos. Pueden alcanzar potencias superiores al centenar de metros. El relleno de la depresión de Padul se completa con una potente masa de turba con intercalaciones de arenas, arcillas y yesos de edad Cuaternario. Cabe hacer referencia también a distintos afloramientos de travertinos que bordean el área de estudio. Los de mayor entidad se sitúan al E de las sierras de Albuñuelas y Los Guájares, en el Valle de Lecrín.

Por tanto, las masas de agua subterránea objeto de este informe están constituidas por:

- un sustrato de rocas metamórficas paleozoicas de baja permeabilidad (esquistos, calcosquistos y filitas), que afloran en todo el borde occidental del ámbito de estudio, además de al N y S de Sierra Tejeda y al S y SE de las sierras de Almirajara y Los Guájares,

- una formación acuífera principal de naturaleza carbonática (mármoles, dolomías y calizas), de edad Triásico Medio-Superior, fisurada y localmente karstificada, con espesores medios que pueden alcanzar 1.200 m, aunque disminuyen hacia el NE. Suele estar separada en dos tramos debido a frecuentes intercalaciones de metapelitas,
- materiales postorogénicos con diferente grado de permeabilidad por porosidad primaria (lutitas, calcarenitas y conglomerados) del Mioceno superior, cuya importancia hidrogeológica depende de su espesor y de su disposición geométrica con respecto a las formaciones acuíferas principales y,
- depósitos cuaternarios de diversa naturaleza y disposición geomorfológica, que pueden constituir acuíferos, según su eventual relación hidrogeológica con las formaciones permeables triásicas y terciarias.

### 3.2. Geometría, estructura y límites

Los accidentes que delimitan a las distintas unidades tectónicas descritas en el apartado anterior son superficies de cabalgamiento que en algunos casos han evolucionado hasta convertirse en fallas de salto en dirección y, posteriormente, en fallas normales (Figuras 3.1 y 3.2). Las rocas de cada unidad han sido también afectadas por otras estructuras compresivas de menor rango, como fallas inversas que se atenúan lateralmente hasta desaparecer o son relevadas por pliegues que aseguran la continuidad lateral entre formaciones litológicas de unidades tectónicas adyacentes. La estructura de las sierras Almijara y Tejeda se caracteriza, además, por grandes pliegues muy bien desarrollados, de vergencia general hacia el NNE, los cuales han sufrido interferencias con otros de vergencia S e incluso E. En detalle, cada uno de los macizos presenta una estructura geológica particular.

#### **Sierra Tejeda**

La estructura interna del macizo de Sierra Tejeda consiste, a grandes rasgos, en un gran anticlinorio de dirección E-O, relativamente abierto y no muy asimétrico, que es responsable del relieve general del macizo (Figura 3.2, cortes 1-1', 2-2' y 3-3'). Sus flancos están formados por repliegues de menor tamaño, también de dirección E-O y muy apretados, cuya vergencia cambia aproximadamente en la zona de charnela del antiformal mayor, de tal manera que al N del mismo las estructuras poseen vergencia S, mientras que, en el flanco meridional, esta es hacia el N. Los límites N y O de Sierra Tejeda son fallas normales, en cuyo bloque hundido (topográficamente más bajo) afloran metapelitas atribuidas a la unidad tectónica superior de Los Guájares. Bajo esta se encuentran los mármoles de la Unidad de Almijara, que llegan a aflorar en la zona de Los Rodaderos a favor de una ventana tectónica (Sanz de Galdeano et al., 2019). En el borde S, a diferencia de los anteriores, el contacto entre esquistos y mármoles es básicamente un contacto estratigráfico normal con buzamientos altos, algo más suaves hacia la parte oriental, aunque cerca de Canillas de Aceituno llega a estar invertido. En el extremo oriental de la sierra se observa la terminación de una gran falla inversa de dirección NO-SE que involucra a las metapelitas paleozoicas y a los mármoles triásicos. La falla se prolonga hacia el sur unos 10 kilómetros por lo que esta estructura y los materiales implicados constituyen una barrera hidrogeológica que separa Sierra Tejeda de la vecina Sierra Almijara. Por último, el límite NE lo constituye el contacto de los mármoles triásicos con los materiales de la depresión de Granada, que fundamentalmente es de tipo tectónico, aunque los depósitos neógeno-cuaternarios fosilizan, de forma discordante, las estructuras previas.

#### **Sierra Almijara y Las Alberquillas**

Sierra Almirajara y Las Alberquillas presentan una estructura geológica compleja, plegada y fallada. Sin embargo, la estructura es algo menos complicada en la vertiente septentrional, pues los mármoles de los términos altos de la serie estratigráfica presentan una disposición casi tabular, con un buzamiento suave hacia el N. Existe un pliegue mayor, un gran antiforme de dirección aproximada NO-SE, cuya traza coincide a grandes rasgos con la línea de cumbres; es decir, con la divisoria hidrográfica (Figura 3.2, cortes 4-4' y 5-5'). Inmediatamente al S del núcleo del anticlinal y con la misma dirección aparecen pliegues sinclinales y anticlinales de escala kilométrica, fuertemente asimétricos y con vergencia general hacia el S. Se pueden distinguir muy bien gracias a que en sus núcleos sinclinales se han conservado los mármoles del tramo superior con intercalaciones de calcoesquistos. Más al S, la vergencia de los pliegues cambia completamente y pasa a ser hacia el N, lo cual da como resultado geometrías en "fondo de saco" de los núcleos sinclinales que quedan en la zona de cambio de vergencia, ocupados por mármoles con calcoesquistos. Al NO de Sierra Almirajara, entre esta y Sierra Tejeda, existe un antiforme que hace aflorar las metapelitas del sustrato paleozoico. El contacto entre estos esquistos y los mármoles de Almirajara es de falla inversa y produce la inversión de la serie marmórea a lo largo del mismo. Desde Canillas de Albaida hasta el mar (al E de Maro) aparecen fallas plurikilométricas de dirección NO-SE, algunas de las cuales constituyen el borde meridional de la sierra y separan los mármoles de la Unidad de Almirajara de las metapelitas de la Unidad de Los Guájares. Un poco más al N, existe una falla inversa, aproximadamente paralela al borde sur, que se extiende desde cerca de Canillas de Albaida y Cómpea, hasta el río Chillar, donde se amortigua y desaparece. Esta falla ha provocado el afloramiento de los esquistos paleozoicos de la base de la unidad a lo largo de una estrecha banda de varios kilómetros de longitud. En las cercanías de la cabecera del río de la Miel aparece una falla normal de dirección NO-SE, que se pierde en el mar a la altura de Cerro Gordo, a favor de la cual también aflora una amplia banda de metapelitas. Existen otras fallas de dirección NNE-SSO y escala kilométrica, algo más recientes que las anteriores. Resultan menos evidentes en el paisaje, pues no suelen provocar cambios litológicos o lineaciones especialmente llamativas. No obstante, condicionan en gran medida las direcciones de drenaje superficial y, probablemente, también el drenaje subterráneo. Al N, el basamento alpujárride está cubierto por materiales neógenos y cuaternarios de la depresión de Granada.

### **Sierra de Los Guájares**

La mayor parte de los límites de los afloramientos permeables de este relieve son contactos normales, a favor de los cuales los mármoles descansan directamente sobre la serie metapelítica paleozoica (Figura 3.1; Figura 3.2, corte 7-7'). Sobre los primeros se apoyan varios isleos tectónicos o klippen de esquistos de la unidad tectónica superior. La estructura es más o menos tabular, ligeramente buzante hacia el S-SE. Existen algunas fallas inversas y normales que retocan este esquema, pero la mayoría no son muy importantes. Una excepción es quizá la falla cuya traza discurre paralela al valle del río de La Toba, de dirección NO-SE. Se trata de un antiguo cabalgamiento, posteriormente falla normal, en cuyo plano han quedado pinzados algunos retazos de esquistos que podrían suponer, al menos de forma local, una discontinuidad hidráulica. Ello explicaría la posición de manantiales significativos a cotas relativamente altas en este sector. El borde N de la sierra de Los Guájares cabalga de forma parcial sobre el sector nororiental de la de Almirajara, según fallas inversas que se prolongan hacia el ENE hasta amortiguarse y relevarse por los pliegues anticlinales anteriormente observados en Sierra Almirajara. Esta combinación de estructuras podría suponer una barrera hidrogeológica, dependiendo de la cota del nivel piezométrico.

### **Sierra de Albuñuelas**

La estructura de la sierra de Albuñuelas no es muy diferente a la del anterior relieve, pues se trata de un gran afloramiento de mármoles del tramo superior de la serie de la Unidad de Almiñara en disposición tabular (Figura 3.2, cortes 6-6' y 7-7'), sobre los que existen numerosos isleos tectónicos de esquistos pertenecientes a la Unidad de Los Guájares. En este caso no hay grandes fallas normales o cabalgamientos que distorsionen la estructura, aunque hay muchas fallas normales de tamaño medio y dirección predominante E-O a ONO-ESE. Estas son responsables del afloramiento de mármoles, puesto que han acomodado los movimientos verticales que produjeron las fosas tectónicas que hoy rodean la sierra de Albuñuelas (Reyes-Carmona et al., 2018). Los límites de los afloramientos calcáreos de esta sierra son, por tanto, una combinación de fallas normales y también contactos discordantes del relleno neógeno de la depresión de Granada (al N y O) y del valle del río Ízbor (E y S).

### **Sierra de Padul**

Los materiales que conforman la sierra de Padul muestran una estructura geológica que a grandes rasgos se puede suponer tabular, con buzamientos suaves hacia el S-SO, ligada a la superposición, repetición y acuíñamiento de unidades, como consecuencia del levantamiento progresivo de Sierra Nevada y la tectónica gravitatoria asociada (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1999). Las unidades tectónicas implicadas en este relieve están separadas entre sí por superficies de despegue, que son visibles gracias a la presencia de filitas de la Unidad de Víboras bajo las dolomías de la unidad superior (Trevenque), a veces con esquistos oscuros intercalados entre ambos materiales. El tramo dolomítico de esta última unidad presenta un elevado grado de fisuración y trituración (kakiritas).

La mayoría de los límites de la sierra son de naturaleza tectónica (fallas normales), entre las que cabe destacar la falla de Nigüelas, que pone en contacto los carbonatos triásicos de la sierra con los cuaternarios de la depresión de Padul a lo largo de todo el borde meridional de la primera (Figura 3.2, corte 8-8'). Hacia el E, la superposición de las rocas del Complejo Alpujárride sobre las del Nevado-Filábride marcan un límite hidrogeológico claro debido a la presencia e implicación de varias unidades tectónicas compuestas por materiales metamórficos de baja permeabilidad.

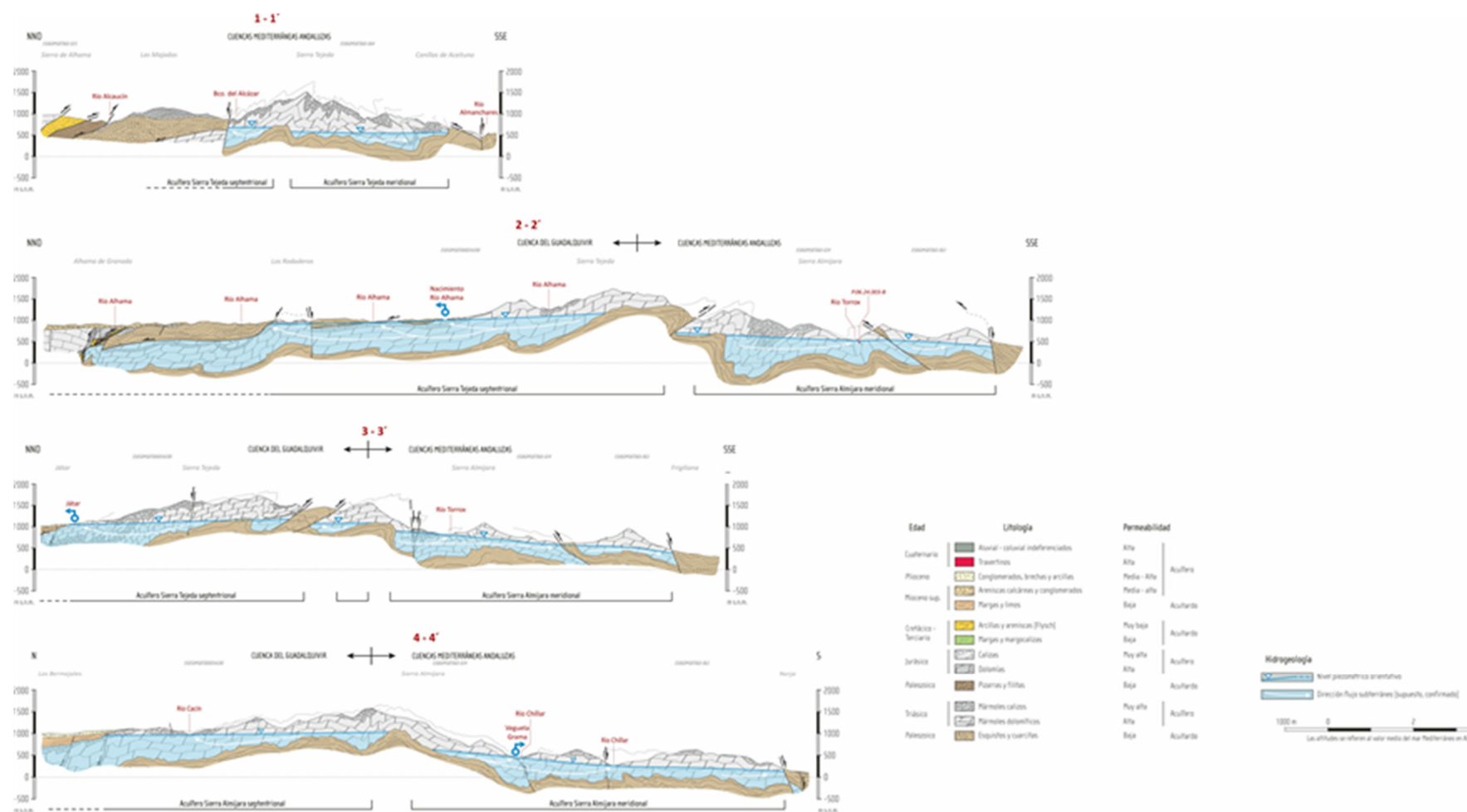
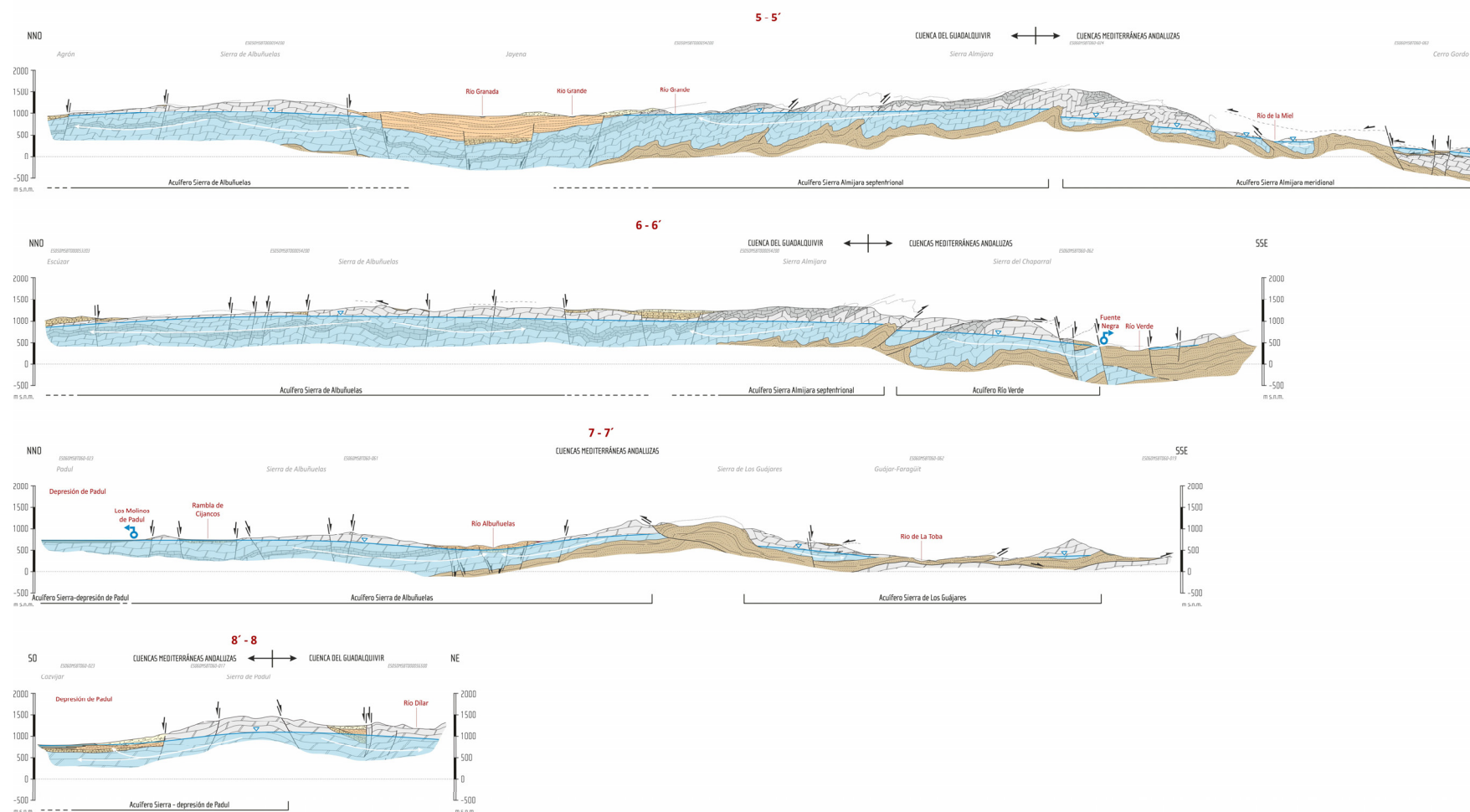


Figura 3.2. Cortes hidrogeológicos de las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájaras, Albuñuelas y Padul. La trayectoria de los cortes se puede ver en la figura 3.1 (1 de 2).



**Figura 3.2. Cortes hidrogeológicos de las sierras de Tejeda, Almiñara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul. La trayectoria de los cortes se puede ver en la figura 3.1 (2 de 2).**

Las sucesivas etapas de deformación que han afectado a los relieves que conforman el ámbito de estudio han ocasionado una intensa fracturación, cuyo reflejo -derivado de las últimas fases tectónicas- son diferentes sistemas de fallas, generalmente de tipo normal, de desgarre o con ambos movimientos, a favor de planos verticalizados, y un denso diaclasado. Todo el borde septentrional del ámbito de estudio está condicionado por sistemas de fracturas de dirección aproximada E-O a ONO-ESE (Figura 3.1) que han jugado un papel decisivo en la génesis y posterior evolución tecto-sedimentaria de las depresiones de Granada y de Padul, además de haber contribuido al levantamiento de las sierras. El escarpe del borde N de las sierras Tejeda y Almijara va disminuyendo progresivamente su altura hacia el E, a la vez que deja de verse una neta superficie de falla de apariencia normal (cubierta por sedimentos más recientes), aunque antes actuó con componente dextrorsa. Asociada a esta falla se encontrarían las principales surgencias que drenan Sierra Tejeda por el N. Sin embargo, este accidente tectónico continuaría más hacia el E donde se observan hasta cinco líneas de falla de dirección aproximada E-O. Dos de ellas, las más meridionales, se prolongan dentro de los afloramientos alpujárrides y pasan a ser fallas inversas con vergencia al SO, que afectan a los materiales de este complejo. La línea septentrional sólo toca a los materiales neógenos en contados puntos y se prolonga hacia al SE por el valle del río de La Toba hasta el propio Guadalfeo. La cuarta línea es la que define el borde N de la sierra de Los Guájares, en el Valle de Lecrín. Y la quinta línea de falla está al N de la anterior y recorre de forma discontinua el tercio meridional de la sierra de Albuñuelas hasta el sector de Restábal y cola del embalse de Béznar (Figura 3.1). Existen otras fallas normales de dirección NO-SE a ONO-ESE que, con las anteriores, delimitan el borde occidental de la sierra de Albuñuelas y definen las pequeñas depresiones tectónicas que se sitúan entre esta sierra y la de Padul, hasta dar lugar a un relieve escalonado y asimétrico formado por graben (fosa tectónica) y semigraben.

En el mismo contexto tectónico extensivo antes descrito se enmarca la depresión de Padul, y su continuación hacia el SE en el Valle de Lecrín, que constituye una fosa tectónica de edad Mioceno, limitada por fallas normales (con orientación preferencial ONO-ESE), las cuales la separan por el N de la sierra de Padul, por el S y O de las sierras de Los Guájares y Albuñuelas, y por el O de Sierra Nevada.

### 3.3. Geomorfología

El relieve de las sierras que incluyen las masas de agua subterráneas objeto de este trabajo está definido, a escala regional, por los pliegues de dirección aproximada E-O y los sistemas de fallas NO-SE. A una escala más detallada, se pueden observar crestas agudas y valles profundos, especialmente en las litologías marmóreas, producto del levantamiento tectónico de los relieves, la incisión de la red de drenaje y la posición del nivel del mar, especialmente durante el Neógeno-Cuaternario. El modelado se completa con algunos movimientos gravitacionales y los efectos de la acción del hielo y deshielo en las partes más elevadas.

Las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares y Padul han sido objeto de una intensa erosión fluvial que ha dado lugar al desarrollo de una densa red de drenaje de aspecto casi dendrítico, con valles muy encajados (Benavente y Almécija, 1993). Aunque el proceso de excavación de los valles, y especialmente de los cañones, tiene una importante componente fluviokárstica, la erosión mecánica y arrastre de materiales desde las laderas han contribuido a aumentar la tasa de erosión hídrica. En este sentido, la fracturación ha facilitado, en gran medida, la denudación y meteorización de la superficie de los mármoles y, en consecuencia, podría haber favorecido el desmantelamiento del relieve. A modo de ejemplo, se puede mencionar el caso extremo de las kakiritas, formadas por mármoles tan triturados y fracturados que la erosión fluvial resultante recuerda a la que se produce en materiales detríticos arenosos.

El relieve está algo menos acentuado en la vertiente septentrional de Sierra Almirajara y en la sierra de Albuñuelas, e incluso se observan superficies de aplanamiento. Concretamente, en esta última los aplanamientos aparecen como una superficie de erosión, a veces cubierta por calcarenitas del Mioceno, mientras que en la falda norte de Sierra Almirajara se observan, además, importantes depósitos de brechas calcáreas cementadas del Pleistoceno, con morfologías de glacia. En la vertiente sur también existen glacia, pero están peor conservados.

La trituración que presentan las dolomías que conforman la sierra de Padul alcanza tal magnitud que ha dado lugar a una erosión lineal muy activa de la red fluvial en sentido remontante, parecida a la que ocurriría en materiales blandos de baja permeabilidad. Cuando las dolomías son atravesadas por fracturas rellenas de calcita, que resisten mejor la erosión, se crean formas de relieve particulares, muy picudas, denominadas localmente “pitones” o “dientes de vieja”. Por su parte, la morfología del centro de la depresión de Padul responde, a grandes rasgos, a un relieve plano correspondiente a la superficie de colmatación de una antigua laguna. El cambio brusco de pendiente entre ambos conjuntos morfológicos está jalonado de una serie de abanicos o conos de deyección, entrelazados unos con otros, los cuales adquieren un desarrollo significativo debido a la tectónica activa de las fallas de borde (Calvache et al., 1997). La margen noroccidental de la depresión ofrece un contraste topográfico mucho más suave y corresponde a una serie de pequeñas elevaciones en materiales neógenos cuaternarios, en los cuales se localiza la divisoria hidrográfica entre las vertientes atlántica y mediterránea.

Como se puede comprobar, la actividad tectónica ha influenciado de forma notable en las características actuales del relieve y debería, de igual manera, haber condicionado la evolución del modelado kárstico (Durán-Valsero, 1996). Sin embargo, los mármoles dolomíticos y calizos están muy fisurados y poco karstificados, tanto en superficie como en profundidad, por lo que las morfologías típicamente kársticas no son muy numerosas. Entre las formas exokársticas cabe hacer referencia a algunos campos de lapiaz que se desarrollan en mayor medida donde afloran mármoles calizos. Existen dolinas aisladas en el sector oriental de Sierra Tejeda, al S de Játar, que llegan a tener hasta 100 m de diámetro. En los alrededores del pico Maroma se han descrito dolinas y simas de escasa profundidad, originadas por la disolución que provocan las aguas frías de fusión nival. Como formas endokársticas, hay pocas cuevas conocidas; las que presentan un desarrollo notable son la de Nerja, la cueva del manantial de Linarejos en Játar, Los Charcones, situada entre Canillas de Aceituno, y la cueva de La Fájara, con más de 1 km de desarrollo horizontal.

Destacan también por sus implicaciones hidrogeológicas las plataformas travertínicas, en sus mayorías inactivas y colgadas sobre la red de drenaje actual. Al E de las sierras de Albuñuelas y Los Guájares, en el Valle de Lecrín, se encuentran la mayor parte de los edificios travertínicos del ámbito de estudio (Figura 3.1). En las cercanías de la población de Cónchar aparecen dos terrazas travertínicas colgadas del orden del centenar de metros sobre el cauce del río Dúrcal: una a 700 - 750 m s.n.m. y la otra a 600 - 660 m s.n.m. Al SO de la localidad de Restábal aflora una nueva terraza de travertinos, situada a 700 - 760 m s.n.m. Unos 1.300 m al E de la terraza anterior se ubica un pequeño cuerpo travertínico, a una cota de 670 - 690 m s.n.m. En Pinos del Valle se localizan tres más, repartidas en varios afloramientos de diverso tamaño, entre las cotas 520 - 550 a 720 - 725 m s.n.m. Al S de esta localidad aparecen dos edificios travertínicos más, uno a cota 670 - 740 m s.n.m., y el otro a 580 - 640 m s.n.m.

Muy cerca del núcleo urbano de Maro, al S de Sierra Almirajara, se encuentra un afloramiento de travertinos considerable, asociado a la descarga actual del manantial de Maro. Al NE de Sierra Tejeda, en la vertiente atlántica, se localizan dos afloramientos de travertinos relacionados con los manantiales de Játar y Linarejos, a 980 y 1,035 m s.n.m., respectivamente. Finalmente, existen otros afloramientos de travertinos, de pequeño tamaño, repartidos por otros puntos como en el



barranco del Alcázar, en el Tajo de Almanchares (al E de Canillas de Aceituno), o los de la cabecera del río de la Miel, al S de Sierra Almjara.

### 3.4. Formaciones hidrogeológicas

Los relieves que conforman el ámbito de estudio ocupan una superficie permeable de 771 km<sup>2</sup>. De esta, gran parte corresponden a afloramientos carbonáticos distribuidos entre las sierras Tejeda (94,2 km<sup>2</sup>), Almjara (273,3 km<sup>2</sup>), Los Guájares (65,9 km<sup>2</sup>), Albuñuelas (190,6 km<sup>2</sup>) y Padul (44,5 km<sup>2</sup>). Se trata esencialmente de mármoles dolomíticos triásicos pertenecientes al Complejo Alpujarride de la Zona Interna de la Cordillera Bética, que constituyen formaciones permeables por fisuración-fracturación y/o karstificación y cuyo espesor conjunto supera ampliamente los 800 m. Dichos carbonatos descansan sobre una potente serie de metapelitas que actúan como sustrato de baja permeabilidad. Ambas formaciones geológicas están delimitadas, en cartografía, por contactos estratigráficos y, sobre todo, por accidentes tectónicos de diversa naturaleza (Figura 3.3). Al N y NE, los materiales alpujarrides se encuentran cubiertos de manera discordante por materiales postorogénicos de la depresión de Granada y de la depresión de Padul, con distinto grado de permeabilidad, que cubren una superficie parcial de 102,5 km<sup>2</sup>. De todos ellos, las brechas cementadas de edad Cuaternario que afloran entre las sierras Tejeda y Albuñuelas son las que presentan un mayor interés hidrogeológico debido a su extensión y a que se encuentran hidráulicamente conectadas con los mármoles triásicos subyacentes. Hacia el E, en el Valle de Lecrín, así como en otras depresiones tectónicas más pequeñas situadas en la sierra de Albuñuelas, hay sedimentos terciarios y cuaternarios con espesores variables que forman acuíferos detríticos, con más de 100 m de espesor en algunos casos. La conexión hidráulica de estos depósitos con los carbonatos triásicos de los bordes (y sustrato) está fuera de toda duda, puesto que los primeros – cuando afloran- constituyen el área de descarga de los segundos (Pulido-Bosch, 1980; Castillo et al., 1984; ITGE, 1998; CMA-GHUMA, 2006).

A escala regional, la estructura geológica es la responsable de la geometría interna de los acuíferos y condiciona las direcciones generales del flujo subterráneo. Los núcleos metapelíticos de los pliegues antiformes ONO-ESE que definen a grandes rasgos los relieves de las sierras Tejeda y Almjara, y su prolongación hacia Los Guájares, constituyen los elementos tectónicos más relevantes para individualizar acuíferos, como se ilustra en los cortes 4-4', 5-5' y 6-6' de la figura 3.2. Los límites hidrogeológicos coinciden con la trayectoria de las charnelas de los pliegues que recorren aproximadamente la línea de cumbres de mayor altitud. Sin embargo, la fracturación también es de gran importancia como condicionante del flujo subterráneo, pues las fallas regionales y los materiales involucrados ejercen como barreras de los acuíferos o los compartimentan internamente. Además, la fracturación y la erosión del contacto entre los materiales permeables y los de baja permeabilidad determinan la posición de los puntos de surgencia actuales. Así, buena parte de la descarga que se realiza por el borde meridional de las sierras Tejeda y Almjara se produce cerca del contacto entre mármoles y materiales poco permeables, constituido frecuentemente por fallas normales de carácter regional. La elevada erosión de los ríos ha terminado por intersectar la superficie piezométrica, de manera que hoy día se produce descarga incluso en puntos teóricamente alejados del contacto con materiales de baja permeabilidad. A su vez, la descarga en estos puntos tiene lugar a favor de fracturas (Pérez-Ramos et al., 2005).

Los rasgos estructurales mencionados, junto con la posición de los manantiales, además de las cotas de la superficie piezométrica, ha permitido diferenciar hasta ocho acuíferos independientes dentro del ámbito de estudio (Pérez-Ramos y Andreo, 2007a; b; CEHIUMA-IGME, 2017): Sierra Tejeda septentrional, Sierra Tejeda meridional, Sierra Almjara septentrional, Sierra Almjara meridional, río Verde, sierra de Los Guájares, sierra de Albuñuelas, y sierra-depresión de Padul. El

mapa de la figura 3.3 muestra la situación orientativa de los límites de los distintos acuíferos identificados. A continuación, se detallan sus principales características geométricas, agrupados por los relieves a los que pertenecen.

**Sierra Tejeda** está formada por dos acuíferos (uno al N y otro al S) separados por los materiales metapelíticos del núcleo del pliegue anticlinal que domina su estructura geológica y que condiciona decisivamente las direcciones preferenciales del flujo subterráneo (corte 1-1' de la figura 3.2). Los mármoles del flanco meridional ocupan menos extensión y afloran en el sector SO de la sierra, donde se encuentra el principal punto de drenaje de este acuífero (manantial de La Fájara). El acuífero septentrional es algo más complejo. El abombamiento del pliegue anticlinal principal al N del pico Maroma conlleva el establecimiento de un umbral hidrogeológico que divide el acuífero septentrional en dos zonas o compartimentos, con sentidos de flujo dominantes hacia el E y hacia el O (Figura 3.3). El borde S de Sierra Tejeda es un contacto normal entre los mármoles y los esquistos de la base, mientras que los bordes occidental y septentrional están constituidos mayoritariamente por fallas normales, con buzamientos que varían entre 40° y 80°, y que separan, en cartografía, los mármoles de la sierra de los esquistos que circundan dicho relieve. Sin embargo, las rocas carbonáticas alpujárrides que afloran en el sector de Los Rodaderos (Figura 3.3') y las que conforman el acuífero septentrional de Sierra Tejeda parecen estar en conexión hidráulica bajo los esquistos de la Unidad de Los Guájares, ya que la recarga que recibe los primeros no es suficiente para justificar el notable aumento de caudal del cauce del río Alhama en ese sector (Sanz de Galdeano et al., 2019).

**Sierra Almijara** muestra también una estructura dominada por la presencia de un gran pliegue anticlinorio de dirección aproximada E-O, que divide los mármoles de este relieve en varios acuíferos cuyos límites coinciden aproximadamente con las líneas de cumbres (cortes 4-4', 5-5' y 6-6' de la figura 3.2). Toda la vertiente meridional de la sierra que queda al S de la zona de charnela principal constituye un único acuífero con un sentido preferencial del flujo subterráneo hacia el SSE, ya que las aguas subterráneas descargan en los distintos cauces que intersectan el relieve e incluso en el mar Mediterráneo. El tránsito del agua subterránea no parece verse afectado por una estrecha banda de esquistos asociados a una falla inversa que recorre en dirección NO-SE la mitad meridional de la sierra, ya que no se observan surgencias importantes asociadas a dicho contacto. Este accidente tectónico fue usado en trabajos previos (IGME, 1983; SGOP, 1991) para individualizar dos acuíferos en esta zona (Sierra Almijara y Las Alberquillas), aunque las cotas piezométricas a un lado y otro de este contacto demuestran que existe continuidad hidrogeológica (GHUMA, 1997). Los bordes S y SO, sin embargo, lo forman fallas normales plurikilométricas de dirección NO-SE que ponen en contacto esquistos y mármoles, por lo que constituyen barreras hidrogeológicas cerradas que restringen el movimiento del agua subterránea en este sector del acuífero.

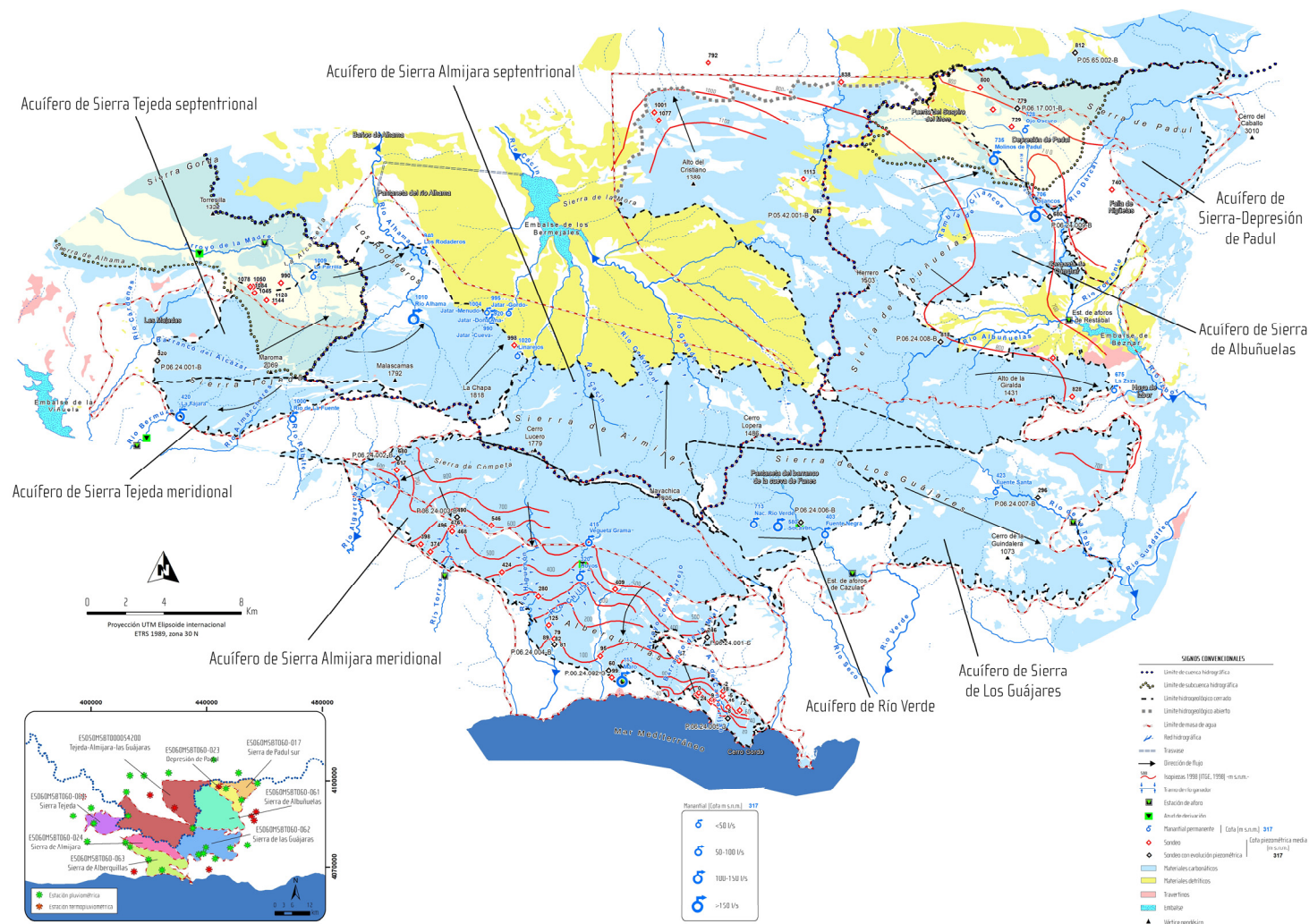
El flujo del agua subterránea en el acuífero de Sierra Almijara septentrional se produce hacia los ríos que drenan esa vertiente en sentido N. No obstante, la geometría es más sencilla puesto que los mármoles presentan una disposición casi tabular, con un buzamiento a favor de la ladera. Más al N, los carbonatos alpujárrides deben continuar bajo los materiales de la franja meridional de la depresión de Granada, aunque hundidos por las fallas normales que recorren todo el borde septentrional del macizo, con trayectoria aproximada E-O (cortes 3-3' y 4-4' de la figura 3.2).

El denominado acuífero de río Verde se individualiza entre el extremo nororiental de Sierra Almijara y el occidental de la de Los Guájares, y sus aguas descargan hacia la cabecera del citado río. Queda separado del acuífero de Sierra Almijara meridional por la continuación hacia el ESE de la zona de charnela principal mencionada previamente, mientras que la traza de otro pliegue anticlinal que

discurre más al N y subparalelo del anterior define el límite septentrional del acuífero y lo separa del acuífero de Sierra Almirajara septentrional (corte 6-6' de la figura 3.2). En las cercanías del pico Navachica debe existir, además, un umbral hidrogeológico alargado en la dirección N-S, puesto que los flujos subterráneos cambian de ESE a NNO a partir de esta zona (CEHIUMA-IGME, 2017).

Las formaciones permeables que constituyen el acuífero de la sierra de **Los Guájares** se disponen de manera más o menos tabular o ligeramente buzantes hacia el SSE, con los mármoles apoyados directamente sobre la serie metapelítica (corte 7-7' de la figura 3.2). No obstante, los esquistos que afloran a favor de la falla inversa que recorre el valle del río de La Toba podrían suponer, al menos de forma local, una discontinuidad hidráulica con capacidad para influir en el sentido preferente de los flujos subterráneos que se dirigen hacia dicho cauce. Al N de la sierra de Los Guájares aparece la prolongación oriental de uno de los anticlinales anteriormente observados en Sierra Almirajara, cuya presencia debe suponer un condicionante geológico que dificulte la continuidad hidrogeológica entre este acuífero y el de Sierra Almirajara septentrional; al menos en condiciones de aguas bajas.

El acuífero de **la sierra de Albuñuelas** está formado por un gran afloramiento de mármoles en disposición tabular (cortes 5-5', 6-6' y 7-7' de la figura 3.2). En este caso, no hay grandes fracturas regionales que distorsionen fuertemente la estructura interna, aunque las fallas normales de tamaño medio y orientación preferente NO-SE a ONO-ESE condicionan la geometría y el sentido de los flujos subterráneos. Los límites son, por tanto, una combinación de fallas normales y también contactos discordantes con el relleno neógeno de las depresiones de Granada, al N y O, y de Padul y del valle del río Albuñuelas, al NE y SE respectivamente. Se trata de límites abiertos, puesto que los carbonatos alpujárrides y, sobre ellos localmente, los esquistos de la Unidad tectónica de Los Guájares, deben prolongarse bajo las formaciones terciarias más allá de los bordes indicados, con las implicaciones hidrogeológicas que esto conlleva. Todo lo expuesto anteriormente hace que resulte complicado concretar los límites hidrogeológicos de la sierra de Albuñuelas. Es más, puede que también exista continuidad hidráulica hacia el S con los mármoles de Sierra Almirajara. No obstante, parece razonable separar, a priori, los dos acuíferos a través de una línea, que partiría desde el extremo más septentrional de la falla del río de La Toba hasta el ápice de la fosa tectónica que se abre hacia el NO en la depresión de Granada y que separa físicamente ambos relieves (Figura 3.3).



**Figura 3.3. Esquema hidrogeológico de las sierras de Tejeda, Almirajara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul. Nótese que la línea blanca y roja marca los límites administrativos de las masas de agua subterránea y la línea blanca y negra los límites hidrogeológicos de los acuíferos. Isopiezas tomadas de ITGE (1998) e IGME-DPM-UMA (2007).**

Por último, la **sierra de Padul** comprende al conjunto de materiales carbonáticos triásicos, dispuestos de manera tabular y con inclinación S-SO, alargados en cartografía según los ejes de los pliegues y limitados por los sistemas de fallas normales que recorren los bordes de la sierra en dirección NO-SE (corte 8-8' de la figura 3.2). Los materiales triásicos fisurados están conectados hidráulicamente con el relleno detrítico de la depresión de Granada, en su margen septentrional, y con los de la depresión de Padul y su continuación hacia el sur por el Valle de Lecrín, en el borde meridional. El límite oriental es cerrado por la elevación de las metapelitas situadas en las superficies de cabalgamientos y, especialmente, por la presencia de los esquistos del Complejo Nevado-Filábride. El acuífero estaría separado del situado inmediatamente al N (MASb "Sierra de Padul", ES050MSBT000056500) por un umbral o alto piezométrico que coincidiría grosso modo con el trazado de la divisoria hidrográfica, aunque este hecho necesita ser confirmado con investigaciones detalladas. Merece especial atención el borde SO de este relieve pues a través de él se produce la mayor parte de la descarga de los materiales triásicos, mediante transferencia subterránea hacia los depósitos cuaternarios que rellenan la depresión de Padul. La continuidad hidráulica entre ambos sectores justificaría la definición de un único acuífero (Sierra-depresión de Padul). Es más, los criterios estructurales y los trabajos previos apuntan a que el basamento de la depresión está formado por dolomías triásicas (ITGE, 1998), lo que supondría la continuidad hidrogeológica entre las sierras de Padul y de Abúñuelas, bajo el relleno neógeno. Quedaría por determinar, no obstante, el grado de confinamiento del acuífero carbonático en este sector debido a la presencia de limos arcillosos del Mioceno superior. La estructura en graben asimétrico de la fosa tectónica de Padul (subsistencia diferencial asociada a las fallas de borde) hace que el depocentro se sitúe cerca de la falla de Nigüelas y, consecuentemente, una mayor profundidad del basamento en esa margen.

### 3.5. Hidrología superficial. Relación río-acuífero

A continuación, se detallan los cauces superficiales más relevantes existentes en el ámbito geográfico del presente informe. Debido a su extensión, la descripción de las relaciones hidrológicas entre los distintos ríos y las formaciones permeables infrayacentes se hace según la demarcación hidrográfica a la que pertenezcan.

#### Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

- El **río Alhama** es uno de los principales ejes de drenaje de la vertiente septentrional de Sierra Tejeda con una orientación S-N. El cauce se encaja en los carbonatos triásicos desde las cumbres de Sierra Tejeda hasta el manantial homónimo (1.020 m s.n.m.), que se localiza en el contacto entre los mármoles y las metapelitas de borde. Este punto constituye la principal aportación permanente de aguas subterráneas (caudal medio de 372 l/s) y es considerado el nacimiento del río. No obstante, aguas arriba de ese lugar puede funcionar como río ganador en años húmedos. Adicionalmente, el río Alhama recibe un aporte de aguas subterráneas a su paso por el afloramiento de mármoles de Los Rodaderos (entre 960 y 930 m s.n.m.), donde aumenta su caudal hasta en 200 l/s (Sanz de Galdeano et al., 2019). Aguas abajo, entre 775 y 810 m s.n.m., y fuera de los límites administrativos de la MASb "Tejeda - Almijara - Las Guájaras", el cauce atraviesa otro pequeño afloramiento de rocas carbonáticas, al que se asocia la salida de aguas termominerales de los Baños de Alhama.
- El **río Cacán** nace en los mármoles de la vertiente septentrional de Sierra Almijara y funciona como un río ganador desde la cota 1.090 m s.n.m. hasta el contacto con los materiales de relleno de la depresión de Granada. Su caudal medio en este punto es 353 l/s. El funcionamiento hídrico es similar para los demás cauces de la ladera N de Sierra Almijara

(ríos Grande -231 l/s de caudal medio-, Añales -213 l/s-, Cebollón -348 l/s-), pues todos reciben aportes subterráneos drenados por pequeños manantiales, así como por descargas difusas a su paso por los materiales carbonáticos. El río Añales recibe, además, las aportaciones del manantial de Linarejos (1.020 m s.n.m.; caudal medio 36,1 l/s) en condiciones de aguas altas, aunque esta descarga procede del acuífero septentrional de Sierra Tejeda.

#### Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (sector Guadalfeo)

- El **río Dúrcal** constituye el principal eje de drenaje de la depresión de Padul y de los relieves adyacentes (sierra de Padul y vertiente oriental de la sierra de Albuñuelas). Su cabecera está situada en el extremo noroccidental de Sierra Nevada cuya máxima altitud dentro de la cuenca es el Cerro del Caballo, con 3.010 m s.n.m. Este cauce discurre hacia el SO por las MASb ES060MSBT060-017 “Sierra de Padul Sur” y ES060MSBT060-023 “Depresión de Padul”, desde las cotas 1.250 a 775 m s.n.m., en la primera, y hasta 665 m s.n.m., en la segunda, en el punto donde confluye con el “río de la Laguna” y la rambla de Cijancos (Figura 3.3). La red de drenaje presenta diferente desarrollo según los distintos materiales que constituyen la cuenca. Tiene mayor densidad en los materiales carbonáticos del borde septentrional, mientras al llegar a la llanura los arroyos modifican su perfil longitudinal, debido al cambio de pendiente, y muchos desaparecen. El río Dúrcal y su afluente por la izquierda, el río Torrente, son los únicos que preservan un cauce bien definido, puesto que la mayor superficie en cabecera les ha permitido excavar sendos cauces a su paso sobre los sedimentos de la depresión. El desagüe de la llanura de Padul y de las lagunas que allí se hallan fluye a través de una red de acequias o zanjás (llamadas “madres”), cuyas aguas confluyen en un último colector (Madre de la Laguna), el cual desagua finalmente hacia el río Dúrcal. Diversos trabajos han cuantificado el caudal medio conjunto de las zanjás de drenaje que recorren la llanura de Padul. Los valores obtenidos están comprendidos entre 500 l/s (Diputación Provincial de Granada-ITGE, 1990) y 570 l/s (Castillo et al., 1984; CMA-GHUMA, 2005). A estos resultados habría que añadir las descargas subterráneas de los sedimentos neógenos hacia el cauce del río Dúrcal (270 l/s, ITGE, 1998) y el agua que fluye por la rambla de Cijancos, la mayoría procedente de la descarga del manantial de igual nombre (caudal medio de 198 l/s), para tener una idea aproximada de las aportaciones totales del río justo antes de atravesar la garganta que se desarrolla al S de Cónchar. En ella, el río Dúrcal salva un desnivel de 145 m (entre 675 y 530 m s.n.m.) en un tramo de 5.000 metros sobre mármoles triásicos y recibe nuevos aportes subterráneos de pequeñas surgencias situadas en ambas márgenes. Una de ellas tiene carácter termal.
- El **río Albuñuelas**, también conocido como el río Santo, es un cauce con carácter ganador en cabecera, en el tramo sobre mármoles (cota más baja a 780 m s.n.m.), que discurre hacia el E camino del río Dúrcal en Restábal (Figura 3.3). Puede recibir igualmente algunos recursos subterráneos de los materiales detríticos miocenos sobre los que discurre. Los caudales de ambos ríos (Albuñuelas y Dúrcal) son medidos de manera conjunta en la estación de aforos de Restábal, que cuantifica las entradas de agua al embalse de Béznar (salvo la aportación del río Torrente, cuya confluencia se produce aguas abajo de la estación). Para el periodo 1987/88 – 2013/14, el valor medio de caudal en ese punto fue 1,5 m³/s. Este dato incluye las descargas subterráneas medias totales de la depresión de Padul, de la sierra de Padul y del borde oriental de la sierra de Albuñuelas (con la excepción del extremo SE que se drenaría por el manantial de la Zaza). Finalmente, aguas abajo del embalse de Béznar, el ahora denominado río Ízbor recibe pequeñas aportaciones en su recorrido sobre un afloramiento aislado de mármoles en el paraje conocido como “Hoyo de Ízbor”.

- El **río de La Toba** constituye el eje de drenaje del acuífero de la sierra de Los Guájares, por medio de descargas difusas a lo largo de su recorrido (cuando fluye sobre carbonatos) que suman 258 l/s de valor medio. En este caso, probablemente tenga menos peso la descarga puntual por manantiales, aunque existen algunas surgencias como Fuente Santa (423 m s.n.m.), con un caudal medio de 40 l/s. El río de La Toba es tributario por la derecha del río Guadalfeo, con el que confluye aguas arriba de la garganta de Escalate, a 90 m s.n.m.

#### Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (sector costero)

- El río Verde de Almuñécar nace en la terminación oriental de Sierra Almijara, al O de Otívar y Lentejil. Constituye el principal eje de drenaje de este sector, ya que es ganador por la descarga difusa de agua subterránea hacia el tramo de cabecera que discurre sobre mármoles, pero sobre todo porque en su cauce se ubican los principales manantiales que drenan el acuífero: Nacimiento Río Verde (713 m s.n.m.), Socavón (580 m s.n.m.) y Fuente Negra (403 m s.n.m.). El caudal medio conjunto de estas surgencias es 244 l/s.
- Los ríos de la vertiente meridional de Sierra Almijara son ganadores en mayor o menor medida. Esto se debe al fuerte encajamiento de la red fluvial, que intersecta al nivel piezométrico, y favorece la descarga más o menos difusa hacia los cauces. Los principales ejes de drenaje subterráneo son (de O a E): **río Algarrobo, río Torrox, río Higuerón, río Chillar, barranco de Maro y río de la Miel**. El trazado de todos ellos es N a S, desde las zonas más elevadas hasta las áreas donde el contacto de los mármoles con las metapelitas se encuentra a menor altitud. La longitud del tramo ganador en cada caso estará condicionada por la cota mínima de los afloramientos carbonáticos: 500 m s.n.m. para el río Algarrobo, 325 m s.n.m. (Torrox), 155 m s.n.m. (Higuerón), 80 m s.n.m. (Chillar) y 25 m s.n.m. (arroyo de la Miel). En el tramo de desembocadura de los ríos Higuerón y Chillar y en el barranco de Maro, fuera de los afloramientos carbonáticos, existen depósitos aluviales que pueden tener implicaciones en el comportamiento del cauce por la infiltración de los recursos hídricos que circulan sobre él. A partir de diversos aforos efectuados en estos cauces, Andreo et al. (2018) estimaron unas aportaciones netas subterráneas de 22,7 hm<sup>3</sup>/año.

#### Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (sector río Vélez)

- El **río Bermuza** nace en el manantial de La Fájara (420 m s.n.m.) y constituye el principal cauce de la vertiente meridional de Sierra Tejeda. Aguas arriba solo presenta caudal cuando fluye agua de escorrentía después de grandes eventos de precipitación. Aguas abajo del manantial existe una estación de aforos con datos diarios desde 1942. El caudal medio calculado para el conjunto de la serie es 170 l/s.
- Por la ladera occidental de Sierra Tejeda discurre el **barranco del Alcázar**, con un caudal medio conjunto de 80 l/s procedente de la descarga difusa de los mármoles situados entre las cotas 600 a 800 m s.n.m.
- Finalmente, cabe mencionar el **arroyo de la Madre**, principal cauce de la cuenca endorreica de Zafarraya, que en periodos húmedos recoge el agua de escorrentía y de algunos manantiales que drenan el acuífero de Sierra Tejeda septentrional. Es el caso del manantial de La Parrilla, situado a 1.010 m s.n.m. en el sector de La Alcaicería (Figura 3.3), una surgencia estacional de tipo trop plein, activa durante periodos húmedos.

### 3.6. Inventario de puntos de agua. Hidrodinámica

#### 3.6.1. Manantiales



El drenaje natural visible de los acuíferos existentes en las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul tiene lugar de tres maneras diferentes: de modo difuso en los tramos de cauce donde el nivel piezométrico ha sido interceptado por la erosión, mediante pequeñas surgencias asociadas a fracturas que concentran parte del flujo difuso hacia el lecho de los ríos y de manera puntual a través de salidas de agua subterránea localizadas, las cuales pueden o no estar asociadas a un cauce principal. El resultado es un elevado número de manantiales, aunque sólo 20 pueden considerarse como los más relevantes a efectos de caracterizar el comportamiento hidrodinámico de los acuíferos a tenor de la magnitud de sus caudales, con valores medios históricos comprendidos entre 16,1 l/s y casi 375 l/s. La ubicación de los puntos de descarga aparece en la figura 3.3 y sus características principales están recogidas en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1. Características de los principales manantiales de las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul.**

MASb	Denominación	nº de medidas	Caudal (l/s)			Periodo de control	Cota m s.n.m.	Coordenadas UTM	
			Máx	Mín	Medio			X	Y
ES060MSBTO 60-064	La Fájara	262	1.860	1,5	105,8	1980/81 - 2016/17	420	402269	4082417
	Río de La Fuente	19	180	5,0	52,2	2003/04 - 2005/06	1.000	408096	4082272
	Río Alhama	178	1.768	31,5	372,4	1980/81 - 2019/20	1.010	414402	4087554
	Los Rodaderos	14	38	19,0	30,1	2015/16 - 2016/17	940	414869	4091007
ES050MSBTO 00054200	Jatar -Gordo-	381	437,8	33,0	104,3	1987/88 - 2019/20	995	418350	4087573
	Jatar -Menudo-	319	579,4	0	25,5	1987/88 - 2019/20	1.004	418173	4087824
	Jatar -Cueva-	319	514,5	28,2	77,8	1987/88 - 2019/20	990	418422	4087444
	Jatar -Doña Ana-	311	35,3	2,1	16,1	1987/88 - 2019/20	920	419301	4087784
	Linarejos	77	912,1	1,5	36,1	2003/04 - 2016/17	1.020	419750	4085509
ES060MSBTO 60-024	Maro	397	1.700	9,0	229,1	1979/80 - 2016/17	113	425212	4068659
ES060MSBTO 60-063	Vegueta Grama	14	168,0	55,5	99,3	2003/04 - 2005/06	415	423449	4075858
	Hoyos	12	108,0	30,0	60,4	2003/04 - 2005/06	320	422986	4074037
	Nac. Río Verde	12	141,0	31,0	70,2	2003/04 - 2005/06	713	432009	4076785
ES060MSBTO 60-062	Socavón	12	153,0	60,0	104,7	2003/04 - 2005/06	580	433279	4076688
	Fuente Negra	30	155,0	15,0	69,4	2003/04 - 2016/17	403	435710	4076255
	Fuente Santa	68	78,0	10,4	39,9	1982/83 - 2016/17	423	444544	4078461
ES060MSBTO 60-061	La Zaza	79	80,1	23,0	37,0	1982/83 - 2016/17	675	450702	4083755
	Cijancos	169	348,0	75,9	194,9	1982/83 - 2016/17	706	446638	4092919
	Molinos de Padul	58	188,4	89,3	143,3	1982/83 - 2005/06	735	444474	4095816
ES060MSBTO 60-023	Ojo Oscuro	39	48,6	21,7	30,5	1982/83 - 2000/01	728	446085	4097321

Las cotas de surgencia son distintas dependiendo del sector considerado (Figura 3.3; Tabla 3.1), como fue expuesto en trabajos previos (IGME, 1983; SGOP, 1991). Los manantiales más caudalosos de Sierra Tejeda se encuentran en los extremos NE y SO del macizo. En el primer sector (vertiente atlántica) se hallan los manantiales del Río Alhama (1.010 m s.n.m., 372 l/s de caudal medio), el grupo de surgencias de Játar (995 m s.n.m., 224 l/s de caudal conjunto) y Linarejos (1.020 m s.n.m., 36,1 l/s), mientras que la surgencia de La Fájara (106 l/s), ubicada en el extremo opuesto de la sierra, surge a 420 m s.n.m. Existen puntos de descarga de menor entidad que los anteriores, como por ejemplo los de la cabecera del río Almanchares y del río de la Fuente, en la vertiente S (mediterránea), o aguas arriba del nacimiento del río Alhama, en la provincia de Granada. Estos puntos presentan caudales medios en torno a 50 l/s y son el resultado de la descarga de numerosas surgencias a lo largo del cauce principal. En un contexto similar se encontraría el barranco del Alcázar, al N de Alcaucín, donde varias surgencias localizadas entre las cotas 600 a 800 m s.n.m.



aportan un caudal medio conjunto de 80 l/s a dicho cauce. Al N de Sierra Tejeda se localiza el manantial de Los Rodaderos, que se ubica en el afloramiento calcáreo de igual nombre, separado del macizo principal, a cota en torno a 940 m s.n.m. El caudal medio de descarga puntual es del orden de 30 l/s, al que habría que sumar las aportaciones difusas que recibe el río Alhama en su recorrido sobre los mármoles de esta zona.

La mayoría de los manantiales significativos de Sierra Almirajara se encuentran cerca del límite SO de los afloramientos permeables (MASb Las Alberquillas), a través del cual se produce parte de la descarga del acuífero de Sierra Almirajara meridional, aunque también hay surgencias, generalmente difusas, hacia el N dentro de la MASb Sierra Almirajara. La descarga principal ocurre a través de los cauces de los ríos Turvilla, Torrox, Higuern, Chillar y de la Miel, cuyas cotas de surgencia representativas son 770, 510, 500, 420 y 40 m s.n.m., respectivamente. Sólo se dispone de información hidrométrica de dos manantiales que surgen en el lecho del río Chillar, relacionados con fracturas regionales: Vegueta Grama (415 m s.n.m.) y Hoyos (320 m s.n.m.), con caudales medios conjuntos de 160 l/s (Tabla 3.3). El primero se ubica administrativamente en la MASb Sierra Almirajara y el segundo en la de Las Alberquillas. Un tercer manantial, denominado Los Patos, se sitúa entre los dos anteriores, a 360 m s.n.m. Merece hacer referencia también a unos manantiales que existían en el contacto entre mármoles y esquistos en el tramo bajo del río Chillar (Bolichero y Fuente Santa), hoy desaparecidos como consecuencia de los bombeos en sondeos cercanos. El manantial de Maro, localizado en la segunda MASb, a 115 m s.n.m., constituye una de las pocas excepciones en cuanto al modo de surgencia (puntual, fuera del cauce de un río) y a la magnitud de sus descargas (valor medio del orden de 230 l/s). Por otro lado, en el acuífero de Sierra Almirajara septentrional, no se conocen manantiales puntuales relevantes, más allá de las surgencias asociadas a las relaciones río-acuífero establecidas, muchas de ellas con caudales bajos o incluso nulos durante el estiaje.

La descarga del acuífero de río Verde se produce por varios manantiales de pequeño caudal que representan las principales aportaciones hídricas a un cauce ya de por sí con un claro carácter ganador en su recorrido sobre mármoles. Los tres manantiales que más contribuyen al caudal del río son Fuente Negra (403 m s.n.m.), situada cerca de la falla de dirección NE-SO que limita los afloramientos carbonáticos, Socavón (580 m s.n.m) y Nacimiento del Río Verde, que es el situado a la cota más elevada (a 713 m s.n.m.) en el interior del macizo marmóreo. No hay correspondencia entre el caudal medio de las surgencias y la altitud a la que éstas se sitúan; el manantial más caudaloso (Socavón, 105 l/s) no es el situado a la cota más baja (Tabla 3.3). El caudal medio anual del conjunto de descargas por este sector está en torno a 245 l/s.

En el acuífero de la sierra de Los Guájaras, el manantial más relevante (Fuente Santa) se encuentra a cota 423 m s.n.m. y tiene un caudal medio cercano a 40 l/s (Tabla 3.3), aunque la mayor parte de la descarga ocurre de manera difusa o por medio de pequeñas surgencias en el cauce del río de La Toba, desde prácticamente su cabecera hasta su desembocadura en el río Guadalfeo (cotas comprendidas entre 750 y 115 m s.n.m.).

En tres sectores a lo largo del borde oriental de la sierra de Albuñuelas surgen varios manantiales asociados al contacto de los carbonatos que forman el acuífero con diversas formaciones de baja permeabilidad (esquistos, margas y limos y arcillas), que ocupan buena parte del valle del río Ízbor (Figura 3.3). Los tres manantiales más relevantes son La Zaza (675 m s.n.m.), Cijancos (706 m s.n.m) y los Molinos de Padul (735 m s.n.m.), aunque en realidad este último se trata de un borde de descarga de 1.000 m de longitud donde hay varios puntos de salida de agua (hasta 8), situados a cotas comprendidas entre 730 y 740 m s.n.m. El manantial de La Zaza presenta un caudal medio histórico de 37 l/s (Tabla 3.3) y está relacionado con el contacto estratigráfico normal de los mármoles triásicos sobre los esquistos infrayacentes. Los manantiales de Cijancos y Los Molinos,

en cambio, se alinean en el contacto mecánico que separa las dolomías triásicas y los materiales detríticos de baja permeabilidad que rellenan la depresión de Padul. El manantial de Cijancos tiene un caudal medio de 195 l/s, por lo que es una de las surgencias puntuales más destacadas del ámbito de estudio. El caudal conjunto de descarga que se produce en el área de Los Molinos de Padul (formada por las surgencias de El Molino, La Raja, Povedano, Mal Nombre, Los Mísqueres) puede situarse en torno a 145 l/s de media anual, si bien varios de los puntos que definen dicha zona se encuentran actualmente secos como consecuencia de bombeos en sondeos cercanos (IGME-AAA-EGMASA, 2009).

El inventario de las principales surgencias se completa con el manantial Ojo Oscuro, localizado en el límite septentrional de la laguna de Padul (a cota 728 m s.n.m.), en el contacto estratigráfico discordante que relaciona los sedimentos de los abanicos aluviales y los de la turbera (Figura 3.3). El caudal medio estimado en este punto a partir de los registros históricos a los que se ha tenido acceso es 30,5 l/s (Tabla 3.1).

La red hidrométrica oficial actual está formada por diez estaciones de aforo que miden el caudal de varios ríos y arroyos vertientes hacia el mar Mediterráneo. Sin embargo, ninguna de ellas totaliza exclusivamente descargas subterráneas, puesto que por su posición geográfica (y por las características geológicas) miden una cierta fracción de escorrentía superficial generada en terrenos de baja permeabilidad y en los carbonatos acuíferos. Las cuencas hidrográficas aforadas están constituidas por mármoles en cabecera y esquistos en la parte baja, aunque en proporción variable. La excepción corresponde a la estación de Restábal, situada en la cuenca del río Dúrcal, en la cola del embalse de Béznar, que recibe agua de escorrentía y de deshielo procedente de las metapelitas de Sierra Nevada, en su tramo superior, además de la escorrentía y de las descargas subterráneas de la depresión de Padul y del borde oriental de la sierra de Albuñuelas. Por lo tanto, las aportaciones medidas en cada estación son, lógicamente, la suma de los caudales de los manantiales más la escorrentía superficial generada por las precipitaciones sobre la cuenca, fundamentalmente sobre mármoles.

Las cuencas hidrográficas con estaciones de aforo disponibles en la vertiente meridional de las sierras Tejeda y Almijara son, de O a E, las de los ríos Alcaucín, Bermuza, Almanchares, Rubite, Algarrobo y Torrox (Figura 3.3). En el tramo medio del este último cauce se encuentra la estación de aforos que registra la menor proporción de escorrentía superficial asociada a materiales de baja permeabilidad. En el extremo opuesto se encontraría la estación del río Rubite, con una aportación subterránea procedente de los mármoles triásicos de Sierra Tejeda casi nula, en proporción a la superficie de cuenca hidrográfica aforada. La estación del río Bermuza se localiza 3 km aguas abajo del manantial de La Fájara; sería un punto de control hidrodinámico idóneo si no fuera porque en ella se mide también el correspondiente caudal de escorrentía superficial que generan los esquistos en situaciones de lluvias. Además, desde 1995, un azud construido entre el manantial y la estación de aforos, y el correspondiente túnel de trasvase, deriva parte del flujo del río hacia el embalse de La Viñuela cuando el caudal supera un cierto umbral. Todo lo expuesto dificulta la interpretación de la componente subterránea en las series de datos. Obras análogas y en posición similar respecto a las respectivas estaciones de aforo pueden encontrarse en el río Alcaucín y en el arroyo de Almanchares.

Las estaciones de aforo que miden el caudal de los ríos Verde y de La Toba se ubican en los tramos medios de sus respectivas cuencas y en ambas se registra componente superficial, además de descarga subterránea procedente de los mármoles triásicos. En el primer caso, las salidas subterráneas del acuífero del río Verde serían completamente controladas por la estación de Cázulas (Figura 3.3) si el agua utilizada para generar energía hidroeléctrica en una subestación cercana, que es derivada en cabecera, no fuera devuelta al cauce un poco más abajo de la ubicación

de la estación. La estación del río de La Toba se sitúa a la altura del núcleo urbano de Guájár-Fondón. En ella se registra solo una parte de las descargas subterráneas que tienen lugar hacia el cauce en este sector del ámbito de estudio.

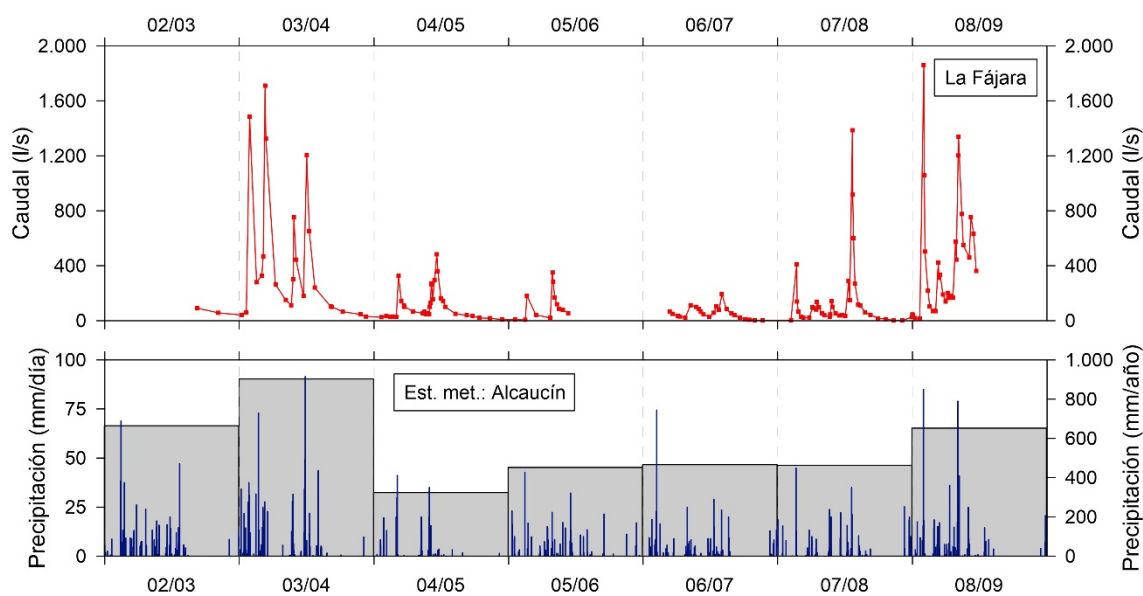
Por último, la estación del arroyo de la Madre se halla situada en el extremo oriental del polje de Zafarraya, cerca de La Alcaicería (Figura 3.3), por donde pasa la escorrentía superficial generada en la ladera noroccidental de Sierra Tejeda y la descarga subterránea procedente de manantiales como el de La Parrilla. A las anteriores estaciones de la red foronómica de la región hay que sumar la construida en el manantial de Maro. La acequia Gorda de Játar dispuso de una estación en el pasado, hoy fuera de servicio.

Se dispone de series históricas de caudal de los principales manantiales que drenan el ámbito de estudio, proporcionadas por el IGME, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas y el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. La longitud temporal de las series difiere en cada caso, aunque muchas de ellas comienzan en la década de 1980 (1980/81, 1982/83, 1987/88) y llegan hasta una época reciente (Tabla. 3). Las series de datos corresponden a medidas puntuales y los registros son discontinuos, con algunas lagunas y numerosos años hidrológicos en los que sólo se realizaron 2 ó 3 medidas, aunque desde mediados de 2003 (1988 en los casos de los manantiales de Játar y Maro) los aforos han sido más frecuentes (mensuales o cada dos meses). Las series de mayor duración son las de los manantiales del Río Alhama y Maro, con 39 y 38 años de registro, respectivamente, si bien la serie del segundo punto cuenta con un mayor número de medidas (398). Las figuras 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 recogen, a modo de ejemplo, los hidrogramas de las surgencias de La Fájara, Río Alhama, Maro y Cijancos como ilustrativas del comportamiento hidrodinámico de los acuíferos del ámbito de estudio.

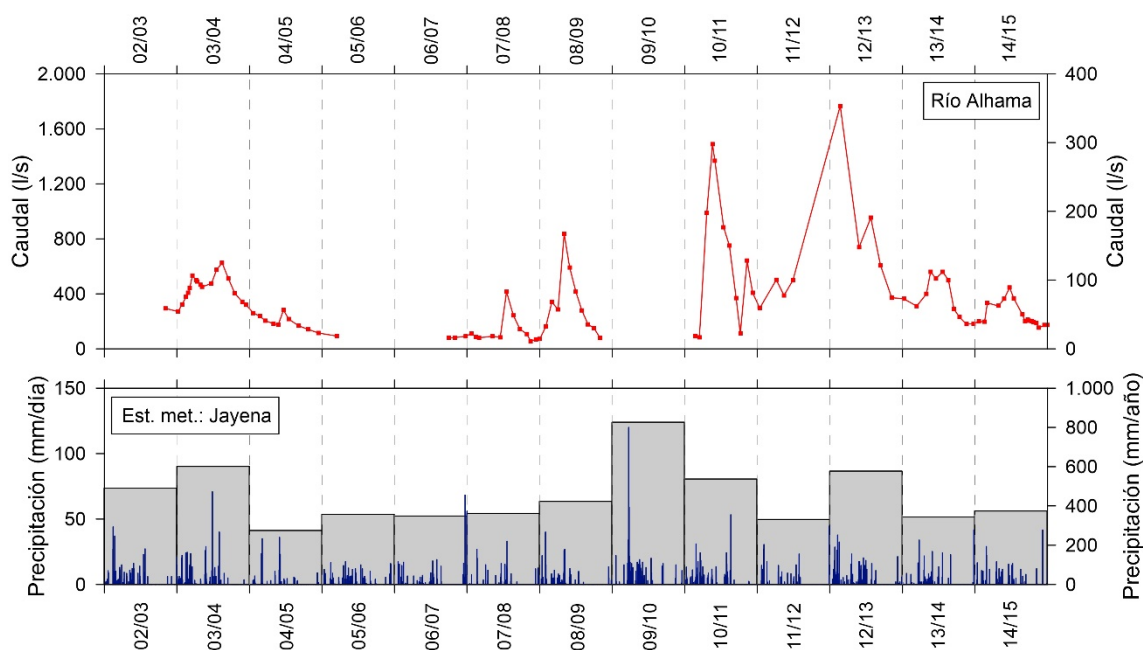
A partir de la serie de caudales del manantial de La Fájara se puede deducir un comportamiento hidrodinámico típicamente kárstico para el acuífero de Sierra Tejeda meridional, con fuertes crecidas durante los periodos de recarga y rápidos descensos en ausencia de las mismas (Figura 3.4) (Pérez et al., 2004; Mudarra et al., 2014). El manantial alcanza caudales próximos a 2.000 l/s en épocas de crecida y menos de 10 l/s durante un estiaje prolongado. Cada evento pluviométrico se traduce en una crecida, cuya magnitud es proporcional a la cantidad e intensidad de las precipitaciones. Los tiempos de respuesta a las lluvias llegan a ser inferiores a dos días. No obstante, en el manantial de La Fájara pueden observarse también algunas respuestas algo más lentas. Ello estaría relacionado con la recarga con agua de fusión nival, hecho que es relativamente recurrente debido a la altitud de Sierra Tejeda (por encima de 2.000 m s.n.m). Así, la fusión paulatina de la nieve puede dar lugar a una recarga lenta, que genera crecidas algo desfasadas y menos pronunciadas que de costumbre. En otras ocasiones, la fusión nival puede prolongarse varias semanas y favorecer una infiltración relativamente constante, lo que da lugar a caudales más o menos estables durante las fases de decrecida e inicio de agotamiento. En cualquier caso, las decrecidas y los agotamientos son relativamente rápidos, con valores de coeficiente de agotamiento del orden de  $1 - 2 \times 10^{-2} \text{ días}^{-1}$  (CEHIUMA-IGME, 2017).

El análisis general del hidrograma del manantial del Río Alhama, a partir de los datos disponibles (Figura 3.5), permite distinguir claramente la alternancia entre periodos húmedos, con caudales más elevados (hasta casi 1.800 l/s), y otros más secos durante los cuales la surgencia sufre un descenso paulatino pero evidente en su caudal de descarga, que es interrumpido tras nuevas y abundantes lluvias. En detalle, se observa que, como máximo, se registra una crecida relevante por cada año hidrológico, según la serie disponible, cuya magnitud depende de la cantidad de precipitación. Se puede intuir, por tanto, un filtrado de la señal de entrada (pluviometría) por parte del sector septentrional del macizo de Sierra Tejeda. El valor medio estimado para el coeficiente de

agotamiento es de  $4 \times 10^{-3}$  días<sup>-1</sup> (CEHIUMA-IGME, 2017). Este comportamiento hidrodinámico denota una respuesta relativamente lenta y amortiguada a los periodos lluviosos, lo cual es indicativo de un flujo subterráneo difuso a través de un acuífero con bajo desarrollo del drenaje kárstico. No obstante, la interpretación tiene las limitaciones propias de la frecuencia de medida (mensual en el mejor de los casos), además de las consideraciones sobre la ubicación de la estación de medida. El punto de aforo se sitúa en el cauce del río Alhama, donde descarga subterránea y escorrentía superficial son aforados de manera conjunta, en caso de que ocurra la segunda.



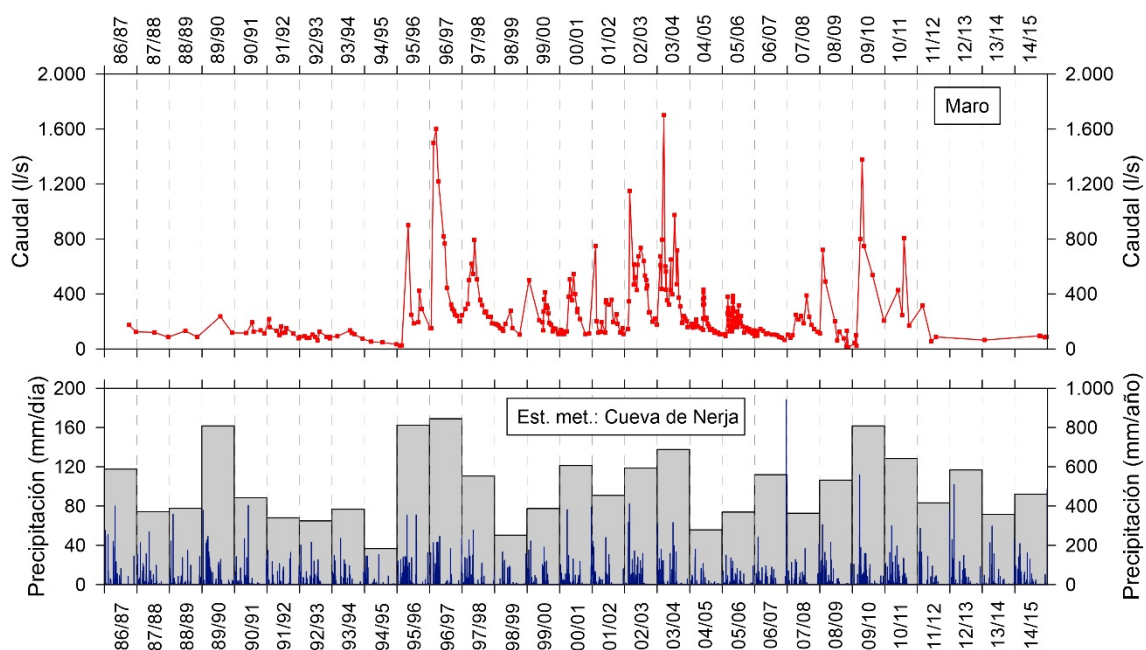
**Figura 3.4. Hidrograma del manantial de La Fájara y precipitación durante el periodo 2003 – 2009.**



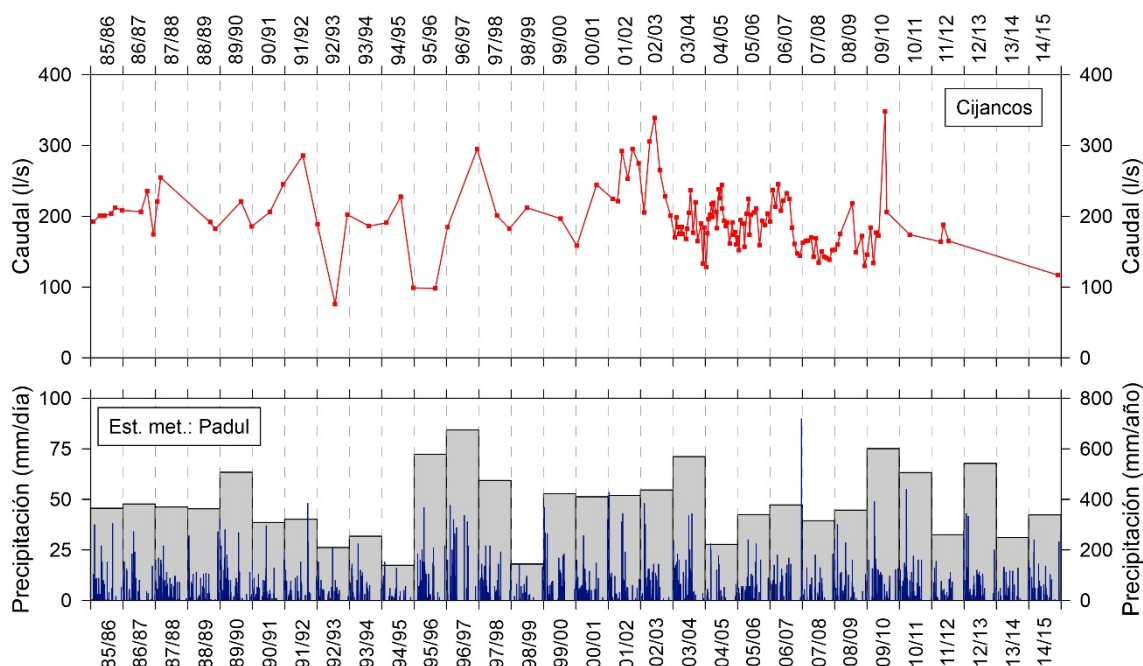
**Figura 3.5. Hidrograma del manantial del Río Alhama y precipitación durante el periodo 2003 – 2015.**

La serie de datos disponible del manantial de Maro muestra una clara influencia de la alternancia de los periodos secos y húmedos en el régimen hidrodinámico del sistema. En épocas secas no hay variaciones significativas de caudal, con caudales del orden de 100 - 130 l/s, como se ve en el primer tramo del hidrograma (hasta 1995). En cambio, durante los periodos más húmedos, la surgencia responde con uno o dos picos de caudal casi todos los años, cuyos valores alcanzan 1.700 l/s (Figura 3.6). No se aprecian tendencias en la serie de datos. Los incrementos de caudal ante las precipitaciones se producen de manera rápida y ocurren en varios días. El valor medio estimado para el coeficiente de agotamiento es de  $2 - 3 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$  (CEHIUMA-IGME, 2017). En el entorno del manantial se efectuaron dos sondeos de reconocimiento para intentar regularlo pero solo resultó productivo el más cercano, el cual atravesó el conducto kárstico que alimenta a la surgencia, con la particularidad de que el caudal de bombeo fue equivalente al caudal drenado por el manantial. Estos datos, unidos al hecho de que el manantial se encuentra a cota 113 m s.n.m., del orden de 30-40 m más alta que el nivel piezométrico regional en esa zona, parecen indicar que el manantial de Maro está relacionado con una red de drenaje kárstico superior dentro del acuífero de Sierra Almirajara meridional. Esta hipótesis sería congruente con el hecho de que el manantial lleva situado en este punto, al menos, desde el Pleistoceno superior, como demuestran las dataciones efectuadas en el travertino asociado (Durán-Valsero, 1996).

Por último, según los datos disponibles, el manantial de Cijancos presenta pequeños aumentos de caudal casi todos los años, si bien la serie de datos no permite observar la alternancia de ciclos húmedos con otros más secos o tendencias significativas. Las variaciones de caudal son de escasa magnitud y las crecidas son puntuales (Figura 3.7). Se constata dos crecidas más marcadas, con caudales que alcanzan 340 - 350 l/s, que se produjeron en primavera de 2003 y 2010, respectivamente. El análisis más preciso para los datos obtenidos entre los años hidrológicos 2003/04 y 2006/07, en el que se efectuaron aforos con mayor frecuencia, permite observar un régimen de descarga relativamente irregular (rápidas variaciones de caudal) ante las precipitaciones, pero sin crecidas o descensos pronunciados. Este comportamiento hidrodinámico se asocia con un desarrollo muy bajo de los conductos kársticos; el flujo se produce por fisuras, con drenaje lento y elevada capacidad de regulación natural.



**Figura 3.6. Hidrograma del manantial de Maro y precipitación durante el periodo 1987 – 2015.**



**Figura 3.7. Hidrograma del manantial de Cijancos y precipitación durante el periodo 1986 – 2015.**

### 3.6.2. Sondeos. Evoluciones piezométricas

El inventario publicado más completo de sondeos existentes en las masas de agua subterráneas objeto de este informe proviene de los estudios efectuados por SGOP (1991) e IARA (1991), en los que figuran numerosos datos relativos a perforaciones en el momento de su ejecución, y el ITGE (1998), este último centrado en las sierras de Albuñuelas y Padul. Cabe también destacar el informe del IGME por encargo de la Agencia Andaluza del Agua (IGME-AAA-EGMASA, 2009). Todos estos documentos recogen un total de 169 sondeos relacionados con los acuíferos carbonáticos objeto del presente trabajo: 13 en Sierra Tejeda, 96 en Sierra Almijara (incluida Las Alberquillas), 56 en las sierras de Los Guájares y de Albuñuelas, 4 en la sierra de Padul. Se menciona también la existencia de 80 pozos y 50 sondeos excavados y perforados en el relleno detrítico de la depresión de Padul. No obstante, los inventarios fueron realizados hace diez años, en el caso más reciente, por lo que el número actual de puntos debe ser diferente, como recoge la base de datos del IGME. Muchos de los sondeos existentes se ubican en el borde meridional de Sierra Almijara, debido a que allí se concentran los núcleos de población más relevantes. Lógicamente, la explotación de las aguas subterráneas en este sector resulta intensa.

En Sierra Tejeda, la accidentada orografía sólo permite la ubicación de captaciones en zonas marginales del relieve, principalmente en la vertiente norte. Por el contrario, la suavidad de la topografía de la sierra de Albuñuelas ha permitido la construcción de sondeos en zonas relativamente alejadas del borde. En la vertiente N de Sierra Almijara existen muy pocos sondeos, ya que los escasos y pequeños núcleos urbanos se abastecen principalmente de aguas de manantial, y las necesidades de riego se satisfacen mediante derivaciones de los cauces principales.

Por último, el accidentado relieve de la sierra de Padul motiva que los sondeos se encuentren cerca de la traza de la falla de Nigüelas, donde cambia la pendiente, o sobre los derrubios cuaternarios

que constituyen los abanicos aluviales. La tabla 3.2 muestra los sondeos más relevantes, ya sea por el uso del agua o por disponer de información piezométrica, de cuantos están recogidos en los inventarios previos.

La demanda de agua se ha cubierto históricamente en la región con los manantiales o derivaciones en los cauces, por medio de acequias, aprovechando las elevadas cotas de surgencia de los primeros, aunque esta situación ha ido cambiando poco a poco hacia una mayor explotación mediante bombeos para completar o satisfacer totalmente las necesidades hídricas. Las extracciones se intensifican, además, en épocas estivales o de sequía cuando los caudales aportados de manera natural por los manantiales o cauces son insuficientes para garantizar las demandas. Cabe destacar los sondeos de los que se abastecen los municipios de Alcaucín y Canillas de Aceituno, en Sierra Tejeda (Tabla 3.2), Agrón y Escúzar en la sierra de Albuñuelas, Padul y Dúrcal en la sierra de Padul, o las explotaciones por bombeo que se llevan a cabo en Sierra Almirajara para abastecimiento urbano de Canillas de Albaida, Cúmpeta, Torrox, Frigiliana, Nerja y Almuñécar. La concentración de bombeos en este último sector (río Torrox, río Chíllar y barranco de Cantarriján), por razones de accesibilidad a la hora de emplazar los sondeos, provoca descensos piezométricos localmente importantes, sobre todo en periodos secos. En el río Chíllar, los bombeos han provocado la desecación de varios manantiales que se encontraban cerca del borde del acuífero y en el barranco de Cantarriján incluso intrusión marina.

**Tabla 3.2. Características de los principales sondeos de las MASb implicadas en el estudio.**

MASb	Nº Inventario IGME	Demoninación	Uso del agua	Cota m s.n.m.	Profundidad del sondeo metros	Cota Piezométrica m s.n.m.	Fecha cota piezométrica	Coordenadas UTM	
								X	Y
	1843-8-0037	Linarejos	No se utiliza	1090	83	998	2003-2006	419554	4086037
	1843-2-0125	Tejeda Norte	Agricultura	1125		1084,32	2003-2006	406075	4088800
	1843-7-0035	Albaida	No se utiliza	620	127	617	1990	413450	4079525
	1843-2-0041	Tejeda Norte-2	Agricultura	1150	113	1123		407145	4088299
	1843-2-0090	Tejeda Norte-3	Agricultura	1090	60	1050		406002	4089107
	1843-2-0091	Tejeda Norte-4	Agricultura	1060	90	1045		406303	4089305
	1843-2-0124	Tejeda Norte-5	Agricultura	1115		1078		405851	4089110
	1843-2-0126	Tejeda Norte-6	Agricultura	1152	18	1144		406696	4088405
	1843-2-0128	Tejeda Norte-7	Agricultura	1012		990		407452	4089300
	1844-3-0013	Cómpeta	Abastecimiento	600	305	398	1990	414700	4075675
	1844-3-0008	Cómpeta-2	Investigación	480	76	476	1990-2001	416250	4076430
	1844-3-0012	Cómpeta-3	Investigación	530	270	374	1989-2001	415200	4075300
	1844-3-0014	Cómpeta-4	Investigación	500	50	496	1992-2001	416330	4076580
	1844-3-0015	Cómpeta-5	Investigación	495	60	468	1992-2001	416330	4076320
	1844-4-0082	Frigiliana-2	Investigación	500	201	424	1986-2001	418915	4074211
	1844-4-0091	Higuerón	Abastecimiento	290	200	280	2003-2006	420800	4072950
	1844-4-0100	Venta de Jaro	No se utiliza	620	72	546	1990-2006	418357	4076634
	1844-4-0095	Chillar-1	Abastecimiento	105	277	79	1992 - 1995	421625	4070700
	1844-4-0105	Chillar-2	Investigación	90	50	82	1992-2006	421650	4070377
	1844-4-0103	Chillar-3	Investigación	105	12	89	1991-2001	421623	4070740
	surgente	Chillar-4	No se utiliza	125		125	2009-2010	421339	4071439
		Maro-2	Investigación	205	112	95	2003-2006	424015	4069840
	1944-1-0052	Maro-3	Investigación	525	280	409	1991-2006	424780	4073309
		Cueva Nerja	Investigación	140		99	2006-2010	424609	4068716
	1944-1-0043	Miel	No se utiliza	120	130	67	1990	428100	4069600
	1944-1-0029	Ayo. Pino-1	No se utiliza	139	125			429073	4067791
	1944-1-0027	Ayo. Pino-2	No se utiliza	166	153			429118	4067926
	1944-5-0013	Marina-1	No se utiliza	85	170	9	2003-2010	429750	4067418
	1944-5-0003	Marina-2	No se utiliza	106	148			429908	4067548
	1944-5-0004	Marina-3	No se utiliza	101	148	24	2003-2009	429798	4067568
	1944-5-0015	Cantarriján-4	Abastecimiento	110	220	18	1989	430350	4067750
	1944-1-0034	Cantarriján-3	Abastecimiento	110	217	-5	2009	430350	4067765
	1944-1-0032	Cantarriján-1	Abastecimiento	120	218	-2	1985-1989	430381	4068005
	1944-5-0016	Cantarriján-5	Agricultura	55		45	2003-2006	430652	4067153
	1944-5-0018	Cantarriján-9	Investigación	150	170	72	1989-2000	431250	4067000
	1943-8-0027	El Valle	Abastecimiento	790	200	680	1996	447500	4085350
	1943-8-0036	La Zarza	Agricultura	838	96	828	1998	448489	4083358
	1943-4-0074	Durcal	Abastecimiento	844	150	740	1998-1999	450556	4094152
	1943-2-0008	Albuñuelas	Abastecimiento	1180	95	1113	1978	434549	4094725
	1942-5-0041	Agrón	Abastecimiento	1100	120	1077	1993	427050	4097775
	1942-5-0052	Escuzar	Abastecimiento	915	192	792	1997	429615	4100785
	1942-5-0057	Agrón-2	abastecimiento	1075		1001	1998-1999	426820	4098190
	1942-6-0016	IRYDA-Alhendín	No se utiliza	860	120	838	1986	436513	4099769
	1942-7-0029	Padul-Puntal	Abastecimiento	845	120	800	1996	443727	4099493
	1942-7-0090	Padul	Abastecimiento	818	100			444385	4098329
	1942-7-0092	Padul-2	Industria	835	115	767	1992	443777	498633
	surgente	P.06.23.001-B	Investigación	729		729	2007-2013	445350	4097432
		P.06.17.001-B	Investigación	836		779	2007-2017	445644	4098391
		P.05.42.001-B	Investigación	1222	410	867	2008-2015	435052	4092627
	00.11.02	P.05.65.002-B	Investigación	1026	294	812	2008-2019	448644	4101301
		P.06.24.001-B	Investigación	537	130	520	2007-2017	401033	4085212
	1944-1-0048	P.06.24.001-S	Investigación	253		246	1999-2017	429559	4070820
	1843-7-0040	P.06.24.002-B	Investigación	700	100	680	1998-2017	413512	4080134
		P.06.24.002-S	Investigación	160		60	2002-2017	424451	4069106
	1843-8-0035	P.06.24.003-B	Investigación	553	118	490	1992-2016	416580	4077070
		P.06.24.004-B	Investigación	91	67	81	2007-2017	421636	4070425
	1944-5-0009	P.06.24.005-B	Investigación	35	82	8	1984-2017	430626	4066594
		P.06.26.006-B	Investigación	486	130	468	2007-2017	434413	4076798
		P.06.24.007-B	Investigación	306	132	296	2007-2017	446718	4078114
		P.06.24.008-B	Investigación	823	120	818	2007-2017	441661	4086208
		P.06.24.009-B	Investigación	716	100	680	2007-2017	447335	4092731

Finalmente, en el ámbito de las masas de agua subterráneas objeto de este informe existen 14 piezómetros de control hidrogeológico, la mayoría asociados a las masas de agua subterránea adscritas a la demarcación Mediterránea y sólo uno a la DHG. De los primeros, 7 están situados en



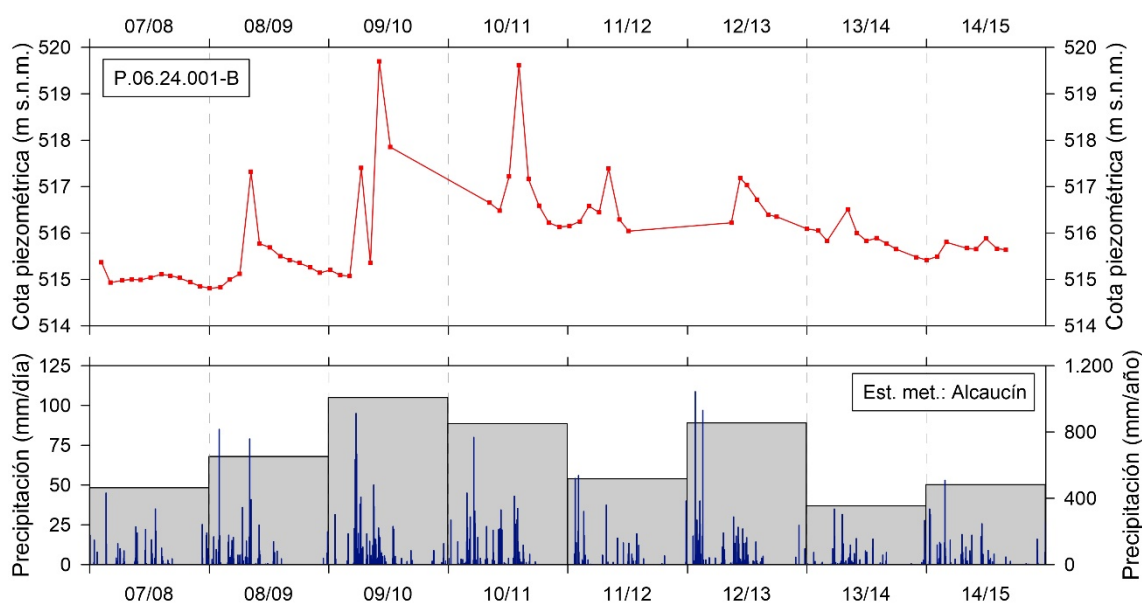
el borde SO de las sierras Tejeda y Almijara, repartidos entre Alcaucín y el barranco de Cantarriján, este último a escasos metros de la línea de costa, y 4 se distribuyen por el margen oriental de las sierras de Los Guájares y de Albuñuelas (Figura 3.3). Los dos restantes permiten el control de las variaciones del nivel piezométrico que tienen lugar, respectivamente, en los materiales de la depresión de Padul y en los carbonatos de la sierra de igual nombre. Varios de los piezómetros inventariados fueron construidos en el año 2007, asociados al Proyecto Redes Nueva Construcción.

Existe una amplia extensión (las zonas elevadas de las sierras Tejeda, Almijara, Los Guájares, Padul) donde se tiene muy poca información sobre la profundidad del nivel piezométrico y la que hay se limita a perforaciones aisladas que fueron construidas en valles interiores con acceso, o en las inmediaciones de algún cortijo, como es el caso del piezómetro P.05.42.001-B (Venta El Fraile), en la zona central de la sierra de Albuñuelas.

Al igual que en el caso de los manantiales, se observan diferencias notables en las cotas piezométricas medias registradas en los sondeos según el sector que se considere (Tabla 3.2), desde valores próximos al nivel del mar, incluso negativos, en el litoral de Sierra Almijara, hasta superiores a 1.000 m s.n.m. al N de Sierra Tejeda o en la sierra de Albuñuelas. El sector con un mayor número de perforaciones es, sin duda, la depresión de Padul. En ella hay inventariados 50 sondeos y 80 pozos, la mayoría de escasa profundidad, que captan el agua de los materiales neógeno-cuaternarios para regadío (IGME-AAA-EGMASA, 2009). Los sondeos más profundos alcanzan los sedimentos basales de la depresión y algunos de ellos, los situados en el borde septentrional, llegan a ser surgentes al interceptar equipotenciales más elevadas que la superficie del terreno. Uno de estos sondeos surgentes se utiliza en la actualidad para efectuar observaciones piezométricas y tomar muestras de agua en la MASb “Depresión de Padul” (ES060MSBT060-023). Se trata del punto P.06.23.001-B en la figura 3.3 y su cota es 729 m s.n.m.

La figura 3.8 muestra la evolución temporal histórica del nivel piezométrico en el punto P.06.24.001-B, situado en el borde occidental de Sierra Tejeda (Figura 3.3), en la localidad de Alcaucín, entre los años hidrológicos 2007/08 – 2014/15. La serie dispone de 4 a 12 medidas anuales durante este periodo, por término medio, al igual que ocurre en el resto de puntos de la Red Oficial de control piezométrico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Se aprecia una evolución claramente influenciada por el régimen de precipitaciones, típica de sondeos situados en el borde de acuíferos carbonáticos, con ascensos rápidos de los niveles piezométricos durante los principales eventos pluviométricos, pero de escasa cuantía, y descensos de igual magnitud tras el cese de las lluvias. Los ascensos máximos, del orden de 4 metros en un mes según los datos disponibles, tuvieron lugar en los años húmedos del periodo 2009 - 2013. En épocas estivales o en periodos secos los niveles tienden al descenso, pero a un ritmo mucho menor que en situaciones de decrecida. Todo ello reflejaría un funcionamiento próximo a kárstico para el acuífero meridional de Sierra Tejeda, coherente con el que ha sido deducido a partir del hidrograma del manantial de La Fájara (Figura 3.4).

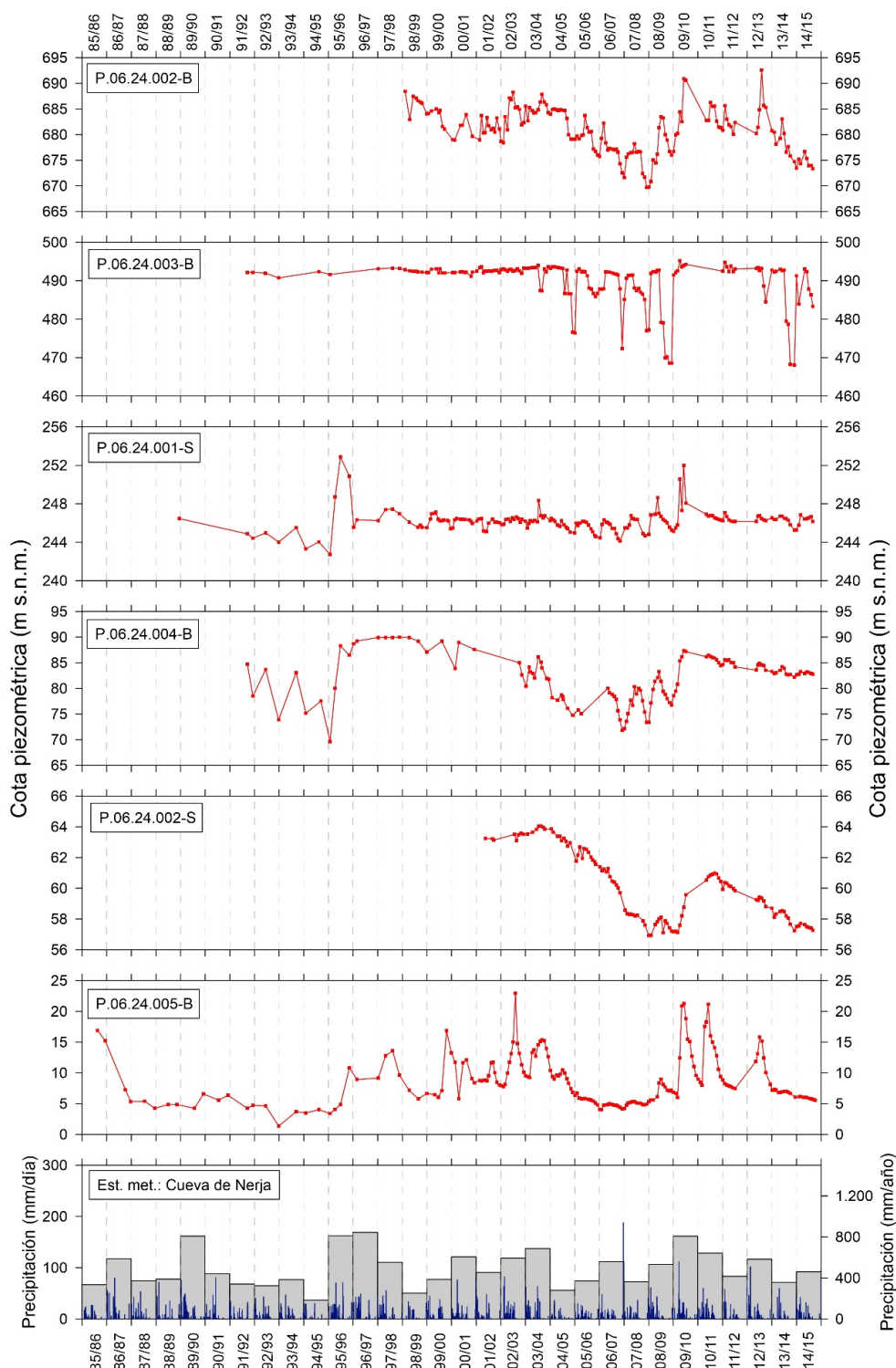
En la vertiente meridional de Sierra Almijara (desde Cómpeta hasta el paraje de Cerro Gordo, Figura 3.3) se pueden encontrar los piezómetros P.06.24.002-B, P.06.24.003-B y P.06.24.001-S que corresponden a sondeos de investigación construidos por el SGOP en 1989, con 100, 118 y 102 m de profundidad respectivamente, y que luego han sido integrados en la Red Oficial de control piezométrico. El nivel piezométrico estático medio en estos puntos para el periodo 1998/99 – 2016/17 se sitúa a cotas 680, 490 y 246 m s.n.m. Completa el inventario de puntos oficiales de la MASb ES060MSBT060-063 “Las Alberquillas” los piezómetros P.06.24.002-S, P.06.24.004-B y P.06.24.005-B, situados en el tramo bajo de los cauces Maro, Chíllar y Cantarriján, a cotas 160, 91 y 35 m s.n.m., y con un nivel estático medio a 60, 81 y 8 m s.n.m., respectivamente.



**Figura 3.8. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en el punto P.06.24.001-B (Sierra Tejeda).**

Las evoluciones históricas de los niveles en los puntos mencionados muestran comportamientos hidrodinámicos dispares, aunque casi todos, en mayor o menor medida, dibujan ciclos anuales de ascensos y descensos piezométricos, cuya amplitud depende de la cantidad de lluvia acumulada durante el año hidrológico (Figura 3.9).

En todos los casos, salvo en el punto P.06.24.003-B, los ascensos durante los periodos lluviosos presentan cierta inercia, sobre todo a principios del año hidrológico, debido a la capacidad de retención de agua del suelo y de la zona no saturada (con cierto espesor y bajo grado de karstificación) del acuífero. Los sondeos P.06.24.002-B y P.06.24.001-S muestran ascensos relativamente rápidos durante lluvias significativas, de hasta 8 metros en un mes (diciembre de 2010), con posteriores descensos de igual magnitud tras los eventos de recarga, los cuales tienden a moderarse durante el estiaje. El primer punto se localiza en el extremo NO de Sierra Almijara (en la cabecera del río Algarrobo) y en él puede verse la influencia de la alternancia de periodos húmedos y secos en la evolución general de la piezometría. Esta influencia no se percibe en el segundo de los puntos mencionados, situado en el río de la Miel, ni se observan tendencias destacables en la serie de datos; el nivel se mantiene estable en torno a la cota 246 m s.n.m.



**Figura 3.9. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en los puntos P.06.24.002-B, P.06.24.003-B, P.06.24.004-B, P.06.24.002-S, P.06.24.001-S y P.06.24.005-B del macizo de Sierra Almiraja.**

Las variaciones piezométricas registradas en el sondeo P.06.24.003-B, localizado en el tramo alto del río Torrox, son de mayor magnitud y de forma diferente que las de los anteriores (Figura 3.9). Dichas variaciones se producen entre las cotas 468 (aguas bajas) y 493 m s.n.m. (aguas altas) sin que se observe una tendencia ascendente o descendente durante los años de registro; como mucho se aprecia una leve ciclicidad en los valores más elevados provocada por la alternancia de periodos húmedos y secos. Lo más destacado de esta serie son los descensos acusados en muchos de los años hidrológicos, coincidentes con los periodos estivales, y los posteriores ascensos de igual

magnitud cuando comienza el principal periodo de recarga pluviométrica (otoño-invierno). Los descensos y ascensos del nivel registrado en este punto ocurren de manera relativamente rápida (23 m en un mes, septiembre de 2009). A partir del año hidrológico 2003/04 se registran variaciones cada vez más acusadas, las cuales están asociadas a la entrada en funcionamiento de sondeos de explotación en las inmediaciones del piezómetro, posiblemente potenciadas por la situación geológica del punto de control. Este se localiza al lado de la estrecha banda de esquistos asociados a una falla inversa (y luego normal) que recorre la mitad meridional de Sierra Almirajara en dirección NO-SE (Fig. 1), y que fue utilizada como argumento en trabajos previos para individualizar las masas de agua subterránea “Sierra Almirajara” y “Las Alberquillas”.

La serie histórica resultante de combinar el registro obtenido en el piezómetro situado en el río Chillar (P.06.24.004-B), y el de su antecesor -hasta 2006- como punto de control (1844-4-0105) en ese lugar, permiten deducir una evolución temporal del nivel piezométrico marcada por la alternancia de 2 ciclos húmedos y 3 secos durante un periodo de 25 años. Los valores más elevados de cota piezométrica (90 m s.n.m.), alcanzados a final de la década de 1990, corresponden a los momentos en los que el sondeo era surgente. Sobre esta evolución general se superponen los cambios estacionales anuales propios del clima mediterráneo (Figura 3.9), los cuales ocurren de manera progresiva y con una amplitud máxima de 9 metros. El último tramo de la serie (desde 2010) permite deducir una tendencia descendente en los niveles piezométricos, tan sólo interrumpida por leves ascensos de 1 a 4 metros, a pesar de que los años 2011 y 2013 fueron húmedos en términos meteorológicos. Ello está relacionado con los bombeos que tienen lugar en sondeos cercanos para el abastecimiento de Nerja.

Hacia el E, en el barranco de Maro, existen varios sondeos, uno de los cuales (P.06.24.002-S) está situado cerca de las instalaciones de la Cueva de Nerja. En él se ha medido periódicamente el nivel piezométrico desde febrero de 2002 (Figura 3.9). Su evolución recuerda a la del punto de control situado en el río Chillar, con los dos máximos piezométricos separados por un periodo con niveles más deprimidos (2007-2009). Pero a diferencia del anterior, aquí las variaciones piezométricas denotan una respuesta más lenta y amortiguada del sistema a las precipitaciones, dentro de una tendencia descendente desde la cota 64 hasta 54,5 m s.n.m. La tendencia observada es debida el aumento del número de captaciones y de las extracciones en esa zona. Aguas arriba, en el mismo barranco de Maro, se encuentra el sondeo Maro-2 (Tabla 3.2), en el cual se produjo un ascenso piezométrico máximo de unos 12 metros asociado a las lluvias del año 2003/2004 INTECSA-INARSA (2009), mientras que en P.06.24.002-S fue de 0,5 metros. En cualquier caso, el nivel piezométrico medido en los sondeos del entorno de la Cueva de Nerja queda por debajo de la cota de surgencia del manantial Maro (113 m s.n.m.).

Finalmente, el piezómetro P.06.24.005-B, localizado en el extremo SE de Sierra Almirajara, en el barranco de Cantarriján (a 500 m de la costa), muestra un comportamiento hidrodinámico distinto a los anteriores. Se produce un ascenso y posterior descenso de la cota piezométrica por cada año hidrológico, proporcional a la cantidad de lluvia acumulada. Las variaciones de nivel tienen lugar de manera amortiguada (Figura 3.9), de manera que tardan alrededor de 2 meses desde que comienza a subir el nivel hasta que alcanza la cota máxima relativa y, después, el nivel piezométrico desciende más lentamente hasta más o menos la cota previa a la recarga. Todo ello, como es lógico, está sujeto a las limitaciones propias de la frecuencia de medida. La diferencia registrada entre los valores máximos y mínimos es del orden de 20 metros y, en algunas ocasiones (diciembre de 2009), la subida piezométrica puede llegar a ser de más de 15 metros. Estas evoluciones evidencian, por un lado, un funcionamiento propio de medios carbonáticos con moderado desarrollo de la karstificación y, por otro, la existencia de flujos subterráneos dirigidos hacia el mar, cuya magnitud depende de las condiciones hidroclimáticas, puesto que el nivel en el sondeo está siempre por encima de la cota cero. No se aprecia la influencia de los bombeos en los sondeos de

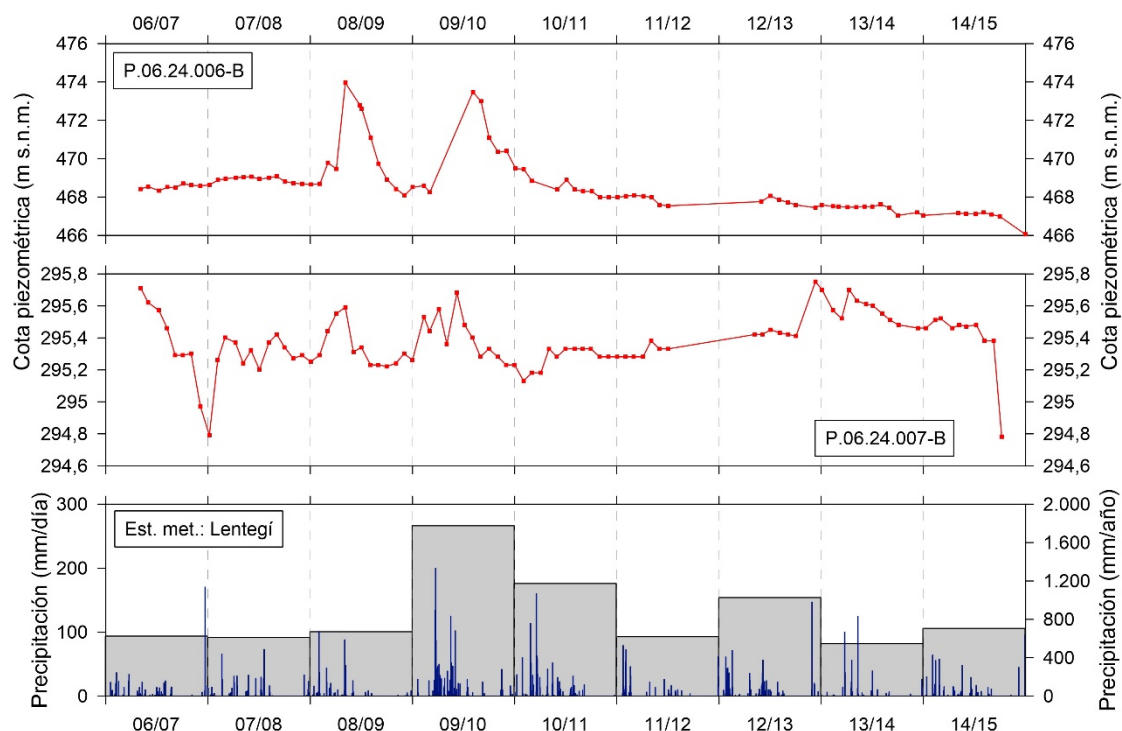
abastecimiento a Almuñécar en las variaciones piezométricas del punto P.06.24.005-B, aunque la distancia entre ellos es de 650 m.

En el borde oriental del acuífero del río Verde se halla el punto P.06.24.006-B, donde el nivel piezométrico se sitúa a 468 m s.n.m., valor intermedio a las cotas de surgencia de los manantiales Socavón y Fuente Negra (Figura 3.3). Más al E, en el valle del río de La Toba, se localizan el sondeo P.06.24.007-B que se utiliza para el control piezométrico de este sector del ámbito de estudio. El nivel estático medio de su serie histórica se sitúa a 296 m s.n.m., 127 m más bajo que la cota de surgencia de Fuente Santa, localizada 2 km al NO. Los 10 años de registro (2007-2017) en ambos puntos permiten observar escasas variaciones en los niveles ante las precipitaciones, aunque de diferente magnitud (Figura 3.10). Destaca los aumentos de más de 4 metros en un mes en el punto P.06.24.006-B, como consecuencia de las lluvias invernales que se registraron en los años 2008/09 y 2009/10. Las variaciones del nivel piezométrico que se registran en ambos sondeos, en régimen no influenciado, son coherentes con la posición que ocupan estos en el borde oriental de los acuíferos del río Verde y de la sierra de Los Guájares, cerca de puntos de descarga o de cauces ganadores: P.06.24.006-B entre los manantiales de Río Verde y Socavón, y P.06.24.007-B en el tramo medio del río de La Toba.

Hacia el N, en la sierra de Albuñuelas, existen otros 2 piezómetros pertenecientes a la Red Oficial de la DHCMA. Ambos están localizados en los límites orientales de los afloramientos carbonáticos y constituyen, junto a otros puntos de la zona y al piezómetro P.05.42.001-B, perteneciente a la red de la DHG, el inventario de sondeos con medidas piezométricas disponibles sobre el acuífero de dicha sierra. La cota piezométrica media más elevada (867 m s.n.m.) se registra en el sondeo P.05.42.001, situado en el sector centro-occidental de la sierra de Albuñuelas, y desciende paulatinamente a medida que el punto de observación se localiza en posiciones cada vez más cercanas al cauce del río Dúrcal. El punto P.06.24.008-B es una obra situada en la cabecera del valle del río Albuñuelas, a una cota de 823 m s.n.m., y cuyo nivel piezométrico estático medio (a 818 m s.n.m.) es representativo del acuífero triásico en este sector. El piezómetro P.06.24.009-B es otro sondeo de investigación situado a menos de 500 m del manantial de Cijancos y cuya cota piezométrica media (680 m s.n.m.; Figura 3.3, Tabla 3.2) es inferior en 26 metros a la cota a la que brota el agua en el mencionado manantial. Los niveles piezométricos medios en la vecina sierra de Padul (MASb ES060MSBT060-017) se encuentran más elevados. Las series de datos piezométricos obtenidos en el punto P.06.17.001-B entre 2007 y 2017, así como en otros sondeos cercanos destinados al abastecimiento de las localidades de Dúrcal y Padul, ha permitido obtener valores medios comprendidos entre 767 y 800 m s.n.m. (Tabla 3.2), propias del acuífero carbonático triásico. No obstante, la mayoría de los sondeos se encuentran en el borde suroriental de la sierra y se conoce muy poco sobre los niveles piezométrico en zonas elevadas. Tan sólo se tiene referencia del sondeo P.05.65.002-B, situado al N, en el valle del río Dílar y fuera del ámbito de estudio (MASb ES050MSBT000056500), cuya cota piezométrica media es 812 m s.n.m.

Las evoluciones temporales de las series piezométricas de 10 años de duración procedentes de los 3 sondeos situados en el acuífero de la sierra de Albuñuelas (P.05.42.001-B, P.06.24.008-B y P.06.24.009-B) y de los dos piezómetros de control del estado cuantitativo de la sierra de Padul (P.06.17.001-B y P.05.65.002-B), se muestran en la figura 3.11. En ellas se observan variaciones de nivel de escasa cuantía y desfasadas en el tiempo (ascensos de 4 metros, como máximo, en 5 meses), relacionados con años hidrológicos especialmente húmedos. Los descensos posteriores ocurren de manera más gradual y prolongada en el tiempo, hasta que son interrumpidos, en el mejor de los casos, por el siguiente ciclo húmedo. La amplitud entre los valores máximos y mínimos está comprendida entre 4,9 m (P.06.17.001-B) y 0,85 m (P.06.24.009-B). Todos los puntos muestran algún tramo en su serie de datos con tendencia al descenso, aunque el punto P.06.17.001-B es con

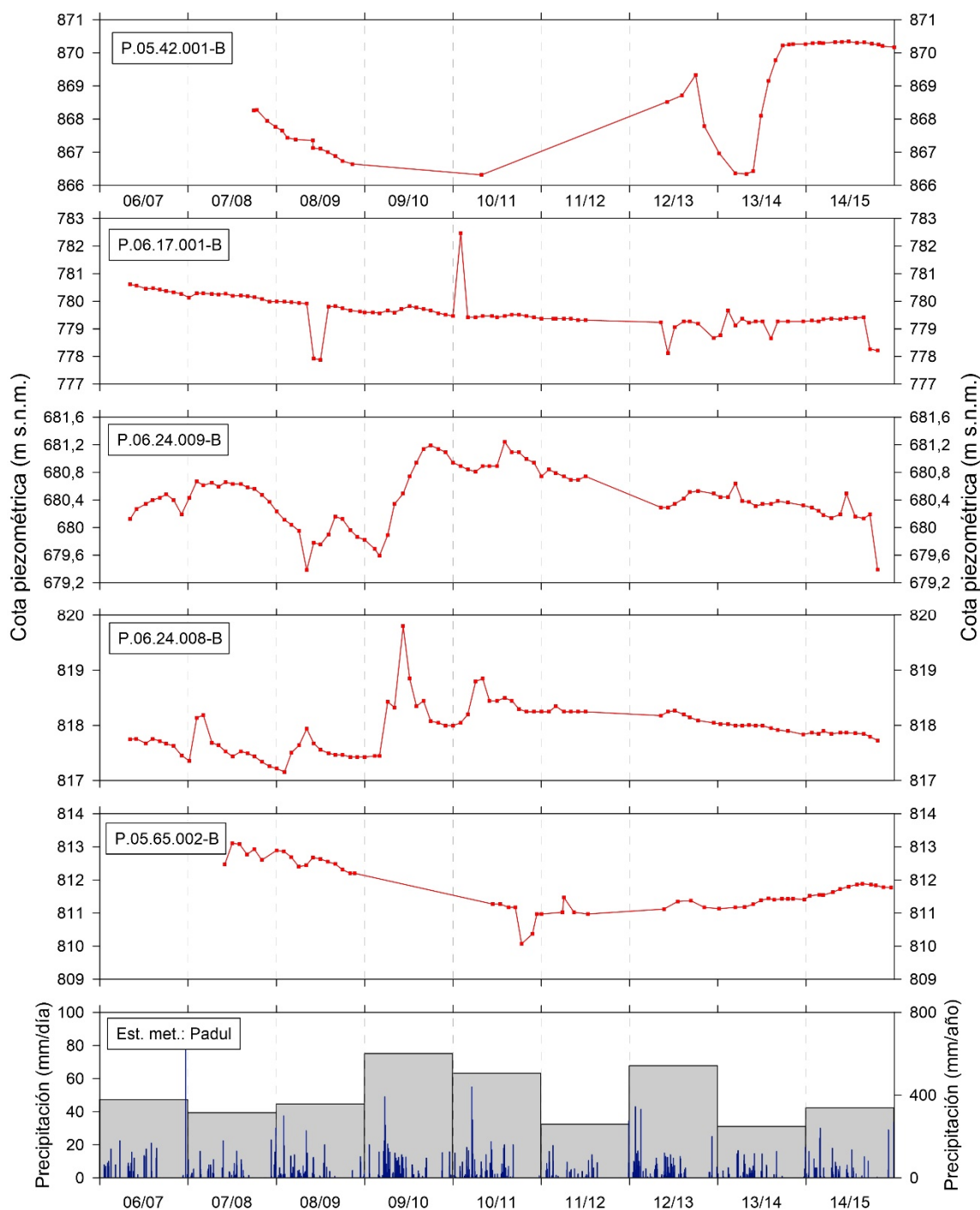
diferencia el que presenta la tendencia descendente más clara y sostenida en el tiempo, debido en gran parte a las extracciones que se realizan en las captaciones que existen en las proximidades.



**Figura 3.10. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en los puntos P.06.24.006-B y P.06.24.007-B del macizo de la sierra de Los Guájares.**

### 3.7. Piezometría en régimen natural e influenciado

Con la información piezométrica disponible, procedente en su mayor parte de los trabajos del SGOP (1991), ITGE (1998), IGME-AAA-EGMASA (2009) y Andreo et al. (2018), y la correspondiente a la localización de las surgencias y tramos de cauces ganadores que drenan los acuíferos del ámbito de estudio se han dibujado las isopiezas que aparecen representadas en la figura 3.3. Aunque se dispone de muchos datos de piezometría, es insuficiente para realizar un mapa de isopiezas completo de toda la región, ya que los puntos de agua suelen situarse en zonas marginales de los acuíferos. Aun así, es posible abordar una descripción aproximada de la geometría de la superficie piezométrica de algunos acuíferos, en régimen próximo al natural, aunque hay sectores que concentran la explotación por bombeo. Igualmente, permite establecer los gradientes hidráulicos y determinar con cierta precisión los sentidos preferentes del flujo subterráneo, si se tiene en cuenta la información que aporta el conocimiento de la estructura geológica. Se trata de acuíferos fundamentalmente libres, aunque algunos sectores del borde septentrional de la MASb ES050MSBT000054200 se encontrarían parcialmente confinados. Cabe destacar la relevancia del sentido S del flujo subterráneo en buena parte de las sierras Almiar y de Padul y del sentido E a SE en los restantes macizos, así como la existencia de una franja no saturada de espesor medio superior a 500 m en las zonas más elevadas, cuyo papel regulador en el funcionamiento hidrogeológico debe ser relevante. El mapa de la figura 3.3 recoge las principales direcciones de flujo subterráneo en los macizos.



**Figura 3.11. Evolución temporal del nivel piezométrico registrado en los puntos P.05.42.001, P.06.24.008-B, P.06.24.009-B, P.06.17.001-B y P.05.65.002-B situados en los macizos de la sierra de Albuñuelas y Padul.**

En Sierra Tejeda existen varios compartimentos hidrogeológicos, según se deduce de la estructura del macizo y de las cotas piezométricas medidas en los puntos disponibles. La piezometría en el acuífero meridional tiene un gradiente relativamente elevado, pues en 5 o 6 km se pasa de cotas que pueden ser del orden de 1.000 m s.n.m. a valores comprendidos entre 620 y 490 m s.n.m. (Tabla 3.2; Figura 3.3) en el borde SO del macizo; 70 - 200 m por encima del nivel de base marcado por el manantial de La Fájara. El sentido de flujo es hacia el O-SO. El compartimento septentrional es algo más complejo. En su mitad oriental, la cota piezométrica es de 1.000 m s.n.m. en las cercanías de los manantiales, mientras que en el extremo O la descarga principal (Barranco del Alcázar) se produce a 600 - 650 metros de altitud. Ello implica necesariamente la existencia de una



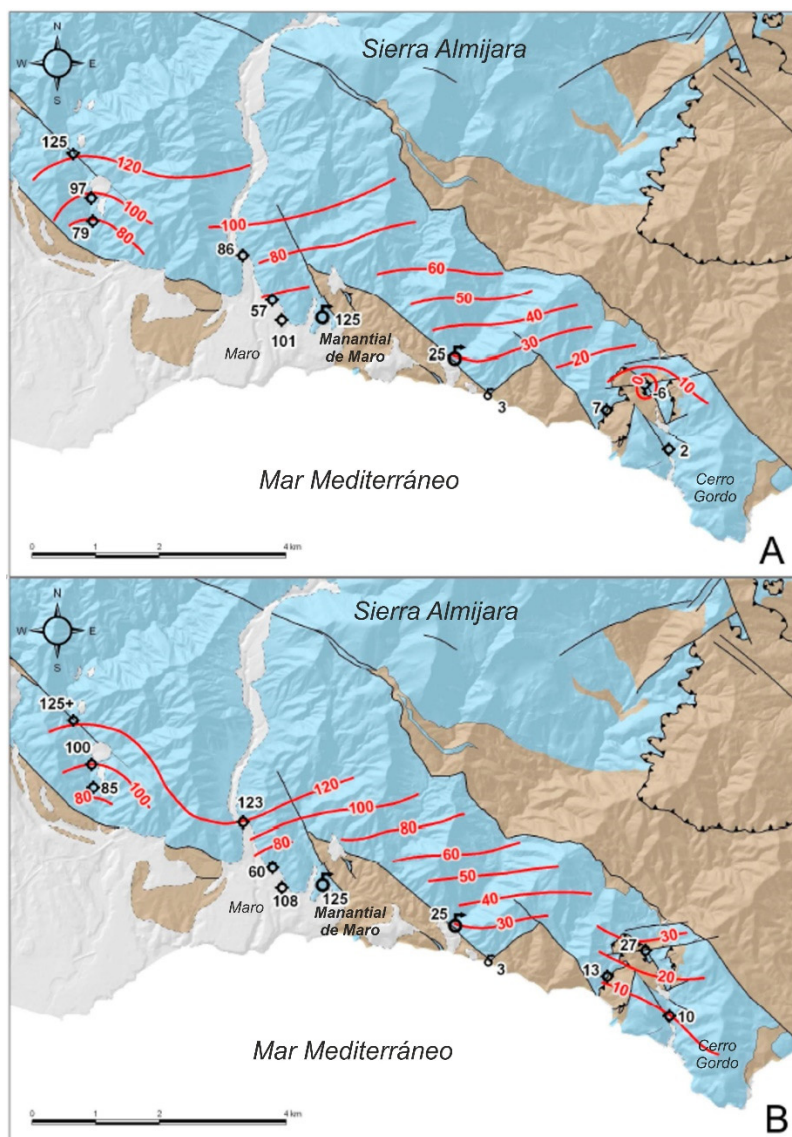
divisoria hidrogeológica entre ambas zonas, con sentidos de flujo dominantes hacia el E y hacia el O. Los sondeos situados al N de Sierra Tejeda parecen mostrar la presencia de dicha divisoria, pues uno de ellos (1843-2-0126) presenta una cota de 1.144 m s.n.m. (Tabla 3.2), mayor que las registradas tanto al E como al O. El gradiente hidráulico en el caso del acuífero septentrional es muy bajo, puesto que la diferencia de cota entre el nivel de los sondeos situados al N del pico Maroma y los manantiales de Játar y Río Alhama es inferior a 150 m, mientras que la distancia horizontal supera los 10 km. El gradiente resultante sería aún menor si se considera el área de Los Rodaderos.

La situación piezométrica en Sierra Almirajara guarda cierto parecido con la anterior, puesto que existen dos ejes antiformes que dividen el macizo en varios acuíferos. La piezometría deducida de los puntos de agua existentes en la vertiente meridional, tanto sondeos como manantiales, indica que el sentido principal de flujo subterráneo es aproximadamente N-S, coherente con la descarga hacia los principales ríos que atraviesan esta vertiente de la sierra: Turvillá, Torrox, Higuerón, Chillar y de la Miel (Figura 3.3). Las cotas máximas (700 - 800 m s.n.m.) se observan en el extremo NO del macizo, en Canillas de Albaida, y descienden progresivamente hasta el nivel del mar en el paraje de Cerro Gordo. El flujo no parece verse afectado especialmente por la falla inversa de dirección NO-SE que en estudios previos se consideró el límite entre las unidades hidrogeológicas (luego masas de agua subterránea, de Almirajara y Alberquillas), ya que no se observan saltos en la piezometría ni surgencias importantes asociadas a dicho contacto. Las metapelitas que dicha falla introduce a través de la serie carbonática deben tener, por tanto, una continuidad limitada.

Un análisis detallado de la piezometría en el sector de Maro-Cerro Gordo (Figura 3.12) para dos situaciones hidrodinámicas diferentes (aguas bajas: noviembre de 2009; aguas altas: mayo de 2010), elaborados con datos del informe de INTECSA-INARSA (2009), permite inferir un flujo regional con orientación preferente NNO-SSE desde el acuífero hacia el mar. En estiaje, la descarga hacia el mar debe reducirse, como se intuye por las cotas piezométricas negativas registradas en el barranco de Cantarriján debido al bombeo que allí tiene lugar para abastecimiento urbano de Almuñécar y para regadío. Sin embargo, en situación de aguas altas, los niveles ascienden y se produce descarga hacia el mar Mediterráneo. Sirvan de ejemplo los ascensos piezométricos que se observan en el sondeo P.06.24.005-B (Figura 3.9). En cualquier caso, el volumen medio anual de descarga submarina no puede ser muy elevado, puesto que los contornos piezométricos y la existencia de pequeñas surgencias en este sector, junto con la estructura geológica en esta zona (particularmente la forma alargada del afloramiento de mármoles limitados por otros de esquistos al N y al S), hacen difícil pensar que haya un flujo subterráneo significativo desde sectores más septentrionales de Sierra Almirajara hacia Cerro Gordo.

El acuífero septentrional de Sierra Almirajara presenta cotas piezométricas en torno a 1.100 m de altitud, que descienden lentamente hacia el N, hasta llegar a 900 - 950 m s.n.m. La descarga del flujo subterráneo se produce hacia los ríos que drenan la vertiente norte del macizo. En las elevaciones cercanas al pico Navachica debe existir una divisoria hidrogeológica entre flujos que se dirigen hacia el NNO (cuenca atlántica) y hacia el ESE, hacia el río Verde. Las cotas piezométricas observadas en este último sector van desde más de 1.100 m s.n.m. hasta 403 m s.n.m. del manantial de Fuente Negra, con un sentido de flujo aproximado hacia el ESE.





**Figura 3.12. Esquemas piezométricos orientativos del sector de Cerro Gordo, correspondientes a situaciones de aguas bajas (noviembre de 2009, mapa A) y aguas altas (mayo de 2010, mapa B). Tomado de INTECSA-INARSA (2009).**

En la sierra de Los Guájares se tiene menos información sobre la piezometría que en otros sectores. En general, se puede deducir un descenso progresivo de los niveles piezométricos en ese sector desde 816 m s.n.m. (al NO de Lentejón) hasta 482 m s.n.m. (en las proximidades de Molvizar). No obstante, el destino final de los flujos subterráneos de este acuífero es el tramo inferior del río de La Toba, a 110 m s.n.m., cerca de su desembocadura (Figura 3.3). Al N de este macizo, coincidente con la prolongación oriental de uno de los anticlinales de Sierra Almijara, debe existir una divisoria hidrogeológica, ya que el sentido del flujo de las aguas subterráneas en esa zona (ONO a ESE) resulta casi opuesto al que se deduce, por ejemplo, en el vecino acuífero de Sierra Almijara septentrional.

Los piezómetros existentes en el centro (P.05.42.001-B) y en el borde oriental de la sierra de Albuñuelas (P.06.24.008-B, P.06.24.009-B) son de gran ayuda en lo relativo al conocimiento de los flujos subterráneos en este acuífero. Según se desprende de los datos de nivel, parece deducirse un gran domo piezométrico, alargado en la dirección NO-SE y con valores máximos próximos a 1.000 m s.n.m., que ocupa el centro-noroeste de la sierra de Albuñuelas. El sentido de flujo es, por

tanto, centrífugo, lo cual lleva a pensar que parte de los recursos de la sierra se transfieren de forma subterránea hacia el N y NO, a los materiales de la depresión de Granada (cotas piezométricas del orden de 800 m s.n.m. en su borde meridional) y, en menor medida, hacia el O, ya que sólo hay manantiales en el borde oriental. En el borde meridional de la sierra, cerca del límite con la de Los Guájares, las aguas subterráneas deben fluir hacia la depresión tectónica del Valle de Lecrín, aunque dadas las escasas salidas visibles, es posible que exista también descarga subterránea hacia las formaciones terciarias que rellenan dicha cuenca. La separación hidrogeológica entre los acuíferos del norte de Sierra Almijara y de la sierra de Albuñuelas no es fácil de definir, e incluso puede no ser tal, debido a la limitación que impone la escasez de datos en esta zona.

El esquema de la figura 3.3 muestra también las isolíneas que permiten inferir la superficie piezométrica del relleno detrítico de la depresión de Padul y zonas adyacentes, para cuya representación se ha consultado la información tomada por el IGME (1977) y ENADIMSA (1980), recogida en IGME-AAA-EGMASA (2009), así como otra más reciente de CMA-GHUMA (2006). Como se puede observar en la figura 3.3, la disposición de las isopiezas indica la existencia de flujos subterráneos procedentes desde los sectores periféricos hacia el centro de la depresión, excepto en el borde SO, que parece ser poco permeable porque los mármoles triásicos de la sierra de Albuñuelas están en contacto con las arcillas y limos del relleno cuaternario de la turbera. Los manantiales de los Molinos de Padul estarían asociados a este contraste de permeabilidad. La profundidad de la zona saturada es mínima en las inmediaciones de la turbera, mientras que aumenta hacia los bordes de la depresión; por ejemplo, el nivel piezométrico se encuentra a más de 20 m de profundidad en los sondeos situados a mayor cota, en la ladera de la sierra de Padul. Los gradientes piezométricos son mayores en las zonas de contacto con los acuíferos carbonáticos de la sierra de Padul y en todo el borde oriental de la turbera, y menores en el extremo noroccidental de la depresión, lo que es indicativo de diferencias en la transmisividad de los materiales.

Por tanto, la relación entre las formaciones detríticas de la depresión y carbonáticas de la sierra de Padul es clara a tenor de la información piezométrica, y no tanto en el caso de la sierra de Albuñuelas, cuya relevancia en el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca sedimentaria quedaría más limitada al extremo NO. En ambos casos, la alimentación procedente de los materiales carbonáticos se ve afectada por un cambio de permeabilidades, al encontrar los limos y arcillas del relleno de la depresión, lo que da lugar a la aparición de numerosos manantiales y a salidas difusas, alineadas a lo largo de los bordes septentrional y meridional de la depresión. Parte de la alimentación recibida continúa su camino subterráneo, a través de los niveles y lentejones de arenas y/o gravas, que se intercalan en el relleno de la depresión. Este aporte es el responsable de buena parte del agua que discurre por los canales de drenaje y de la que se almacena en las lagunas que allí se hallan CMA-GHUMA (2006), así como de la que brota de manera difusa en el lecho del río Dúrcal (Castillo et al., 1984; ITGE, 1998).

Finalmente, la escasez de información no permite inferir la forma de la superficie piezométrica de la sierra de Padul y, lo que es más relevante, la situación de la divisoria hidrogeológica que debe existir entre los dominios administrativos de las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir y de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Con los datos disponibles de los puntos P.05.65.002-B (cuya cota piezométrica es 812 m s.n.m.) y P.06.17.001-B (779 m s.n.m.), así como de otros sondeos situados en el extremo NO de la sierra con cotas comprendidas entre 800 y 769 m s.n.m. no es posible definir la divisoria.

### 3.8. Parámetros hidráulicos e hidrogeológicos

Los acuíferos asociados a las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul presentan cierta homogeneidad en los valores de sus parámetros hidráulicos característicos, según

se desprende de estudios precedentes. Se observan diferencias en los valores de transmisividad, que varían entre 10 y 800 m<sup>2</sup>/día (SGOP, 1991), con 120 - 170 m<sup>2</sup>/día de valor promedio para la mayoría de los macizos. Según este estudio, uno de los sectores más transmisivos sería Cerro Gordo (860 m<sup>2</sup>/día), aunque otros ensayos hidráulicos efectuados en esa zona arrojaron valores inferiores (10 y 60 m<sup>2</sup>/día), lo que indica cierta heterogeneidad a escala local. Por su parte, los caudales específicos medidos en los sondeos fueron 0,1 l/s·m en un punto situado en la cabecera del río Seco de Almuñécar, 0,5 l/s·m en el punto 1844-4-0100, situado en la ladera meridional de Sierra Almijara (Tabla 3.2), 2 l/s·m en un pozo ubicado en el río de la Miel, y entre 5 y 10 l/s·m en el borde norte del acuífero septentrional de Sierra Tejeda. El coeficiente de almacenamiento medio deducido fue del 0,1 - 0,2 %. Otras pruebas de bombeo ejecutadas en el marco del estudio GHUMA (1997) arrojaron valores de caudales específicos comprendidos entre  $\leq 0,01$  y 3 l/s·m para el borde meridional de Sierra Almijara.

En la sierra de Albuñuelas se han calculado transmisividades medias de 130, 15 y 241 m<sup>2</sup>/día en varios ensayos efectuados en sondeos situados en el borde norte de dicho macizo (SGOP, 1992). En un ensayo de bombeo realizado por el ITGE en el sondeo de abastecimiento a Agrón (1942-5-0041) se obtuvo un valor de conductividad hidráulica de  $3,47 \times 10^{-6}$  m/s (CHG-IGME, 2001a).

En el entorno de la depresión de Padul, los materiales carbonáticos triásicos presentan una transmisividad media de 105 m<sup>2</sup>/día y un coeficiente de almacenamiento de entre 1 - 2 %, según información recogida en IGME-AAA-EGMASA (2009). Otro ensayo efectuado en la vertiente atlántica de la sierra de Padul reveló una transmisividad de 600 m<sup>2</sup>/día (ITGE, 1998). Por su parte, en los conglomerados de base y los depósitos que constituyen los abanicos de los bordes se han obtenido valores de transmisividad de 102 y 103 m<sup>2</sup>/día. Finalmente, los materiales pliocuaternarios del relleno de la depresión de Padul, junto con las capas de turba, presentan globalmente una permeabilidad muy baja debido a su carácter arcilloso y, aunque existen intercalaciones de arenas y gravas de cierta permeabilidad, su poca potencia no altera el carácter global antes mencionado, con unos valores medios de conductividad hidráulica de  $2,75 \times 10^{-6}$  m/s en dirección horizontal y de  $7,3 \times 10^{-7}$  m/s en dirección vertical (IGME-AAA-EGMASA, 2009).

No existe información respecto a valores de velocidad real de flujo, puesto que no se tiene constancia de que se hayan realizado ensayos con trazadores artificiales en la región.

En lo que respecta a los parámetros hidrodinámicos de los manantiales, los coeficientes de agotamiento calculados en los manantiales de La Fájara y Linarejos, ambos situados en extremos opuestos de Sierra Tejeda y en régimen no influenciado, corresponden con el drenaje de un sistema típicamente kárstico ( $1,5 \times 10^{-2}$  días<sup>-1</sup>). El tiempo de respuesta medio al impulso pluviométrico es de unos 2 días. En el resto de las surgencias de Sierra Tejeda (Río Alhama, Játar, Barranco del Alcázar), los coeficientes de recesión están comprendidos entre 2,7 y  $5,1 \times 10^{-3}$  día<sup>-1</sup> (CEHIUMA-IGME, 2017). Estos datos indican un bajo desarrollo de la karstificación funcional en los sectores de acuífero drenados por esas surgencias, por lo que presentaría cierta capacidad de regulación natural. Los valores de los coeficientes de agotamiento calculados en el resto de los manantiales del ámbito de estudio indicarían incluso un menor grado de karstificación (Maro:  $2,5 \times 10^{-3}$  día<sup>-1</sup>, Vegueta Grama:  $2,1 \times 10^{-3}$  día<sup>-1</sup>).

### 3.9. Infraestructuras hidráulicas

Buena parte de los recursos hídricos procedentes de las masas de agua subterránea implicadas en este estudio son regulados, junto con la correspondiente escorrentía superficial, por los embalses de Los Bermejales, Béznar, y La Viñuela (Figura 3.3), situados respectivamente al N, E y O del ámbito de estudio. El primero se ubica en la cabecera del río Cacán, tributario por la margen

izquierda del río Genil, en un punto donde convergen los ríos Játar, Añales, Cacín Cebollón, Grande de Jayena, todos ellos procedentes de la ladera septentrional de Sierra Almijara, y el río Granada y otros arroyos secundarios que discurren por la vertiente occidental de la sierra de Albuñuelas. Además, recibe parte de los recursos que fluyen por el río Alhama y que son retenidos en la “Pantaneta del río Alhama”, localizada aguas arriba de la localidad de Alhama de Granada. El canal asociado a la “Pantaneta” y que permite la transferencia de recursos hacia el embalse de Los Bermejales tiene una longitud de 9,5 km, repartidos en diferentes tramos de túneles y canal a cielo abierto. Por lo tanto, este embalse, junto con las infraestructuras hidráulicas asociadas, regula las descargas subterráneas naturales de los acuíferos Sierra Tejeda septentrional y Sierra Almijara septentrional.

El embalse de Béznar, con una capacidad de 56 hm<sup>3</sup>, permite regular el drenaje subterráneo hacia el Valle de Lecrín de algunos acuíferos del ámbito de estudio. En concreto, las descargas de la sierra de Albuñuelas, de la sierra de Padul y de los sedimentos detríticos neógenos periféricos. Por su ubicación, este embalse almacena también agua de escorrentía y de fusión de nieve proveniente de la ladera NO de Sierra Nevada, a través de los cursos fluviales Dúrcal y Torrente. Aproximadamente 5 km aguas abajo de la presa de Béznar, el agua del río Ízbor es retenida por la presa de Rules, junto con el resto de la descarga del acuífero de la sierra de Albuñuelas que se produce por el manantial de La Zaza.

El sistema del embalse de La Viñuela está constituido por la presa de La Viñuela (173 hm<sup>3</sup> de capacidad) y ocho presas de derivación para trasvasar caudales excedentarios de los principales ríos de la cuenca del río Vélez hacia dicho embalse. Cuatro de estas presas de regulación (y sus respectivos canales de derivación) involucran en distinto grado a los recursos subterráneos de las vertientes occidental y meridional de Sierra Tejeda. Se trata de las infraestructuras construidas a mediados de la década de los 90 del pasado siglo en los ríos Alcaucín, Bermuza, Almachares y Rubite. La primera infraestructura laminaría el agua subterránea drenada por el barranco del Alcázar, la segunda deriva parte del flujo subterráneo aportado por el manantial de La Fájara al río Bermuza en condiciones de aguas altas, y finalmente las presas en los ríos Almachares y Rubite jugarían un papel secundario en lo que a la laminación de la aportación subterránea se refiere porque la descarga de este tipo es escasa hacia dichos cauces.

En el ámbito de estudio existen, además, otras presas más pequeñas construidas para diversos fines entre los que cabe mencionar la retención de sedimentos. De entre estas infraestructuras destaca la “Pantaneta del Barranco de la Cueva de Funes, situada en el término municipal de Otívar, en la cabecera del río Verde, que se utiliza como punto de agua en el plan INFOCA.

En lo referente a infraestructuras de menor entidad, cabe destacar cuatro azudes de derivación y sus respectivos canales asociados a las centrales hidroeléctricas de los ríos Chíllar, Verde (Cázulas), Dúrcal y Torrente. La toma de la primera central se sitúa en el tramo medio del río Chíllar, a 425 m s.n.m. y el canal, con una longitud aproximada de 6 km, discurre siguiendo un trazado sinuoso por la ladera izquierda del mencionado cauce hasta la central, a cota 135 m s.n.m. Por su parte, la central de Cázulas se encuentra en el mismo lugar donde se haya la estación de aforos del río Verde (a 170 m s.n.m.; Figura 3.3) y funciona con el agua transportada por un canal de 7,5 km de longitud y trazado sinuoso, cuyo inicio se localiza a 500 m s.n.m., entre los manantiales de Socavón y Fuente Santa. En las inmediaciones del municipio de Nigüelas se encuentra otra central hidroeléctrica, que se abastece con agua del río Torrente. Por último, la diferencia de cota en el valle del río Dúrcal es aprovechada para generar energía eléctrica con el agua que fluye por un canal de 7 km de longitud por la margen izquierda de dicho río. En todos los casos mencionados,

el agua derivada para la producción de energía eléctrica es devuelta a los cauces de donde fue tomada.

Otra infraestructura hidráulica del ámbito de estudio, al margen de las captaciones de agua subterránea descritas en apartados anteriores y de las conducciones asociadas, es el túnel para trasvasar agua desde la cuenca endorreica de Zafarraya hacia la cuenca del río Vélez. Aunque queda fuera del ámbito geográfico del presente trabajo, esta construcción tiene capacidad para transferir hacia la cabecera del río de Alcaucín recursos hídricos procedentes del drenaje subterráneo de la MASb “Sierra Tejeda” (ES060MSBT060-064) que circulan, al menos en situaciones de aguas altas, por el arroyo de la Madre.

### 3.10. Usos del agua

Uno de los usos consuntivos preferentes que se hace de los recursos hídricos de los acuíferos es el destinado a regadío de las parcelas agrícolas limítrofes con las sierras objeto de este informe o las situadas en los valles de los principales ríos. Por su extensión y geografía, los terrenos que rodean las sierras de Tejeda, Almijara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul muestran características climáticas variadas, las cuales condicionan, junto con la pendiente y el sustrato geológico, los tipos de vegetación y los usos preferentes del suelo en cada lugar. La agricultura no es ajena a estas circunstancias, de tal manera que se pueden reconocer diversos tipos de cultivos dependiendo del sector que se considere, desde frutales subtropicales y cultivos hortofrutícolas en la comarca de La Axarquía, en el litoral granadino y en el valle del río Verde, hasta terrenos dedicados casi en exclusiva al almendro y olivar en las laderas de las sierras de Albuñuelas, Padul y borde norte de Almijara.

Buena parte de los recursos hídricos usados para riego en todo el límite septentrional del ámbito de estudio procede del agua subterránea drenada por los manantiales o que descarga hacia los ríos de la zona y, sobre todo, de las extracciones mediante bombeos que se concentran en algunos sectores como en el borde septentrional de Sierra Tejeda y de la sierra de Albuñuelas. En el Valle de Lecrín, en cambio, el agua para estos fines se capta o se deriva directamente de los cauces que bajan de Sierra Nevada. El mismo procedimiento se sigue en los valles de los ríos Albuñuelas, de La Toba y Verde. Mas al O, destacan las derivaciones mediante acequias desde los cauces que bajan por la vertiente meridional de Sierra Almijara, las cuales han sustentado el riego tradicional de esta zona de la Axarquía. Esto cambió con la entrada en funcionamiento del embalse de La Viñuela, en 1989, y la ampliación de la superficie regable a los terrenos situados por debajo de la cota 140 m s.n.m.

Otro de los usos preferentes del agua subterránea en la región es el destinado a satisfacer la demanda urbana de los municipios situados dentro o en la periferia de los macizos que componen el ámbito de estudio. De sus aguas subterráneas se abastecen total o parcialmente localidades pertenecientes a las provincias de Málaga (desde Alcaucín hasta Nerja) y Granada (comarcas de la Costa Tropical, Valle de Lecrín, Alhama y Vega de Granada). El abastecimiento se realiza principalmente mediante sondeos (Padul, Dúrcal, Almuñécar, Cúmpeta, Frigiliana, Nerja, etc.) y en menor medida por captación directa del agua en manantiales (Alhama de Granada y Játar). Con respecto a la actividad industrial, cabe mencionar la existencia en Sierra Tejeda y en la sierra de Padul de varias canteras de extracción de áridos, cuyas necesidades hídricas son cubiertas por sondeos.

Se puede considerar como uso no consuntivo el agua de los ríos Chillar, Verde, Padul y Torrente utilizada para la generación de energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas mencionadas en el apartado anterior. Además, cabe añadir el valor ambiental de las masas de agua subterránea, dado

que los recursos drenados de manera natural por los manantiales y los aportados a los cauces ganadores constituyen caudales significativos que sustentan la biodiversidad del Parque Natural de las Sierra Tejeda – Almajara y Alhama, así como de los terrenos circundantes.

De forma indirecta, los caudales que descargan los acuíferos hacia los ríos Cacán, Alcaucín, Bermuza e Ízbor son regulados por los embalses mencionados en el apartado anterior, y utilizados para abastecimiento urbano (entre otros a municipios de la Costa del Sol Oriental malagueña y la Costa Tropical granadina), agrícola, industrial y generación de energía hidroeléctrica. Son, por tanto, unas reservas estratégicas de agua subterránea por el número de municipios y actividades económicas que dependen de estos acuíferos.

### 3.11. Funcionamiento hidrodinámico

Los acuíferos de las Sierras de Tejeda, Almajara, Los Guájares, Albuñuelas y Padul son de naturaleza libre, formados principalmente por mármoles calizos y dolomíticos de edad Triásico, con 668,5 km<sup>2</sup> de extensión (Figuras 3.3 y 3.13). Estas rocas son permeables debido a los procesos de fracturación y karstificación que han experimentado. La recarga se produce principalmente por infiltración de agua de lluvia y de fusión nival (en las zonas más elevadas), a través de las numerosas fracturas que afectan a los mármoles y, en menor medida, por las formas exokársticas. La descarga natural ocurre de manera puntual por manantiales permanentes ubicados a lo largo de los bordes de los diferentes acuíferos y por los numerosos cauces que intersectan las rocas permeables y que actúan como ejes preferenciales de drenaje. Al N y al NE, los materiales alpujarrides se encuentran cubiertos por diversas formaciones detríticas neógenas, con distinto grado de permeabilidad, que cubren un total de 102,5 km<sup>2</sup>. La conexión hidráulica entre estos depósitos y los carbonatos triásicos de los bordes (y sustrato) está fuera de toda duda, puesto que los primeros constituyen zonas de descarga preferentes de los segundos. Existen extracciones mediante sondeos y pozos localizados en los bordes de los afloramientos permeables, en zonas llanas del interior de los macizos, o cerca de núcleos de población. Las salidas se completan con las descargas submarinas que se puedan producir en el paraje de Cerro Gordo.

La complejidad geológica de la zona de estudio, en especial la existencia de una sucesión de pliegues anticlinales que recorre la línea de cumbres de las sierras Tejeda, Almajara y Los Guájares, prácticamente O a E, condiciona la geometría y, por tanto, el funcionamiento hidrogeológico de estos relieves, pues provoca que la cota del sustrato impermeable, formado por metapelitas del Paleozoico, quede por encima del nivel piezométrico. Ello ocasiona la compartimentación del flujo subterráneo y la división del ámbito de estudio en hasta ocho acuíferos.

Sierra Tejeda está constituida por mármoles triásicos con elevado grado de fracturación, y desigual desarrollo kárstico. Las metapelitas del núcleo anticlinal E-O que domina la estructura geológica de la sierra forman una divisoria hidrogeológica que separa los flujos subterráneos que se dirigen al S (acuífero de Sierra Tejeda meridional) de los que van hacia el N y NE (Sierra Tejeda septentrional). La descarga del acuífero septentrional (80 km<sup>2</sup> de superficie permeable) tiene lugar por manantiales situados en los bordes del macizo y por algunos sondeos. Adicionalmente, debe existir un flujo subterráneo dirigido hacia el N, hacia el área conocida como Los Rodaderos, e incluso más allá, hasta las surgencias termominerales de los Baños de Alhama. En esta zona más septentrional, el acuífero se encontraría parcialmente confinado bajo las formaciones metapelíticas poco permeables y, en su caso, bajo el relleno sedimentario de la depresión de Granada. Los puntos de descarga presentan en su mayoría aumentos y descensos de caudal amortiguados como respuesta ante los diferentes eventos de precipitación. Ello indica un funcionamiento hidrogeológico propio de medios fisurados o de flujo difuso. No obstante, el manantial de Los Linarejos, situado en el extremo nororiental de Sierra Tejeda, muestra un comportamiento típico de sistemas kársticos. El

funcionamiento del manantial de La Fájara también presenta respuestas naturales rápidas ante eventos de precipitación. Esta surgencia es el principal punto de drenaje de los 18,2 km<sup>2</sup> de superficie de recarga del acuífero de Sierra Tejeda meridional.

Las características estructurales de Sierra Almirajara son similares a las observadas en Sierra Tejeda de tal manera que se puede identificar una divisoria hidrogeológica principal constituida por las metapelitas del núcleo del anticlinal ESE-ONO, cuya traza coincide aproximadamente con la línea de cumbres del macizo (Figuras 3.3 y 3.13). La terminación del pliegue hacia el extremo oriental del macizo da lugar a 3 acuíferos principales: dos al N (Sierra Almirajara septentrional y río Verde) y uno al sur (Sierra Almirajara meridional, que incluye la MASb Las Alberquillas). Todos ellos están constituidos por mármoles triásicos con elevado grado de fracturación y escaso desarrollo de karstificación, en los que el flujo subterráneo ocurre de forma difusa a través de las numerosas fisuras y fracturas. El funcionamiento hidrogeológico es similar tanto en el acuífero meridional (150,4 km<sup>2</sup> de superficie permeable) como en el septentrional (87,1 km<sup>2</sup>), ya que sus recursos son drenados de forma difusa hacia los cauces de los principales ríos que fluyen de N a S y de S a N, respectivamente. Además, parte de los recursos del acuífero de Sierra Almirajara meridional se descargan a través de manantiales puntuales que, salvo en el caso de Maro, son de escaso caudal.

Por último, existen bombeos en los diferentes sondeos que se concentran cerca de los núcleos de población, además de descarga submarina en el paraje de Cerro Gordo. El funcionamiento hidrogeológico de los dos principales acuíferos de Sierra Almirajara es propio de acuíferos fisurados o de flujo difuso y, por tanto, presentan gran capacidad de regulación natural de los recursos hídricos. No obstante, las respuestas naturales rápidas registradas en el manantial de Maro ante eventos de precipitación sugieren que el sector drenado por dicha surgencia presenta un funcionamiento hidrogeológico más propio de acuíferos kársticos o de flujo por conductos.

El acuífero del río Verde se encuentra delimitado al S por el anticlinal que constituye la divisoria hidrogeológica entre los dos acuíferos previos y al N por un anticlinal prácticamente paralelo dirección E-O que se prolonga hacia el E en la vecina sierra de Los Guájares. El área de recarga de este acuífero (40,8 km<sup>2</sup>) coincide aproximadamente con la superficie de afloramientos permeables vertientes a la cuenca del río Verde (Figuras 3.3). La mayoría de los recursos hídricos son drenados de forma difusa hacia dicho cauce; en consecuencia, los flujos subterráneos convergen según la traza marcada por el río, con sentido general hacia el E. Las respuestas hidrodinámicas de las surgencias ante los eventos de precipitación son amortiguadas, lo que pone de manifiesto que el funcionamiento es inercial, ya que el flujo subterráneo ocurre de forma difusa a través de fisuras y fracturas que afectan a las formaciones carbonáticas.

El acuífero de la sierra de Los Guájares presenta un funcionamiento hidrogeológico similar al definido en el caso anterior y en Sierra Almirajara, pues un único cauce superficial (el río de La Toba) actúa como eje de drenaje principal, con sentido SE, al recibir a lo largo de su recorrido las aportaciones subterráneas de 73,1 km<sup>2</sup> de superficie permeable. Los manantiales que vierten sus aguas al río de La Toba, como Fuente Santa, presentan un comportamiento hidrodinámico muy inercial en respuesta a los eventos de precipitación más significativos. Adicionalmente, parte de los recursos del acuífero son transferidos de manera subterránea hacia los depósitos detrítico-aluviales que recubren su lecho antes de la confluencia con el río Guadalfeo, en el extremo suroccidental de la sierra de Los Guájares (Benavente, 1982). Todo ello evidencia un escaso desarrollo de la karstificación en el acuífero, con flujos subterráneos de tipo difuso o ligado a fracturas.

El acuífero de la sierra de Albuñuelas ocupa una superficie de 234,1 km<sup>2</sup> y está formado por dolomías de edad triásica (190,6 km<sup>2</sup>), con elevado grado de fracturación y escaso desarrollo de karstificación, y formaciones detríticas neógenas con diverso grado de permeabilidad (42,8 km<sup>2</sup>). El

flujo subterráneo se produce principalmente de forma difusa a través de fisuras y fracturas que afectan a las formaciones carbonáticas. Buena parte de sus recursos son drenados de forma natural por los manantiales situados en el borde oriental del acuífero y por transferencias laterales a los depósitos detríticos contiguos. También deben existir descargas difusas hacia el río Dúrcal, a su paso por el cañón excavado en los mármoles a la altura de Cónchar. El sentido del flujo principal es, por tanto, hacia el E, donde se ubican las principales surgencias. No obstante, la distribución espacial de las isopiezas indica que el flujo subterráneo puede aproximarse a centrífugo y, en consecuencia, existen transferencias laterales de recursos hacia el N y O, hacia otras masas de agua subterráneas situadas en la depresión de Granada. Las respuestas hidrodinámicas de las surgencias ante los eventos de precipitación son amortiguadas, lo que pone de manifiesto que el flujo es más bien de tipo difuso.

Por último, parte de los materiales carbonáticos triásicos de la sierra de Padul y el relleno detrítico de la depresión de igual nombre presentan continuidad hidrogeológica (Figuras 3.3), puesto que la recarga que tiene lugar en los 44,5 km<sup>2</sup> de la ladera meridional de la primera se dirige al segundo (42,8 km<sup>2</sup>), donde aflora a modo de pequeñas surgencias o en los cauces que intersectan la secuencia de materiales. La existencia de una superficie potencial continua entre ambos sectores podría justificar la definición de un único acuífero (sierra-depresión de Padul), de carácter libre en la sierra y de tipo multicapa en la zona deprimida. Los depósitos neógenos y cuaternarios confinan parcialmente las dolomías triásicas del basamento de la depresión, las cuales deben de permitir la continuidad hidrogeológica entre las sierras de Padul y la de Abuñuelas. El destino final de los flujos subterráneos es el río Dúrcal, a su paso por el cañón excavado en los mármoles a la altura de Cónchar. De confirmarse este hecho, se pondría de manifiesto la relevancia hidrogeológica de este cauce como el eje de drenaje principal del cuadrante nororiental del ámbito de estudio. El conjunto acuífero de la sierra-depresión de Padul cuenta con una gran capacidad de regulación natural debido a las características hidrogeológicas mencionadas y al elevado grado de fracturación y arenización (kakiritación) que presentan las dolomías que lo forman.



### 3.12. Identificación de masas de agua subterránea compartidas o con continuidad hidrogeológica (MASCH) entre diferentes ámbitos de planificación

La Encomienda de Gestión, encargada por la DGA al actualmente denominado CN IGME-CSIC para desarrollar diversos trabajos relacionados con el inventario de recursos hídricos subterráneos y con la caracterización de acuíferos compartidos entre demarcaciones hidrográficas, contempla, en el área geográfica de las sierras de: Tejeda, Almiar, Las Guájaras, Albuñuelas y Padul, tres potenciales masas de agua subterránea compartidas o con continuidad hidrogeológica (MASCH), que se han designado, bien en el PHN o en los respectivos planes de cuenca del Guadalquivir y Cuencas Mediterráneas Andaluzas, con los nombres de “Tejeda-Almijara-Las Guájaras-Sierra de Albuñuelas”, “Tejeda-Almijara-Las Guájaras-Sierra de Padul Sur” “Tejeda-Almijara-Las Guájaras-Sierra de Tejera, Sierra de Almijara y Sierra de las Guájaras”.

En las tres MASCH anteriormente referenciadas acontece que la MASb “Tejeda-Almijara-Las Guájaras”, adscrita a la DHG, constituye un elemento común, por lo que inicialmente se pensó que el conjunto de las MASb implicadas podían constituir una única MASCH. Al objeto de confirmar dicho supuesto se planteó una caracterización geológica e hidrogeológica común a todas las MASb que se recogen en los anteriores epígrafes del presente apartado 3. Los resultados obtenidos han dado lugar a las conclusiones que se sintetizan a continuación:

- En la MASb ES060MSBT060-064 “Sierra de Tejeda” se identifican dos acuíferos totalmente individualizados entre sí, que se han denominado Tejeda Meridional y Tejeda Septentrional (Figura 3.3). El primero de ellos se localiza en la DHCMA, por lo que cabría definirlo como una MASb perteneciente exclusivamente a dicha cuenca, mientras que el segundo - localizado también en la DHCMA- presenta continuidad hidrogeológica con la MASb ES050MSBT000054200 Tejeda - Almiar - Las Guajaras que se encuentra adscrita a la DHG. En esta última MASb (Figura 3.3), los afloramientos permeables correspondientes a la sierra de Tejeda presentan continuidad hidrogeológica con el acuífero de Tejeda Septentrional adscrito a la DHCMA, por lo que ambos acuíferos constituyen una única masa de agua subterránea compartida o con continuidad hidrogeológica (MASCH) entre los ámbitos de planificación de la DHG y la DHCMA. A esta MASCH, para evitar confusionismos, se la ha designado como Sierra de Tejeda septentrional, mientras que a la MASb adscrita exclusivamente a la DHCMA se la ha denominado Sierra de Tejeda Meridional.
- La MASb ES060MSBT060-027 Sierra de Almiar, dado que constituye un acuífero individualizado, no presentan continuidad hidrogeológica con la MASb ES050MSBT000054200 Tejeda - Almiar - Las Guajaras, por lo que constituye una única MASb pertenecientes exclusivamente a la DHCMA, que se ha denominado, para evitar confusionismos, como Sierra de Almiar Meridional.
- En la MASb ES060MSBT060-062 Sierra de las Guájaras, adscrita a la DHCMA, se identifican dos acuíferos individualizados, por lo que no presentan continuidad hidrogeológica con la MASb ES050MSBT000054200 Tejeda - Almiar - Las Guajaras perteneciente a la DHG. Dichos acuíferos se han designado con los nombres de Sierra de los Guájaras-Río de la Toba y acuífero carbonático de la cabecera del río Verde. Ambos acuíferos dar lugar a dos MASb independientes entre sí y localizadas en la DHCMA.
- Las MASb ES060MSBT060-017 Sierra del Padul Sur y ES060MSBT060-023 Depresión de Padul presenta continuidad hidrogeológica entre sí y también con la MASb ES060MSBT060-

061 Sierra de Albuñuelas. Las tres MASb se localizan en la DHCMA y, junto al acuífero Almiar Septentrional, dan lugar a una MASCH entre los ámbitos de planificación de la DHG y DHCMA. A dicha MASCH se la ha denominado Almiar septentrional-Padul-Albuñuelas.

Como resumen de las puntualizaciones expuestas, hay que indicar que el importante conjunto de acuíferos identificados y descritos en el apartado 3.11, dan lugar a dos masas de agua subterránea compartidas o con continuidad hidrogeológica (MASCH), que se han denominado Sierra de Tejeda septentrional y Almiar septentrional-Padul-Albuñuelas, como se puede observar en los cortes geológicos de la figura 3.2 y en la figura 3.3.

## 4. CLIMATOLOGÍA

El área objeto de este informe se caracteriza por presentar un clima mediterráneo suave en la vertiente meridional y con matices continentales en la septentrional, donde los inviernos son relativamente fríos y los veranos secos y prolongados. La distribución de las precipitaciones está marcada por una notable estacionalidad; los valores más elevados se registran durante las estaciones de otoño, invierno y primavera, y son casi inexistentes durante los meses de verano. La orografía constituye un factor fundamental en la distribución de las precipitaciones y las temperaturas. En las zonas elevadas, el régimen pluviométrico es más elevado y las temperaturas considerablemente más bajas (con nevadas frecuentes durante el invierno) que en las zonas topográficamente deprimidas y, sobre todo, en la costa.

### 4.1. Información meteorológica

El estudio pluviométrico llevado a cabo se ha desarrollado partiendo de la información de 34 estaciones meteorológicas, cuyas principales características se recogen en la tabla 4.1 y se muestran en la figura 3.13. Esta relación de estaciones cubre un rango de altitudes comprendido entre 129 (Torrox) y 1.640 m s.n.m. (Arquilla) y pertenecen a la red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), salvo la estación Zafarraya, que forma parte de la red de Estaciones Agroclimáticas de la Junta de Andalucía. Todas las estaciones cuentan con una frecuencia de registro diaria. El periodo de referencia elegido para el estudio corresponde a 30 años hidrológicos, entre 1985/86 - 2014/15, que se ha tomado como referencia en el marco del proyecto. De las 34 estaciones, 9 disponen de registro de temperatura.

**Tabla 4.1. Estaciones climáticas utilizadas con sus principales características (Datum ETRS89).**

Estación	Código	Coordenadas UTM		Altitud (m s.n.m.)	Parámetro de medida	E. termo. asignada	P. media (mm)	T. media (°C)
		X	Y					
Torrox	6207	414928	4068347	129	P,T	---	457	18.1
Vélez de Benaudalla	6264	454156	4077600	134	P	6258	482	---
Viñuela	6183	398685	4078849	154	P	AGRO	533	---
Lanjarón	6258	456428	4085908	655	P,T	---	486	15.3
Posturas	6257O	455521	4087577	1060	P,T	---	478	14.3
Alhama (Alcaicería)	6378	412893	4087629	1030	P	5572	681	---
Arquilla	6257I	457112	4089078	1640	P,T	---	541	11.4
Dúrcal (Presa)	6251	457607	4099153	1630	P	6257I	553	---
Dílar (C. eléctrica)	5517	451080	4102578	1060	P	6249	451	---
Ventas de Huelma	5559	426877	4102599	864	P	5572	299	---
Alhendín	5520	442467	4107101	728	P	6249	365	---
Zafarraya	AGRO	397313	4094344	889	P,T	---	977	12.8
Santa Cruz del Comercio	5577	413465	4101736	769	P	5572	339	---
Ventas de Zafarraya	6377	400064	4090477	905	P	AGRO	784	---
Periana	6180	393814	4087591	555	P	AGRO	591	---
Alcaucín	6182	400984	4084946	580	P	AGRO	685	---
Canillas de Albaída	6202	412006	4078507	562	P	6207	643	---
Alhama de Granada	5576	412285	4095948	839	P	5572	468	---
Bermejales	5572	420481	4094850	802	P,T	---	422	15.3
Cómpeta	6203	413500	4076889	689	P	6207	683	---
Jayena	5568U	428924	4090553	968	P,T	---	447	13.8
Cacín	5573	418347	4101682	695	P	5572	350	---
Frigiliana	6210E	419924	4072450	390	P	6207	541	---
Nerja	6213	424557	4068890	168	P	6207	491	---
Almuñécar (El Zahorí)	6222I	440845	4069105	270	P,T	---	466	18.6
Cazulas	6220	437287	4074246	331	P	6222I	669	---
Lentegí	6221	439784	4076848	619	P	6222I	724	---
Ótivar	6221E	438925	4074604	176	P	6222I	637	---
Ítrabo	6266	442977	4072820	383	P	6222I	600	---
Guájtar Fondón	6262	448205	4076638	306	P	6222I	527	---
Albujuelas	5569E	435225	4083322	1300	P	5568U	724	---
Nigüelas	6253	452113	4093225	996	P	6257I	461	---
Padul (Aguadero)	6250	446699	4097264	776	P	6249	400	---
Padul	6249	444232	4097896	776	P,T	---	382	16.3

La corrección de las series pluviométricas y termométricas se ha desarrollado en varias fases, atendiendo a la continuidad del registro de cada estación. El primer paso ha consistido en identificar los vacíos de datos en el registro original y proceder al completado de series por correlación lineal, entre los pares de estaciones con el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) más elevado. A las series pluviométricas se les ha realizado el análisis para identificar errores sistemáticos o puntuales, mediante el método de dobles masas. En las estaciones seleccionadas no se han detectado errores.

## 4.2. Análisis espacio-temporal

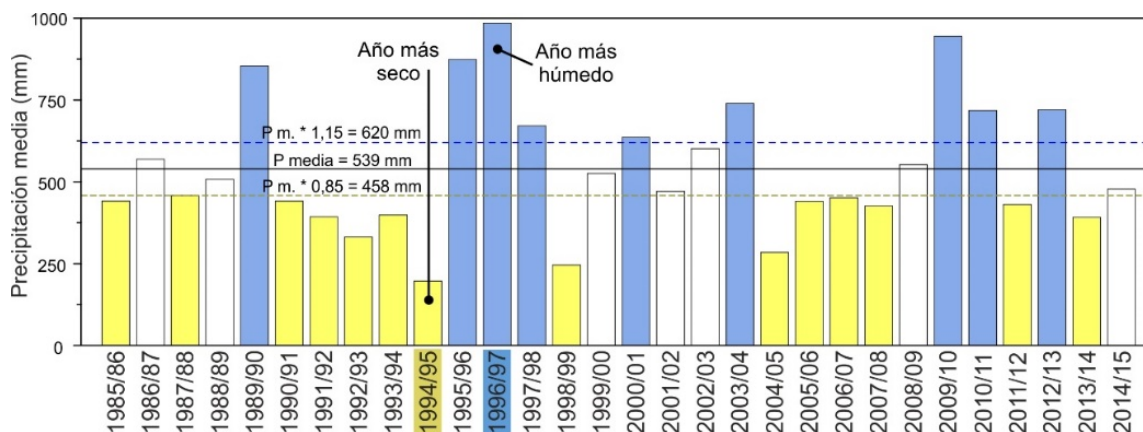
### Análisis temporal

El cálculo de la precipitación media anual (aritmética) se ha realizado considerando las estaciones seleccionadas (longitud de la serie, continuidad de esta y distribución espacial) para el periodo 1985/86 - 2014/15 (Tabla 4.1). La precipitación media anual en el ámbito de estudio se ha cifrado en 539 mm. Este valor se ha tenido en cuenta para la caracterización de los años tipo, pero no para la evaluación de la recarga por los métodos APLIS y balance de agua en el suelo, que se ha estimado a partir de la distribución espacial de las precipitaciones (isoyetas) o de la lluvia útil en su caso. No existen estudios previos para la misma área de estudio que supongan una referencia a la hora de comparar los resultados aquí alcanzados, con otros periodos temporales. Sí existen, en cambio, análisis de la precipitación y de la temperatura para ámbitos geográficos más extensos (IGME, 1983) o para algunos sectores concretos del área de estudio y diferentes periodos de registro (Benavente, 1982; SGOP, 1991; ITGE, 1998; Andreo et al., 2018).

La caracterización de periodos húmedos, medios o secos se realiza mediante de la definición de los años tipo, para lo cual se utilizan un porcentaje umbral respecto a la media histórica, normalmente el 15 %. Es decir, los años hidrológicos cuya cantidad de precipitación total es un 15 % menor de la media, se consideran secos, mientras que si superan la media en un 15 % encima, son húmedos. En el periodo 1985/86 - 2014/15 se han identificado 9 años de tipo húmedo, 14 de tipo seco y 7 de características medias. El año más húmedo del registro fue el 1996/97 con una precipitación media de 985 mm, mientras que el más seco de la serie, con 197 mm de media, fue el año 1994/95 (Tabla 4.2, Figura 4.1). En los 30 años hidrológicos de registro se puede observar una cierta alternancia entre periodos plurianuales con precipitación superior a la media (1995/96 - 1997/98, 2008/09-2010/11) y otros en los que se registró un valor inferior (1990/91 - 1994/95, 2004/05 - 2007/08). También se puede observar que los periodos secos constan de más años consecutivos que los húmedos (Tabla 4.2, Figura 4.1).

### Análisis espacial

Las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran la distribución espacial de las precipitaciones en el ámbito de estudio, mediante los mapas de isoyetas característicos de las condiciones hidroclimáticas húmedas, medias y secas, respectivamente. Se ha seleccionado el año hidrológico 1996/97 (el más húmedo del periodo considerado), como representativo de las condiciones húmedas, y el 1994/95 (el más seco) como característico de los años con escasa precipitación. Las condiciones hidrometeorológicas medias (Figura 4.3) se han representado a partir de los valores medios aritméticos de las distintas estaciones (Tablas 4.1 y 4.2). La equidistancia de las isoyetas es de 100 mm en todos los mapas y su trazado debe considerarse como aproximado, especialmente en las zonas más elevadas, donde no existe una densidad suficiente de estaciones que permita el trazado preciso de las isolíneas de precipitación.



**Figura 4.1. Distribución temporal de la precipitación media anual en el área de estudio durante el período 1985/86 – 2014/15. En azul, años de tipo húmedo, en blanco de tipo medio y en amarillo, años de tipo seco.**

La distribución espacial de la precipitación es similar en las tres condiciones hidroclimáticas consideradas (Figuras 4.2, 4.3 y 4.4), aunque con magnitudes absolutas muy distintas. En términos generales, la distribución es concéntrica con respecto a la línea de cumbres, donde los valores de precipitación son máximos, y disminuyen de manera generalizada hacia el N y hacia el S, también hacia el E. Por el contrario, en el litoral costero y en el valle del Guadalfeo, así como en la sierra de Albuñuelas y en la depresión de Granada, las lluvias son más escasas, con los valores medios anuales más bajos (299 mm) registrados en la estación Ventas de Huelma. Por tanto, la altitud y orientación de las alineaciones montañosas condicionan la distribución espacial de las precipitaciones en el conjunto del área.

La precipitación media anual caída sobre los afloramientos permeables durante el periodo histórico, determinada mediante planimetría de isoyetas, es 636 mm. Este dato se considera más adecuado que el de la media aritmética porque tiene en cuenta la distribución espacial y altitudinal de las precipitaciones. No obstante, conviene tener presente que no se dispone de estaciones en la línea de cumbres y, por tanto, existe cierta incertidumbre sobre la precipitación que realmente se produce sobre en estas zonas.

**Tabla 4.2. Precipitación anual (mm) durante el periodo 1985/86 – 2014/15 en el ámbito de estudio y áreas próximas. Años tipo: azul (húmedo), amarillo (seco) y blanco (año de tipo medio).**

Año hidrológico	Albunuelas (La Huda)	Alcaucín	Alhama de Granada	Almuñécar (El Zañor)	Neja	Cacín	Canillas de Albaida	Cazorlas	Cometa	Frigiliana	Fuente de Guadalupe	Guájara	Jayena	Lantejuela	Níjar	Órtiga	Padul (Aguadero)	Padul	Bermúdez	Periana	Torrox	Villaluenga	San Pedro del Comercio	Zafarraya	AGRO	5520	6378	62571	5517	6251	62570	6258	6264	5559	PP media anual (mm)
1985/86	561	888	315	317	334	236	433	494	513	368	367	372	401	524	414	523	371	365	284	493	335	336	385	715	1239	426	536	295	377	586	264	400	357	189	442
1986/87	699	759	488	549	588	365	671	725	757	648	512	659	454	804	451	702	386	382	440	530	547	486	340	823	938	411	920	508	366	699	452	492	589	232	570
1987/88	684	604	347	284	370	260	477	472	466	407	340	416	397	586	452	488	412	369	313	510	342	464	395	822	945	329	785	417	393	693	360	450	370	160	458
1988/89	663	1008	382	499	389	316	525	528	570	442	392	471	406	536	462	471	388	363	344	388	377	376	365	752	1470	330	804	580	423	700	472	489	411	183	508
1989/90	1103	1764	730	647	808	461	1029	901	1039	809	764	930	676	1057	652	894	563	508	675	908	712	842	456	1122	2452	425	1591	751	555	864	675	735	669	263	854
1990/91	682	363	409	383	442	285	521	523	553	408	343	384	364	581	386	400	319	309	341	502	314	415	273	872	607	351	845	519	395	566	397	429	377	154	442
1991/92	493	758	344	206	340	219	420	375	477	324	267	334	348	412	331	386	324	322	297	456	302	333	231	737	1086	311	626	443	338	424	314	344	331	131	394
1992/93	448	502	318	239	324	222	392	315	472	305	269	322	287	335	277	339	242	210	270	396	289	301	223	617	720	201	457	351	291	337	274	290	235	192	331
1993/94	583	537	360	306	384	289	564	413	547	383	347	381	307	457	332	386	331	255	330	408	379	445	195	385	769	241	807	393	359	407	341	346	360	219	398
1994/95	236	250	206	151	183	162	232	220	228	176	141	223	176	253	210	176	130	140	211	190	200	200	103	389	358	118	313	187	188	216	116	121	159	127	197
1995/96	1232	982	735	772	812	492	997	1142	1169	833	989	1147	641	1216	697	1113	642	579	595	903	747	883	409	1233	1407	563	1301	966	829	929	713	779	802	463	874
1996/97	1374	1092	880	871	845	619	1173	1411	1283	930	1009	1261	842	1277	838	1214	771	675	715	915	828	834	546	1414	1564	545	1754	1056	777	864	884	899	986	552	985
1997/98	936	837	555	527	553	431	794	1049	816	597	658	710	504	944	579	804	507	475	500	753	514	782	428	845	1200	452	907	735	540	609	589	597	738	331	670
1998/99	347	301	222	227	252	181	307	272	311	308	256	244	218	321	194	267	146	144	200	290	251	262	154	383	431	185	320	269	195	222	188	187	193	118	246
1999/00	848	609	461	567	387	351	453	703	629	521	655	635	408	557	510	673	405	423	298	416	411	505	327	647	888	372	687	607	455	514	570	518	492	389	526
2000/01	801	754	590	566	606	447	792	845	817	704	667	738	490	919	495	754	413	411	460	790	599	651	457	927	1208	463	535	621	498	551	533	563	593	359	636
2001/02	592	532	461	439	454	405	584	503	603	476	407	479	649	498	433	472	379	416	463	531	322	468	323	643	705	375	401	495	455	515	489	464	355	245	471
2002/03	754	664	465	557	594	367	866	832	871	657	659	669	491	756	469	941	398	438	454	599	566	583	312	782	975	468	513	619	516	583	536	582	584	344	602
2003/04	992	903	585	601	688	488	905	883	936	764	754	782	602	918	594	853	528	569	673	1038	645	818	417	1202	1400	458	633	798	605	684	686	687	619	437	740
2004/05	357	324	271	241	279	190	326	361	406	284	280	377	275	419	257	338	185	222	272	329	311	304	187	425	428	178	238	264	203	232	225	260	255	179	285
2005/06	596	452	385	308	369	322	540	551	570	407	487	488	357	602	409	543	308	340	356	510	365	455	305	691	680	333	436	426	382	436	425	371	389	360	440
2006/07	563	466	369	359	560	287	477	488	471	517	395	526	349	625	473	472	371	378	341	584	392	452	286	735	760	352	478	443	423	479	398	388	344	317	450
2007/08	585	464	351	415	364	253	505	593	515	448	436	497	362	611	368	590	329	315	336	506	428	426	235	575	638	275	416	448	320	366	422	471	416	230	427
2008/09	635	653	470	511	532	380	717	609	712	558	528	601	423	671	464	708	401	357	471	624	483	553	374	876	998	375	540	493	511	580	533	546	428	470	553
2009/10	1370	1008	896	958	808	589	1168	1470	1194	899	1118	1203	826	1776	857	1333	649	601	705	1029	764	972	559	1108	1221	537	911	900	687	762	869	889	1027	451	945
2010/11	963	851	652	697	642	477	947	911	1020	770	763	806	537	1174	554	828	531	506	575	781	661	741	444	895	1008	435	718	706	592	670	730	639	638	539	718
2011/12	536	518	382	428	416	320	596	548	566	519	455	532	331	619	342	506	299	260	358	483	398	434	316	583	683	206	393	448	336	381	397	363	384	292	430
2012/13	935	855	691	641	583	487	791	761	811	706	646	760	577	1027	596	863	603	542	663	854	551	762	573	1186	1084	665	706	654	759	859	610	580	535	578	720
2013/14	556	355	409	334	358	281	430	512	432	454	404	459	343	545	354	527	284	249	289	391	269	356	270	611	730	256	341	405	366	417	427	302	360	231	391
2014/15	606	482	309	383	460	317	668	651	734	596	514	584	374	705	386	558	375	339	405	613	416	553	294	524	724	321	509	437	392	447	452	412	459	237	478
Media * 1,15	833	787	538	536	564	402	740	769	785	622	606	690	514	833	530	733	460	439	484	679	526	613	390	902	1124	420	783	622	518	636	550	559	554	344	620
Media	724	685	468	466	491	350	643	669	683	541	527	600	447	724	461	637	400	382	421	591	457	533	339	784	977	365	681	541	451	553	478	486	482	299	539
Media * 0,85	616	582	398	396	417	297	547	568	580	459	448	510	380	616	392	542	340	325	358	502	389	453	288	666	831	310	579	460	383	470	406	413	410	254	458
Máximo	1374	1764	896	958	845	619	1173	1470	1283	930	1118	1261	842	1776	857	1333	771	675	715	1038	828	972	573	1414	2452	665	1754	1056	829	929	884	899	1027	578	985
Mínimo	236	250	206	151	183	162	232	220	228	176	141	223	176	253	194	176	130	140	200	190	200	200	103	383	358	118	238	187	188	216	116	121	159	118	197
Años húmedos	9	10	9	11	10	10	10	9	10	10	11	9	8	9	8	10	8	8	8	9	10	9	10	7	9	11	10	8	8	10	9	10	10	11	9
Años medios	7	7	7	6	6	8	6	6	5	7	5	7	9	6	11	6	11	12	6	10	7	8	10	12	8	11	5	8	10	9	10	8	6	4	7
Años secos	14	13	14	13	14	12	14	15	15	13	14	14	13	15	11	14	11	10	16	11	13	13	10	11	13	8	15	14	12	11	11	12	14	15	14



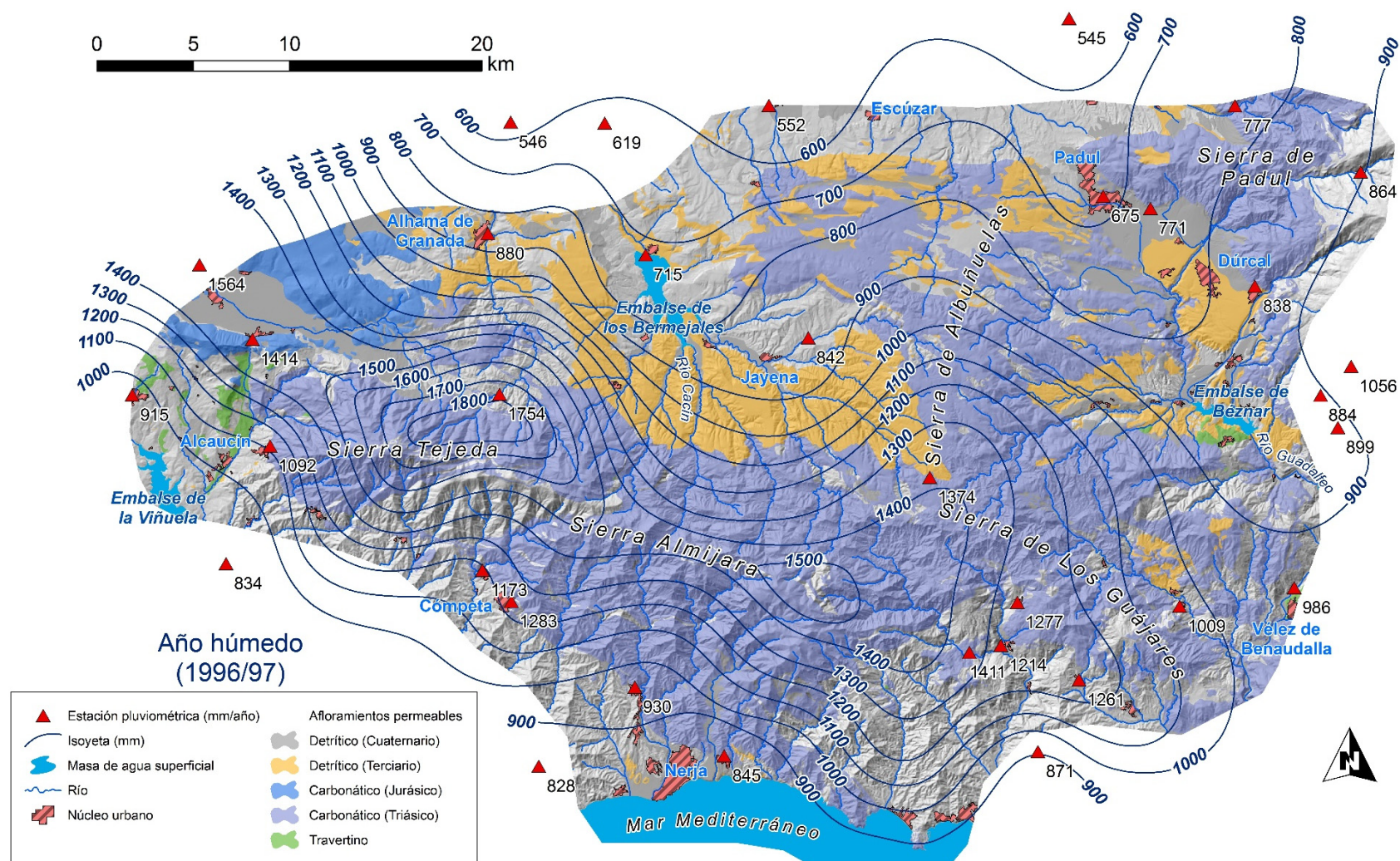
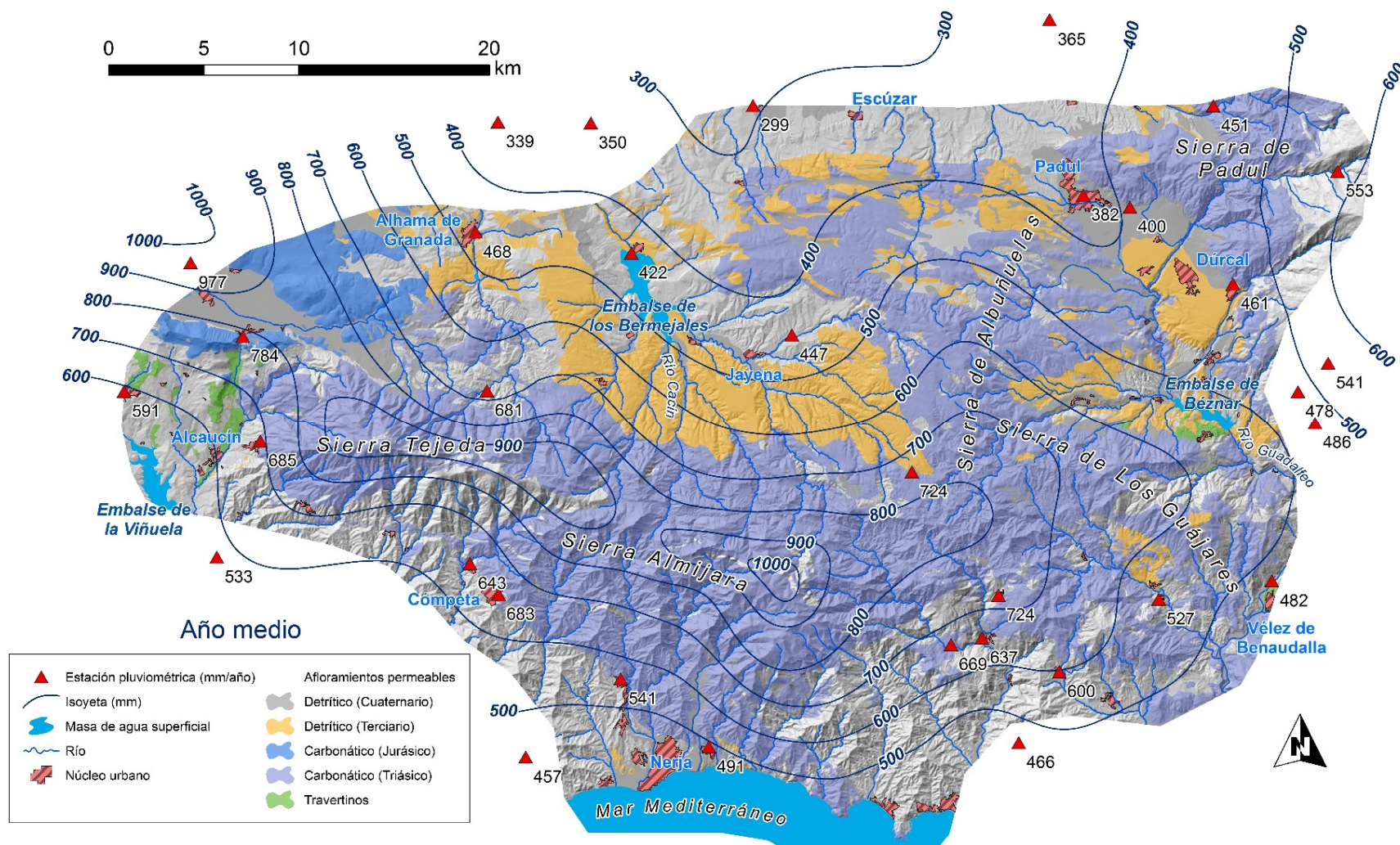


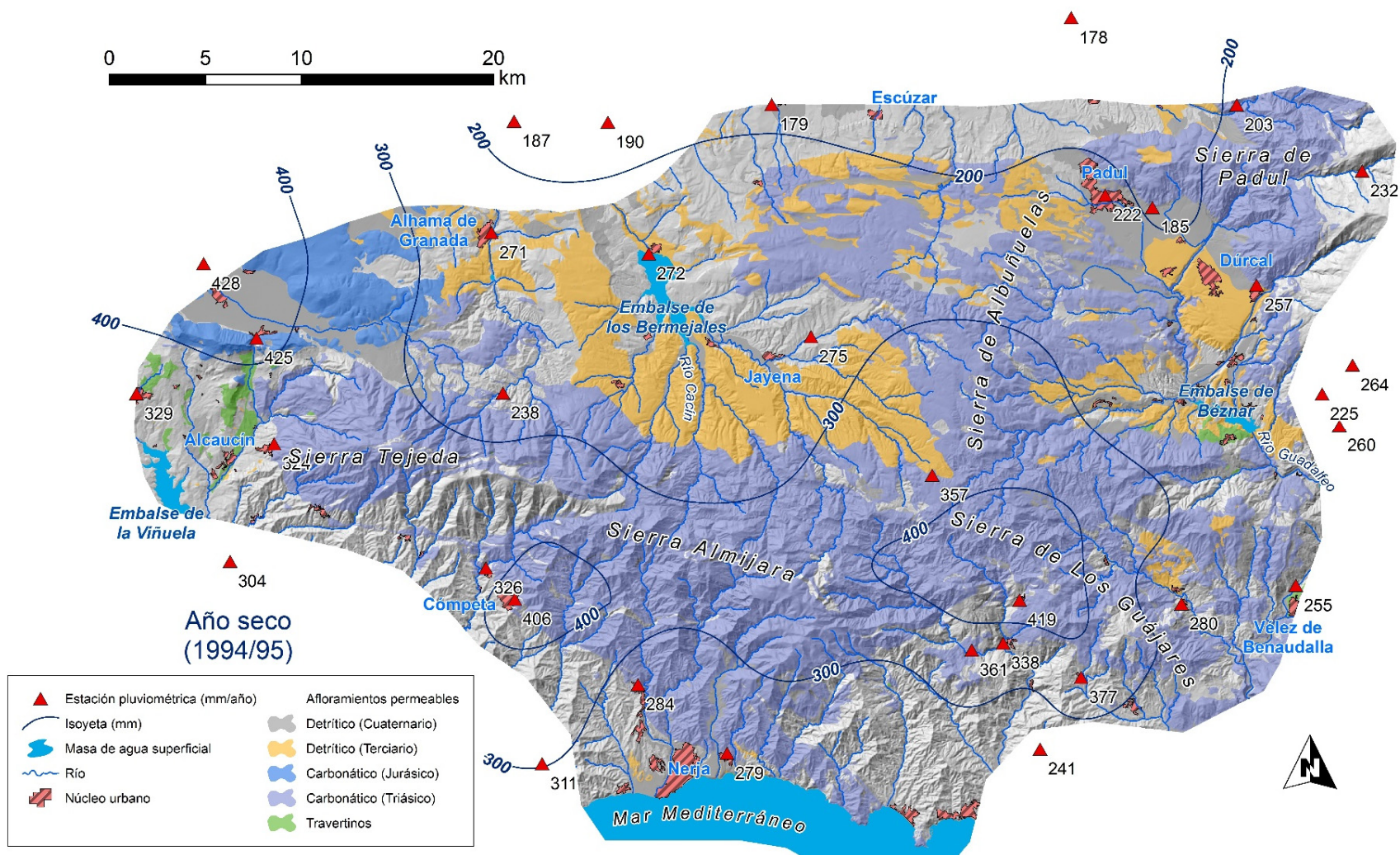
Figura 4.2. Mapa de isoyetas correspondiente al año más húmedo (1996/97) del periodo histórico en el ámbito de estudio, con una precipitación media obtenida por planimetría de 1.063 mm. La precipitación media aritmética es 985 mm. La equidistancia entre las isoyetas es de 100 mm.





**Figura 4.3.** Mapa de isoyetas correspondiente al año medio del periodo 1985/86 – 2014/15 en el área de estudio, con una precipitación media obtenida por planimetría de 636 mm. El valor medio (aritmético) es 539 mm. La equidistancia entre las isoyetas es de 100 mm.





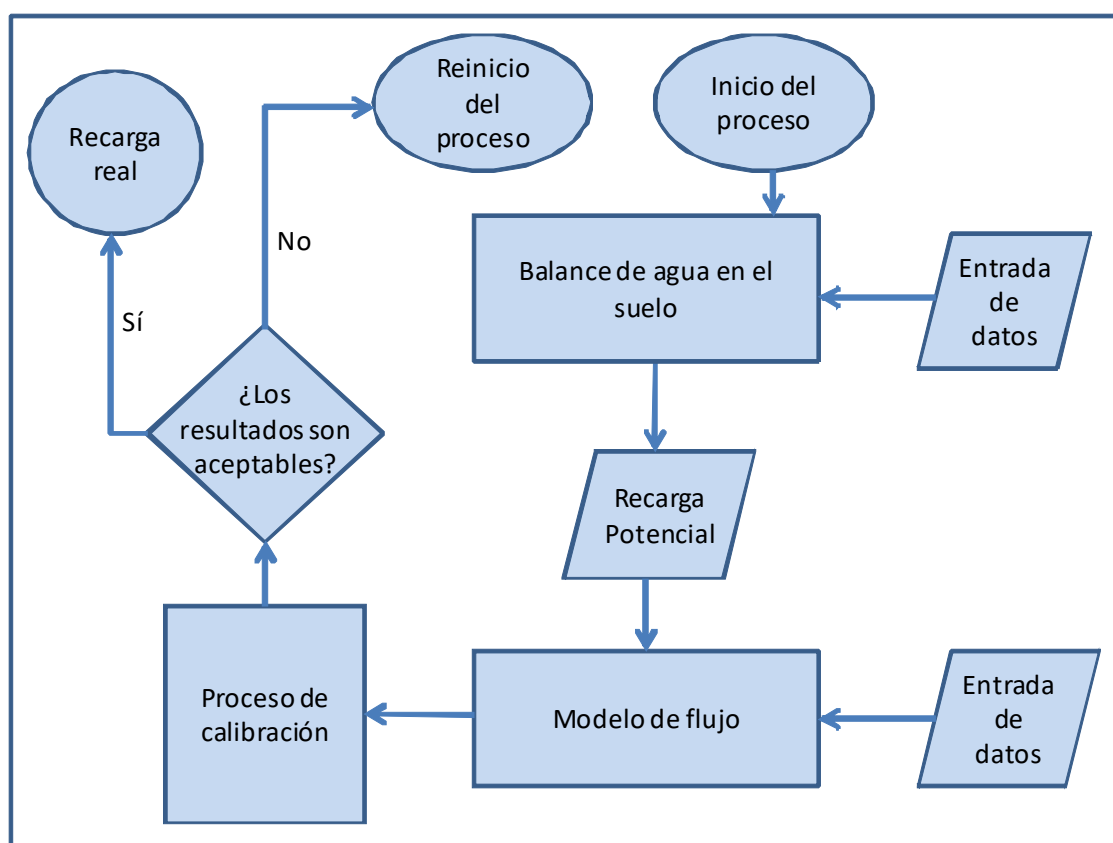
**Figura 4.4.** Mapa de isoyetas correspondiente al año 1994/95, el más seco del periodo histórico en el área de estudio, con una precipitación media obtenida por planimetría de 301 mm. La precipitación media (aritmética) registrada fue 197 mm). La equidistancia entre las isoyetas es de 100 mm.

## 5. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE EL CÓDIGO RENATA

RENATA (Recarga NATural a los Acuíferos) es un código de evaluación de la recarga a los acuíferos que combina dos metodologías tradicionales de estimación de este parámetro a través de un único proceso de cálculo iterativo (Figura 5.1). Dichos métodos son: el balance de agua en el suelo y la estimación de la recarga a los acuíferos mediante un modelo numérico de flujo en diferencias finitas. El enfoque conjunto y coordinado del empleo de ambas metodologías al unísono pretende garantizar una mejor coherencia entre los resultados que ofrece el balance de agua en el suelo -que proporciona la magnitud de la recarga potencial- y las fluctuaciones del nivel freático -que refleja los efectos de la recarga real- en el acuífero.

Los resultados que proporciona un balance de humedad en el suelo se vienen utilizando, desde hace algún tiempo, como datos de entrada a un modelo numérico de flujo, para que este valide la bondad de la estimación realizada, pero sin que ambos procesos de cálculo se interrelacionen automáticamente entre sí mediante una única sistemática de procesamiento de datos. Esta era la forma en que operaba la primera versión de RENATA (DPA-IGME, 2012).

La nueva versión de RENATA (DPA-IGME, 2019), que es la que se emplea en el presente documento, se caracteriza por presentar un procedimiento de cálculo y calibración continuo que lo hacen novedoso, versátil y sencillo de manejar, aunque su utilización exige disponer de un modelo conceptual del acuífero robusto y plausible.



**Figura 5.1. Diagrama de flujo del código RENATA**

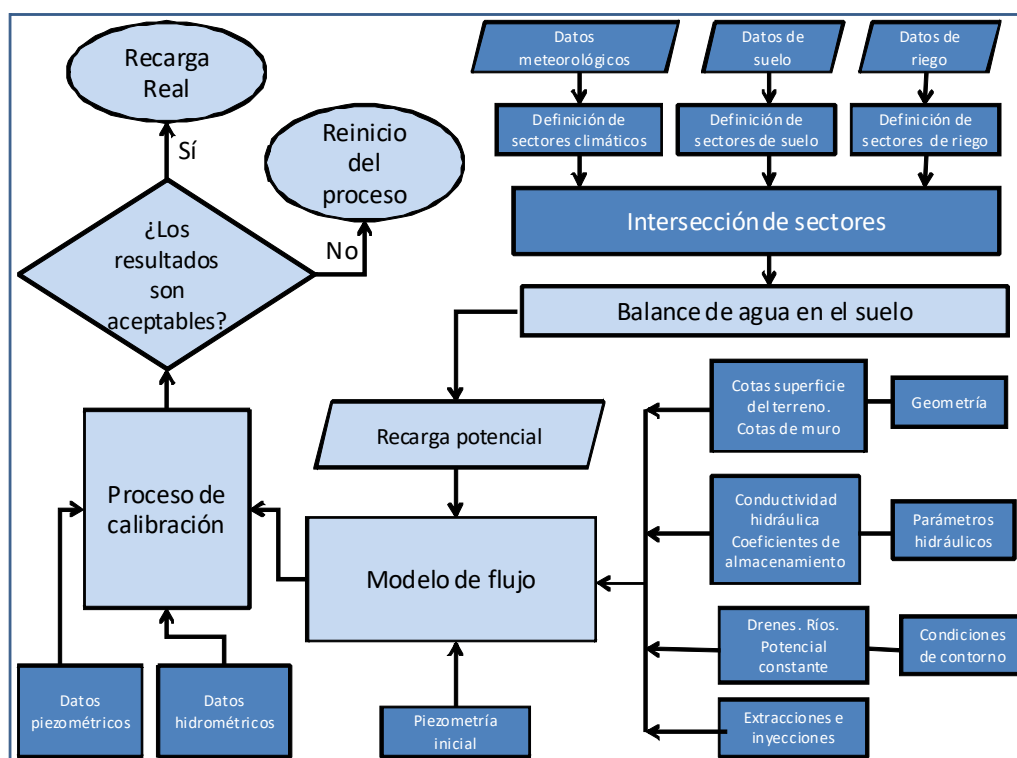
El código opera el balance de agua en el suelo de manera distribuida a partir de dividir la superficie permeable del terreno sobre la que se puede infiltrar agua en tres tipos de sectores: climáticos, suelo y riego. El proceso de cálculo permite definir y calibrar de forma distribuida un parámetro tan incierto y difícil de determinar como la reserva de agua en el suelo. RENATA, una vez calibrado,

también se puede utilizar como una herramienta complementaria de apoyo a la predicción y a la simulación de hipótesis de gestión, siempre que no sea recomendable o preciso realizar una modelación de flujo más específico o de mayor detalle, por lo que resulta una herramienta útil para la identificación y delimitación de divisorias hidrogeológicas, que es uno de los objetivos del presente trabajo.

La aplicación de este código ofrece una serie de ventajas frente a otras metodologías de estimación de la recarga a los acuíferos como son:

- Utiliza parámetros distribuidos y tiene en cuenta el valor de la precipitación y de la temperatura en el tiempo y en el espacio.
- Calcula la recarga a nivel diario y proporciona series temporales de la misma en toda la superficie del acuífero para cada una de las celdas de la malla en las que se subdivide su superficie.
- Permite la simulación del flujo subterráneo, por lo que los valores de recarga son ajustados y calibrados con series de niveles piezométricos e hidrogramas de las descargas.
- En el ajuste y calibración también se pueden incluir las series de extracciones históricas.

La estimación de la recarga mediante la aplicación del código RENATA contempla los pasos que se sintetizan en la figura 5.2.



**Figura 5.2.** Diagrama de flujo del código RENATA detallando los datos que se tienen que aportar al programa.

En el documento elaborado por IGME-DPA (2012) titulado “RENATA (Recarga Natural de Acuíferos). Manual del Usuario” se detallan con precisión todos los métodos de los que dispone el programa para calcular la evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, lluvia útil, infiltración y escorrentía superficial.

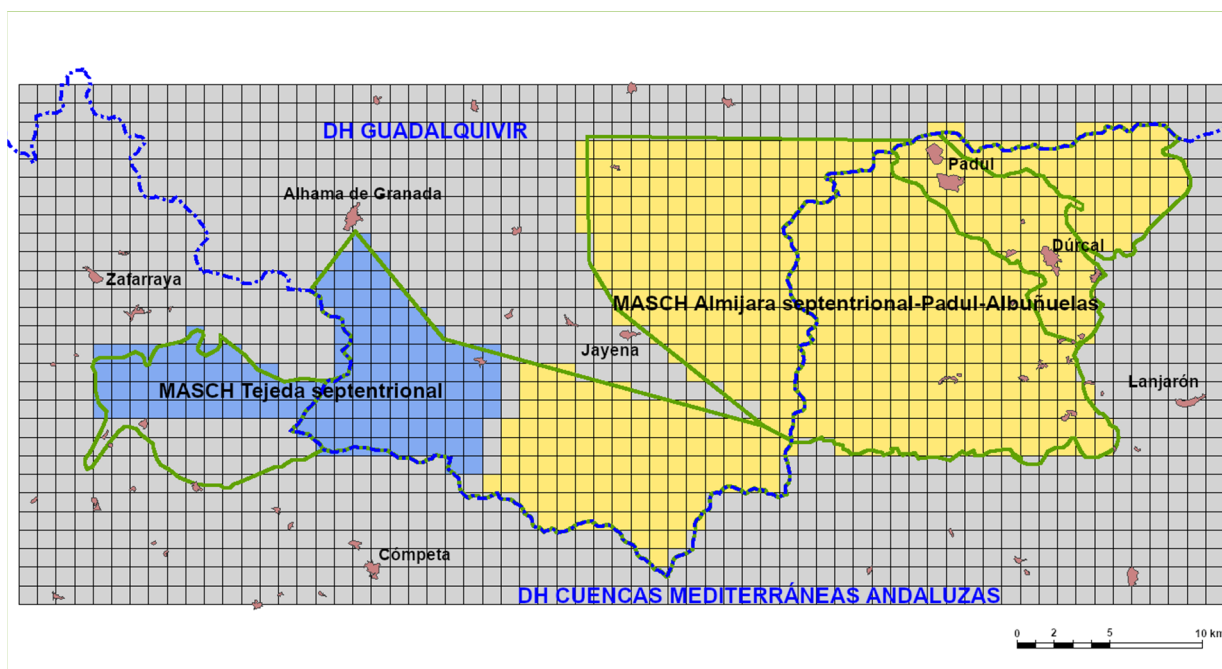
El balance de agua en el suelo se ha obtenido aplicando la siguiente metodología:

- Cálculo de la Evapotranspiración potencial (ETP) con 4 posibles métodos: Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Criddle para calcular la evapotranspiración de referencia y Blaney-Criddle para calcular la evapotranspiración de cultivo.
- Determinación de la lluvia útil (LLU) mediante el método del balance de agua en el suelo de Thornthwaite modificado por G. Girard (1981)
- Descomposición de la lluvia útil (LLU) en escorrentía (ESC) e infiltración (INF) mediante el método del Soil Conservation Service de los EE. UU. del número de curva.

### 5.1. Generación de la malla y establecimiento del periodo de cálculo

Para la aplicación del código RENATA se ha definido un mallado rectangular de coordenadas UTM X: 394.000 -459.000 e Y: 4.075.000-4.103.000 en la que queda enmarcada la superficie sujeta al proceso de cálculo y estimación de la recarga (Figura 5.3). La malla definida consta de 28 filas y 65 columnas con celdas de 1 km<sup>2</sup> de tamaño. Las de tipo activo (superficie permeable) ocupan una extensión de 671 km<sup>2</sup>.

El cálculo de la recarga se ha realizado a nivel diario en cada una de las celdas activas del mallado para un periodo de 30 años hidrológicos, comprendidos entre 1985/86 y 2014/15. En el cálculo de la recarga se ha tenido únicamente en cuenta la extensión de material acuífero en superficie de las MASCHs, la localización y cota de los puntos de agua (piezómetros y manantiales) y el volumen de agua bombeada. Los parámetros restantes se han calculado a partir de la calibración del código RENATA.



**Figura 5.3. Mallado y límites del modelo para la determinación de la recarga y del funcionamiento hidráulico mediante el código RENATA (en gris las celdas inactivas).**

Hay que señalar en la figura 5.3 (y en las sucesivas en las que se visualiza la malla del modelo RENATA) que no se han considerado como celdas activas las que abarcan el sector de acuífero denominado Sierra de Tejeda Sur de la DHCMA, ya que, como se ha comentado en los apartados de hidrogeología, este se encuentra desconectado hidráulicamente del sector Sierra de Tejeda Norte, por lo que no forma parte de la MASCH y, por tanto, tampoco del modelo.



## 5.2. Módulo de Balance hídrico

### Sectores climáticos

La discretización permite calcular la lluvia útil (*LLU*) a partir de las estaciones meteorológicas de la región, según la malla de celdas diseñada. Para obtener la recarga por agua de lluvia se ha utilizado el método de los polígonos de Thiessen, a partir de algunas de las estaciones pluviométricas consideradas en la caracterización climática (Tabla 4.1). En el ámbito de estudio se han generado 15 polígonos de Thiessen (Figura 5.4), a los que se han asignado series de datos de evapotranspiración potencial (*ETP*) procedentes de la estación termométrica más cercana. En la tabla 5.1 se muestran las características de cada uno de los sectores climáticos. Los datos de precipitación, temperatura y de *ETP* utilizados en el modelo son diarios. La *ETP* se ha calculado a partir de la ecuación de Hargreaves y Samani (1985).

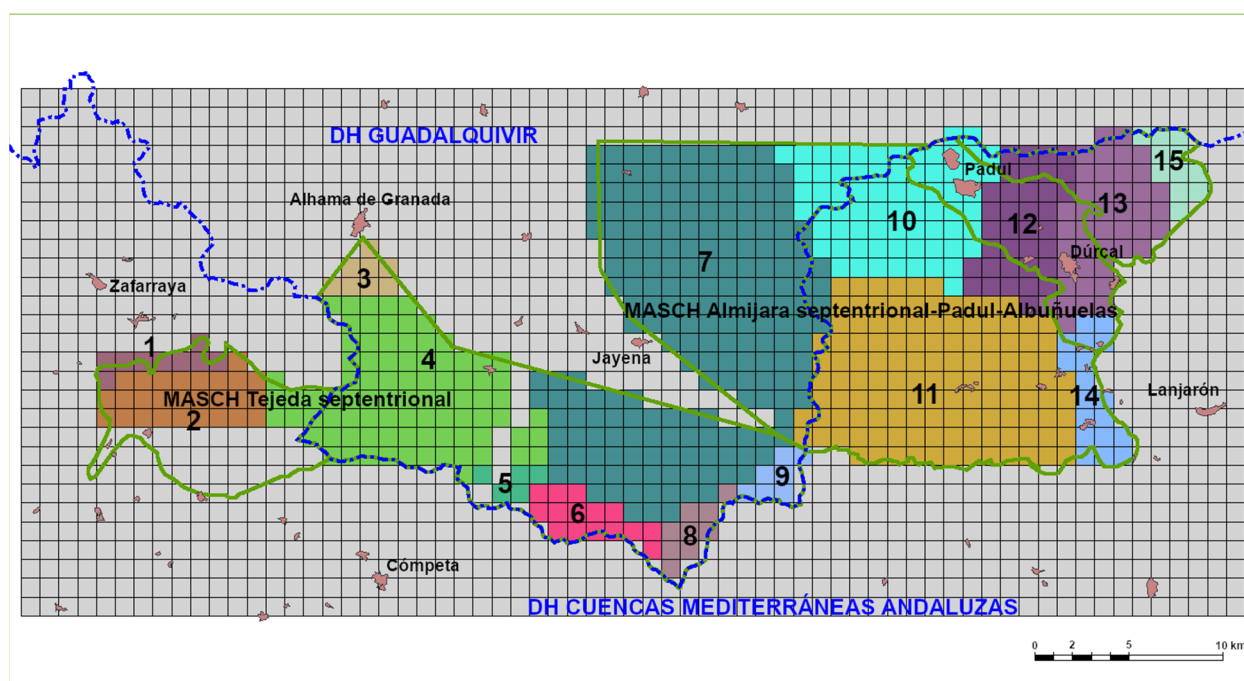


Figura 5.4. Sectores climáticos por polígonos de Thiessen ajustados al mallado

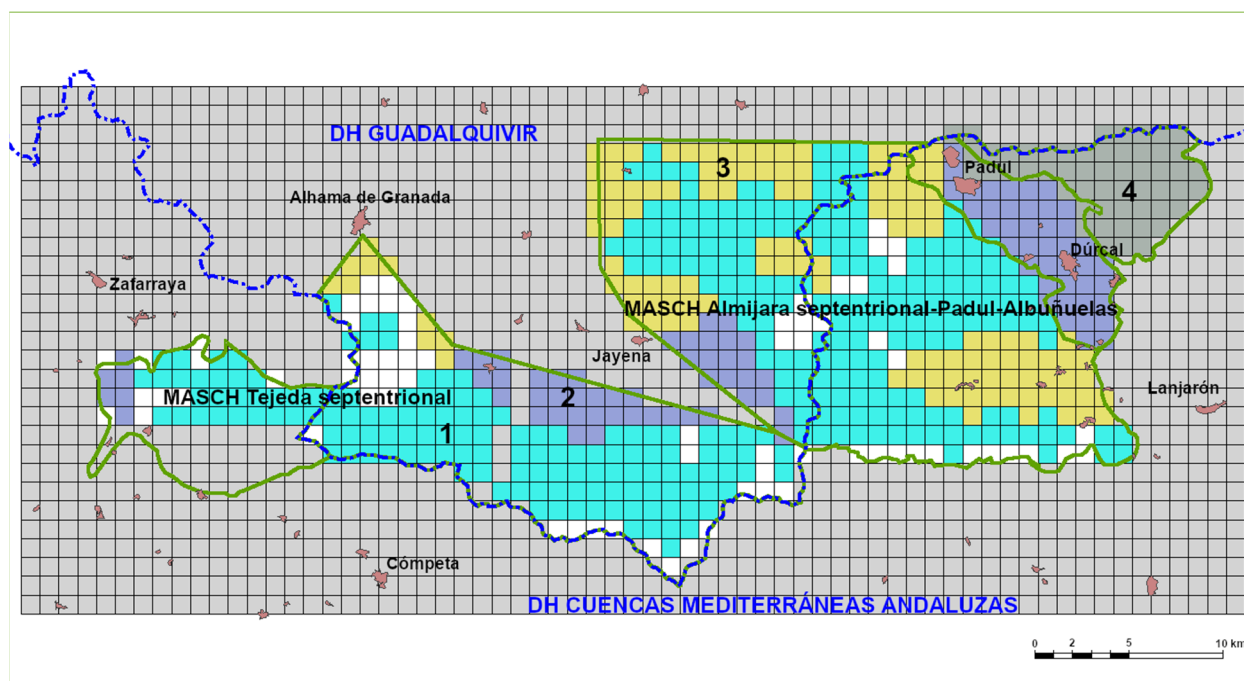
### Sectores de suelo

A cada celda del modelo se le ha asignado la litología mayoritaria que aflora en el área que engloba (Figura 5.5). Para ello se ha utilizado la información geológica mostrada en la figura 3.1. A continuación se han fijado los valores de reserva útil (RU) del suelo que recubre los distintos materiales (Tabla 5.2). No obstante, solo se han considerado los afloramientos permeables que intervienen en la recarga que, en este caso, son los carbonatos y las formaciones detríticas.

Tabla 5.1. Características de los sectores climáticos (1985/86-2014/15).

Sector climático	Estación pluviométrica	Estación termométrica	Superficie (km²)	Precipitación media (l/m²/a)	ETP media (l/m²/a)
1. Ventas de Zafarraya	6377	Zafarraya AGRO	9	783,94	1103,1
2. Alcaucín	6182	Zafarraya AGRO	27	684,07	1103,1
3. Alhama de Granada	5576	5572	8	467,71	1283,4

4. Alhama (Alcaicería)	6378	5572	86	680,38	1283,4
5. Còmpeta	6203	6207	5	682,50	1051,5
6. Frigiliana	6210E	6207	15	540,27	1051,5
7. Jayena	5568U	5568U	202	446,90	1202,8
8. Cazulas	6220	6222I	9	668,37	1090,8
9. Lentegí	6221	6222I	7	723,85	1090,8
10. Padul	6249	6249	71	381,75	1312,9
11. Albuñuelas	5569E	5568U	124	723,87	1202,8
12. Padul (Aguadero)	6250	6249	36	399,44	1312,9
13. Nigüelas	6253	6257I	43	461,08	1003,9
14. Posturas	6257O	6257O	18	477,74	1156,1
15. Dúrcal (Presa)	6251	6257I	11	552,79	1003,9



**Figura 5.5. Sectores de suelo aplicados en el código RENATA**

**Tabla 5.2. Sectores de suelo: parámetros utilizados**

Sector de suelo	Superficie (km²)	Parámetros Calibrados
1 Mármoles	323	RU <sub>min</sub> =30 mm; RU <sub>max</sub> =50 mm P <sub>0</sub> =25 mm; NC=67
2 Detrítico	94	RU <sub>min</sub> =50 mm; RU <sub>max</sub> =90 mm P <sub>0</sub> =50 mm; NC=50
3 Calcarenitas	126	RU <sub>min</sub> =40 mm; RU <sub>max</sub> =70 mm P <sub>0</sub> =30 mm; NC=73
4 Calizas metamórficas	54	RU <sub>min</sub> =25 mm; RU <sub>max</sub> =40 mm P <sub>0</sub> =25 mm; NC=67

## Sectores de riego

Las entradas procedentes de los retornos de riego no han sido contempladas a efectos del balance, puesto que la superficie regable en las áreas de recarga es escasa.

### Intersección de sectores y definición de áreas de recarga

Como resultado de la intersección de los sectores diferenciados para clima, suelo y riego, se han definido 30 áreas con distinta tasa de recarga que representan las entradas en el modelo de flujo. Sobre una superficie de materiales permeables de 597 km<sup>2</sup> (materiales carbonatados 84 % y detríticos 16 %) se produce una infiltración media de 112,78 hm<sup>3</sup>/a.

#### 5.3.3. Módulo de calibración. Modelo de flujo

En este apartado se describe el diseño del modelo de simulación del flujo subterráneo (límites y geometría, parámetros hidrodinámicos, componentes y tipos de recarga, etc.), a partir del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de cada uno de los acuíferos identificados en las dos MASCHs.

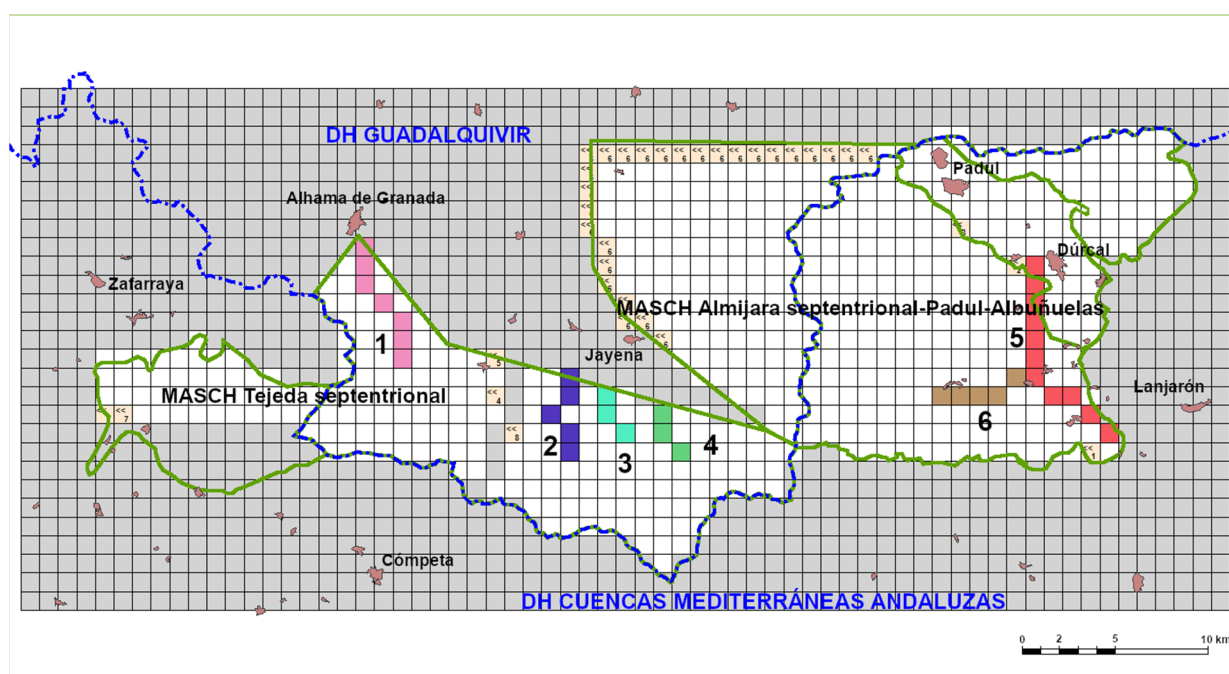


Figura 5.6. Condiciones en los límites del modelo de flujo. Las celdas grises son inactivas.

### Condiciones de contorno

Se han definido como celdas inactivas, de flujo nulo, (de color gris oscuro en la figura 5.6) todas aquellas que se encuentran fuera de los límites del ámbito de estudio, así como las que permiten individualizar los diferentes acuíferos según el modelo conceptual descrito en apartados anteriores.

Las salidas naturales se producen por manantiales, cauces ganadores y por transferencias laterales hacia materiales detríticos adyacentes. Las salidas se completan por los bombeos en diferentes sectores. Las celdas donde se localizan los manantiales y donde posiblemente se



produzcan descargas ocultas son de tipo dren. En el modelo generado se han asignado 35 celdas de tipo dren (Figura 5.6) que representan 6 manantiales y 2 transferencias subterráneas, y 34 celdas de tipo río para simular los 6 ríos principales. Para incluir los ríos en el modelo con RENATA se necesita la cota del río y la altura de la lámina de agua, así como un factor de recarga ( $\text{m}^2/\text{día}$ ) (Tabla 5.3). Dicho factor, al igual que la conductancia en las celdas tipo dren, se ha calculado por calibración.

**Tabla 5.3. Parámetros usados en los ríos.**

Río	Cota máxima – Cota mínima (m s.n.m.)	Factor de recarga ( $\text{m}^2/\text{día}$ )
1.- Río Alhama	900 - 875	500
2.- Río Cacán	930 - 900	1000
3.- Río Grande	1110 - 1060	1000
4.- Río Cebollón	1050 - 950	1000
5.- Río Dúrcal	680 - 550	500
6.- Río Albuñuelas	830 - 750	1000

## Geometría

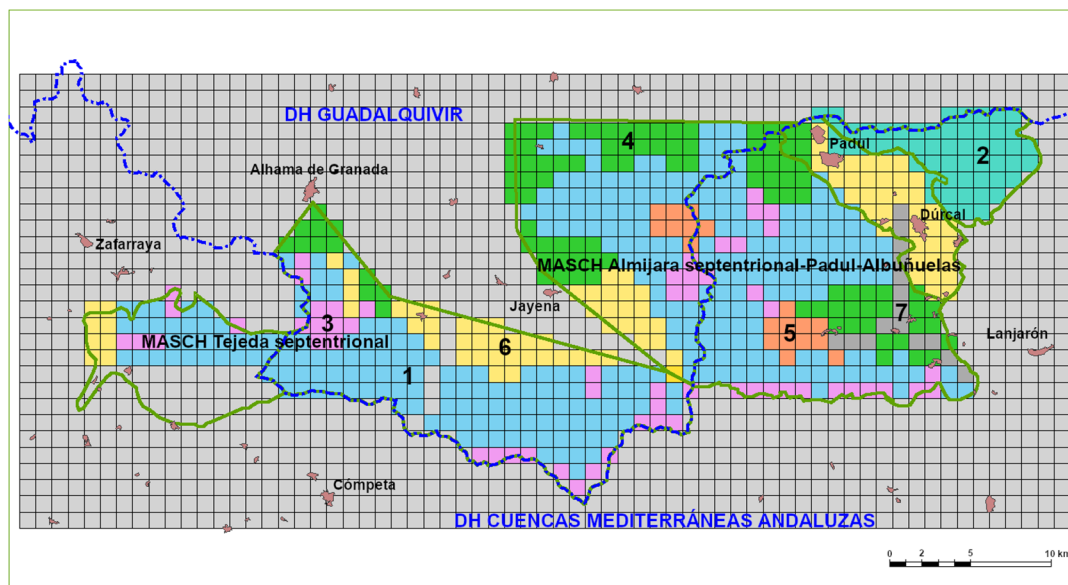
La simulación con RENATA funciona considerando una sola capa. Esta se ha limitado por la superficie topográfica y un muro del acuífero genérico a cota -100 m s.n.m. Esta profundidad se ha establecido en el modelo para evitar el secado de las celdas que haría imposible el funcionamiento de este. El ajuste de la permeabilidad y coeficiente de almacenamiento se ha utilizado para compensar las diferencias entre el espesor del acuífero real y el impuesto en el modelo. La topografía se ha importado del modelo digital del terreno de paso 200 m, referido a ETRS89, tomado del IGN.

## Parámetros hidráulicos

Los parámetros necesarios para calcular el flujo subterráneo son la conductividad hidráulica ( $\text{m}/\text{día}$ ), el coeficiente de almacenamiento confinado ( $1/\text{m}$ ) y el coeficiente de almacenamiento libre. Para el modelo numérico de la MASCH se han establecido 8 sectores hidrogeológicos (Figura 5.7). En la tabla 5.4 se muestran los valores de los parámetros hidráulicos resultado de la calibración con RENATA.

## Extracciones

Los datos de bombeo utilizados en el modelo RENATA se han obtenido de la bibliografía descrita en anteriores capítulos de este informe. El volumen de agua bombeada en la sierra de Albuñuelas y en la depresión de Padul se ha considerado, para la modelización, el mismo a lo largo de todo el periodo de cálculo:  $6,4 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Además, se ha tenido en cuenta la estacionalidad de los bombeos, lo que implica considerar el doble de bombeos en los meses de mayo a octubre que en el periodo comprendido entre noviembre y abril. La situación de las celdas del modelo en las que se han concentrado los bombeos se muestra en la figura 5.8.



**Figura 5.7. Sectores de parámetros hidráulicos.**

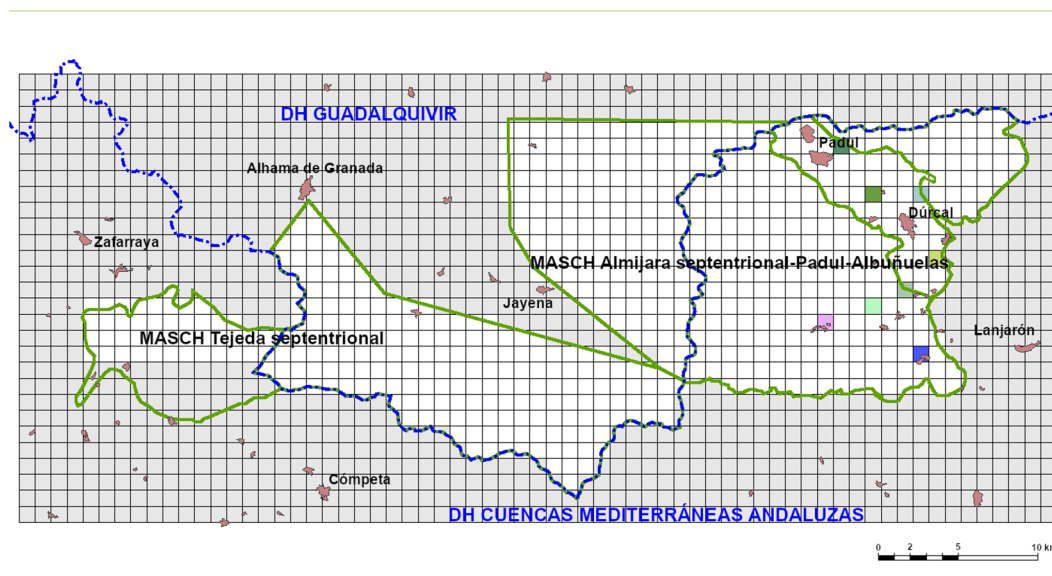
### Calibración

La calibración se ha realizado en régimen transitorio influenciado, partiendo de los niveles iniciales obtenidos en régimen permanente no influenciado, considerando como entradas la media de la recarga obtenida en el periodo entre 1985/86-2014/15.

A lo largo del proceso de calibración en régimen transitorio se han modificado los valores de la reserva de agua en el suelo y el umbral de escorrentía. Así mismo, se han modificado los parámetros hidráulicos hasta alcanzar un funcionamiento aceptable. Para ello, se ha utilizado como criterio subjetivo la coherencia del funcionamiento hidrológico con el conocimiento del acuífero y, como criterio objetivo, el ajuste de los datos calculados con RENATA con las series de niveles piezométricos de los siguientes puntos: P.06.24.001-B, P.05.42.001-B, P.06.26.008-B, P.06.24.009-B y P.06.17.001-B.

**Tabla 5.4. Sectores de parámetros hidráulicos.**

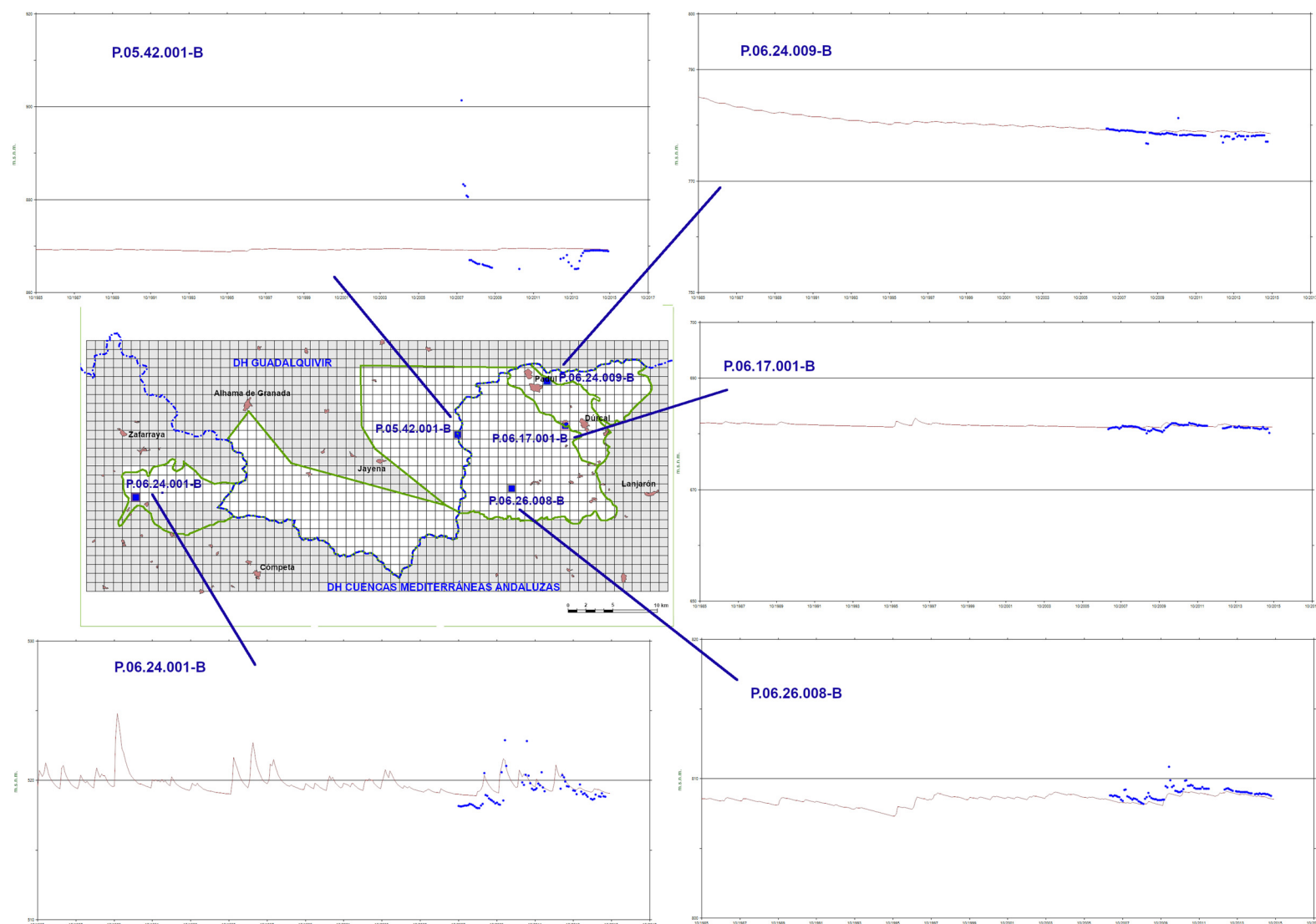
Sector de parámetros hidráulicos	Superficie (km <sup>2</sup> )	Conductividad (m/día)	Coefficiente almacenamiento confinado (1/m)	Coefficiente almacenamiento libre
1 Mármoles	324	0,25	0,001	0,0001
2 Calizas metamórficas	54	0,25	0,001	0,0001
3 Esquistos y calcoesquistos	59	0,001	3E-05	0,0001
4 Calcarenitas	103	5	0.004	0,0001
5 Margas y calizas	19	0,074	0,001	0,001
6 Arenas, arcillas y gravas	96	0,19	0.00025	0.001
7 Aluvial	16	2	0.001	0.001
<b>Total</b>	<b>671</b>			



**Figura 5.8. Localización de los bombeos impuestos en RENATA.**

En la figura 5.9 se muestra la situación de los puntos utilizados para la calibración del modelo así como sus respectivos gráficos con los niveles piezométricos observados y los modelizados en cada uno de ellos. Como puede apreciarse, los resultados de la calibración de la piezometría son aceptables, es verdad que no en todos los puntos elegidos se ha conseguido un buen ajuste, probablemente por la regionalización de los bombeos impuestos, pero, salvo tramos puntuales, sí se observa, en general, una tendencia similar en la evolución de los dos tipos de series de datos.

Aunque el objetivo del modelo de flujo es contrastar y validar los resultados suministrados por el módulo de balance hídrico, aquel, una vez calibrado, permite reproducir las tendencias piezométricas e hidrodinámicas en cada sector acuífero. Sin embargo, la ausencia de datos de explotación actualizados y de un esquema conceptual más preciso, recomiendan que los resultados obtenidos sean tomados con cautela.



**Figura 5.9. Evolución de piezometría medida y simulada en captaciones representativas.**

## 6. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN NATURAL

En régimen natural las entradas de agua al acuífero corresponden sólo a la infiltración de la precipitación atmosférica, por lo que no se contemplan los retornos de riego ni las salidas por bombeos. Al establecer que el régimen es permanente no hay variación del almacenamiento y las entradas y las salidas de agua del acuífero son equivalentes.

La recarga en régimen natural proporcionada por RENATA para la MASCH (periodo 1985/86-2014/15) es, para la MASCH Tejeda septentrional, de 27,44 hm<sup>3</sup>/a. De este volumen, 16,95 hm<sup>3</sup>/a (61,8%) acontecen en territorio adscrito a la DHG y 10,49 hm<sup>3</sup>/a (38,2%) en el administrado por la DHCMA. Por lo que respecta a las salidas estas son fundamentalmente hacia drenes y manantiales (75%) y el resto son hacia los ríos (Tabla 6.1). El porcentaje de las salidas es muy similar en ambas demarcaciones, casi el 50 % en cada una. La DHCMA recibe transferencias subterráneas desde la DHG de 3,03 hm<sup>3</sup>/a (18% de su recarga total).

**Tabla 6.1. Balance hídrico en régimen natural estacionario de la MASCH Tejeda septentrional por demarcaciones hidrográficas.**

Demarcación hidrográfica	Recarga total (hm <sup>3</sup> /a)	%	Salidas ríos (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas drenes (hm <sup>3</sup> /a)	Total salidas (hm <sup>3</sup> /a)	%	Transfer. (hm <sup>3</sup> /a) <sup>(1)</sup>
Guadalquivir	16,95	61,8	6,96	6,96	13,92	50,7	-3,03
Cuencas mediterráneas andaluzas	10,49	38,2	0	13,52	13,52	49,3	3,03
<b>Total MASCH</b>	<b>27,44</b>	<b>100</b>	<b>6,96</b>	<b>20,48</b>	<b>27,44</b>	<b>100</b>	<b>0</b>

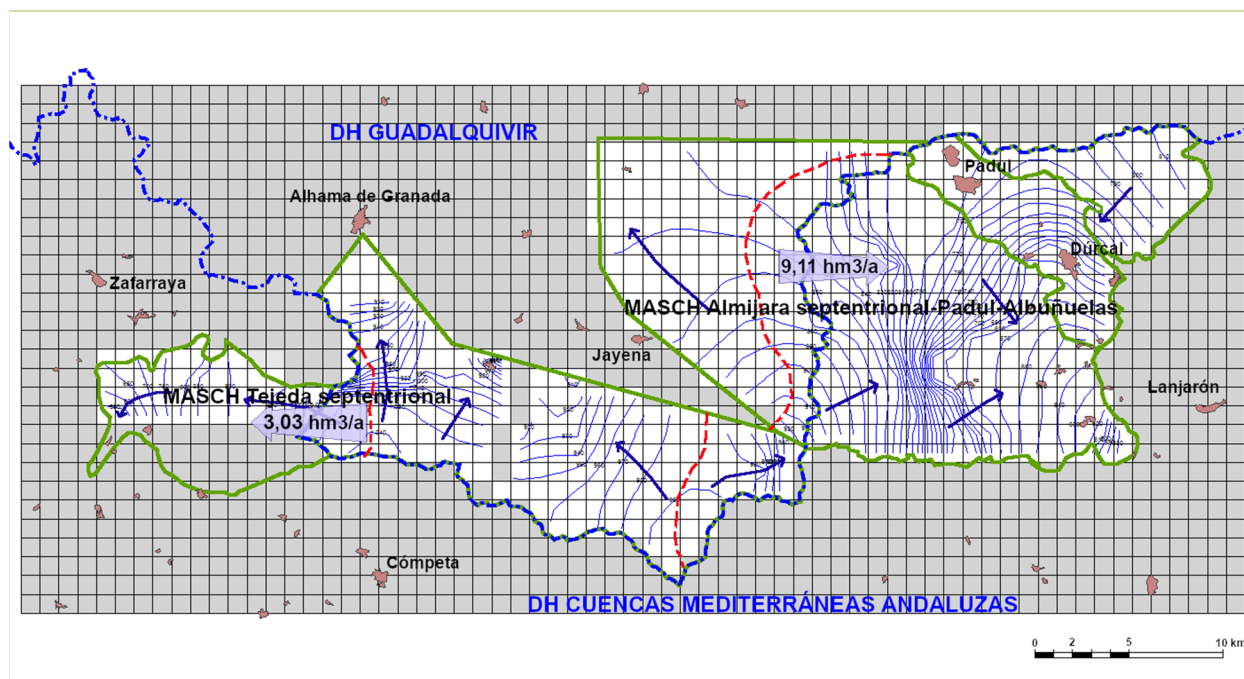
(1) Valores positivos corresponden a entradas y negativos a salidas

Por lo que respecta a la MASCH Aljara septentrional-Padul-Albuñuelas (Tabla 6.2), la recarga en el periodo 1985/86-2014/15 es de 85,34 hm<sup>3</sup>/a, de los que 31,90 hm<sup>3</sup>/a (37,4%) corresponden a la DHG y 53,44 hm<sup>3</sup>/a (62,6%) a la DHCMA. En este caso las salidas son principalmente hacia los ríos (74%) y el resto a través de manantiales o descargas laterales hacia los acuíferos adyacentes. El porcentaje mayor de salidas se produce en la DHCMA (73%) que recibe una transferencia subterránea media, desde la DHG, de 9,11 hm<sup>3</sup>/a.

**Tabla 6.2. Balance hídrico en régimen natural estacionario de la MASCH Aljara septentrional-Padul-Albuñuelas por demarcaciones hidrográficas.**

Demarcación hidrográfica	Recarga total (hm <sup>3</sup> /a)	%	Salidas ríos (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas drenes (hm <sup>3</sup> /a)	Total salidas (hm <sup>3</sup> /a)	%	Transfer. (hm <sup>3</sup> /a) <sup>(1)</sup>
Guadalquivir	31,90	37,4	8,30	14,44	22,74	26,7	-9,11
Cuencas mediterráneas andaluzas	53,44	62,6	54,82	7,78	62,60	73,3	9,11
<b>Total MASCH</b>	<b>85,34</b>	<b>100</b>	<b>63,12</b>	<b>22,22</b>	<b>85,34</b>	<b>100</b>	<b>0</b>

(1) Valores positivos corresponden a entradas y negativos a salidas



**Figura 6.1. Funcionamiento hidrodinámico de las MASCHs en régimen natural.** La línea azul de trazos y puntos indica la divisoria hidrológica, la roja de trazos la divisoria hidrogeológica y las flechas el sentido del flujo subterráneo. Las flechas rellenas indican las transferencias subterráneas medias entre demarcaciones.

En la figura 6.1 se puede observar como la trayectoria de las direcciones de flujo está condicionada por las descargas a los cursos fluviales y transferencias subterráneas fuera de las MASCHs, también como la posición de las divisorias hidrográfica e hidrogeológica son claramente distintas: la hidrogeológica en la Sierra de las Albuñuelas se desplaza hacia el Oeste y en la Sierra Tejeda hacia el Este, en ambos casos hacia la DHG.

## 7. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN ALTERADO

El funcionamiento hidrogeológico en régimen alterado de las MASCHs (periodo 1985/86-2014/15), así como la evolución histórica de sus variables de estado, se ha simulado con la inclusión de las presiones soportadas por el sistema debidas a los bombeos.

En la tabla 7.1 se muestra el balance hídrico de la MASCH Tejeda septentrional en régimen influenciado para el periodo 1985/86-2014/15 por demarcaciones hidrográficas. Dicho balance es ligeramente diferente del obtenido en régimen natural debido a la variación en el almacenamiento (0,18 hm<sup>3</sup>/a), provocada por la respuesta inercial de las salidas naturales ante la variación interanual de las precipitaciones. La transferencia desde la DHG hacia la DHCMA es la misma que la resultante del balance en régimen natural.

**Tabla 7.1. Balance hídrico por demarcaciones hidrográficas de la MASCH Tejeda septentrional en régimen influenciado. Periodo 1985/86-2014/15**

Demarcación hidrográfica	Recarga precip. (hm <sup>3</sup> /a)	Variación del almacenamiento (hm <sup>3</sup> /a)	Aportes totales (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas ríos (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas drenes (hm <sup>3</sup> /a)	Explotación (hm <sup>3</sup> /a)	Total salidas (hm <sup>3</sup> /a)	Transf. Subt. <sup>(1)</sup> (hm <sup>3</sup> /a)
<b>Guadalquivir</b>	16,95	0,11	17,06	7,00	7,03	0	14,03	-3,03
<b>Cuencas mediterráneas andaluzas</b>	10,49	0,07	10,56	0	13,59	0	13,59	3,03
<b>Total MASCH</b>	<b>27,44</b>	<b>0,18</b>	<b>27,62</b>	<b>7,00</b>	<b>20,62</b>	<b>0</b>	<b>27,62</b>	<b>0</b>

(1) Valores positivos corresponden a entradas y negativos a salidas

Al igual que en la anterior, en la tabla 7.2 se muestra el balance hídrico correspondiente a la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas. Dicho balance es también algo diferente del obtenido en régimen natural, en este caso debido fundamentalmente a las explotaciones (6,4 hm<sup>3</sup>/a), que suponen el 7,5 % de la recarga, lo que ha provocado, por un lado que las descargas naturales disminuyan, pasan de 85,34 a 84,28 hm<sup>3</sup>/a (poco más de 1 hm<sup>3</sup>/a) y, por otro que tenga lugar una variación decreciente del almacenamiento de unos 5,33 hm<sup>3</sup>/a. En los 30 años simulados la disminución del almacenamiento se cuantifica en 160 hm<sup>3</sup>, casi la totalidad en la DHCMA (99%). También la transferencia desde la DHG hacia la DHCMA aumenta ligeramente, 0,02 hm<sup>3</sup>/a.

**Tabla 7.2. Balance hídrico por demarcaciones hidrográficas de la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas en régimen influenciado. Periodo 1985/86-2014/15**

Demar. hidrográfica	Recarga precip. (hm <sup>3</sup> /a)	Variación del almacenamiento (hm <sup>3</sup> /a)	Aportes totales (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas ríos (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas drenes (hm <sup>3</sup> /a)	Explotación (hm <sup>3</sup> /a)	Total salidas (hm <sup>3</sup> /a)	Transf. Subt. <sup>(1)</sup> (hm <sup>3</sup> /a)
<b>Guadalquivir</b>	31,90	0,03	31,93	8,37	14,43	0	22,80	-9.13
<b>Cuencas mediterráneas andaluzas</b>	53,44	5,30	58,75	53,86	7,62	6,40	67,88	9.13
<b>Total MASCH</b>	<b>85,34</b>	<b>5,33</b>	<b>90,68</b>	<b>62,23</b>	<b>22,05</b>	<b>6,40</b>	<b>90,68</b>	<b>0</b>

(1) Valores positivos corresponden a entradas y negativos a salidas



La contribución en términos porcentuales de las principales magnitudes del balance hídrico para las dos MASCH (periodo 1985/86-2014/15) discretizadas por demarcación hidrográficas se recogen en la tabla 7.3 y 7.4.

**Tabla 7.3. Porcentajes de recarga, tasa de explotación y variación del almacenamiento por demarcaciones hidrográficas en régimen influenciado (1985/86-2014/15) para la MASCH Tejeda septentrional.**

Demarcación hidrográfica	Total recarga (%)	Tasa de explotación <sup>(1)</sup> (%)	Variación del almacenamiento <sup>(2)</sup> (%)
Guadalquivir	61,8	0	62,3
Cuencas mediterráneas andaluzas	38,2	0	37,7
<b>Total MASCH</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>

(1) % de las extracciones respecto a la recarga generada en cada demarcación hidrográfica

(2) % reducción de la variación del almacenamiento por demarcación hidrográfica respecto a la reducción total en la MASCH

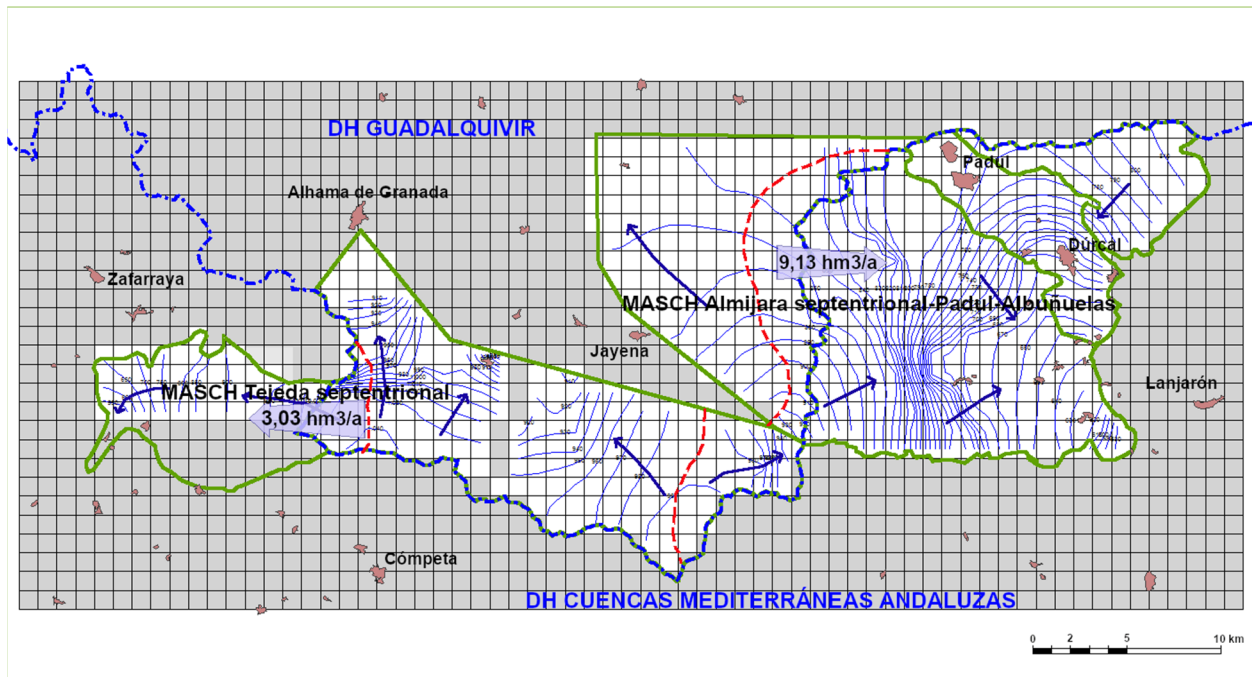
**Tabla 7.4. Porcentajes de recarga, tasa de explotación y variación del almacenamiento por demarcaciones hidrográficas en régimen influenciado (1985/86-2014/15) para la MASCH Aljara septentrional-Padul-Albuñuelas.**

Demarcación hidrográfica	Total recarga (%)	Tasa de explotación <sup>(1)</sup> (%)	Variación del almacenamiento <sup>(2)</sup> (%)
Guadalquivir	37,4	0	0,6
Cuencas mediterráneas andaluzas	62,6	12,0	99,4
<b>Total MASCH</b>	<b>100</b>	<b>7,5</b>	<b>100</b>

(1) % de las extracciones respecto a la recarga generada en cada demarcación hidrográfica

(2) % reducción de la variación del almacenamiento por demarcación hidrográfica respecto a la reducción total en la MASCH

Como se puede observar en la figura 7.1, el trazado de las isopiezas en régimen influenciado al final del periodo (septiembre del 2015) es prácticamente idéntico al que tiene lugar en régimen natural (Figura 6.1), tan solo, debido al efecto de los bombeos, en la Depresión del Padul desciende el nivel piezométrico entre 5 y 10 metros. Debido a estos bombeos, la transferencia en la MASCH Aljara septentrional-Padul-Albuñuelas desde la DHG hacia la DHCMA aumenta ligeramente, pasa de 9,11 a 9,13 hm<sup>3</sup>/a.



**Figura 7.1. Funcionamiento hidrodinámico de las MASCHs en régimen influenciado. La línea azul de trazos y puntos indica la divisoria hidrológica, la roja de trazos la divisoria hidrogeológica y las flechas el sentido del flujo subterráneo. Las flechas rellenas indican las transferencias subterráneas medias entre demarcaciones.**

## 8. BALANCE HÍDRICO SUBTERRÁNEO SEGÚN DIVISORIA HIDROGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA

Desde un punto de vista estrictamente normativo la evaluación de los recursos hídricos subterráneos disponibles de una masa de agua subterránea, independientemente de que aquella presente continuidad hidrogeológica o no con otra localizada en un ámbito de planificación diferente, responde a la directriz aportada en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2008) -apartado 1.2-55- donde se establece que los recursos disponibles de una masa de agua subterránea se determinarán a partir del *valor medio interanual de la tasa de recarga total de la masa de agua subterránea, menos el flujo interanual medio requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica para el agua superficial asociada, para evitar cualquier disminución significativa en el estado ecológico de tales aguas, y cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados.*

Estimar la tasa de recarga de un acuífero -especialmente la que procede de la precipitación- es una operación incierta e imprecisa, que depende de multitud de factores, como se viene exponiendo en diversos documentos técnico-científicos desde hace muchos años (Lerner *et al.*, 1990; Custodio *et al.*, 1997; Healy, 2010). Prueba de ello son los diferentes resultados que han proporcionado las distintas metodologías que se han aplicado en el presente estudio, aunque, evidentemente, siempre ofrecerán una mayor confianza y certidumbre aquellas estimaciones que pueden someterse a una calibración mediante contraste con los datos reales tomados y medidos en campo o laboratorio. Este es el caso de metodologías como los códigos BALAN y RENATA.

Por otro lado, en el apartado 1.2-55 de la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2008), también se hace alusión a las restricciones ambientales asociadas a las aguas subterráneas. A este respecto, en el texto refundido de la Ley de Aguas, en su apartado 5.2.4.1 “Estado cuantitativo”, se *dispone que las restricciones ambientales, asociadas a las aguas subterráneas, corresponden a los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos y para prevenir los efectos negativos causados por la intrusión marina. En el régimen de caudales ecológicos se incluye tanto los caudales necesarios para mantener el caudal base en las masas superficiales categoría ríos como los requerimientos hídricos necesarios para la conservación de los lagos y zonas húmedas. En lo que se refiere a la intrusión marina considera los volúmenes mínimos necesarios para evitar el avance de la cuña salina.*

La situación que presentan la MASCH Tejeda septentrional y la MASCH Almiar septentrional-Padul-Albuñuelas puede considerarse excedentaria. Tan solo hay explotación en la segunda y, en ella, los bombeos existentes son inferiores a las entradas medias estimadas (7,5 %).

En las tablas 8.1 y 8.2 se muestra una comparativa de la distribución de la recarga en régimen natural (sin bombeos) y en régimen alterado (con bombeos) para las dos MASCHs, según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a las demarcaciones de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas y del Guadalquivir. De la observación de las tablas se desprende que la recarga, tanto en régimen natural como influenciado, se distribuye de diferente manera según se considere la cuenca hidrológica o la hidrogeológica.

**Tabla 8.1. Comparativa de la distribución de recarga en régimen natural y en régimen influenciado en la MASCH Tejeda septentrional según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a la Cuenca del Guadalquivir y las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.**

Régimen de funcionamiento hídrico	Distribución según	Cuenca Guadalquivir (hm <sup>3</sup> /a)	Cuencas Mediterráneas Andaluzas (hm <sup>3</sup> /a)	MASCH (hm <sup>3</sup> /a)
<b>Natural</b>	Divisoria hidrográfica	16,95 (61,8%)	10,49 (38,2%)	<b>27,44</b>
	Divisoria hidrogeológica	13,92 (50,7%)	13,52 (49,3%)	
<b>Influenciado</b>	Divisoria hidrográfica	16,95 (61,8%)	10,49 (38,2%)	<b>27,44</b>
	Divisoria hidrogeológica	13,92 (50,7%)	13,52 (49,3%)	

(a) De acuerdo con la IPH (2008) recarga es equivalente a recurso hídrico renovable.

**Tabla 8.2. Comparativa de la distribución de la recarga en régimen natural y en régimen influenciado en la MASCH Aljara septentrional-Padul-Albuñuelas según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a la Cuenca del Guadalquivir y las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.**

Régimen de funcionamiento hídrico	Distribución de recursos según	Cuenca Guadalquivir (hm <sup>3</sup> /a)	Cuencas Mediterráneas Andaluzas (hm <sup>3</sup> /a)	MASCH (hm <sup>3</sup> /a)
<b>Natural</b>	Divisoria hidrográfica	31,90 (37,4%)	53,44 (62,6%)	<b>85,34</b>
	Divisoria hidrogeológica	22,79 (26,7%)	62,55 (73,3%)	
<b>Influenciado</b>	Divisoria hidrográfica	31,90 (37,4%)	53,44 (62,6%)	<b>85,34</b>
	Divisoria hidrogeológica	22,77 (26,7%)	62,57 (73,3%)	

(a) De acuerdo con la IPH (2008) recarga es equivalente a recurso hídrico renovable.

Dado que no se han considerado retornos de riego, la recarga para las MASCHs en régimen natural e influenciado es la misma.

En la MASCH Tejeda septentrional, atendiendo a la divisoria hidrográfica, el 61,8 % de los recursos se genera en el ámbito de la DHGy el 38,2 % restante en la DHCMA. Si se atiende a la divisoria hidrogeológica, las cifras cambian un poco, ya que esta se desplaza respecto a la hidrológica hacia la DHCMA (Figura 8.1), así, tanto en régimen natural como influenciado, el 50,7 % se genera en la DHG y el 49,3 % en la DHCMA. La diferencia entre usar una divisoria u otra son unos 3,03 hm<sup>3</sup>/a que se transfieren de media desde la DHG a la DHCMA.

Del mismo modo, en la MASCH Aljara septentrional-Padul-Albuñuelas, teniendo en cuenta la divisoria hidrológica el 62,6 % de los recursos se genera en la DHCMA y el 37,4 % en la DHG. Si se considera la divisoria hidrogeológica, las cifras cambian ya que esta se desplaza respecto a la hidrológica hacia la DHCMA (Figura 8.1), así, el 73,3 % se genera en la DHCMA y el 26,7 % en la DHG. La diferencia entre usar una divisoria u otra son los 9,11 hm<sup>3</sup>/a en régimen natural y los 9,13 hm<sup>3</sup>/a en régimen influenciado que se transfieren desde la DHG a la DHCMA.

## 9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los principales resultados y conclusiones obtenidas de los trabajos llevados a cabo se exponen en los siguientes puntos.

- Existen masas de agua subterránea, colindantes entre dos o más demarcaciones hidrográficas, cuya realidad física respecto de su conexión hídrica y funcionamiento hidrogeológico escapa a sus límites administrativos, por lo que resulta necesario afrontar su estudio y su gestión desde la óptica de su realidad hidrogeológica. Este es el caso de las masas de agua subterránea que se contemplan en el presente informe, donde no tiene sentido proceder a estimar los recursos de agua subterránea de manera independiente, unilateral y separadamente. A dichas masas se las ha agrupado bajo la denominación de “masas de agua subterránea que presentan continuidad hidrogeológica” (MASCH).
- Las masas de agua subterránea con continuidad hidrogeológica denominadas como **Tejeda septentrional y Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas** engloban parte de la MASb Tejeda - Almijara - Las Guájaras (ES050MSBT000054200) de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG) y las MASb Sierra del Padul Sur (ES060MSBT060-017), Depresión de Padul (ES060MSBT060-023), Sierra de Albuñuelas (ES060MSBT060-061), y Tejeda (ES060MSBT060-064) pertenecientes a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA). Las 5 MASb comparten formaciones acuíferas de naturaleza esencialmente carbonática, constituidas por mármoles y dolomías de edad triásica.
- La conexión entre las MASb de ambas demarcaciones se produce, por una parte, al Este, en la MASCH Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas a lo largo de unos 20 km y, por otra, al Oeste, en la MASCH Tejeda septentrional, a lo largo de 2-3 km.
- Se ha descartado la conexión entre las MASCH Tejeda septentrional y Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas, separadas por materiales esquistosos aflorantes paralelos al río Cacín, por lo que hay que considerarlas como MASCH independientes con distinto comportamiento hidráulico. También se ha descartado la conexión hacia el Sur entre las MASb de la DHG y DHCMA, así las MASb de Almijara, Sierra de las Alberquillas y Sierra de los Guájares, pertenecientes a la DHCMA, quedarían fuera de las MASCHs descritas.
- En definitiva, se tiene que el conjunto formado por las MASb de Tejera-Almijara-Las Guájaras; Sierras de Tejera-Almijara-Las Guájaras; Sierra de Padul Sur y Sierra de Albuñuelas dan lugar a dos Masas de agua subterránea compartidas o con continuidad hidrogeológica (**Tejeda septentrional y Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas**) y a cuatro MASb localizadas exclusivamente en las DHCMA. Estas son las siguientes: **Tejera meridional; Almijara meridional; Sierra de las Guájaras-Río de la Toba; y acuífero carbonático de la cabecera del río Verde.**
- La formación acuífera principal son los mármoles y dolomías de edad triásica, con hasta 800 metros de espesor, permeables debido a los procesos de fracturación y, en menor medida de karstificación. En la parte oriental (Depresión de Padul), sobre estas rocas y en continuidad hidráulica, aparecen formaciones neógenas con espesores y grados de permeabilidad variables.
- La precipitación media estimada para las MASCHs en el periodo 1985/86-2014/15 es de 539 mm y varía entre 175 y 1.750 mm.
- La recarga a los acuíferos se produce por infiltración directa del agua de lluvia sobre los materiales permeables carbonatados y detríticos. Tan sólo una fracción muy pequeña de las entradas se debe al agua de escorrentía superficial generada en la cuenca vertiente a la

depresión de Padul, que termina infiltrándose de manera difusa en los depósitos detríticos. Esta cuenca endorreica de origen tectónico y 50 km<sup>2</sup> de superficie vertiente es drenada de manera artificial por la zanja denominada Madre de la Laguna. La mayor parte de la descarga ocurre de forma difusa hacia los numerosos cauces que intersectan las rocas permeables y que actúan como ejes preferenciales de drenaje. También de manera puntual por varios manantiales permanentes ubicados en los bordes de los diferentes acuíferos. Las extracciones por bombeo se concentran en la depresión de Padul y en la parte oriental de la sierra de Albuñuelas y representan aproximadamente un 6 % de los recursos medios. Las salidas se completan con las descargas ocultas que deben producirse hacia la depresión de Granada.

- Los recursos renovables de la MASCH Tejeda septentrional en régimen natural se estiman en 27,44 hm<sup>3</sup>/a (periodo 1985/86 a 2014/15), de ellos 16,95 hm<sup>3</sup>/a (61,8 %) se generan en territorio adscrito a la DHG y 10,49 hm<sup>3</sup>/a (38,2 %) en el administrado por la DHCMA.
- Los recursos renovables de la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas en régimen natural se estiman en 85,34 hm<sup>3</sup>/a (periodo 1985/86 a 2014/15), de ellos 31,90 hm<sup>3</sup>/a (37,4 %) se generan en territorio adscrito a la DHG y 53,44 hm<sup>3</sup>/a (62,6 %) en el administrado por la DHCMA.
- Las extracciones medias, aunque de difícil cuantificación por la escasez de datos, se han estimado a partir de datos bibliográficos en 6,4 hm<sup>3</sup>/a de media para el periodo 1985/86-2016/17, solo en la DHCMA y en la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas. La tasa de explotación global en la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas en los 30 años analizados es del 7,5 %. En la MASCH Tejeda septentrional no se han considerado explotaciones.
- En régimen influenciado (alterado por las extracciones) el diseño de las isopiezas y direcciones de flujo es casi idéntico al de régimen natural, debido a que las extracciones por bombeo, que se concentran en la parte oriental de la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas, suponen menos del 8 % de sus recursos. A escala global de toda la MASCH, esta es claramente excedentaria.
- El régimen de explotación que se realiza en la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas es perfectamente sostenible, ya que presenta un grado de explotación reducido (7,5 %) y una afección a las descargas naturales por ríos y manantiales de tan solo el 1,2 %. El decrecimiento del almacenamiento medio, debido al bombeo, es de unos 5,37 hm<sup>3</sup>/a, la mayor parte, 99 %, lógicamente, en la DHCMA, donde se produce la explotación.
- La transferencia de agua subterránea entre demarcaciones, según el criterio de la divisoria hidrológica, se produce desde la DHG hacia la DHCMA. En la MASCH Tejeda septentrional 3,03 hm<sup>3</sup>/a, tanto en régimen natural como influenciado y en la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas 9,11 hm<sup>3</sup>/a en régimen natural y 9,13 hm<sup>3</sup>/a en influenciado. Con la divisoria hidrogeológica se compensan estas transferencias al reasignarse parte de territorio, aproximadamente 80 km<sup>2</sup>, de la DHG a la DHCMA: unos 15 km<sup>2</sup> en la MASCH Tejeda septentrional y unos 65 km<sup>2</sup> en la MASCH Almirajara septentrional-Padul-Albuñuelas.

## REFERENCIAS

- Aldaya, F.; García-Dueñas, V. y Navarro Vila, F. (1979): Los Mantos Alpujárrides del tercio central de las Cordilleras Béticas. Ensayo de correlación tectónica de los Alpujárrides. *Acta Geológica Hispánica*, 14: 154–166.
- Andreo, B. (1997): Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España). Tesis Doctoral. Confederación Hidrográfica del Sur de España y Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga (España). 489 pp.
- Andreo, B. y Carrasco, F. (1996): Estudio hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja. En: *Geología de la Cueva de Nerja*, tomo 3, pp. 163 – 187. ISBN: 84-604-6079-7.
- Andreo, B., Barberá, J.A., Mudarra, M., Marín, A.I., García-Orellana, J., Rodellas, V. y Pérez, I. (2018): A multi-method approach for groundwater resource assessment in coastal carbonate (karst) aquifers: the case study of Sierra Almajara (southern Spain). *Hydrogeology Journal*, 26 (1): 41-56. DOI: 10.1007/s10040-017-1652-7.
- Andreo, B., Vías J.M., Durán, J.J., Jiménez, P., López-Geta, J.A. y Carrasco, F. (2008): Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16: 911-925.
- Benavente, J. (1981): Caracterización hidrológica del alto río Verde (Otívar, Granada). En: *Simposio del Agua en Andalucía*, tomo II: 565 – 578. Granada.
- Benavente, J. (1982): Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos de la provincia de Granada. Tesis doctoral. Universidad de Granada. 605 pp.
- Benavente, J. y Almécija, C. (1993): Estudio geomorfológico del entorno de la Cueva de Nerja. En: *Geología de la Cueva de Nerja. Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, 3: pp. 117-158. Patronato de la Cueva de Nerja.
- Benavente, J. y Romero, A. (1981): Investigaciones hidrogeológicas en el extremo oriental de la Sierra Almajara (Granada). En: *Simposio del Agua en Andalucía*, tomo I: 221 – 232. Granada.
- Benavente, J., El Mabrouki, K. y Castillo, A. (2001): Reconocimiento hidrogeológico de la cuenca vertiente al embalse de Alhama (Norte de Sierra Tejeda; Granada). En: *V Simposio Agua en Andalucía*: pp. 33-41.
- Benavente, J. e Hidalgo, M.C. (2002): Análisis de la descarga del acuífero carbonatado de Sierra Almajara en un periodo de contrastes hidrológicos. En: Carrasco, F., Durán, J.J. y Andreo, B. (Eds.) *Karst and Environment*, pp. 237-242.
- Calvache, M. L., Viseras, C., Fernandez, J. (1997): Controls on fan development-evidence from fan morphometry and sedimentology; Sierra Nevada, SE Spain. *Geomorphology*, 21, 69-84.
- Carrasco, F.; Andreo, B.; Liñán, C. y Vadillo, I. (1996): Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja (Provincia de Málaga). En: *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, pp. 249-263.
- Castillo, A., Benavente, J., Fernández-Rubio, R. y Pulido, A. (1984): Evolución y ámbito hidrogeológico de la laguna de Padul (Granada). En: *Las zonas húmedas en Andalucía*, 87-100. ISBN: 84-7433-283-4. Ed. Serv. Publicaciones del MOPU (Monografías de la DGMA).



- Castillo, A. y Fernández-Rubio, R. (1984): Hidrogeología de la cuenca vertiente a la Depresión de Padul (Granada). En: I Congreso Español de Geología, IV: 109-121.
- Castillo, E.; Gollonet, F.J. y Delgado, J. (1986): Características hidrodinámicas de materiales carbonáticos alpujárrides en el sector Nerja – La Herradura (Granada). En: II Simposio sobre el Agua en Andalucía, 2: pp. 267-276.
- Castillo, A. y Carmona, J. (2000): Reconocimiento hidrogeológico de la Sierra de la Almijara meridional. *Geotemas*, 1 (2): 63-68.
- Castillo, A., Carmona, J. y Benavente, J. (2001): Cuantificación de los recursos hídricos en la vertiente meridional del Parque Natural de Sierra Almijara (Málaga). *Geogaceta*, 29: 33-36.
- CEHIUMA-IGME (2017): Análisis de las características hidrogeológicas de los principales manantiales y estudio isotópico ( $\delta^{34}\text{S}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ) de los acuíferos carbonáticos de las sierras Tejeda, Almijara, Guájares y Albuñuelas. Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga – Instituto Geológico y Minero de España. Informe inédito. 50 pp.
- CHG-IGME (2001a): Norma de explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.42 (Tejeda-Almijara-Las Guájares). Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Instituto Geológico y Minero de España, 39 pp.
- CHG-IGME (2001b): Norma de explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.65 (Sierra de Padul). Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Instituto Geológico y Minero de España, 32 pp.
- CHS-IGME-GHUMA (2004): Redefinición de las unidades hidrogeológicas de la Cuenca Sur. Instituto Geológico y Minero de España; Confederación Hidrográfica del Sur; Universidad de Málaga, Madrid (España). 219 pp.
- CMA-GHUMA (2006): Definición del contexto hidrogeológico de humedales andaluces. V. Lagunas de Granada. Consejería de Medio Ambiente – Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Informe inédito. 56 pp.
- Delgado, F., Estévez, A., Martín, J.M. y Martín-Algarra, A. (1981): Observaciones sobre la estratigrafía de la formación carbonatada de los mantos alpujárrides (Cordillera Bética). *Estudios Geológicos*, 37: 45 - 57.
- Diputación Provincial de Granada - ITGE (1990): Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Granada. Diputación Provincial de Granada - ITGE, Granada, 107 pp.
- Diputación Provincial de Málaga (1988): Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga. Diputación Provincial de Málaga, 151 pp.
- Durán-Valsero, J.J. (1996): Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: Contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental. Tesis doctoral. Univ. Complutense. 409 pp.
- ENADIMSA (1980): Investigación de carbón en Arenas del Rey y Padul (Padul). Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras S.A. Informe inédito.
- Espejo, J.M.; Fernández, M.C. y Linares, L. (1988): Inventario de surgencias de aguas de origen continental en el litoral mediterráneo del Sur de España, mediante utilización de sensores térmicos aeroportados con apoyo de técnicas oceanográficas e hidrogeológicas. En: *Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros. TIAC'88*. IGME, Madrid, pp 191–228.

- Fernández del Río, G., Castillo, E., Delgado, J. y Villalobos, M. (1992): Evaluación de recursos hídricos de las sierras Tejeda y Almijara (Málaga y Granada). En: Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, XV: pp. 241-256.
- GHUMA (1997): Aprovechamiento hidrogeológico de la Axarquía. Málaga. Parte de sondeos. Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Informe inédito. 17 pp másanejos.
- Hargreaves, G.H y Samani, Z.A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1, 96–99.
- IARA (1991): Investigación de los acuíferos de la sierra de Almijara Axarquía-este (Málaga). Instituto Andaluz de Reforma Agraria. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Informe inédito. 203 pp.
- IGME-ADARO (1975): Estudio Hidrogeológico de la cuenca Sur. Zona comprendida entre su límite occidental y el río Adra. Sistema Tejeda-Almijara. Instituto Geológico y Minero de España. Informe inédito. 44 pp.
- IGME (1977): Informe hidrogeológico de la depresión de Padul. Informe inédito. 17 pp.
- IGME (1983): Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España (sector occidental) Sistema acuífero nº 41. Calizas y dolomías triásicas de la sSierra de Almijara-Sierra de Lújar. Informe técnico nº 10. Instituto Geológico y Minero de España. Informe inédito.
- IGME-DPM-UMA (2007): Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga. Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Málaga; Universidad de Málaga. Madrid. 3 tomos.
- INTECSA-INARSA (2009): Investigación hidrogeológica del sector meridional de Sierra Almijara (Nerja-La Herradura) para evaluación de la descarga submarina. Intecsa-Inarsa - Cuenca Mediterránea Andaluza (Agencia Andaluza del Agua) - Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Informe inédito. 145 pp.
- IGME-AAA-EGMASA (2009): Propuesta de uso sostenible de los sectores acuíferos (MASb 06.23, 06.17, 06.61) relacionados con la depresión de Padul con objeto de mantener los ecosistemas asociados al humedal-turbera. Instituto Geológico y Minero de España-Agencia Andaluza del Agua-EGMASA. Informe inédito. 77 pp.
- IGME-DGA (2010). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica. Masa de agua subterránea 051.042 Tejeda-Almijara-Las Guájaras. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Asistencia técnica para el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 53 pp.
- IGME - Diputación Provincial de Alicante (2012): RENATA: Recarga Natural a los acuíferos.
- IGME-GHUMA (2003): Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonatados: aplicación a la Cordillera Bética. Instituto Geológico y Minero de España. Informe inédito. 3 tomos.
- ITGE (1999): Plan de integración de los recursos hídricos subterráneos en los sistemas de abastecimiento público de Andalucía. Sector de los acuíferos de Padul-La Peza y Albuñuelas. Instituto tecnológico Geominero de España. Informe inédito. 199 pp.

- ITGE-Junta de Andalucía (1998): Atlas Hidrogeológico de Andalucía. Instituto Tecnológico Geominero de España; Junta de Andalucía. 216 pp.
- Jódar, J., Cabrera, J.A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Lambán, L.J., Herrera, C. y Custodio, E. (2017): Groundwater discharge in high-mountain watersheds: A valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Bérchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 593-594: 760-772. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.190.
- Kessler, H. (1967): Water balance investigations in the Karstic regions of Hungary. Symposium on Hydrology of Fractured Rocks, Dubrovnik (Yugoslavia), AIHS-UNESCO, 1: 91-105.
- López-Chicano, M. y Pulido-Bosch, A. (1996): Observaciones hidrogeológicas e hidroquímicas sobre los manantiales termominerales de Alhama de Granada (Cordilleras Béticas. España). *Geogaceta*, 19: 134-136.
- López-Chicano, M., Cerón, J.C., Vallejos, A. y Pulido-Bosch, A. (2001): Geochemistry of thermal springs, Alhama de Granada (southern Spain). *Applied Geochemistry*, 16 (9-10): 1153-1163.
- Marín, A.I. (2009): Los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la evaluación de recursos hídricos y a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos carbonatados. Caso de la Alta Cadena (provincia de Málaga). Tesis de licenciatura, Universidad de Málaga (España). 131 pp.
- Montiel, D., Dimova, N., Andreo, B., Prieto, J., García-Orellana, J. y Rodellas, V. (2018): Assessing submarine groundwater discharge (SGD) and nitrate fluxes in highly heterogeneous coastal karst aquifers: Challenges and solutions. *Journal of Hydrology*, 557: 222-242. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.12.036.
- MOPU-IGME (1988): Delimitación de las Unidades Hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características. Estudio 07/88, Memoria General. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Instituto Geológico y Minero de España. 122 pp.
- Mudarra, M., Andreo, B., Barberá, J.A. y Mudry, J. (2014). Hydrochemical dynamics of TOC and NO<sub>3</sub>- contents as natural tracers of infiltration in karst aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 71(2), 507-523.
- Ollero-Robles, E.; García-García, J.L. y Alcaín-Martínez, G. (1988): Características hidrogeológicas del acuífero carbonatado costero de Las Alberquillas. En: *Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros*, TIAC'88. IGME, Madrid, pp 439–453.
- Padilla, A. y Delgado, J. (2005). Tratamiento y gestión de series de datos hidrológicos. Manual de Usuario. TRASERO: Diputación Provincial de Alicante. 49 pp.
- Padilla, A. y Delgado, J. (2013): Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Programa TRASERO 2.0. Departamento de ciclo hídrico, Diputación Provincial de Alicante, 87 pp.
- Pérez-Ramos, I., Jiménez-Gavilán, P., Andreo, B. y Carrasco, F. (2004): Estudio de la descarga de la vertiente meridional de Sierra Tejeda (Málaga) mediante el análisis correlatorio y espectral. *Geogaceta*, 35: 163-166.
- Pérez-Ramos, I.; Pistre, S.; Andreo, B. y Sanz de Galdeano, C. (2005): Estudio de la fracturación en el sector meridional de Sierra Almijara (provincia de Málaga). *Geogaceta*, 37: 7-10.

- Pérez-Ramos, I. y Andreo, B. (2007a): Sierra Tejeda (M.A.S. 060.064). En: Durán, J.J. (Coord. general), Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga, tomo 2, 137-142. Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Málaga, Madrid. 220 pp.
- Pérez-Ramos, I. y Andreo, B. (2007b): Sierra Almijara (M.A.S. 060.024)-Alberquillas (M.A.S. 060.063). En: Durán, J.J. (Coord. general), Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga, tomo 2, 143-148. Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Málaga, Madrid. 220 pp.
- Pulido, A. (1980): Datos hidrogeológicos sobre el borde occidental de Sierra Nevada. Fundación Juan March. Serie Universitaria. 47 pp. ISBN: 84-7075-168-9.
- Reyes-Carmona, C., Jabaloy-Sánchez, A. y Galve-Arnedo, J.P. (2018): Estructura del graben asimétrico de Albuñuelas (Granada). *Geogaceta*, 64: 7 – 10.
- Romero, A. (1977): Estudio Hidrogeológico de la cuenca del río de las Guájaras (Granada). Tesis de licenciatura (inédita). Universidad de Granada. 185 pp.
- Sanz de Galdeano, C. (1990): Estructura y estratigrafía de la sierra de Los Guájares y sectores próximos (Conjunto Alpujárride, Cordillera Bética). *Estudios Geológicos*, 46: 123-134.
- Sanz de Galdeano, C. y López-Garrido, A.C. (1999): Estratigrafía y estructura de las unidades alpujárrides en el borde occidental de Sierra Nevada (Granada, España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 12(2): 187–198.
- Sanz de Galdeano, C. y López-Garrido, A.C. (2003): Revisión de las unidades alpujárrides de las sierras de Tejeda, Almijara y Guájaras (sector central de la Zona Interna Bética, provincias de Granada y Málaga). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 16(3-4): 135–149.
- Sanz de Galdeano, C., Prieto-Mera, J. y Andreo, B. (2015): Structure of the Alpujárride Complex and hydrogeological observations to the NW of Sierra Tejeda (Granada and Malaga provinces, Betic Internal Zone, Spain). *Estudios Geológicos*, 75(1): e090. <https://doi.org/10.3989/egeol.43395.509>.
- SGOP (1991): Estudio hidrogeológico de las Sierras Tejeda, Almijara y Guájaras (Málaga y Granada). Servicio Geológico de Obras Públicas. Informe inédito. 245 pp.
- SGOP (1992): Estudio hidrogeológico de la Sierra de Albuñuelas (Granada). Dirección General de Obras Hidráulicas. Servicio Geológico de Obras Públicas. Informe inédito.
- Témez, J. (1978): Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España.
- Thorntwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. y Jiménez, P. (2004): The COP method. F. Zwahlen (Ed.) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate aquifers*, Final Report of COST Action 620. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; Brussels, Luxemburg, 163-172.

## ANEXOS

**ANEXO I**  
**BALANCES HÍDRICOS GENERADOS POR RENATA**

**BALANCE MASCH TEJEDA SEPTENTRIONAL**



Total MASCH Tejeda septentrional							
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	58,20	-20,68	-6,96	0,00	0,00	23,62	3,97
86-87	80,64	-20,74	-6,96	0,00	0,00	43,14	-15,41
87-88	68,12	-20,72	-6,99	0,00	0,00	28,80	-1,11
88-89	77,86	-20,72	-6,97	0,00	0,00	27,59	0,09
89-90	146,87	-22,08	-7,00	0,00	0,00	87,73	-58,70
90-91	66,88	-21,02	-7,03	0,00	0,00	25,26	2,73
91-92	61,07	-20,86	-7,04	0,00	0,00	22,56	5,33
92-93	44,39	-20,47	-7,01	0,00	0,00	10,25	17,19
93-94	65,68	-20,48	-7,00	0,00	0,00	27,12	0,35
94-95	28,03	-20,08	-6,98	0,00	0,00	2,58	24,44
95-96	112,69	-20,97	-7,02	0,00	0,00	70,65	-42,71
96-97	144,65	-21,86	-7,08	0,00	0,00	99,58	-70,67
97-98	82,13	-21,65	-7,14	0,00	0,00	45,86	-17,07
98-99	29,72	-20,83	-7,15	0,00	0,00	6,83	21,13
99-00	61,97	-20,74	-7,15	0,00	0,00	21,21	6,64
00-01	58,20	-20,57	-7,13	0,00	0,00	21,74	5,96
01-02	42,77	-20,39	-7,12	0,00	0,00	10,95	16,54
02-03	53,46	-20,43	-7,10	0,00	0,00	20,87	6,60
03-04	68,91	-20,63	-7,11	0,00	0,00	29,20	-1,49
04-05	25,77	-20,20	-7,08	0,00	0,00	7,19	20,05
05-06	42,86	-19,98	-7,05	0,00	0,00	4,57	22,43
06-07	45,79	-19,86	-7,02	0,00	0,00	7,48	19,34
07-08	41,06	-19,81	-7,01	0,00	0,00	3,58	23,23
08-09	55,19	-20,05	-6,97	0,00	0,00	24,10	2,89
09-10	89,87	-20,71	-7,00	0,00	0,00	56,63	-28,96
10-11	71,94	-20,70	-7,02	0,00	0,00	31,78	-4,07
11-12	41,14	-20,37	-7,03	0,00	0,00	13,15	14,26
12-13	72,78	-20,61	-7,02	0,00	0,00	33,82	-6,20
13-14	34,55	-20,15	-7,00	0,00	0,00	8,13	18,98
14-15	46,87	-19,97	-6,98	0,00	0,00	7,11	19,78
TOTAL	1920,07	-618,35	-211,11	0,00	0,00	823,10	5,51
MEDIA	64,00	-20,61	-7,04	0,00	0,00	27,44	0,18

Demarcación Hidrográfica Guadalquivir (MASb Tejeda-Almijara-Las Guájaras)							
Fecha	Precipitación hm <sup>3</sup>	Dren/Manantial hm <sup>3</sup>	Ríos hm <sup>3</sup>	Nivel cte. hm <sup>3</sup>	Extracciones hm <sup>3</sup>	Infiltración hm <sup>3</sup>	Reservas hm <sup>3</sup>
85-86	31,87	-6,91	-6,96	0,00	0,00	9,13	7,72
86-87	54,30	-7,06	-6,96	0,00	0,00	29,62	-12,56
87-88	45,92	-7,10	-6,99	0,00	0,00	18,60	-1,50
88-89	47,11	-6,98	-6,97	0,00	0,00	14,44	2,54
89-90	92,91	-7,57	-7,00	0,00	0,00	54,56	-37,05
90-91	49,47	-7,32	-7,03	0,00	0,00	19,78	-2,50
91-92	36,95	-7,15	-7,04	0,00	0,00	12,46	4,73
92-93	27,51	-6,93	-7,01	0,00	0,00	5,61	11,30
93-94	47,11	-7,04	-7,00	0,00	0,00	20,07	-3,03
94-95	18,70	-6,84	-6,98	0,00	0,00	1,75	15,07
95-96	77,11	-7,30	-7,02	0,00	0,00	48,88	-31,58
96-97	103,03	-7,90	-7,08	0,00	0,00	71,43	-53,55
97-98	54,04	-7,73	-7,14	0,00	0,00	30,41	-12,59
98-99	19,27	-7,30	-7,15	0,00	0,00	4,66	12,74
99-00	41,20	-7,22	-7,15	0,00	0,00	13,84	3,50
00-01	33,78	-7,03	-7,13	0,00	0,00	11,01	6,16
01-02	25,44	-6,91	-7,12	0,00	0,00	4,93	12,09
02-03	31,86	-6,90	-7,10	0,00	0,00	11,02	5,96
03-04	39,24	-6,89	-7,11	0,00	0,00	13,38	3,64
04-05	15,10	-6,77	-7,08	0,00	0,00	3,84	13,03
05-06	26,84	-6,69	-7,05	0,00	0,00	1,64	15,13
06-07	28,99	-6,63	-7,02	0,00	0,00	4,23	12,44
07-08	25,49	-6,67	-7,01	0,00	0,00	2,24	14,51
08-09	33,22	-6,72	-6,97	0,00	0,00	13,13	3,61
09-10	56,69	-7,03	-7,00	0,00	0,00	35,73	-18,70
10-11	44,44	-7,02	-7,02	0,00	0,00	17,83	-0,75
11-12	24,47	-6,87	-7,03	0,00	0,00	7,68	9,29
12-13	43,80	-6,93	-7,02	0,00	0,00	18,41	-1,43
13-14	21,64	-6,77	-7,00	0,00	0,00	4,65	12,15
14-15	30,59	-6,68	-6,98	0,00	0,00	3,61	13,07
TOTAL	1228,09	-210,87	-211,11	0,00	0,00	508,55	3,43
MEDIA	40,94	-7,03	-7,04	0,00	0,00	16,95	0,11

Demarcación Hidrográfica Cuencas Mediterráneas Andaluzas (MASb Sierra Tejeda)							
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	26,33	-13,77	0,00	0,00	0,00	14,49	-3,75
86-87	26,33	-13,68	0,00	0,00	0,00	13,52	-2,85
87-88	22,20	-13,62	0,00	0,00	0,00	10,20	0,39
88-89	30,75	-13,74	0,00	0,00	0,00	13,16	-2,45
89-90	53,97	-14,51	0,00	0,00	0,00	33,17	-21,66
90-91	17,41	-13,70	0,00	0,00	0,00	5,49	5,23
91-92	24,11	-13,71	0,00	0,00	0,00	10,10	0,60
92-93	16,88	-13,54	0,00	0,00	0,00	4,64	5,88
93-94	18,58	-13,45	0,00	0,00	0,00	7,05	3,38
94-95	9,33	-13,25	0,00	0,00	0,00	0,84	9,37
95-96	35,58	-13,67	0,00	0,00	0,00	21,78	-11,13
96-97	41,62	-13,96	0,00	0,00	0,00	28,15	-17,13
97-98	28,09	-13,91	0,00	0,00	0,00	15,45	-4,48
98-99	10,46	-13,53	0,00	0,00	0,00	2,17	8,39
99-00	20,77	-13,52	0,00	0,00	0,00	7,37	3,14
00-01	24,42	-13,54	0,00	0,00	0,00	10,73	-0,20
01-02	17,33	-13,48	0,00	0,00	0,00	6,01	4,45
02-03	21,60	-13,53	0,00	0,00	0,00	9,86	0,64
03-04	29,67	-13,75	0,00	0,00	0,00	15,82	-5,12
04-05	10,67	-13,43	0,00	0,00	0,00	3,35	7,03
05-06	16,02	-13,30	0,00	0,00	0,00	2,93	7,30
06-07	16,81	-13,23	0,00	0,00	0,00	3,26	6,89
07-08	15,58	-13,15	0,00	0,00	0,00	1,34	8,72
08-09	21,97	-13,34	0,00	0,00	0,00	10,97	-0,72
09-10	33,18	-13,69	0,00	0,00	0,00	20,90	-10,27
10-11	27,50	-13,67	0,00	0,00	0,00	13,94	-3,31
11-12	16,67	-13,50	0,00	0,00	0,00	5,47	4,97
12-13	28,98	-13,68	0,00	0,00	0,00	15,41	-4,77
13-14	12,91	-13,37	0,00	0,00	0,00	3,48	6,82
14-15	16,28	-13,29	0,00	0,00	0,00	3,50	6,72
TOTAL	691,99	-407,48	0,00	0,00	0,00	314,55	2,08
MEDIA	23,07	-13,58	0,00	0,00	0,00	10,48	0,07

**BALANCE MASCH ALMIJARA SEPTENTRIONAL-PADUL-ALBUÑUELAS**

Total MASCH Almijara septentrional-Padul-Albuñuelas							
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	217,75	-22,17	-62,94	0,00	-6,40	54,61	36,84
86-87	258,29	-22,21	-63,01	0,00	-6,40	100,76	-9,12
87-88	238,26	-22,26	-63,01	0,00	-6,40	64,51	27,07
88-89	239,58	-22,11	-62,17	0,00	-6,40	24,01	66,65
89-90	382,08	-22,29	-63,19	0,00	-6,40	174,37	-82,43
90-91	221,32	-22,19	-62,51	0,00	-6,40	47,74	43,32
91-92	189,93	-22,17	-62,11	0,00	-6,40	25,01	65,63
92-93	157,32	-22,02	-61,38	0,00	-6,40	20,49	69,30
93-94	190,04	-21,97	-61,03	0,00	-6,40	39,27	50,13
94-95	93,33	-21,87	-60,52	0,00	-6,40	0,53	88,31
95-96	401,47	-22,16	-61,80	0,00	-6,40	213,26	-122,86
96-97	480,47	-22,44	-63,77	0,00	-6,40	286,91	-194,24
97-98	313,30	-22,41	-63,88	0,00	-6,40	133,90	-41,34
98-99	117,05	-22,25	-62,74	0,00	-6,40	15,35	76,00
99-00	268,63	-22,24	-62,58	0,00	-6,40	73,45	17,74
00-01	280,77	-22,09	-62,26	0,00	-6,40	89,29	1,45
01-02	277,16	-22,01	-62,64	0,00	-6,40	84,86	6,22
02-03	275,66	-22,01	-62,56	0,00	-6,40	109,27	-18,35
03-04	348,08	-22,02	-62,89	0,00	-6,40	137,28	-45,89
04-05	139,71	-21,88	-62,18	0,00	-6,40	43,06	47,54
05-06	210,58	-21,80	-61,49	0,00	-6,40	30,07	59,49
06-07	213,57	-21,72	-60,92	0,00	-6,40	29,95	59,07
07-08	207,06	-21,74	-60,87	0,00	-6,40	33,54	55,39
08-09	240,95	-21,69	-60,93	0,00	-6,40	94,59	-5,56
09-10	463,62	-21,92	-63,04	0,00	-6,40	271,75	-180,42
10-11	328,61	-21,95	-63,03	0,00	-6,40	121,01	-29,66
11-12	190,23	-21,90	-62,29	0,00	-6,40	38,82	51,78
12-13	337,56	-21,96	-62,58	0,00	-6,40	139,09	-48,19
13-14	193,18	-21,85	-61,91	0,00	-6,40	36,91	53,25
14-15	220,70	-21,76	-61,30	0,00	-6,40	26,50	62,90
TOTAL	7696,27	-661,07	-1867,50	0,00	-191,88	2560,16	160,06
MEDIA	256,54	-22,04	-62,25	0,00	-6,40	85,34	5,34

Demarcación Hidrográfica Guadalquivir (MASb Tejeda-Almijara-Las Guájaras)							
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	95,70	-14,40	-8,24	0,00	0,00	21,75	9,96
86-87	114,06	-14,43	-8,32	0,00	0,00	39,16	-7,32
87-88	96,91	-14,48	-8,26	0,00	0,00	21,76	10,06
88-89	99,49	-14,43	-7,90	0,00	0,00	6,34	25,07
89-90	166,86	-14,54	-8,63	0,00	0,00	72,32	-40,03
90-91	90,51	-14,53	-8,24	0,00	0,00	15,60	16,20
91-92	83,81	-14,55	-8,01	0,00	0,00	9,11	22,54
92-93	68,80	-14,46	-7,78	0,00	0,00	7,25	24,16
93-94	77,35	-14,46	-7,63	0,00	0,00	9,16	22,07
94-95	42,34	-14,41	-7,50	0,00	0,00	0,48	30,68
95-96	162,87	-14,51	-8,19	0,00	0,00	79,31	-47,40
96-97	208,21	-14,64	-9,51	0,00	0,00	119,34	-86,11
97-98	127,67	-14,68	-9,38	0,00	0,00	46,38	-13,46
98-99	52,70	-14,61	-8,64	0,00	0,00	4,12	28,14
99-00	102,92	-14,62	-8,45	0,00	0,00	19,85	12,28
00-01	121,43	-14,53	-8,38	0,00	0,00	31,57	0,37
01-02	144,30	-14,48	-8,91	0,00	0,00	48,03	-15,50
02-03	121,20	-14,46	-8,80	0,00	0,00	42,79	-10,53
03-04	147,48	-14,48	-8,83	0,00	0,00	49,77	-17,29
04-05	65,26	-14,40	-8,50	0,00	0,00	18,51	13,63
05-06	87,77	-14,36	-8,09	0,00	0,00	3,35	28,11
06-07	87,26	-14,32	-7,81	0,00	0,00	8,43	22,85
07-08	88,54	-14,33	-7,81	0,00	0,00	13,46	17,79
08-09	103,77	-14,29	-7,98	0,00	0,00	37,41	-5,98
09-10	200,56	-14,35	-9,35	0,00	0,00	112,30	-79,49
10-11	135,66	-14,38	-9,06	0,00	0,00	39,50	-7,07
11-12	82,27	-14,40	-8,46	0,00	0,00	13,91	18,12
12-13	141,03	-14,37	-8,69	0,00	0,00	48,53	-16,47
13-14	82,70	-14,34	-8,24	0,00	0,00	10,13	21,63
14-15	94,76	-14,31	-7,90	0,00	0,00	7,37	23,89
TOTAL	3294,19	-433,54	-251,49	0,00	0,00	957,01	0,88
MEDIA	109,81	-14,45	-8,38	0,00	0,00	31,90	0,03

TOTAL Demarcación Hidrográfica Cuencas Mediterráneas Andaluzas							
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	122,05	-7,77	-54,70	0,00	-6,40	32,85	26,88
86-87	144,24	-7,78	-54,69	0,00	-6,40	61,60	-1,81
87-88	141,36	-7,77	-54,75	0,00	-6,40	42,75	17,01
88-89	140,09	-7,68	-54,27	0,00	-6,40	17,67	41,59
89-90	215,22	-7,75	-54,56	0,00	-6,40	102,04	-42,40
90-91	130,80	-7,66	-54,27	0,00	-6,40	32,14	27,12
91-92	106,12	-7,63	-54,09	0,00	-6,40	15,89	43,09
92-93	88,53	-7,56	-53,61	0,00	-6,40	13,24	45,14
93-94	112,69	-7,51	-53,40	0,00	-6,40	30,10	28,06
94-95	50,99	-7,47	-53,02	0,00	-6,40	0,05	57,63
95-96	238,60	-7,65	-53,61	0,00	-6,40	133,95	-75,46
96-97	272,27	-7,80	-54,26	0,00	-6,40	167,57	-108,13
97-98	185,63	-7,73	-54,50	0,00	-6,40	87,52	-27,88
98-99	64,34	-7,64	-54,09	0,00	-6,40	11,23	47,86
99-00	165,71	-7,62	-54,12	0,00	-6,40	53,60	5,47
00-01	159,34	-7,57	-53,88	0,00	-6,40	57,72	1,08
01-02	132,86	-7,53	-53,73	0,00	-6,40	36,83	21,73
02-03	154,46	-7,55	-53,76	0,00	-6,40	66,47	-7,82
03-04	200,60	-7,54	-54,06	0,00	-6,40	87,51	-28,60
04-05	74,46	-7,48	-53,67	0,00	-6,40	24,55	33,92
05-06	122,81	-7,44	-53,40	0,00	-6,40	26,73	31,38
06-07	126,31	-7,40	-53,11	0,00	-6,40	21,52	36,22
07-08	118,52	-7,41	-53,06	0,00	-6,40	20,08	37,60
08-09	137,19	-7,40	-52,95	0,00	-6,40	57,18	0,42
09-10	263,06	-7,57	-53,69	0,00	-6,40	159,46	-100,93
10-11	192,95	-7,56	-53,97	0,00	-6,40	81,50	-22,59
11-12	107,96	-7,50	-53,83	0,00	-6,40	24,92	33,67
12-13	196,53	-7,59	-53,89	0,00	-6,40	90,56	-31,72
13-14	110,48	-7,50	-53,67	0,00	-6,40	26,78	31,63
14-15	125,93	-7,46	-53,40	0,00	-6,40	19,13	39,01
TOTAL	4402,08	-227,53	-1616,01	0,00	-191,88	1603,14	159,18
MEDIA	146,74	-7,58	-53,87	0,00	-6,40	53,44	5,31

Demarcación Hidrográfica Cuencas Mediterráneas Andaluzas (MASb Sierra de Albuñuelas)							
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	81,28	0,00	-50,82	0,00	-2,00	21,70	21,38
86-87	99,22	0,00	-50,81	0,00	-2,00	45,45	-2,45
87-88	96,20	0,00	-50,86	0,00	-2,00	30,37	12,82
88-89	94,77	0,00	-50,45	0,00	-2,00	12,63	30,60
89-90	152,25	0,00	-50,74	0,00	-2,00	78,63	-35,46
90-91	93,15	0,00	-50,50	0,00	-2,00	26,92	16,53
91-92	72,43	0,00	-50,40	0,00	-2,00	13,16	30,43
92-93	62,17	0,00	-50,00	0,00	-2,00	10,88	32,42
93-94	79,91	0,00	-49,87	0,00	-2,00	27,05	16,40
94-95	33,51	0,00	-49,57	0,00	-2,00	0,00	43,15
95-96	169,59	0,00	-50,09	0,00	-2,00	99,57	-56,71
96-97	192,38	0,00	-50,57	0,00	-2,00	125,40	-82,65
97-98	130,90	0,00	-50,72	0,00	-2,00	68,03	-24,82
98-99	46,73	0,00	-50,38	0,00	-2,00	10,36	33,20
99-00	118,08	0,00	-50,46	0,00	-2,00	43,91	-0,27
00-01	112,55	0,00	-50,27	0,00	-2,00	47,00	-3,38
01-02	90,12	0,00	-50,17	0,00	-2,00	29,75	13,92
02-03	108,40	0,00	-50,22	0,00	-2,00	51,58	-8,05
03-04	141,96	0,00	-50,51	0,00	-2,00	71,56	-27,71
04-05	51,60	0,00	-50,16	0,00	-2,00	19,28	24,54
05-06	85,29	0,00	-49,95	0,00	-2,00	22,68	21,09
06-07	83,40	0,00	-49,73	0,00	-2,00	15,52	28,15
07-08	83,41	0,00	-49,72	0,00	-2,00	19,19	24,51
08-09	92,57	0,00	-49,62	0,00	-2,00	41,99	1,30
09-10	187,85	0,00	-50,21	0,00	-2,00	118,99	-76,28
10-11	136,93	0,00	-50,40	0,00	-2,00	62,62	-19,23
11-12	75,55	0,00	-50,29	0,00	-2,00	19,80	23,92
12-13	134,68	0,00	-50,33	0,00	-2,00	63,41	-20,15
13-14	77,58	0,00	-50,13	0,00	-2,00	21,07	22,45
14-15	87,42	0,00	-49,93	0,00	-2,00	14,85	28,81
TOTAL	3071,88	0,00	-1507,88	0,00	-59,90	1233,36	68,45
MEDIA	102,40	0,00	-50,26	0,00	-2,00	41,11	2,28



Demarcación Hidrográfica Cuencas Mediterráneas Andaluzas (MASb Depresión de Padul)							
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	19,51	-7,77	-3,88	0,00	-4,40	3,21	5,53
86-87	21,38	-7,78	-3,88	0,00	-4,40	5,98	2,68
87-88	21,37	-7,77	-3,89	0,00	-4,40	3,93	4,29
88-89	21,43	-7,68	-3,81	0,00	-4,40	0,52	6,96
89-90	30,50	-7,75	-3,82	0,00	-4,40	9,13	-1,28
90-91	17,91	-7,66	-3,77	0,00	-4,40	1,04	5,97
91-92	16,88	-7,63	-3,70	0,00	-4,40	0,40	6,04
92-93	12,88	-7,56	-3,60	0,00	-4,40	0,40	5,62
93-94	16,27	-7,51	-3,53	0,00	-4,40	0,30	5,26
94-95	8,18	-7,47	-3,45	0,00	-4,40	0,00	5,30
95-96	33,79	-7,65	-3,52	0,00	-4,40	14,63	-8,10
96-97	40,42	-7,80	-3,69	0,00	-4,40	18,89	-11,05
97-98	27,49	-7,73	-3,78	0,00	-4,40	8,44	-0,85
98-99	8,54	-7,64	-3,72	0,00	-4,40	0,06	6,49
99-00	23,92	-7,62	-3,66	0,00	-4,40	3,11	3,22
00-01	23,32	-7,57	-3,61	0,00	-4,40	3,34	2,72
01-02	21,53	-7,53	-3,56	0,00	-4,40	2,12	3,59
02-03	22,96	-7,55	-3,55	0,00	-4,40	5,92	0,03
03-04	29,74	-7,54	-3,55	0,00	-4,40	5,51	0,31
04-05	11,48	-7,48	-3,51	0,00	-4,40	1,21	4,14
05-06	18,61	-7,44	-3,44	0,00	-4,40	0,63	4,39
06-07	21,24	-7,40	-3,38	0,00	-4,40	1,74	2,97
07-08	17,96	-7,41	-3,34	0,00	-4,40	0,07	4,51
08-09	21,89	-7,40	-3,32	0,00	-4,40	5,76	-0,78
09-10	37,55	-7,57	-3,47	0,00	-4,40	18,93	-12,19
10-11	28,48	-7,56	-3,57	0,00	-4,40	7,55	-1,02
11-12	16,17	-7,50	-3,54	0,00	-4,40	1,06	4,68
12-13	30,47	-7,59	-3,57	0,00	-4,40	11,38	-4,81
13-14	16,08	-7,50	-3,54	0,00	-4,40	1,37	4,45
14-15	19,53	-7,46	-3,47	0,00	-4,40	0,86	4,46
TOTAL	657,48	-227,53	-108,13	0,00	-131,98	137,49	53,55
MEDIA	21,92	-7,58	-3,60	0,00	-4,40	4,58	1,78

Demarcación Hidrográfica Cuencas Mediterráneas Andaluzas (MASb Sierra del Padul Sur)							
Fecha	Precipitación hm <sup>3</sup>	Dren/Manantia hm <sup>3</sup>	Ríos hm <sup>3</sup>	Nivel cte. hm <sup>3</sup>	Extracciones hm <sup>3</sup>	Infiltración hm <sup>3</sup>	Reservas hm <sup>3</sup>
85-86	21,26	0,00	0,00	0,00	0,00	7,95	-0,03
86-87	23,64	0,00	0,00	0,00	0,00	10,17	-2,04
87-88	23,79	0,00	0,00	0,00	0,00	8,44	-0,10
88-89	23,89	0,00	0,00	0,00	0,00	4,52	4,03
89-90	32,47	0,00	0,00	0,00	0,00	14,28	-5,66
90-91	19,74	0,00	0,00	0,00	0,00	4,17	4,62
91-92	16,81	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33	6,62
92-93	13,48	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97	7,11
93-94	16,51	0,00	0,00	0,00	0,00	2,75	6,40
94-95	9,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	9,19
95-96	35,21	0,00	0,00	0,00	0,00	19,75	-10,66
96-97	39,47	0,00	0,00	0,00	0,00	23,27	-14,43
97-98	27,23	0,00	0,00	0,00	0,00	11,05	-2,21
98-99	9,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	8,16
99-00	23,70	0,00	0,00	0,00	0,00	6,58	2,52
00-01	23,47	0,00	0,00	0,00	0,00	7,38	1,75
01-02	21,20	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97	4,22
02-03	23,09	0,00	0,00	0,00	0,00	8,98	0,20
03-04	28,90	0,00	0,00	0,00	0,00	10,44	-1,20
04-05	11,38	0,00	0,00	0,00	0,00	4,05	5,23
05-06	18,91	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42	5,90
06-07	21,67	0,00	0,00	0,00	0,00	4,26	5,10
07-08	17,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	8,58
08-09	22,73	0,00	0,00	0,00	0,00	9,43	-0,10
09-10	37,66	0,00	0,00	0,00	0,00	21,53	-12,46
10-11	27,54	0,00	0,00	0,00	0,00	11,33	-2,33
11-12	16,24	0,00	0,00	0,00	0,00	4,05	5,06
12-13	31,38	0,00	0,00	0,00	0,00	15,77	-6,76
13-14	16,82	0,00	0,00	0,00	0,00	4,34	4,72
14-15	18,98	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42	5,73
TOTAL	672,72	0,00	0,00	0,00	0,00	232,29	37,18
MEDIA	22,42	0,00	0,00	0,00	0,00	7,74	1,24