



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España

# INFORME SOBRE LA EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA EN EL ENTORNO DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA PERIODO 2011 A 2013



**Abril de 2013**



## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. OBJETIVOS
3. METEOROLOGÍA
4. HIDROGEOLOGÍA
5. EVOLUCIÓN DE LA LÁMINA DE AGUA EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA
6. EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA PIEZOMETRÍA EN EL ENTORNO DE LA LAGUNA
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES
8. BIBLIOGRAFÍA



El presente informe ha sido realizado por el Instituto  
Geológico y Minero de España.

Autores:

Sergio Martos Rosillo

Juan Antonio López Geta

Amalia Romero Prados

Dirección y supervisión:

Juan Antonio López Geta



## 1 INTRODUCCIÓN

A principio de los años setenta del siglo XX, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), en su estrategia de apoyo a la gestión de las aguas subterráneas, estableció diferentes tipos de redes de control de las aguas subterráneas en España, registrándose los datos referentes a piezometría y calidad. Con esto ha sido posible crear una infraestructura hidrogeológica básica para el desarrollo de planes de investigación hidrogeológica. Desde el año 2000, esta función ha sido asumida por la administración hidráulica competente. No obstante, en el ámbito de las aguas subterráneas, el IGME ha continuado con el control de ciertas redes en aquellos acuíferos que por sus características medioambientales suponen un área de especial interés científico. Una de estas zonas de interés es la Laguna de Fuente de Piedra. En el entorno de este humedal, se iniciaron las labores de control hidrogeológico en 1973 y, a día de hoy, se continua trabajando gracias a la labor realizada por los servicios técnicos del Patronato de la Reserva Natural.

La cuenca vertiente a la laguna de Fuente de Piedra se localiza en el extremo septentrional de la provincia de Málaga, en la divisoria atlántico-mediterránea, y consiste en una cuenca endorreica de 153 km<sup>2</sup>. Por su parte, la Laguna de Fuente de Piedra, de 13 km<sup>2</sup> de superficie, constituye el nivel de base de la cuenca. Esta laguna es, desde el punto de vista biológico, una de las zonas húmedas más relevantes de España, ya que es la zona más importante para la reproducción de flamenco rosa, constituyendo además un lugar de especial interés para la nidificación y la reproducción de otras aves. Su interés internacional, la hace estar incluida dentro del Convenio Ramsar, desde el año 1983. Asimismo, en 1988 fue declarada como Zona de Protección Especial para las Aves (ZEPA) y, desde 1989, disfruta de su declaración, por parte de la Junta de Andalucía, como Reserva Natural, según lo dispuesto en la ley 2/89 de 18 de julio. En la actualidad, este humedal es administrado por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, de la Junta de Andalucía, a través de un Patronato.

## 2 OBJETIVOS

En este informe se recogen y comentan los datos relativos a las medidas realizadas en la red de control de las aguas subterráneas de la Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra, además se analizan la información meteorológica disponible. Este análisis de la información hidrometeorológica constituye la base del asesoramiento permanente del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) al Patronato de la Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra, en los temas que competen a su Comisión Técnica de Agua. Los resultados que se contemplan en estos informes tipo recogen los siguientes aspectos:

- Recopilación y análisis de datos de la estación meteorológica de la laguna (precipitación y temperatura) del periodo del informe y comparación con las medias del periodo del que se disponen datos de la estación próxima de La Herriza.
- Tratamiento e interpretación de datos piezométricos del periodo del informe y análisis en el contexto de la información histórica disponible.

- o Tratamiento e interpretación de los controles de nivel de agua en la laguna y la correlación de los mismos con los datos meteorológicos y piezométricos del periodo del informe.

Los datos y conclusiones que se recogen en esta Memoria corresponden a los años hidrológicos 2011/12 y 2012/13.

### 3 METEOROLOGÍA

Se aborda en este apartado el análisis de los datos meteorológicos en el entorno de la Laguna de Fuente de Piedra, con objeto de cuantificar los principales componentes del ciclo hidrológico y, en la medida de lo posible, establecer su variabilidad temporal.

La información meteorológica tratada procede de las bases de datos de la Oficina del Patronato de la Laguna y de la Agencia Estatal de Meteorología. Se han utilizado los valores mensuales de precipitación y los valores medios mensuales de la temperatura del aire, correspondientes a los observatorios meteorológicos de las estaciones de La Herriza y Cerro del Palo.

#### 3.1 PRECIPITACIÓN

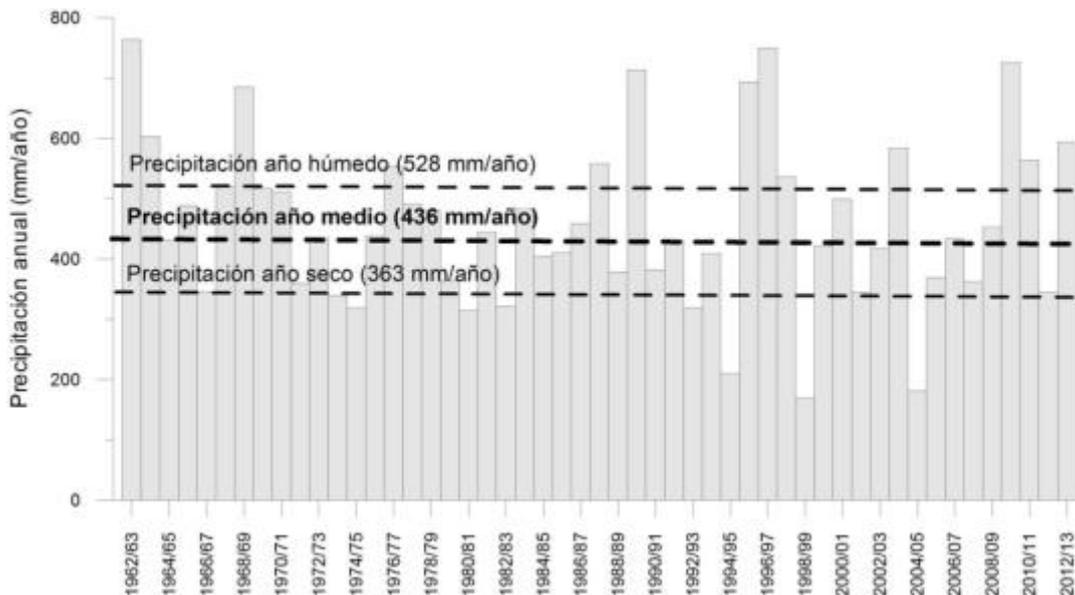
En este informe se analiza la precipitación mensual del periodo 1962/63-2013/14. Los estadísticos de posición de esa serie de datos de precipitación, junto con los datos de precipitación mensual correspondientes a los años hidrológicos 2011/12 y 2012/13, se presentan en la tabla 1.

| AÑO            | OCT         | NOV         | DIC         | ENE         | FEB         | MAR         | ABR         | MAY         | JUN         | JUL        | AGO        | SEP         | Total        |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|
| 2011/12        | 33,6        | 101,6       | 5,4         | 16,7        | 3,1         | 2,6         | 30,9        | 34,8        | 0,0         | 2,5        | 0,0        | 113,9       | 345,1        |
| 2012/13        | 89,7        | 153,5       | 30,9        | 61,3        | 69,9        | 124,8       | 29,6        | 23,6        | 0,0         | 0,0        | 0,4        | 9,8         | 593,5        |
| <b>Media</b>   | <b>51,0</b> | <b>66,4</b> | <b>67,6</b> | <b>56,9</b> | <b>54,2</b> | <b>43,7</b> | <b>41,7</b> | <b>30,0</b> | <b>11,6</b> | <b>2,1</b> | <b>7,2</b> | <b>24,8</b> | <b>457,2</b> |
| D.E            | 44,8        | 55,4        | 61,2        | 48,5        | 39,2        | 31,9        | 29,4        | 27,7        | 16,0        | 5,5        | 18,6       | 28,8        | 137,3        |
| <b>Mediana</b> | <b>43,5</b> | <b>53,0</b> | <b>46,5</b> | <b>48,5</b> | <b>53,3</b> | <b>43,0</b> | <b>35,5</b> | <b>21,5</b> | <b>4,0</b>  | <b>0,0</b> | <b>0,0</b> | <b>17,0</b> | <b>435,8</b> |
| P25            | 13,3        | 29,5        | 21,3        | 21,0        | 20,4        | 20,1        | 21,5        | 8,5         | 0,0         | 0,0        | 0,0        | 2,7         | 363,0        |
| P75            | 79,3        | 84,5        | 102,8       | 77,0        | 76,1        | 57,4        | 51,8        | 44,7        | 19,8        | 1,6        | 3,6        | 32,2        | 528,3        |
| Max            | 177,5       | 322,0       | 248,0       | 197,1       | 179,1       | 124,8       | 141,4       | 121,0       | 83,0        | 30,0       | 80,0       | 113,9       | 763,8        |
| Min            | 0,0         | 0,0         | 0,0         | 0,0         | 0,0         | 0,0         | 2,9         | 0,0         | 0,0         | 0,0        | 0,0        | 0,0         | 169,0        |

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>2011/12</b>         | <b>345,1</b> |
| <b>Año tipo seco</b>   | 363,0        |
| <b>Año tipo medio</b>  | 435,8        |
| <b>Año tipo húmedo</b> | 528,3        |
| <b>2012/13</b>         | <b>593,5</b> |

**Tabla 1.** Precipitación media mensual de la serie de datos de precipitación correspondiente a las estaciones de La Herriza y Cerro del Palo del periodo 1962/63-2012/13 y su comparación respecto a los datos de precipitación mensual de los años hidrológicos 2011/12 y 2012/13. Se adjuntan los valores anuales del año medio, seco y húmedo.

La precipitación media en el entorno de la Laguna de Fuente de Piedra, en el periodo estudiado (1962/63-2012/13), es de 457 mm/año, con una desviación estándar asociada  $\pm 137$  mm/año. El valor mediano es de 436 mm/año, con percentiles 25 y 75 de 363 y 528 mm/año, respectivamente. El año seco presenta un valor anual de 363 mm y el húmedo de 528 mm. La variabilidad interanual de la precipitación es notable, tal como se puede comprobar en la figura 1, donde, asimismo, se confirma la considerable diferencia de precipitación registrada durante los dos últimos años hidrológicos.

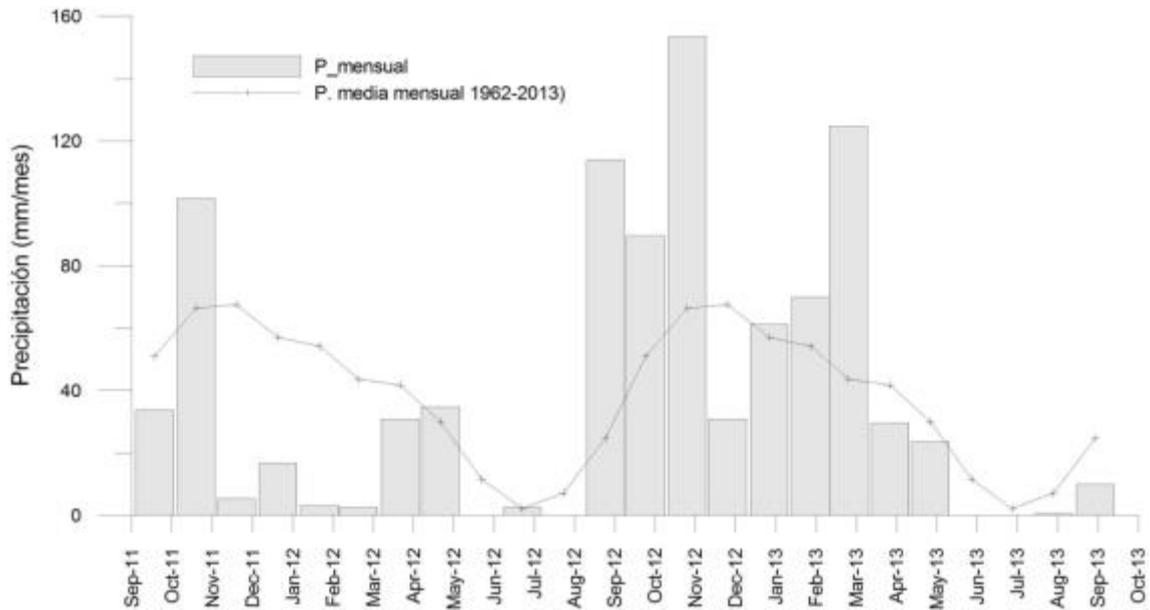


**Figura 1.** Evolución anual de la precipitación en el entorno de la Laguna de Fuente de Piedra.

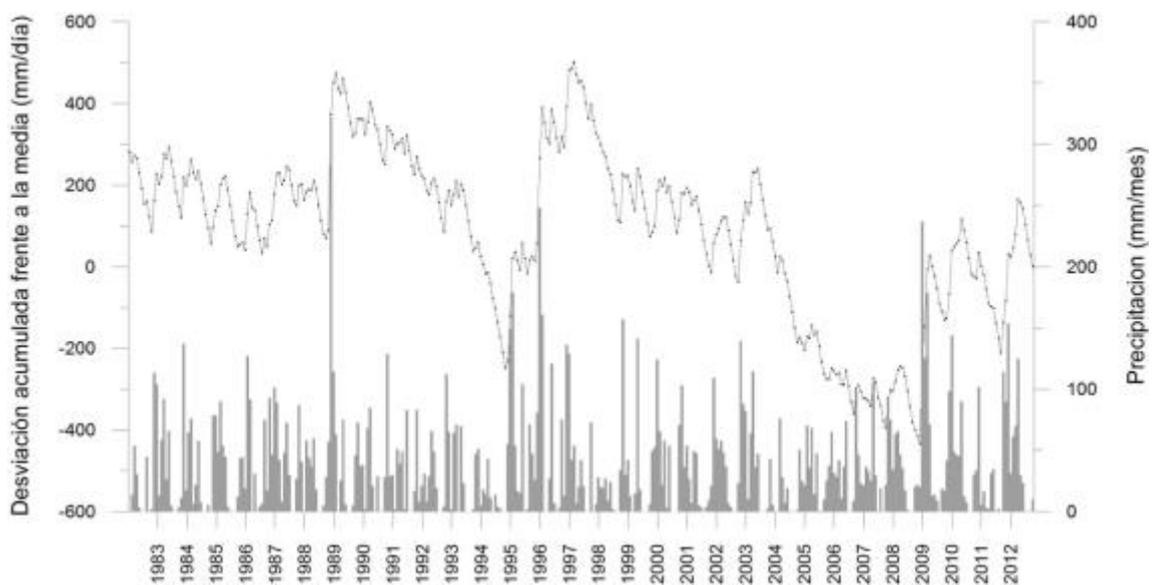
En el año hidrológico 2011/12, la precipitación fue de 345 mm, es decir, el total anual fue inferior al del año seco (363 mm/año) del periodo analizado (1962-2013). Un análisis de los datos mensuales permite comprobar que todos los meses se han registrado precipitaciones inferiores a la media, con excepción de los meses de noviembre, mayo y septiembre. No obstante, deben ser destacados los importantes valores de precipitación medidos en los meses de noviembre y septiembre, muy por encima de la media mensual, aspecto que pone de manifiesto la evidente variabilidad de la precipitación incluso a escala intra-anual (ver la figura 2). Por su parte, los datos de precipitación anual del año hidrológico 2012/13 son notablemente diferentes a los de su predecesor. En efecto, la precipitación anual del 2012/13 fue de 593 mm, superior a la del año húmedo (528 mm/año). Por meses, en octubre, noviembre, febrero y marzo se registraron precipitaciones mensuales por encima de la media del periodo.

Las desviaciones acumuladas de la precipitación mensual respecto a la media se pueden observar en la figura 3. Es conocido que el análisis de este tipo de gráficas es de especial interés, debido a la marcada relación que existe entre la desviación de la precipitación mensual con respecto a la media y la evolución piezométrica en los acuíferos de no muy grandes dimensiones. En la citada figura, se comprueba que existen tres grandes periodos secos, limitados por cuatro valores mínimos (años 1987, 1995, 2009 y 2012) y cuatro máximos (años 1990, 1998, 2004 y 2013). Entre los primeros destacan los mínimos de 1995 y de 2009, ocurridos tras seis años consecutivos de precipitaciones por debajo de la media. El valor

acumulado positivo más desplazado respecto a la media se mide en febrero de 1998. En relación con lo anterior, debe ser destacado el importante incremento de la precipitación acumulada que se registra entre los años 1996 y 1997.



**Figura 2.** Evolución de la precipitación mensual del periodo septiembre de 2011 a octubre de 2013 respecto a la media mensual del periodo 1962-2013.



**Figura 3.** Evolución de la precipitación acumulada mensual respecto a la media y precipitación mensual de las estaciones meteorológica de La Herriza y Cerro del Palo.

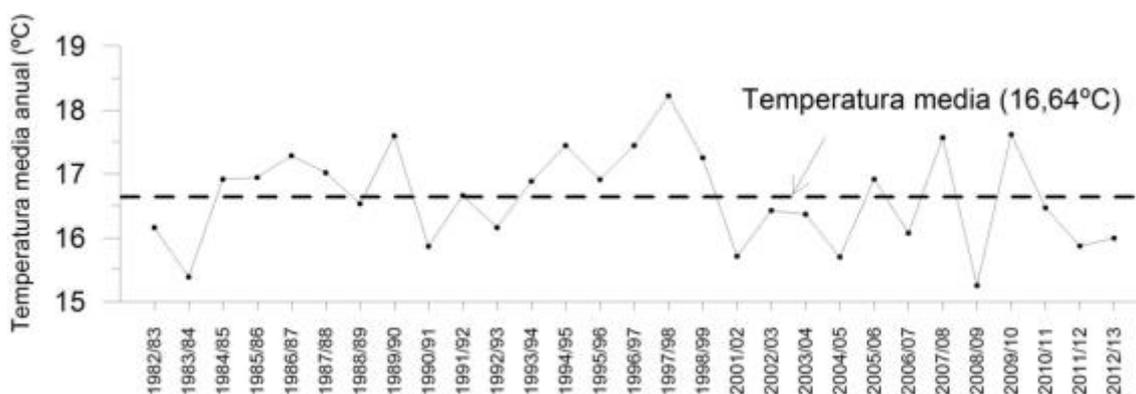
### 3.1 TEMPERATURA

La temperatura media anual del aire, correspondiente al periodo 1962/63 a 2012/13, es de 16,6 °C, con una desviación estándar de 0,75 °C (figura 3). Por su parte la mediana es de 16,7°C con percentiles 25 y 75 de 16,1 y 17,2 °C, respectivamente. La media anual de los dos últimos años es inferior al valor medio del periodo y queda, incluso, por debajo del valor correspondiente al percentil 25 de la muestra estadística.

| AÑO            | OCT          | NOV          | DIC         | ENE         | FEB         | MAR          | ABR          | MAY          | JUN          | JUL          | AGO          | SEP          | Media        |
|----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2011/12        | 18,26        | 11,97        | 7,82        | 7,65        | 5,12        | 11,03        | 12,52        | 19,18        | 23,95        | 24,73        | 26,48        | 21,77        | 15,87        |
| 2012/13        | 22,19        | 10,97        | 8,98        | 8,10        | 6,95        | 11,03        | 14,21        | 16,61        | 19,84        | 24,89        | 25,94        | 22,23        | 15,99        |
| <b>Media</b>   | <b>18,58</b> | <b>12,74</b> | <b>9,41</b> | <b>8,41</b> | <b>9,33</b> | <b>12,62</b> | <b>14,09</b> | <b>17,83</b> | <b>22,34</b> | <b>25,89</b> | <b>25,95</b> | <b>22,52</b> | <b>16,64</b> |
| Des.Est        | 2,97         | 2,90         | 1,41        | 1,45        | 2,61        | 1,53         | 1,59         | 1,65         | 1,53         | 0,94         | 1,00         | 1,81         | 0,75         |
| <b>Mediana</b> | <b>17,40</b> | <b>12,50</b> | <b>9,20</b> | <b>8,40</b> | <b>9,60</b> | <b>12,60</b> | <b>14,20</b> | <b>17,60</b> | <b>22,70</b> | <b>25,80</b> | <b>25,90</b> | <b>22,10</b> | <b>16,66</b> |
| P25            | 16,80        | 11,10        | 8,60        | 8,10        | 8,90        | 11,40        | 12,80        | 16,61        | 21,60        | 25,10        | 25,50        | 21,30        | 16,08        |
| P75            | 20,20        | 13,40        | 10,00       | 9,10        | 10,20       | 13,30        | 15,00        | 18,60        | 23,30        | 26,50        | 26,80        | 23,60        | 17,25        |
| Max.           | 25,60        | 24,90        | 12,20       | 11,00       | 13,40       | 15,70        | 17,40        | 21,40        | 25,10        | 28,30        | 27,80        | 27,50        | 18,23        |
| Min            | 13,80        | 7,40         | 6,60        | 2,80        | 0,60        | 10,10        | 10,90        | 13,90        | 17,70        | 24,40        | 23,80        | 19,70        | 15,25        |

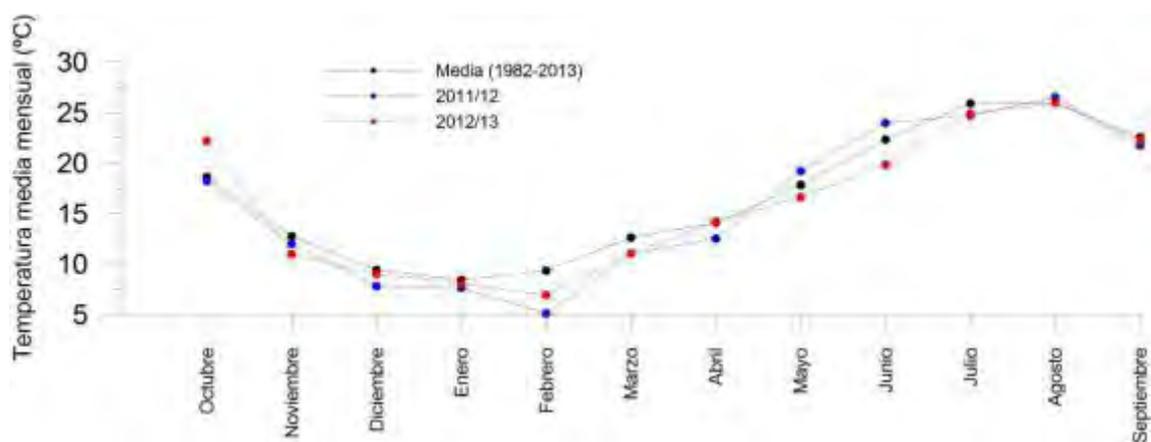
**Tabla 2.** Temperatura media mensual de la serie de datos de temperatura correspondiente a las estaciones de La Herriza y Cerro del Palo del periodo 1982/83 a 2012/13 y su comparación respecto a los datos de temperatura media mensual de los años hidrológicos 2011/12 y 2012/13.

En la figura 4 destaca la importante variabilidad interanual de la temperatura.



**Figura 4.** Evolución anual de la temperatura en el entorno de la Laguna de Fuente de Piedra.

La distribución de la temperatura media mensual, a lo largo del periodo octubre de 2011 a septiembre de 2013, se observa en la figura 5, donde se aprecia un incremento progresivo de la temperatura de enero a julio, una meseta, que se produce en julio y agosto, y un progresivo descenso, desde agosto hasta el mes de enero. En esta figura se comprueba que las temperaturas durante la estación de invierno son suaves, con medias mensuales comprendidas entre 8,5 y 12,6 °C, mientras que, por su parte, el verano es muy caluroso, con valores medios mensuales comprendidos entre 22 y 26 °C.



**Figura 5.** Evolución de la temperatura mensual del periodo septiembre de 2011 a octubre de 2013 respecto a la media mensual del periodo 1982-1983.

## **4 EVOLUCIÓN DE LA LÁMINA DE AGUA EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA**

El nivel de la lámina de agua en la laguna es controlado, de forma sistemática, mediante un limnígrafo de registro continuo, desde 1983. El limnígrafo se halla instalado en un pozo perforado en el propio vaso de la laguna, realizado por la antigua explotación salinera (Figura 6). El número de inventario de esta captación es el 1642/2/267. El dispositivo permite controlar las variaciones del nivel del acuífero cuando la laguna se encuentra inundada y la evolución de la superficie piezométrica bajo el fondo de la laguna, cuando esta se sitúa por debajo de la cota de la superficie del vaso.

En la figura 7, se presenta la evolución del nivel de la lámina de agua de la laguna, medido en el citado pozo. Se han incorporado en la gráfica, los valores de precipitación mensual, que se detallan en el apartado 2 de esta Memoria, y la desviación acumulada de la lluvia respecto a la media mensual. Además, con una línea discontinúa se ha señalado la cota 409,54 m s.n.m., a la que se sitúa el fondo de la laguna en ese sector.

El hidrograma resultante permite comprobar que existe una estrecha relación entre la distribución temporal de la lluvia y la evolución de la lámina de agua de la laguna. A lo largo del año, la laguna comienza a inundarse a finales de otoño y a secarse al final de la primavera, debido a la intensa evaporación que se produce en esta zona. La laguna suele quedarse del orden de dos meses al año sin agua, si bien en 1995 llegó a estar seis meses seca.

En el periodo representado en la figura 7 se observan cuatro ciclos con niveles máximos de inundación (1989-90, 1996-98, 2009-10 y 2012-13) en los que se han llegado a alcanzar casi los 170 cm de altura de lámina de agua. Se trata, por tanto, de una laguna estacional, que se seca durante el estiaje, con excepción de los años húmedos en los que permanece inundada.

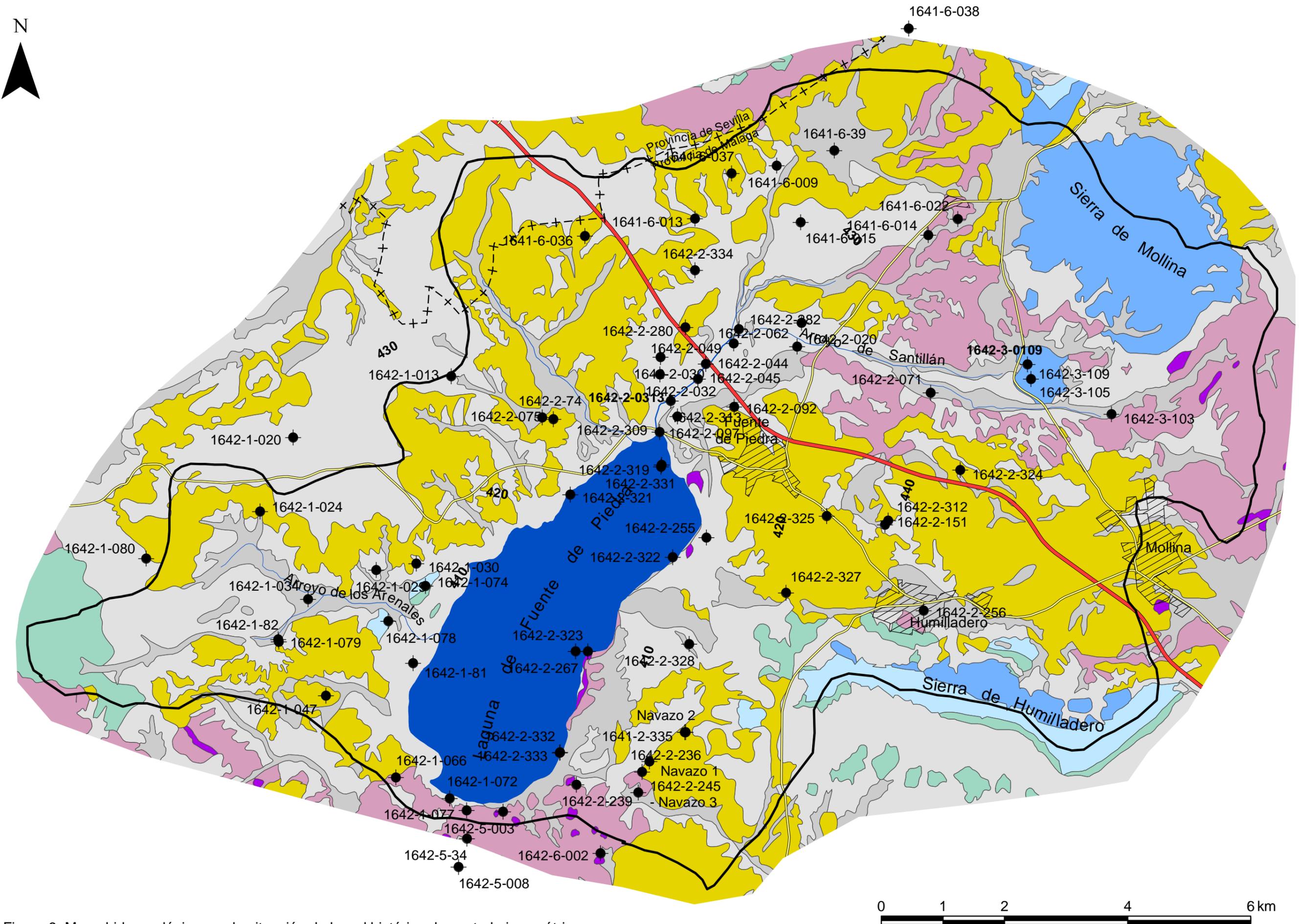
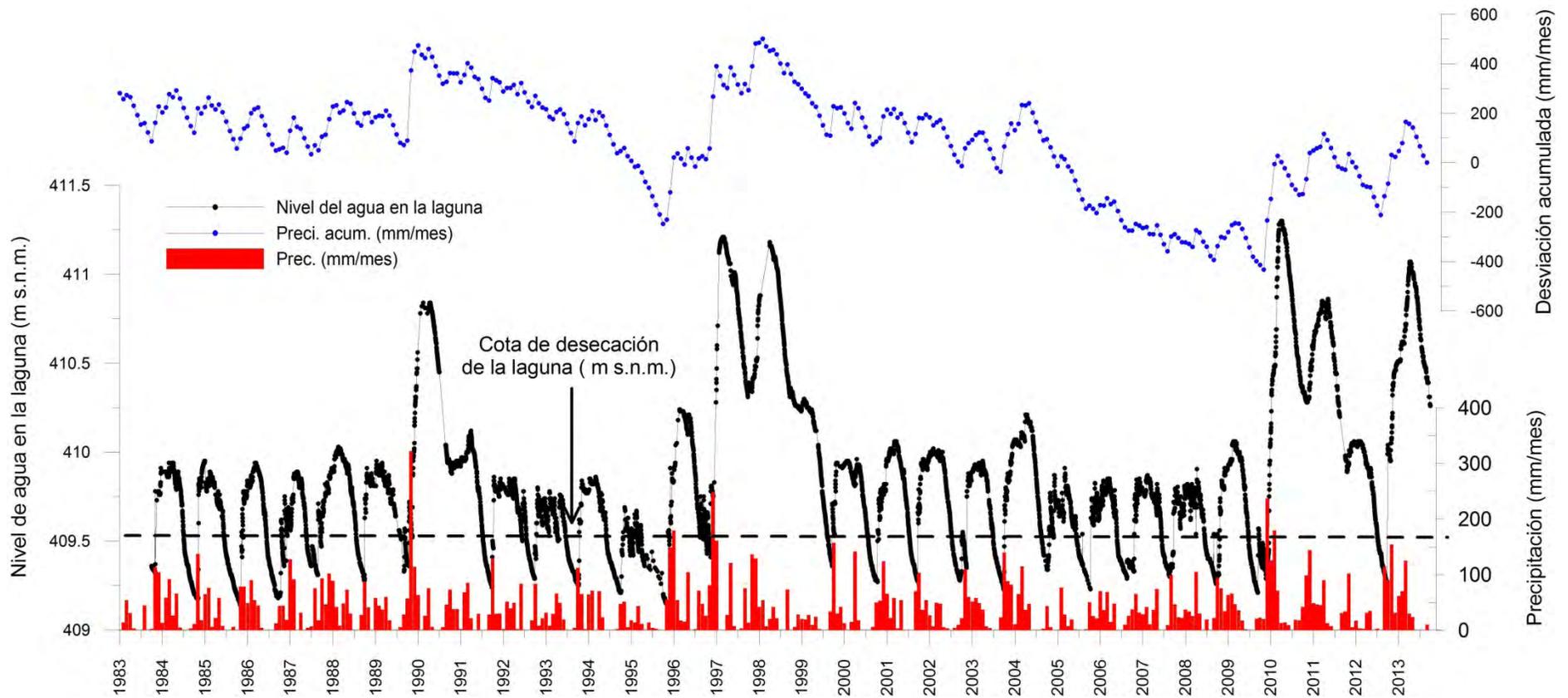


Figura 6. Mapa hidrogeológico con la situación de la red histórica de control piezométrico.



**Figura 7.** Evolución del nivel de agua en la laguna de Fuente de Piedra. Datos registrados en el limnógrafo de control instalado en el pozo 1642/2/276. En la gráfica se adjunta la precipitación mensual en el entorno de la laguna (observatorios de La Herriza y Cerro del Palo) y la desviación acumulada de la precipitación mensual respecto a la media. La línea negra discontinua indica la posición del fondo de la laguna. Periodo 1983-2013.

En definitiva, el hidrograma muestra la gran variabilidad temporal de este sistema hidrológico. Se producen rápidos ascensos de nivel como respuesta a las primeras precipitaciones de cierta magnitud del año hidrológico. Aportaciones a las que se suma un caudal continuo, mucho más inercial, procedente de los acuíferos limítrofes y relacionados con el humedal. La descarga del sistema se produce por la evaporación de la lámina de agua de la laguna, proceso que continúa incluso, por efecto de la capilaridad, cuando la lámina de agua ha desaparecido de la superficie. Tanto es así, que la descarga del sistema por evaporación ha sido estimada entre 21,4 hm<sup>3</sup>/año (Linares, 1990) y 23,5 hm<sup>3</sup>/año (Heredia et al., 2011).

Como consideraciones finales, hay que señalar que, durante el periodo analizado en esta Memoria (2011-2013), se comprueba la manifiesta variabilidad temporal de este sistema hidrológico. En este sentido, se han registrado dos máximos de altura en la lámina de agua. El primero, en abril de 2011, con 127 cm, y el segundo, en marzo de 2013, con 147 cm. Además, las escasas precipitaciones del año hidrológico 2011-2012 generaron un reducido almacenamiento de agua, provocando que el nivel quedase por el fondo de la laguna, en el sector donde se ubica el limnígrafo, entre julio y septiembre del año 2012. Los 593 mm de precipitación del año hidrológico 2012-2013 han provocado en la laguna la permanencia de una lámina de agua durante todo el año, estando el mínimo registrado en septiembre de 2013, en 77 cm.

## 5 HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 INTRODUCCIÓN

La investigación hidrogeológica del sistema de la Laguna de Fuente de Piedra se inicia en 1975 por parte del Instituto Geológico y Minero de España (López-Geta et al., 2013). En 1984, el IGME (entonces ITGE) presenta un informe hidrogeológico que sienta las bases respecto al funcionamiento hidrogeológico de este sistema. A este trabajo, le siguieron varias tesis doctorales, que consideraron este entorno de forma parcial; es el caso de la tesis de Almécija (1977), regional (Rodríguez-Rodríguez, 2002), o que se centraron en distintos aspectos hidrogeológicos de este sistema, como ocurrió con el trabajo de Linares (1990).

La continua labor de asesoramiento por parte del IGME al Patronato de la Laguna y la reactivación de la investigación hidrogeológica en esta zona permitieron la consecución de nuevos avances en su conocimiento (IGME, 2011), aspectos que son sintetizados en el trabajo de Heredia et al. (2009) y que, discrepan, en algunos aspectos fundamentales respecto al funcionamiento hidrogeológico del sistema, con los presentados por Linares (1990), o, más recientemente, por Kohfahl et al. (2008).

### 5.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

La cuenca endorreica de Fuente de Piedra se sitúa emplazada en las Zonas Externas de la Cordillera Bética, en una región muy compleja geológicamente, y, en donde, predominan materiales triásicos en facies germano-andaluzas. La unidad geológica, sobre la que se desarrolla la laguna, ha sido denominada como Manto de Antequera-Osuna (Cruz-Sanjulián, 1972), Complejo Caótico Subbético (Martín-Algarra y Vera, 2004) y más recientemente Melange Frontal Sinorogénica (Pedrera et al., 2013). En efecto, el sector donde se localiza la cuenca endorreica de la laguna de Fuente de Piedra está caracterizado por una compleja estructura geológica formada por diferentes sierras carbonáticas, como las de Molina-La Camorra y Humilladero, en las que es posible reconocer su estructura interna, rodeadas por una unidad tectónica alóctona de despegue, muy deformada, la denominada Melange Frontal Sinorogénica (Pedrera et al., 2013). Esta unidad la constituyen, fundamentalmente, arcillas y margas triásicas con evaporitas, e incorpora bloques desorganizados de rocas jurásicas, cretácicas y terciarias (hasta el Neocomiense) y se puede dividir en dos conjuntos: i) Melange basal, diferenciada durante la fase de “stacking” de la Zona Externa, cuando los movimientos halocinéticos jugaban un papel fundamental, y ii) la Melange superior, que consiste en una unidad transporte, erosionada y removilizada (Sanz de Galdeano et al., 2008, Pedrera et al., 2013).

En relación con el emplazamiento de la Melange puede estar relacionada la presencia de pequeñas cuencas endorreicas, que estarían vinculados con el levantamiento y el efecto de compensación de subsidencia asociado al acortamiento tectónico que afecta a esta zona (Pedrera et al., 2014).

Por encima de los materiales de la Melange, y de forma discordante, se han depositado materiales del Mioceno Superior y del Cuaternario. Los primeros, están formados, por calcarenitas bioclásticas, arenas y margas con intercalaciones de niveles de conglomerados; los segundos consisten en depósitos de ladera, aluviales, sedimentos endorreicos y costras calcáreas.

### 5.3 LOS ACUÍFEROS DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA

En la cuenca endorreica de la laguna de Fuente de Piedra coexisten distintos materiales geológicos que dan lugar a diferentes tipos de acuíferos. Entre estos destacan los acuíferos jurásicos de las Sierras de Molina-La Camorra y Humilladero, situados en las zonas más altas de la cuenca, en sus límites norte y sureste, respectivamente.

El **acuífero de Molina-La Camorra** consiste en un acuífero con 11,8 km<sup>2</sup> de afloramientos permeables, de los que parte de ellos se encuentran dentro de los límites de la cuenca hidrológica de la laguna. Está constituido por unos 300 m de dolomías y calizas jurásicas, muy permeables, debido a los procesos de fracturación y karstificación que las afectan. La existencia de algunas cavidades kársticas, situadas en el sector central de la sierra, que penetran hasta el muro del acuífero y recientes trabajos de investigación cartográfica y geofísica, llevados a cabo entre la Universidad de Granada y el IGME, señalan hacia la posible conexión geológica e hidrogeológica entre las sierras de Molina y La Camorra (Pedrera et al., in litt.). Además, la recopilación de datos procedentes de sondeos mecánicos y de prospección gravimétrica y electromagnética ha permitido delimitar la extensión lateral de los materiales jurásicos bajo el recubrimiento terciario y de la Melange en el entorno de la Sierra. En régimen natural este acuífero presentaba dos puntos principales de drenaje, situados a la misma cota (447 m s.n.m.). Al norte del acuífero, el manantial de Alameda, que descargaba hacia la cuenca del Guadalquivir. Al sur del acuífero, el manantial de Santillán, que descargaba en el arroyo del mismo nombre, en la cuenca endorreica de la laguna, y que permitía el aporte continuo de agua desde el acuífero hacia el humedal. La recarga media de este acuífero ha sido evaluada recientemente en 2,3 hm<sup>3</sup>/año, mediante balance de agua en el suelo diario (BAS) y mediante el método APLIS (Ruiz, 2012). De esta cantidad, al menos 1,2 hm<sup>3</sup>/año se descargaban por el manantial de Santillán hacia la laguna. La intensa explotación a la que se encuentra sometido el acuífero, tanto en el sector gestionado por la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir como de la Demarcación Mediterránea Andaluza, ha provocado la desaparición de la citada surgencia desde los años ochenta del siglo XX (Linares, 1990). Por tanto, han dejado de suministrarse aportes de agua desde el acuífero carbonático a la laguna. La consecuencia es que el acuífero carbonático ha pasado a capturar recursos del acuífero Mioceno-Cuaternario y del acuitardo triásico, lo que es causa del actual deterioro en la calidad del agua captada para abastecimiento de este acuífero.

El **acuífero de la Sierra de Humilladero** consiste en otro acuífero de naturaleza carbonática, formado por dolomías y calizas jurásicas. Cuenta con 4,9 km<sup>2</sup> de afloramientos permeables, de los que parte quedan incluidos en la cuenca endorreica. Estos materiales presentan un espesor medio de 450 m. Los escasos ensayos de bombeo disponibles permiten confirmar la alta permeabilidad del acuífero. Su recarga ha sido estimada mediante los métodos de BAS y APLIS en 1 hm<sup>3</sup>/año (Ruiz, 2012). No se conoce muy bien el funcionamiento, en régimen natural, de este acuífero, al no estar identificado ningún manantial relevante, con un caudal medio de drenaje, que lo justificase como principal punto de descarga. En este sentido, las recientes obras de investigación geológica llevadas cabo, con los proyectos de las líneas de alta velocidad ferroviarias, han permitido comprobar la continuidad de los materiales jurásicos de la Sierra de Humilladero, en su sector occidental, y a cota menor a la de la laguna. Esta cuestión permitiría justificar que buena parte de los recursos de este sistema se canalizaran lateralmente y de forma no visible hacia la laguna. Lo que sí está confirmado, como se muestra en este informe, es que el nivel piezométrico de los sondeos que captan las calizas se encuentra, en la actualidad, muy por debajo de la cota del fondo de la laguna y que, por tanto, este acuífero, al igual que el de Molina-La Camorra ha dejado de drenarse hacia la laguna. Los recursos extraídos de esta sierra parecen superar a la recarga media desde tiempo atrás, con todas las implicaciones medioambientales y las que se derivan del posible desabastecimiento a las poblaciones que dependen de forma exclusiva del agua subterránea de este acuífero.

El **acuífero Mioceno-Cuaternario** es el más extenso del sistema hidrológico de la laguna. Lo constituyen calcarenitas y arenas del Mioceno Superior y gravas, arenas y limos cuaternarios. Sus límites laterales coinciden aproximadamente con los de la cuenca hidrológica de la laguna. Los espesores de los materiales permeables están comprendidos entre 30 y 100 (Heredia et al., 2011). En este mismo trabajo se presenta la delimitación de la geometría del muro del acuífero mioceno-cuaternario, hecha mediante la interpolación de datos procedentes de sondeos mecánicos y de información geofísica. De este modo, Heredia y col. (op.cit) señalan la existencia de un depocentro, con un espesor del orden de 100 m, al noreste de la laguna, otro, de unos 75 m, en el interfluvio con el arroyo de La Albina, al oeste de la laguna. Con todo, el acuífero presenta importantes cambios laterales de facies, que afectan a la variabilidad espacial de la permeabilidad. En ITGE (1998) se señala que las zonas más permeables del acuífero coinciden en los alrededores de Fuente de Piedra y al norte de Huilladero (ITGE, 1998). La recarga del acuífero se produce por infiltración del agua de lluvia y por la infiltración de parte de la escorrentía que se genera durante las épocas lluviosas en los arroyos que vierten sus aguas a la laguna. La abundante información piezométrica disponible en este acuífero, desde los años setenta del anterior siglo, pone de manifiesto que, en régimen natural el flujo subterráneo es radial convergente hacia la laguna, hacia donde se produce la descarga del acuífero por evaporación de la lámina de agua. La proliferación de pozos y sondeos para uso agrícola, (en 1989 se inventariaron más de 400, ver Linares et al., 1989) y su intensa explotación ha provocado la existencia de distintos sectores en los que se han desarrollado conos de depresión asociados a los bombeos. Estos sectores se localizan fundamentalmente en la desembocadura del arroyo de Santillán y entre las localidades de Humilladero y Fuente de Piedra.

## 5.4 FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO GENERAL

Se puede establecer que los acuíferos antes descritos se integran en un único conjunto en el que todos se encuentran hidrogeológicamente relacionados, constituyendo un sistema hidrogeológico bien definido y aislado de los restantes que existen en la región.

En opinión de la mayoría de los autores que han trabajado en este sistema hidrogeológico (Heredia et al., 2007), los límites de este sistema coincidirían sustancialmente con los de la cuenca superficial y, en su mayor parte, están constituidos por umbrales piezométricos que dan lugar a divisorias hidráulicas, especialmente bien definidas en el ámbito del acuífero Mioceno-Cuaternario y, con menos precisión cuando se sitúa sobre los acuíferos jurásicos de las sierras Molina-La Camorra y Humilladero. En este sentido, en Pedrera et al., (in litt.) indican que la continuidad geológica de las sierras de Molina y La Camorra implica que los bombeos que se hacen en las calizas y dolomías de este acuífero, situados en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, contribuyen al vaciado de sus reservas, por lo que afectan directamente al humedal de la laguna de Fuente de Piedra. Esta situación parece repetirse de igual forma en el vecino acuífero de la Sierra de Humilladero.

De este modo, en régimen natural, la circulación subterránea en este sistema tiene lugar desde la divisoria hidrogeológica hacia el centro de la cuenca, donde, a través de la laguna se produce la descarga del sistema. La intensa evaporación que tiene lugar en la laguna, durante la mayor parte del año, favorece y condiciona el continuo flujo subterráneo hacia ella.

En los últimos años este esquema de circulación se ha modificado como consecuencia de los bombeos. El sentido de flujo se habría invertido en los acuíferos jurásicos, que habrían pasado a capturar agua del acuífero Mioceno-Cuaternario y del acuitardo arcilloso de la Melange. Además, los fuertes bombeos en distintos sectores del acuífero Mioceno-Cuaternario habrían reducido las aportaciones de este acuífero a la laguna.

## 6 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

### 6.1 RED DE CONTROL Y MEDIDAS EFECTUADAS

El control de la evolución de los niveles piezométricos de los acuíferos del sistema de Fuente de Piedra comenzó a realizarse, por parte del IGME, en 1974. En la primera red de observación piezométrica quedaron incluidos una serie de puntos representativos, en los que se realizaban campañas de control con una cadencia de medida de trimestral a semestral. Posteriormente, desde 1984, se lleva a cabo un control más estricto, con medidas hechas con una periodicidad mensual, en una red compuesta por unos 40 a 60 puntos de control. En este sentido, debe ser destacado que las labores de medida en campo han pasado durante los últimos años a realizarse por parte del personal técnico de la Reserva.

Por diversas circunstancias, en el transcurso del tiempo, algunos de los piezómetros que se empezaron a controlar en 1974 han tenido que ser abandonados. En parte esto es debido al deterioro de algunos pozos y sondeos, por lo que actualmente son operativos solo una decena de los denominados piezómetros “históricos”. Por otra parte, de la red que empezó a controlarse en 1985 ha sido necesario sustituir algunos puntos de control. También han sido incorporados a la red de vigilancia varios sondeos piezométricos perforados por el IGME, como consecuencia de distintos trabajos de investigación

Durante el periodo 2011-2013 se han controlado 41 y 42 sondeos, respectivamente (Tabla 3).

| <b>Año</b> | <b>Numero de piezómetros medidos</b> |
|------------|--------------------------------------|
| 2000       | 41                                   |
| 2001       | 40                                   |
| 2002       | 37                                   |
| 2003       | 35                                   |
| 2004       | 36                                   |
| 2005       | 31                                   |
| 2006       | 44                                   |
| 2007       | 43                                   |
| 2008       | 36                                   |
| 2009       | 42                                   |
| 2010       | 44                                   |
| 2011       | 42                                   |
| 2012       | 41                                   |
| 2013       | 42                                   |

**Tabla 3.** Número de piezómetros controlado entre los años 2000 y 2013

En este informe, y con objeto de facilitar la interpretación de la evaluación temporal de la piezometría, se han realizado una serie de cambios respecto a los informes previos. De este modo, y al igual que se realizó en Linares et al. (1989) se presenta la evolución piezométrica diferenciada por sectores en la propia cuenca vertiente a la laguna. Para ello, se ha dividido la cuenca en ocho sectores: norte, noroeste, Molina-Santillán, Fuente de Piedra, Humilladero, sur, sureste y oeste. Para cada uno de ellos se ha realizado una gráfica general en la que se incluyen: i) un plano con la identificación y la situación de los puntos de control, ii) un gráfico de la evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control de este sector, iii) una gráfica con la evolución temporal de la altura de la lámina de agua, y iv) una gráfica con la precipitación mensual y con la desviación acumulada de la precipitación mensual respecto a la media. Cuando se ha considerado de interés diferenciar la evolución del nivel en diferentes grupos de piezómetros en un solo sector, se han realizado varias gráficas de evolución. Por último, y aprovechando que todos los puntos de control están nivelados, se han transformado todas las profundidades de nivel a cota. Se entiende que estos cambios van a contribuir a facilitar la interpretación de los datos piezométricos en su conjunto.

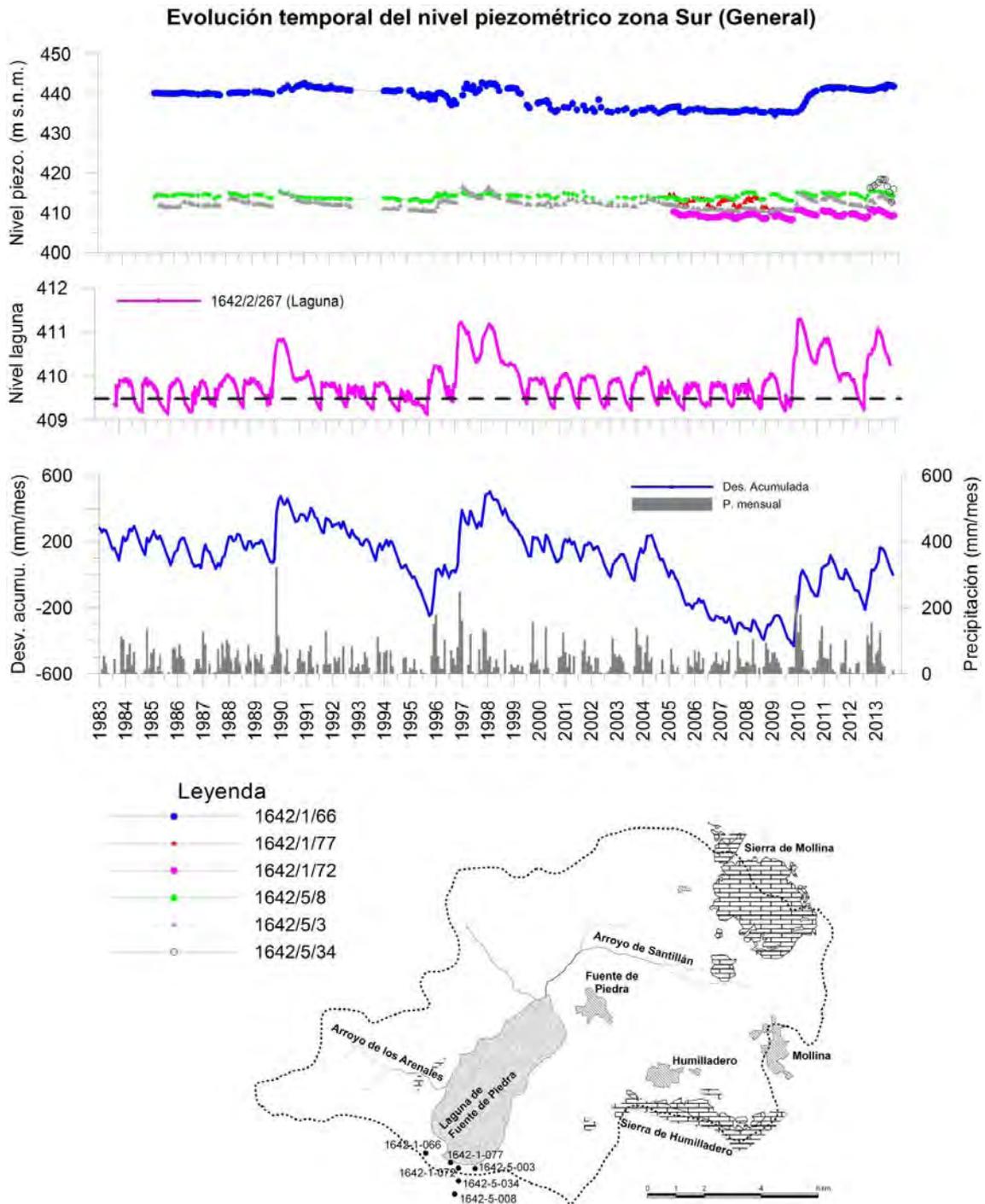
## 6.2 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

### 6.2.1 Evolución piezométrica del Sector Sur

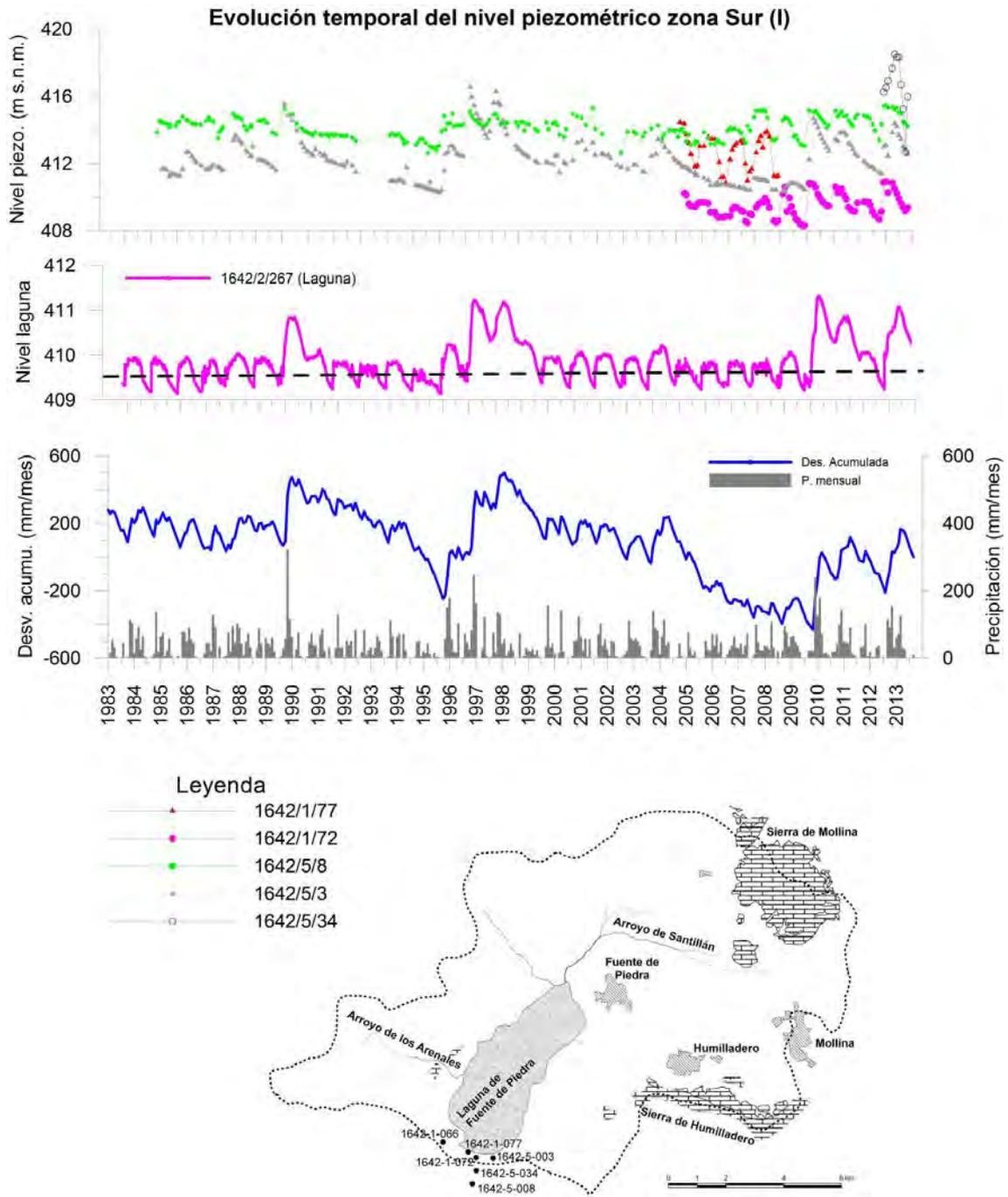
Al sur de la laguna se han seguido un total de seis puntos de control piezométrico, algunos situados fuera del límite de la divisoria de aguas superficial. De todos estos piezómetros los de mayor representatividad, por su mayor periodo de control, son los identificados como 1642-5-3 y 1642-5-8.

En la figura 8 se ha representado toda la información piezométrica disponible en el sector Sur de la laguna. En esta figura destaca la notable diferencia de cota piezométrica del punto de control 1642-1-66 respecto al resto. Debe ser indicado que este sondeo está perforado en arcillas y margas en facies germano-andaluzas. Este presenta niveles piezométricos situados entre 434 y 443 m s.n.m., mientras que en el resto quedan comprendidos entre 408 y 415 m s.n.m.

Para facilitar el análisis de los datos se ha realizado la figura 9, en la que se ha eliminado la evolución del nivel en el punto 1642-1-66. De la observación de este gráfico se deduce que no hay una tendencia descendente generalizada de los niveles y que, en el periodo 2011-2013, los niveles piezométricos quedan situados alrededor de la cota media de todo el periodo de registro (1983-2013). Destaca en la figura el gran paralelismo en la evolución temporal del nivel en el piezómetro 1642/5/3 y con el de la lámina de agua de la laguna. Esta evolución, aunque muy parecida, está algo más amortiguada en el punto de control 1642/5/8. Por último, el punto de control 1642/5/34 presenta mayor carga hidráulica que el resto de los sondeos próximos y con una mayor amplitud en sus oscilaciones piezométricas. Este sondeo se encuentra perforado en arcillas y margas triásicas, en el límite de la divisoria de aguas superficial.



**Figura 8.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Sur de la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra.



**Figura 9.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Sur de la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra.

### 6.2.2 Evolución piezométrica del Sector Sureste

En el sector sureste de la laguna se han hecho medidas en ocho puntos de control (figura 10). El punto de control 1642/6/2 es el que presenta mayor continuidad en el tiempo. Este queda situado fuera de la divisoria de aguas superficial a la laguna y presenta un descenso que se está estabilizado desde el año 2007, en torno a 420 m s.n.m. La evolución temporal del nivel en el piezómetros 1642/2/236 ha sido muy parecida a la del sondeo anterior, hasta que dejó de medirse en 2004. Los puntos de control 1642/2/245, Navazo 2, y Navazo 1 tienen un reducido periodo de control y describen una tendencia paralela a la evolución de la lámina de agua en la laguna. En este sector parece haberse producido una readaptación del nivel piezométrico, en el periodo 2009-2013, a una nueva situación hidrodinámica que podría estar causada por un aumento y estabilización del caudal de bombeo en ese sector. Otra posibilidad podría apuntar hacia la reducción del volumen de entradas laterales procedentes del acuífero carbonático de Humilladero.

### 6.2.3 Evolución piezométrica del Sector Humilladero

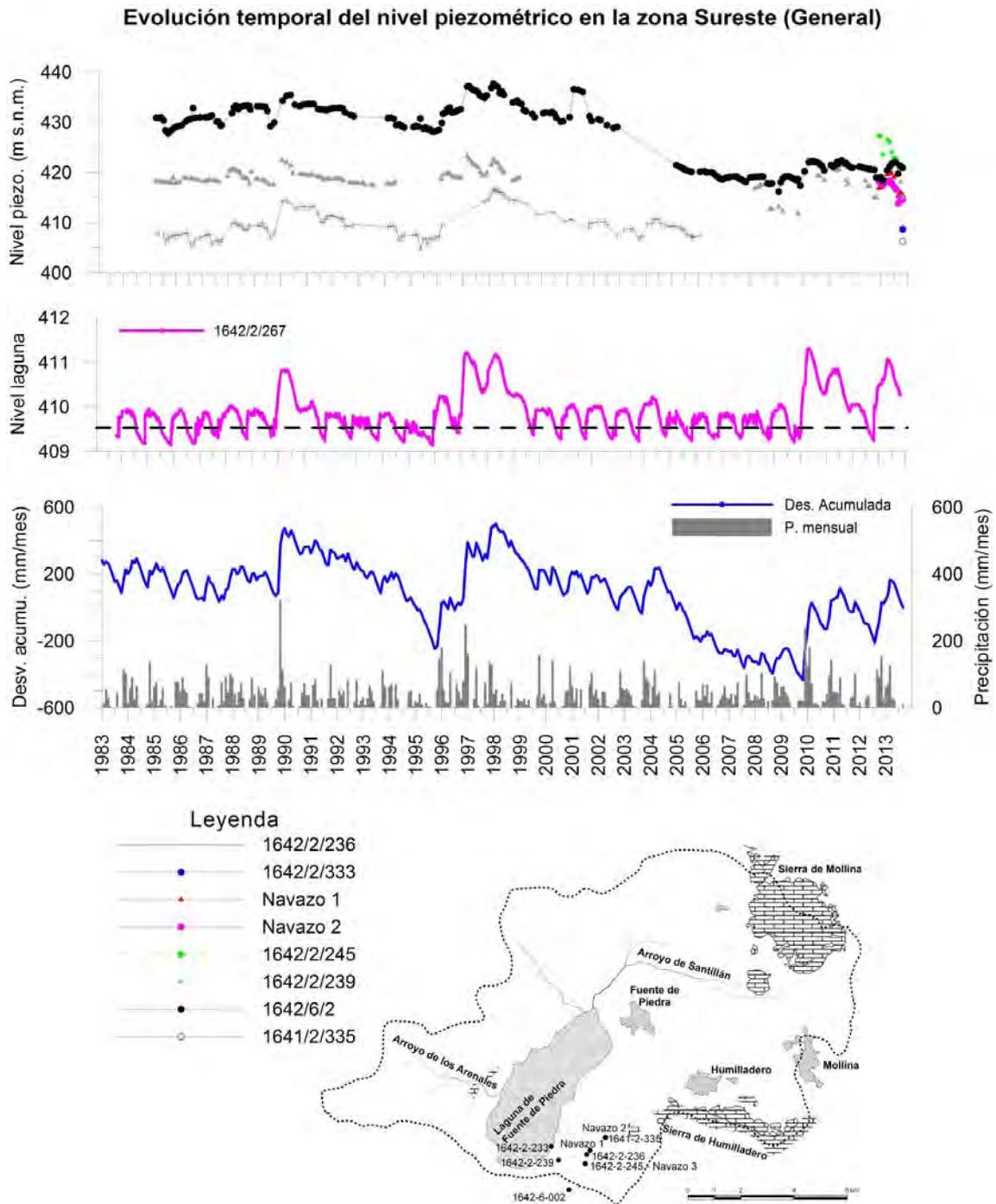
En el sector próximo a la Sierra de Humilladero se han controlado once puntos (figura 11). Los sondeos 1642/2/257, de abastecimiento a Humilladero, y 103B (piezómetro de la Demarcación Hidrográfica del Sur) perforan calizas y dolomías jurásicas de la Sierra de Humilladero y presentan un descenso de nivel continuo en el tiempo, que pone de manifiesto un consumo continuado de reservas en el citado acuífero. En este sentido el descenso acumulado en el sondeo de abastecimiento a Humilladero es, en el periodo 1995-2013, de 61,2 m. Por su parte, el punto de control 1642/2/256 está colgado respecto al resto, con una cota piezométrica entorno a los 460 m s.n.m.

A menor cota se sitúan los niveles medidos en los puntos de control 1642/2/324, 2/151, 2/255, 2/312, 2/325 y 2/327. La evolución temporal del nivel piezométrico en estos pozos se ha representado en la figura 12. En esta figura se puede comprobar que en la zona más septentrional de este sector, el punto de control 1642/2/324 se mantiene estable. A este respecto, se debe indicar que este sondeo capta materiales cretácicos de la Melange. Por otro lado, los sondeos 2/325, 2/312 presentan cierta tendencia ascendente, que se inicia incluso antes que la tendencia ascendente de la desviación acumulada de la precipitación. Asimismo, el pozo 1642/2/327 presenta una evolución similar a la desviación acumulada de la precipitación.

### 6.2.4 Evolución piezométrica del Sector Fuente de Piedra

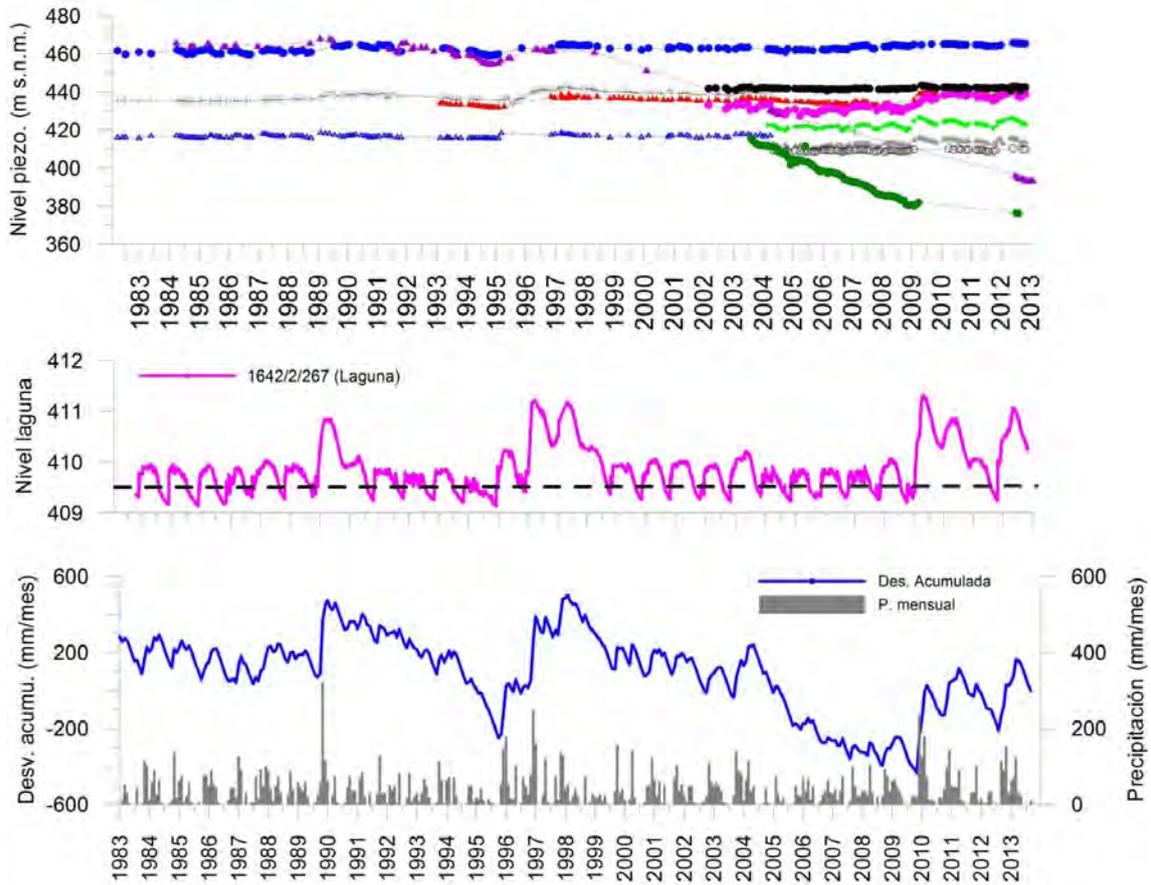
Inmediatamente al norte y al oeste de la localidad de Fuente de Piedra se han controlado un total de cinco puntos (figura 13), durante el periodo 1983-2013. La longitud de las series de datos piezométricos es de interés en el caso de los pozos 1642/2/313 y 1642/2/92. En estos se observa una tendencia ascendente que no coincide con la evolución de la desviación acumulada de la precipitación respecto a la media y que podría estar relacionada con una disminución de los bombeos en este sector. Por otro lado, el sondeo 1642/2/75, situado en la margen más occidental de este sector presenta una evolución piezométrica estabilizada desde el año 2004, con una cota piezométrica en torno a 417 m s.n.m, sin embargo con anterioridad a esa fecha, los niveles en este pozo estaban más altos, alrededor de 422-423 m s.n.m. Esta

estabilización del nivel puede deberse a un incremento y posterior estabilización del volumen de bombeo en la zona noroeste de la cuenca.



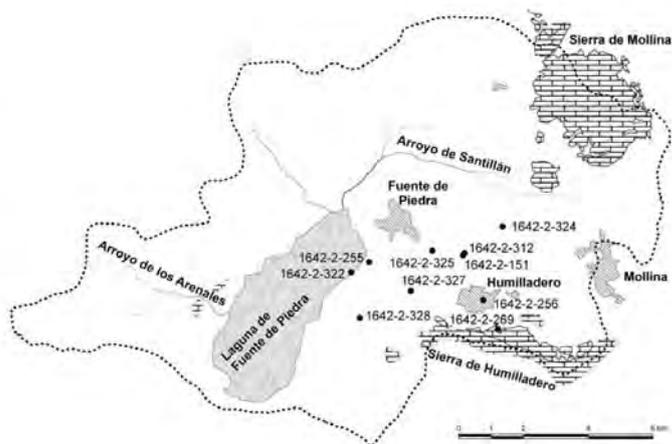
**Figura 10.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Sureste de la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra.

### Evolución temporal del nivel piezométrico sector de Humilladero (General)

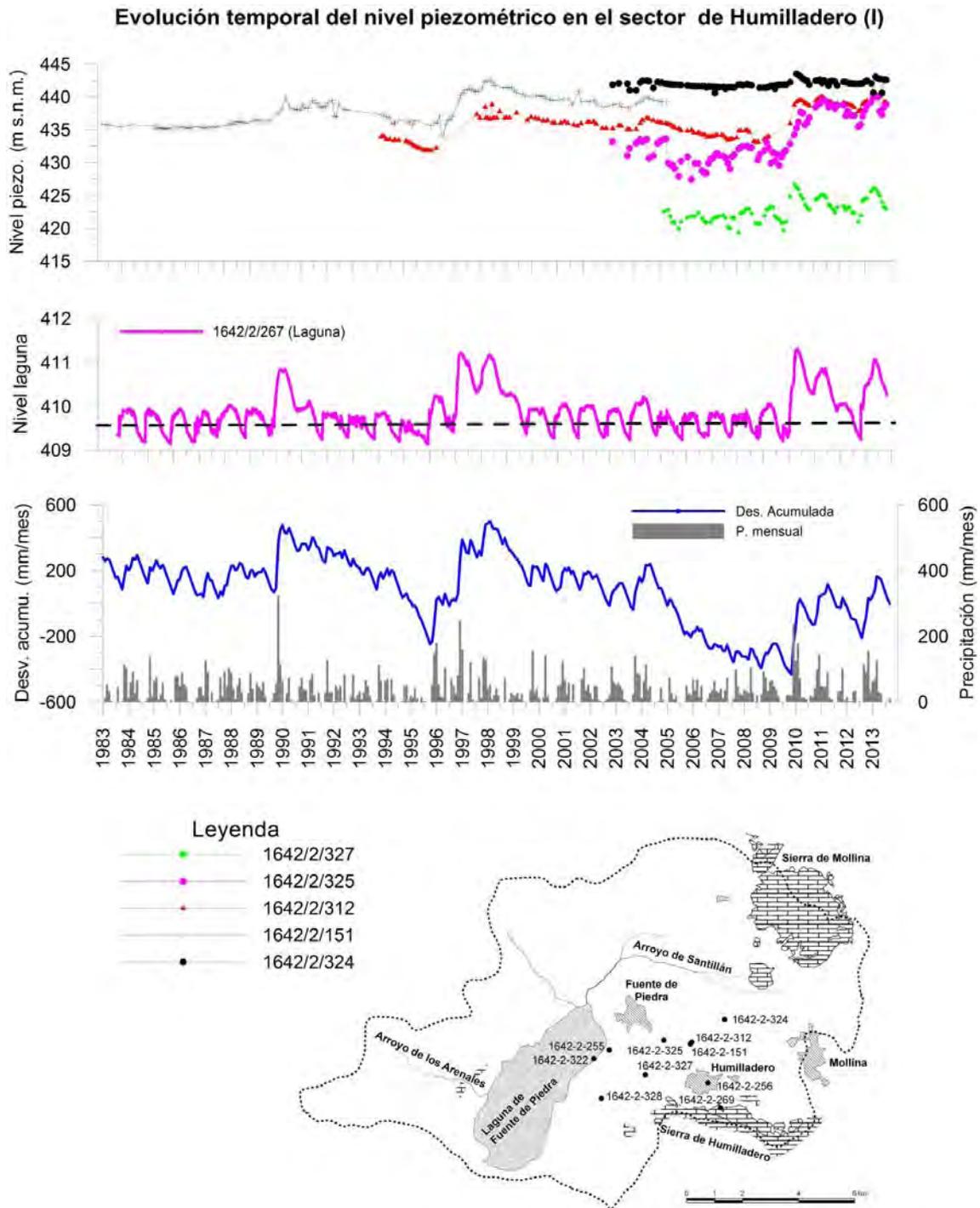


#### Leyenda

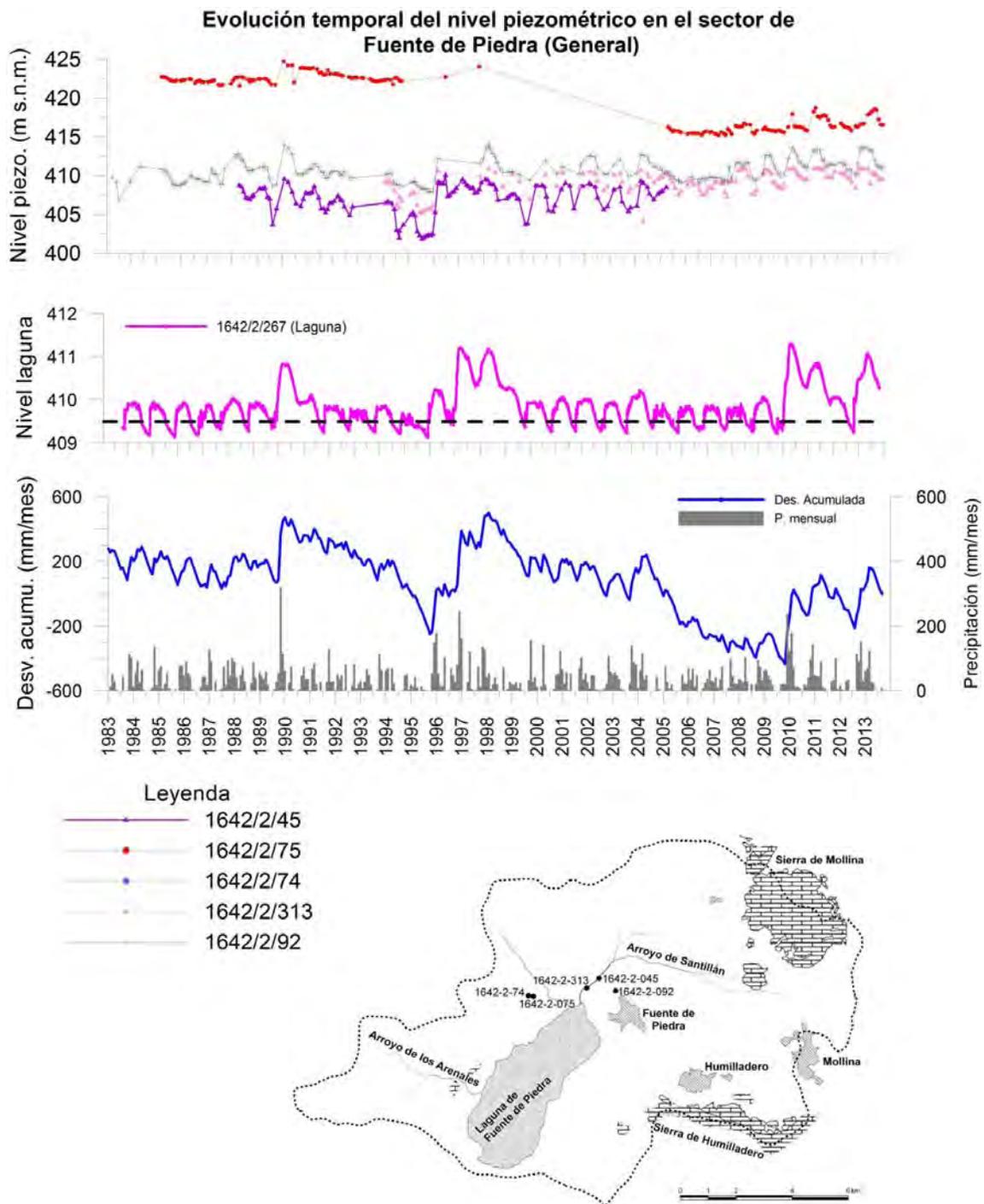
- 1642/2/151
- 1642/2/256
- ▲ 1642/2/312
- ◆ 1642/2/325
- 1642/2/327
- 1642/2/328
- 1642/2/324
- 1642/2/322
- ▲ 1642/2/255
- 103B(CHS)
- ▲ 1642/2/257



**Figura 11.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector de Humilladero.



**Figura 12.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector de Humilladero.



**Figura 13.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector de Fuente de Piedra.

### 6.2.5 Evolución piezométrica del Sector de Santillán

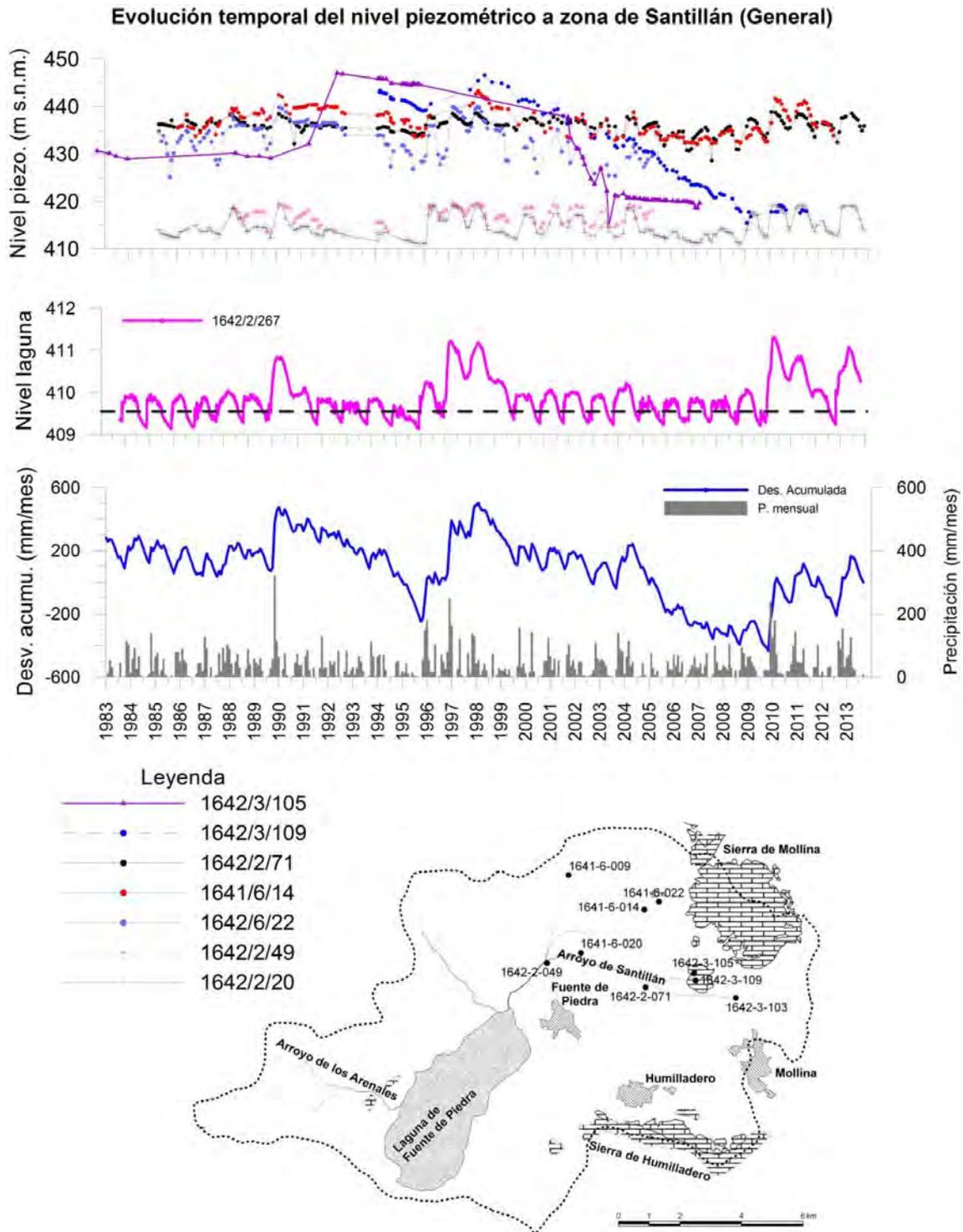
En el sector próximo al acuífero carbonático de la Sierra de Molina y a la cabecera del arroyo de Santillán se han controlado nueve sondeos a lo largo del periodo 1983-2013 (Figura 14). Los sondeos 1642/3/105 y 3/109, situados aguas arriba del antiguo punto de surgencia del manantial de Santillán, y perforados en calizas y dolomías jurásicas, presentan un continuo descenso del nivel que ha dejado de ser controlado. En la actualidad, los niveles se encuentran por debajo del fondo de ambos sondeos.

La citada situación hidrodinámica supone que se ha producido una inversión del sentido del flujo del agua subterránea en este sector. Es decir, el acuífero carbonático de Molina-La Camorra, que alimentaba al acuífero Mioceno-Cuaternario, en condiciones naturales, ha pasado a ser alimentado con agua del acuífero Mioceno-Cuaternario. En ese sentido, en el acuífero detrítico se puede observar como a partir de la fecha en la que el nivel en el acuífero carbonático queda por debajo el acuífero detrítico (años 1999-2000, en el sondeo 1642/3/105, y 2003, en el caso del 1642/3/109), se registra una mayor oscilación intra-anual de los niveles piezométricos en los sondeos 1641/6/14 y 1642/2/71. Esta respuesta puede estar relacionada con una mayor afección de los bombeos, en este sector del acuífero, como consecuencia de la menor transferencia lateral de recursos hídricos que provenía de la Sierra de Molina. Por último, el sondeo 1642/2/20 con menor diferencia de potencial hidráulico respecto al resto, por su mayor proximidad a la laguna, se mantiene estable alrededor de la cota 411—416 m s.n.m. a lo largo de su periodo de control.

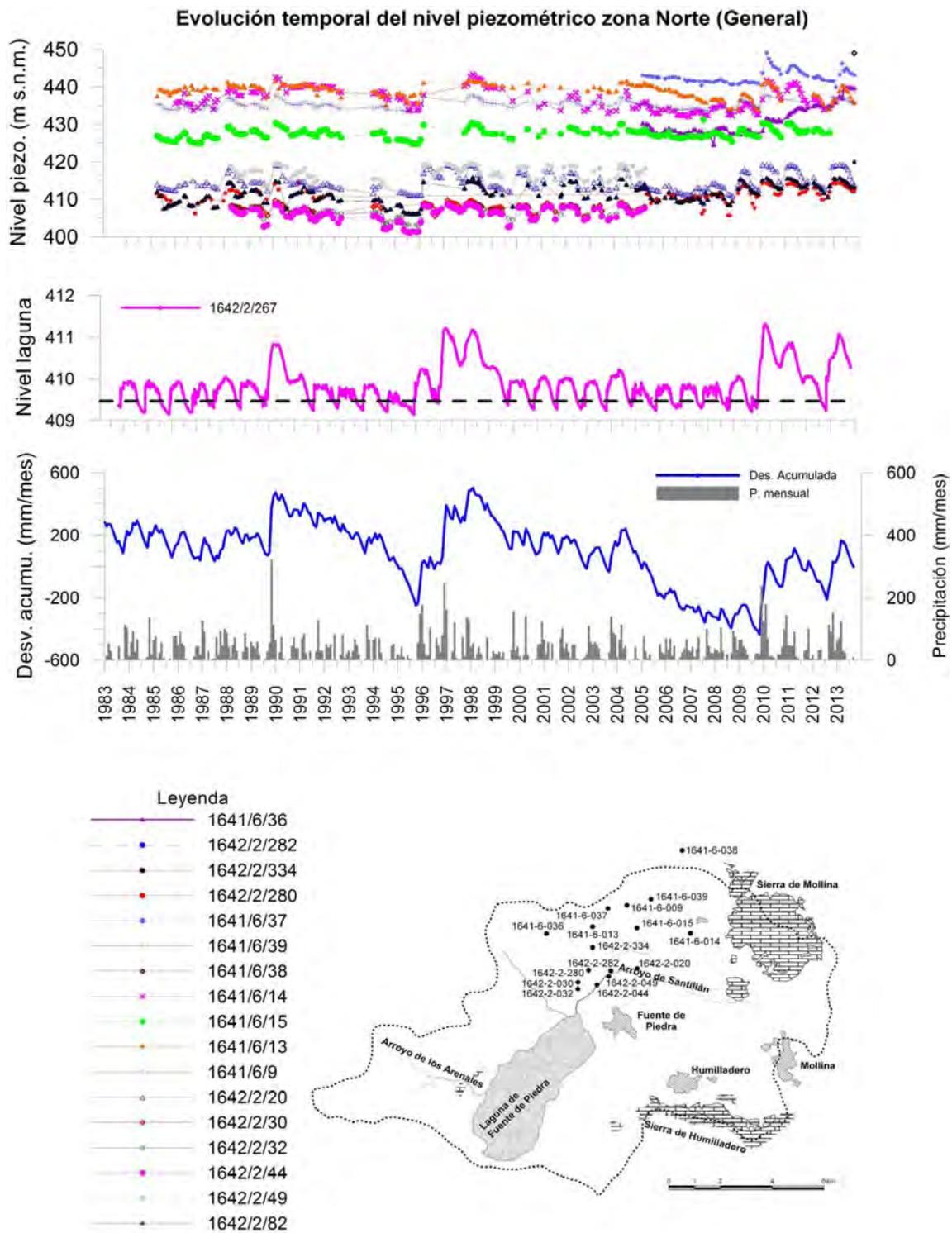
### 6.2.6 Evolución piezométrica del Sector Norte

Al norte de la laguna existe un número muy importante de sondeos, de los que un total de 17 han sido controlados, en alguna ocasión, durante el periodo 1983-2013. En la figura 15, donde se representan todos los datos se pueden diferenciar dos grupos de niveles por su cota. El primero con sus niveles piezométricos comprendidos entre 423 y 445 m s.n.m. y el segundo con los niveles entre 400 y 419 m s.n.m.

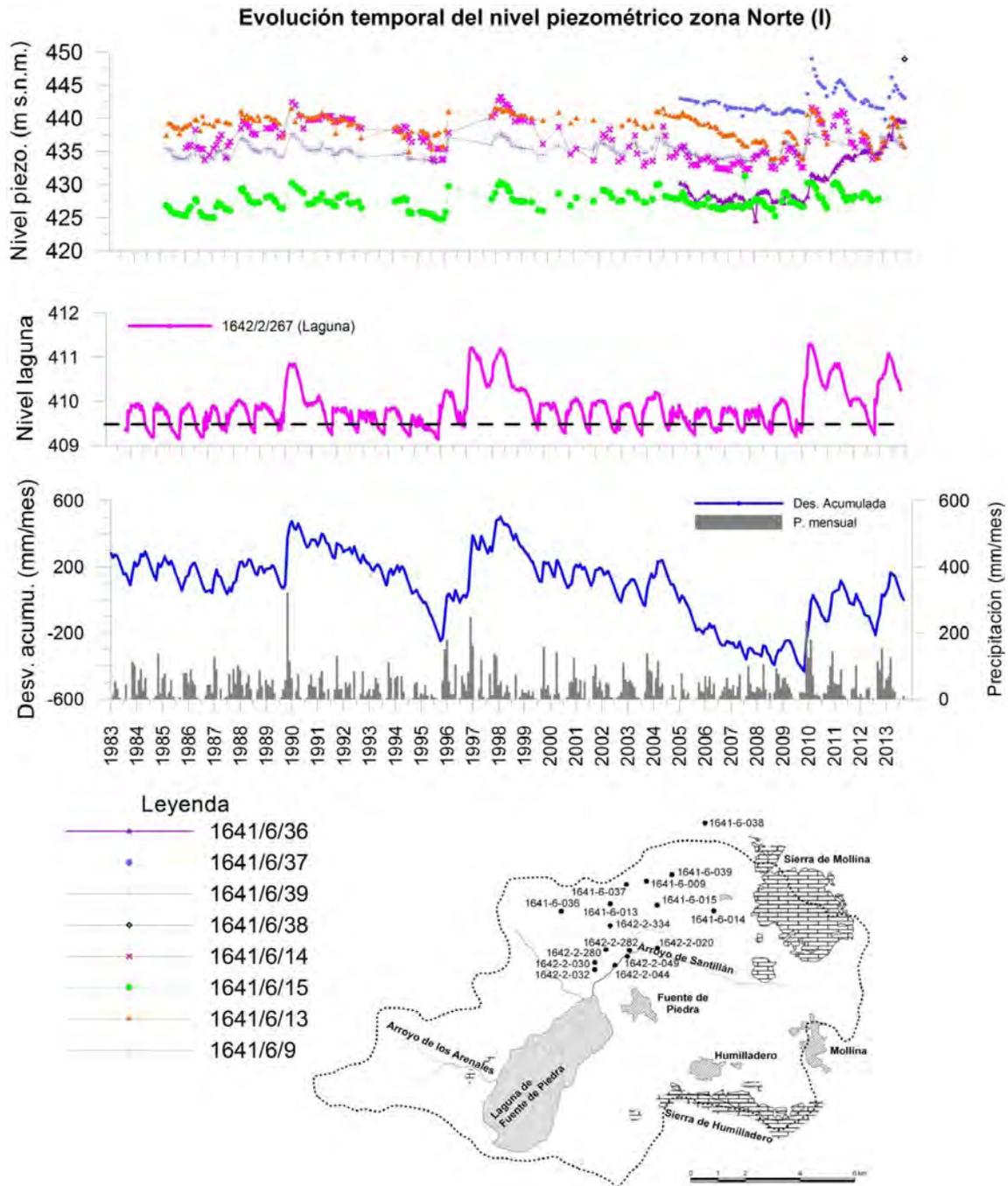
En la figura 16, se han representado las evoluciones piezométricas medias en los pozos con mayor cota piezométrica del Sector. Los pozos 1641/6/13 y 1641/6/9 presentan un largo y continuado periodo de registro y su evolución es paralela a la de la desviación acumulada de la precipitación, de lo que se deduce una fuerte control meteorológico en el funcionamiento hidrogeológico de esta área del acuífero. Algo parecido, pero a mayor cota, y con un periodo de registro sensiblemente inferior, ocurre en el pozo 1641/6/37; sondeo que está perforado en materiales triásicos. En la figura 16 destaca la evolución de nivel piezométrico en el pozo 1641/6/36 con una importante subida de nivel desde 2009 a la actualidad.



**Figura 14.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector de Santillán.



**Figura 15.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Norte.



**Figura 16.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Norte (I).

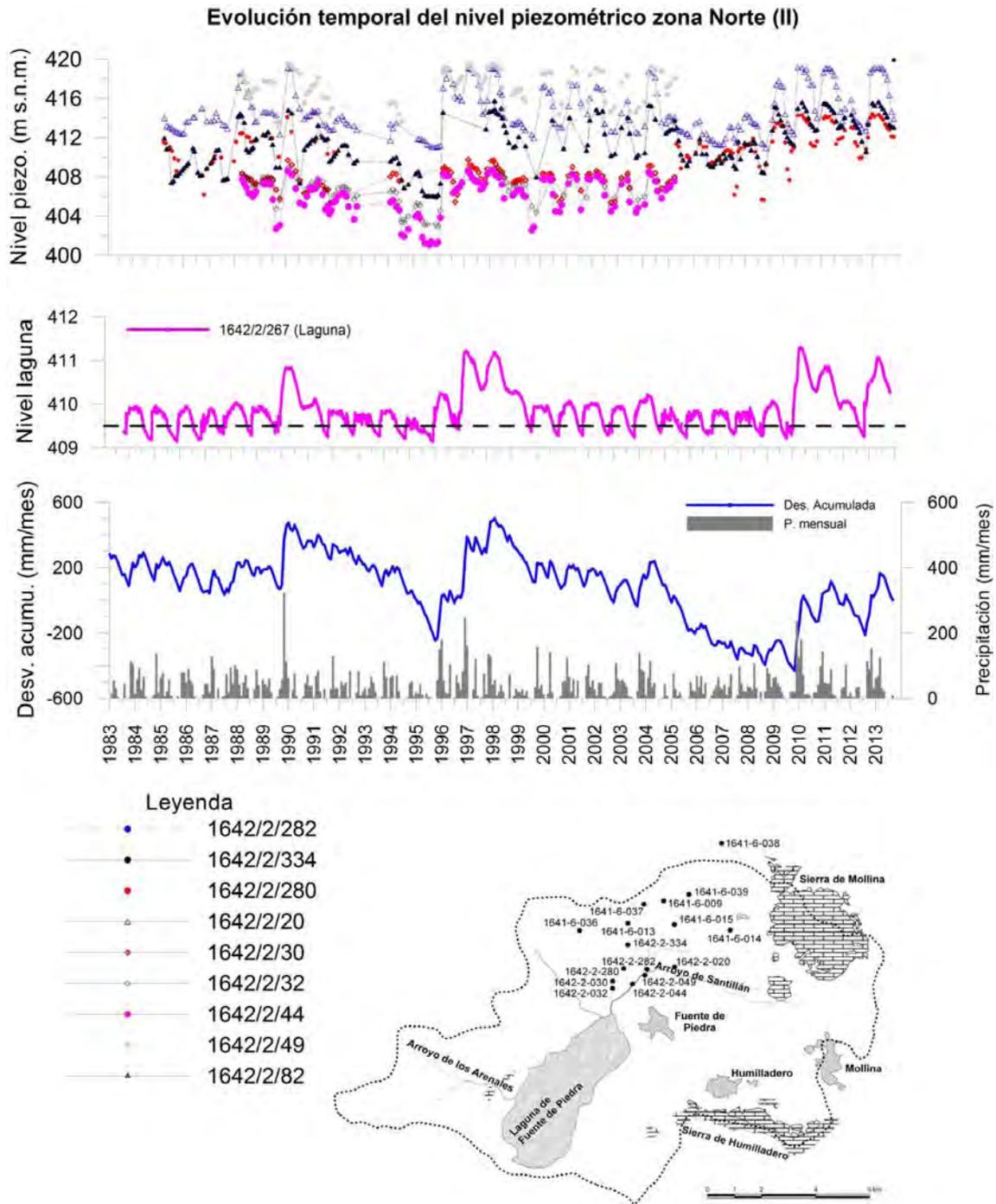
En la figura 17 se incluyen los registros de nivel realizados en el sector inmediatamente al norte de la laguna. En los pozos 1641/2/49 y 1642/2/20 muy próximos al aluvial del arroyo de Santillán describen cotas de nivel y oscilaciones piezométricas parecidas. La cota del nivel de estos pozos está en torno a 416 m s.n.m.. En el caso del pozo 1642/2/20 esta evolución se mantiene hasta finales del 2013. En los pozos en los que se continua haciendo un control, sondeos 1642/2/280 y 1642/2/82, los niveles presentan una tendencia ascendente desde el periodo 2003-2004, que puede estar relacionada con un descenso en el volumen de bombeo en ese sector.

### **6.2.7 Evolución piezométrica del Sector Noroeste**

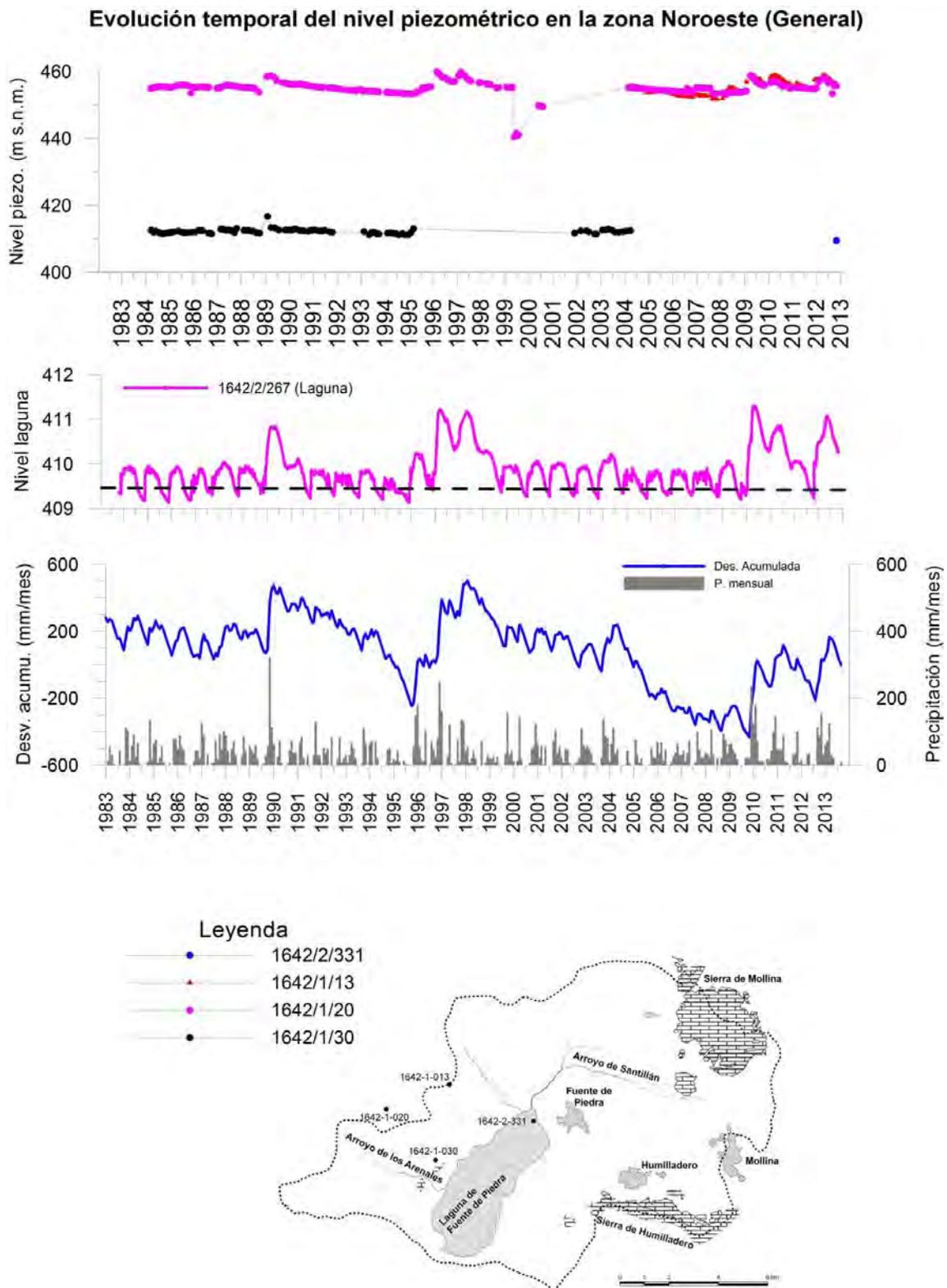
Al noroeste de la laguna existen cuatro puntos con medidas piezométricas (Figura 18). Dos de ellos el 1642/1/30 y el 1642/2/331, están muy próximos a la laguna y presentan niveles piezométricos muy estables y entono a 410 m s.n.m. Los más alejados presentan una notable diferencia de nivel piezométrico respecto a la laguna, con niveles por encima de los 450 m s.n.m. Esta diferencia de potencial hidráulico apunta hacia una reducida permeabilidad de este sector del acuífero.

### **6.2.8 Evolución piezométrica del Sector Oeste**

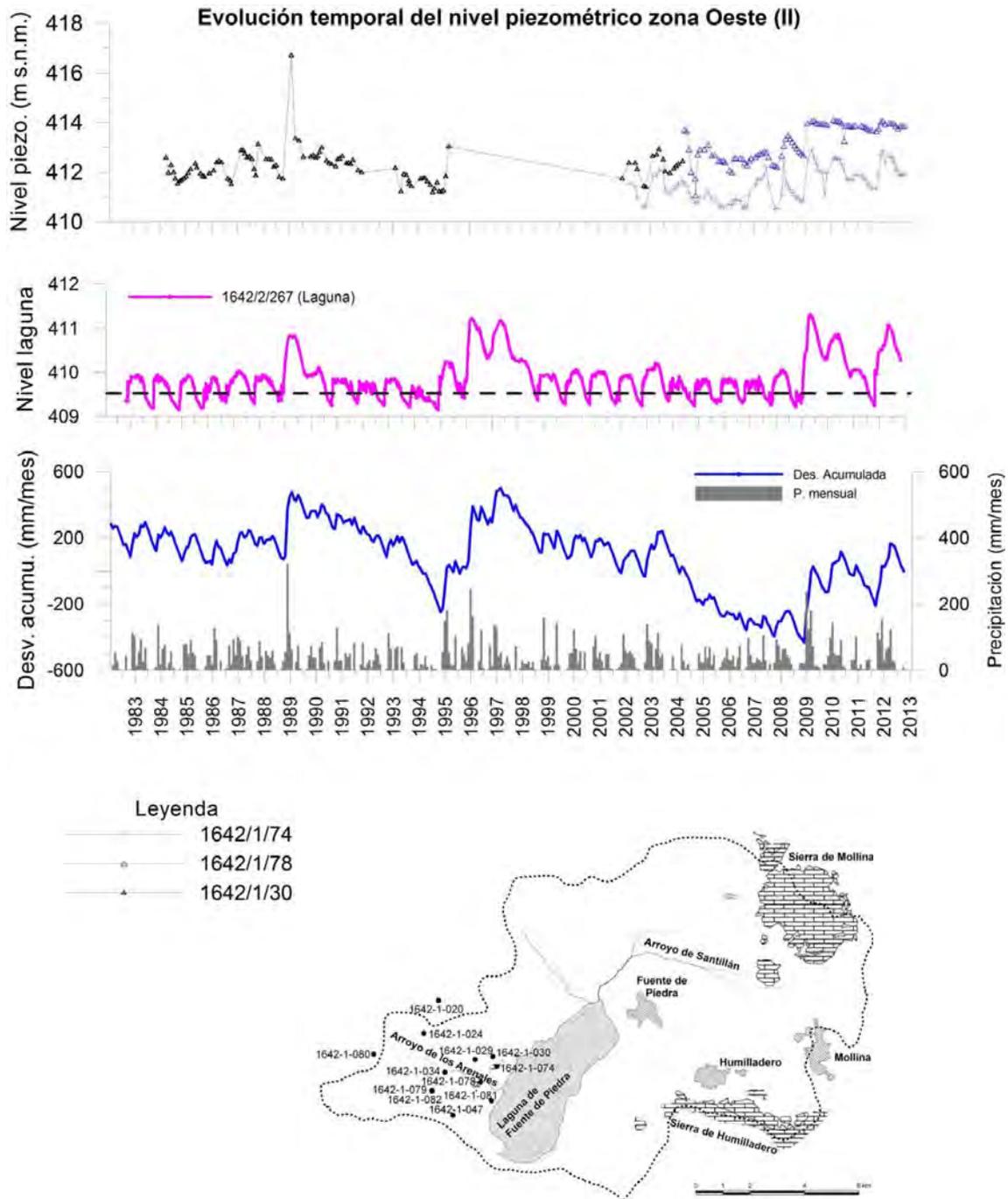
En el sector oeste de la laguna se han controlado doce puntos durante el periodo 1983-2013. La información piezométrica se ha representado en dos gráficas diferentes. En la figura 19, se representa la evolución del nivel de agua en los pozos de control más próximos a la laguna, 1642/1/30, 1642/1/78 y 1642/1/74. La evolución temporal del nivel en estos puntos es muy parecida a la de desviación acumulada de la lluvia media mensual, si bien destaca la reducida oscilación del nivel del sondeo 1642/1/78. En la figura 20, donde se presentan los datos piezométricos de los puntos más alejados, destaca, por su periodo de registro, el pozo 1642/1/24. No se observan tendencias descendentes del ninguno de los puntos de control.



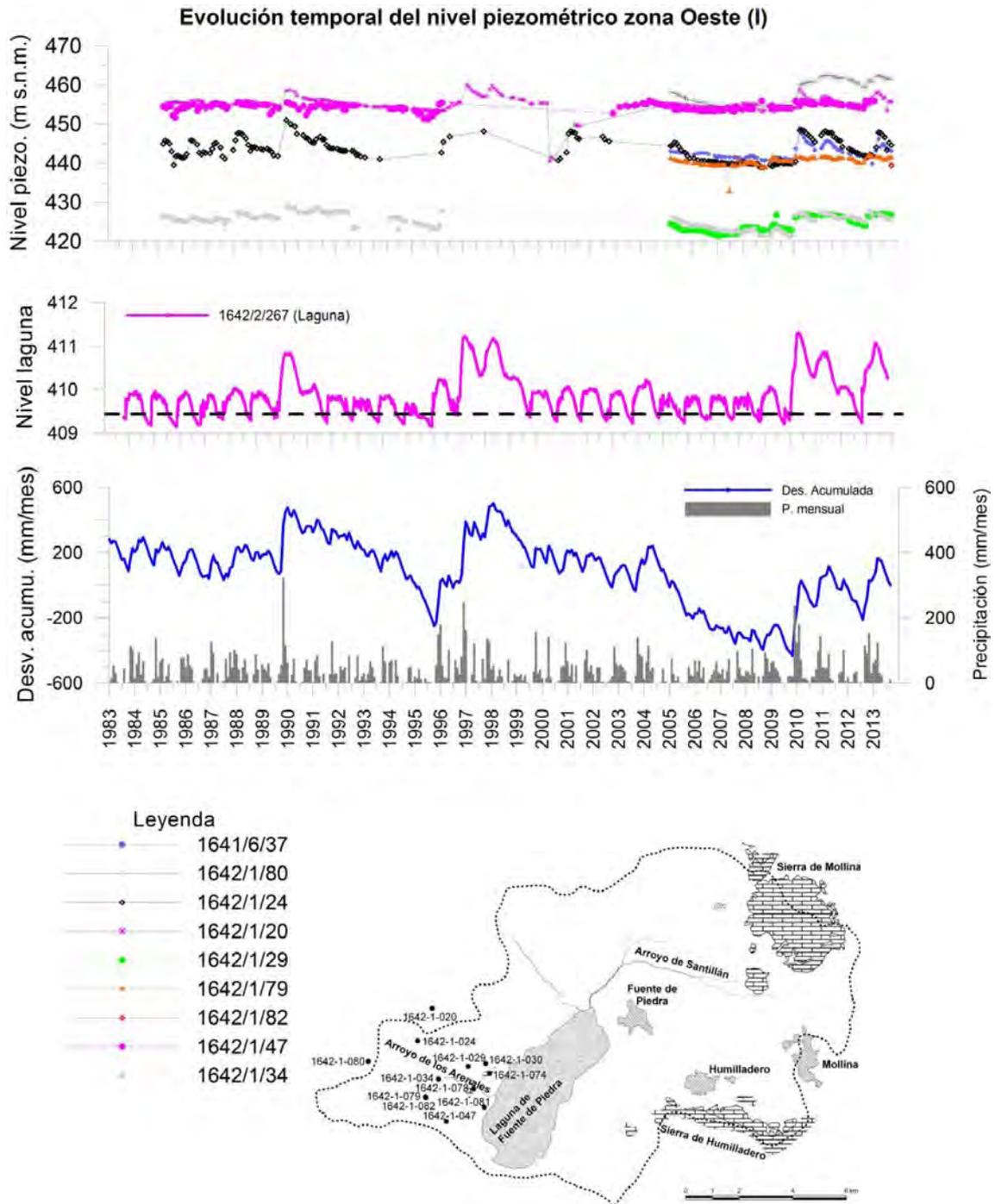
**Figura 17.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Norte (I).



**Figura 18.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Noroeste.



**Figura 19.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Oeste (II).



**Figura 20.** Evolución temporal de los niveles piezométricos en los puntos de control situados en el Sector Oeste (I).

### 6.3 ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA

La figura 21 incluye una mapa de la superficie piezométrica correspondiente a mayo de 1984, en el que se muestran una serie de rasgos comunes con los mapas de isopiezas realizados con anterioridad (ver Linares y del Valle, 1986). Las isopiezas marcan un flujo radial convergente hacia la laguna y la continuidad hidrogeológica entre los materiales mioceno-cuaternarios y los jurásicos, de las sierras de Molina y de Humilladero. En opinión de Linares y del Valle (op.cit), el mapa piezométrico que se representa en la figura 21 correspondería a una situación muy parecida a la que tendría este sistema hidrogeológico en régimen natural. Este mapa se realizó tras un año lluvioso y después de que la mayoría de los pozos de explotación permanecieran inactivos un periodo de bombeo comprendido entre seis y ocho meses. Los gradientes hidráulicos del acuífero en ese escenario, excepto en el sector suroccidental, donde parece haber una medida anómala, son inferiores al 7 ‰.

Las isopiezas correspondientes a septiembre de 2012 y de 2013, representadas en las figuras 22 y 23, respectivamente, muestran una situación notablemente diferente a la de 1984. Las diferencias piezométricas son más palpables en el sector oriental de la cuenca vertiente a la laguna; así, en la mitad oriental del sistema hidrológico asociado a la laguna, destacan dos grandes conos de bombeo, asociados a los piezómetros perforados en las calizas y dolomías jurásicas. Estos conos de bombeo desplazarían la divisoria hidrogeológica oriental hacia el oeste, hacia la laguna, con las implicaciones hidrogeológicas que esto conlleva. Por otro lado, en la mitad occidental de la laguna el gradiente hidráulico se hace más acusado, pasando a ser del orden del 1%.

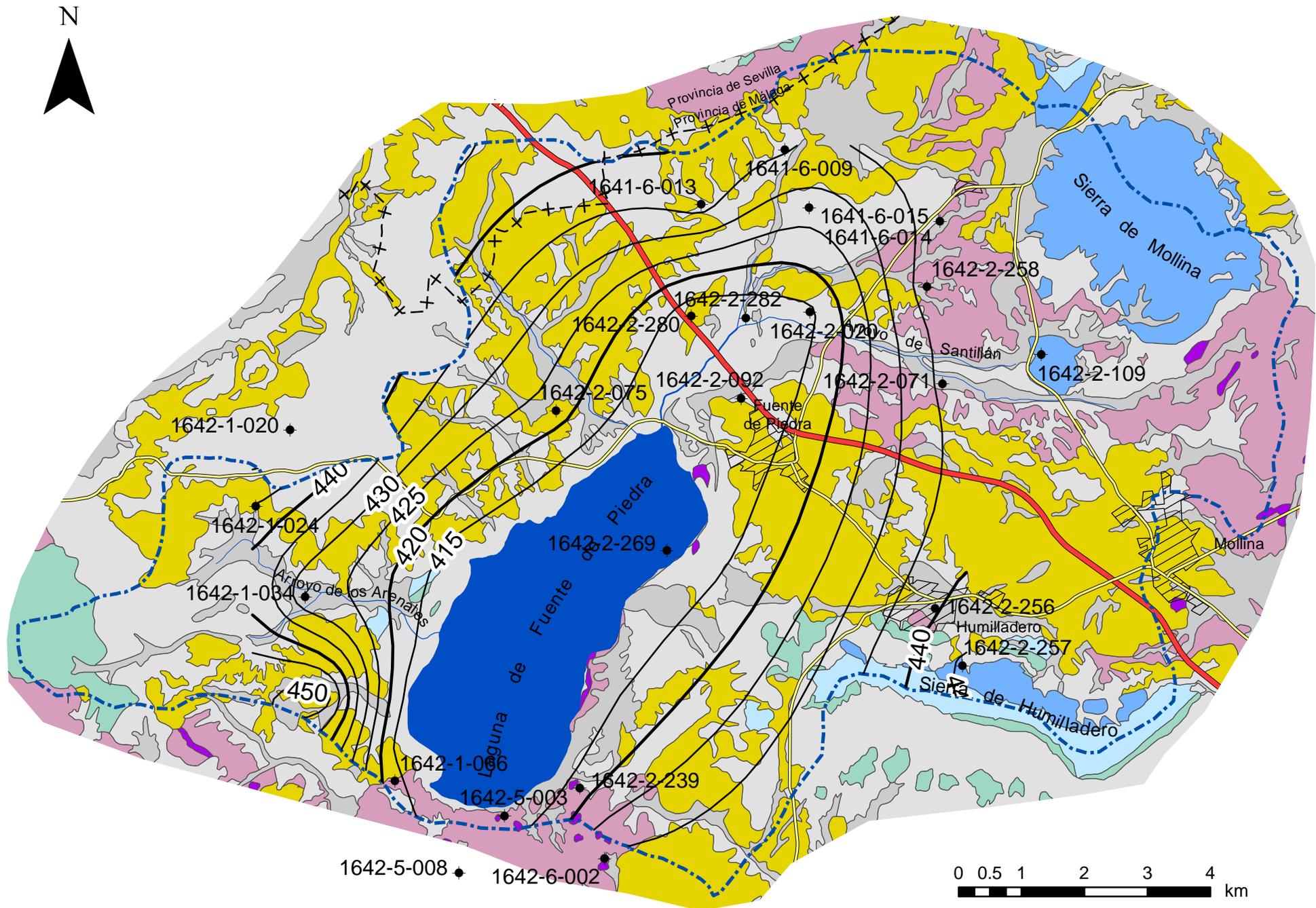


Figura 21. Mapa piezométrico correspondiente a septiembre de 1985

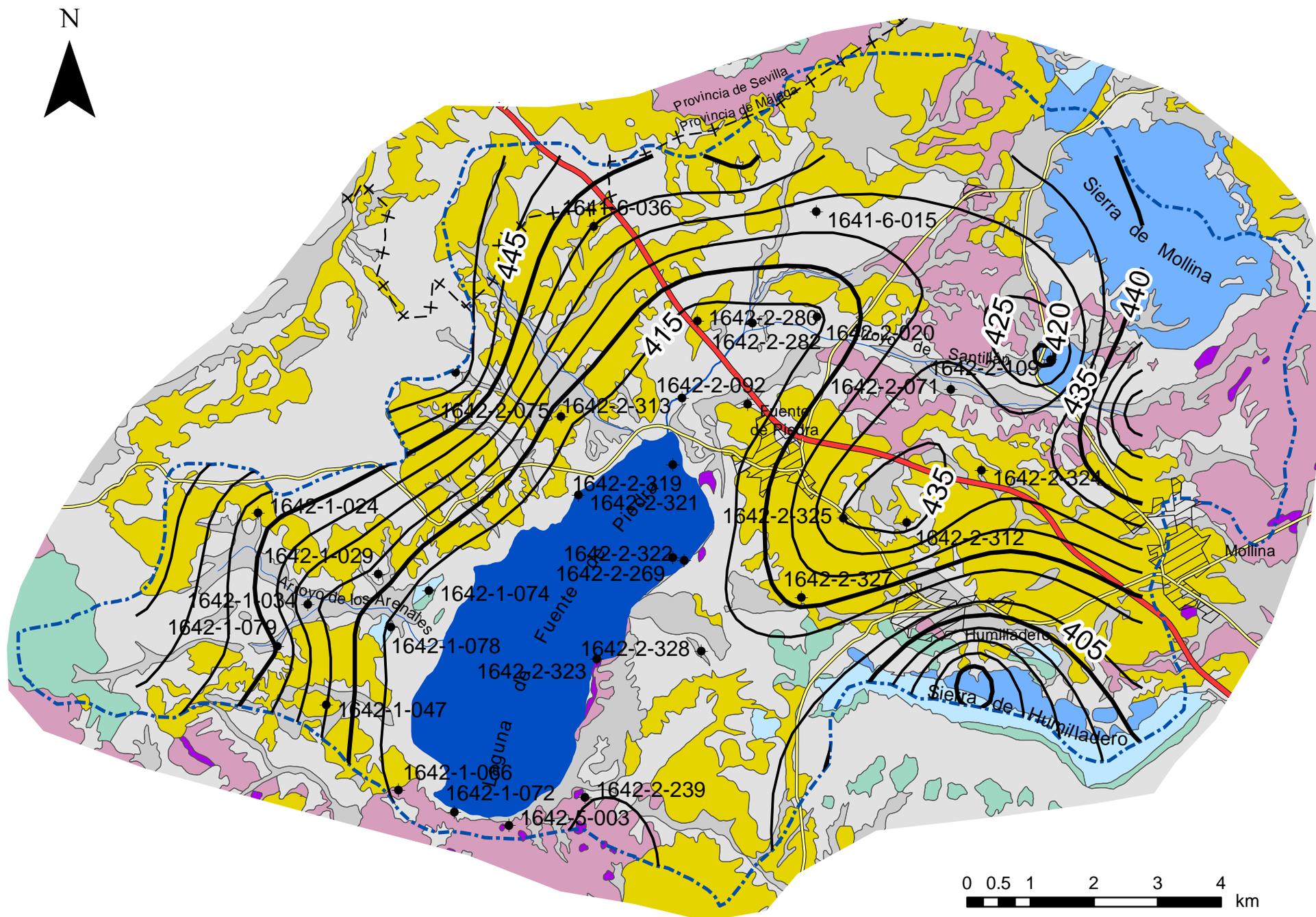


Figura 22. Mapa piezométrico correspondiente a septiembre de 2012



## 7 RESUMEN Y CONCLUSIONES

### A) METEOROLOGÍA

El tratamiento de los datos meteorológicos ha permitido comprobar los siguientes aspectos:

- La precipitación media de los observatorios considerados, en el periodo estudiado (1976-2006), es de 457 mm/año, que se reduce a 363 mm/año en el año seco y alcanza valores de 528 mm/año en el húmedo.
- El año hidrológico 2011-2012 con una lluvia anual de 345 mm, se puede considerar seco. Por el contrario, en el año 2012-13, la precipitación registrada fue de 593 mm, por lo que ha sido superior a la del año húmedo del periodo analizado.
- El análisis de la variabilidad temporal de la precipitación ha puesto de manifiesto una elevada irregularidad interanual, aspecto que condiciona de forma evidente la recarga de los acuíferos: alternan cortos periodos lluviosos, de alta intensidad, con dilatados periodos secos, menos intensos que los anteriores.
- La temperatura media anual del aire está comprendida entre 15,9 y 17,6 °C, con una acusada amplitud térmica anual de las temperaturas medias (entre 29,9 y 34,1 °C).

### B) LÁMINA DE AGUA EN LA LAGUNA

El análisis de la evolución temporal de la altura de la lámina de agua de la laguna durante el periodo analizado en esta Memoria (2011-2013) permite comprobar la manifiesta variabilidad temporal de este sistema hidrológico. En este sentido, se han registrado dos máximos de altura en la lámina de agua. El primero, en abril de 2011, con 127 cm, y el segundo, en marzo de 2013, con 147 cm. Por otro lado, las escasas precipitaciones del año hidrológico 2011-2012, generaron un reducido almacenamiento de agua, provocando que el nivel quedase por debajo del fondo de la laguna, en el sector donde se ubica el limnógrafo, entre julio y septiembre del año 2012. Por el contrario, los 593 mm de precipitación que alcanzaron a la laguna en el año hidrológico 2012-2013 han provocado la permanencia de una lámina de agua durante todo el año, estando el mínimo registrado en septiembre de 2013, en 77 cm.

### C) EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

El seguimiento y el estudio de la evolución temporal del nivel piezométrico en los distintos puntos de control de la red han permitido hacer las siguientes consideraciones:

- El general, los niveles piezométricos medidos en los sondeos que captan el acuífero Mioceno-Cuaternario están estables y presentan una evolución temporal paralela a la desviación acumulada de la lluvia respecto a la media. No obstante existen sectores que indican que existe un descenso acumulado del nivel piezométrico y otros donde ocurre lo contrario. Estos aspectos se discuten a continuación.
- Donde existe un descenso claro y manifiesto de la superficie piezométrica es en los dos acuíferos jurásicos que alimentaban al acuífero Mioceno-Cuaternario, en condiciones naturales. Los acuíferos de Mollina-La Camorra y Humilladero han pasado de alimentar al acuífero Mioceno-Cuaternario, y por tanto, a la laguna, a ser detractores de recursos del sistema.
- En el acuífero Mioceno-Cuaternario hay distintos sectores en los que los niveles piezométricos permanecen estables, y oscilan de forma paralela a la curva de la desviación acumulada de la precipitación. Estas áreas coinciden con los sectores sur de la laguna, con el área central comprendida entre las sierras de Mollina y Humilladero y con el sector oeste-suroeste.
- En otras áreas se ha comprobado que se ha producido un descenso acumulado del nivel, que puede ser debido a una readaptación hidrodinámica como consecuencia del incremento y estabilización del volumen de bombeo, o bien, a una disminución de las aportaciones laterales de los acuíferos jurásicos. Este último supuesto podría explicar el descenso acumulado de niveles que se miden en los pozos 1642/6/2 (20 m) y 1642/2/239 (6 m), en el sureste de la laguna, al oeste de la Sierra de Humilladero. El sondeo 1642/2/75 presenta una respuesta parecida a los anteriores, con un descenso de unos 6-7 m, estabilizado a partir de 2005, al noroeste de la laguna.
- En otros sectores se han detectado recuperaciones del nivel piezométrico que implican el descenso del volumen de bombeo en estas zonas. Sería el caso del área situada al norte de la Sierra de Humilladero, en la que los niveles ascienden desde 2004; en la desembocadura del arroyo de Santillán y al oeste de la localidad de Fuente de Piedra, donde los pozos 1642/92 y 1642/3/313, comienzan una recuperación coincidiendo con el año 2004. Por último, el sondeo 1642/1/36, al noroeste de la laguna también presenta una tendencia ascendente del nivel.

Por otra parte, la realización de los mapas piezométricos correspondientes a los meses de septiembre de 2012 y 2013 y su comparación con el mapa piezométrico de mayo de 1984, en el que se supone una situación parecida a la que presentaría este sistema en régimen natural, permite hacer las siguientes observaciones. La piezometría que presentan los acuíferos asociados al sistema hidrológico de la Laguna de Fuente de Piedra se ha modificado, considerablemente, respecto a su estado años atrás. La principal causa de esta modificación se debe a la inversión del flujo que se ha provocado en los acuíferos jurásicos de Mollina-La Camorra y Humilladero. La captura de recursos desde estos acuíferos ha generado un desplazamiento de la divisoria hidrogeológica oriental hacia la laguna. Esta nueva situación implica una disminución importante de la alimentación de la laguna, tanto desde los acuíferos

jurásicos como desde el Mioceno-Cuaternario. Por otro lado, las zonas del acuífero Mioceno – Cuaternario que recibían lateralmente la transferencia de recursos desde los acuíferos jurásicos han sufrido un descenso de los niveles, respuesta que pudiera consistir en la readaptación del acuífero ante su nueva situación hidrodinámica.

De lo anterior, se puede deducir la importante afección a la que se encuentra sometido el sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra.

El notable descenso de la superficie piezométrica en los acuíferos de Mollina-La Camorra y de Humilladero ha provocado que estos acuíferos hayan pasado a ser detractores de agua del sistema. En este sentido, y a la luz de las nuevas investigaciones geofísicas realizadas en las sierras de Mollina y de La Camorra, en el nuevo Plan de Ordenación de Extracciones se deberá tener en cuenta las afecciones al acuífero que se producen fuera de los límites de la Masa de Agua Subterránea de Fuente de Piedra. En efecto, las nuevas autorizaciones de agua por parte de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir están afectando a la laguna, dado que el acuífero tiene continuidad hidrogeológica fuera de la cuenca.

Se considera esencial reperfilar o construir nuevos piezómetros en los acuíferos carbonáticos. En la mayoría de los existentes el nivel piezométrico se encuentra por debajo del fondo de las perforaciones. Asimismo, se entiende que el importante ritmo de descenso de la superficie piezométrica en los acuíferos jurásicos requeriría de una urgente intervención por parte de la administración correspondiente. Además de los daños ambientales citados, se debe tener en cuenta que de estos acuíferos se abastece a la población de todos los núcleos urbanos del entorno, sin que por el momento exista otra alternativa de suministro.

De lo anterior se entiende que hay que actualizar el conocimiento hidrogeológico de estos acuíferos y plantear distintas actuaciones para dar una solución adecuada a su actual explotación no sostenible.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almécija Ruiz, C. 1997. *Estudio hidrogeológico e hidroquímico de los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 518 pp.
- Cruz San Julián, J. 1974, *Estudio Geológico del sector Cañete la Real-Teba-Osuna*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 413 pp.
- Heredia, J., Ruiz J.M., García de Domingo, A. 2007. Estrategias para la caracterización del sistema hidrogeológico con densidad variable de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga) *Taller de Grupos de Investigación- Gestión Hídrica de los Humedales andaluces*. Baeza.

- Heredia, J. et al., 2009. Caracterización de un sistema hidrogeológico complejo con variabilidad extrema de la densidad: Laguna de Fuente Piedra (Málaga). Vinculación con un sistema kárstico regional hipersalino. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (3): 423-442 ISSN: 0366-0176
- ITGE 1998. *Hidrogeología de la reserva natural de la Laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*. Ed. ITGE. 80 pp.
- Kohfahl, C., Rodriguez, M., Fenk, C., Menz, C., Pekdeger, A., Benavente, J., Hubberten, H., Meyer, H., Knappe, A. and López Geta, J.A. 2008. Characterising flow regime and interrelation between surface water and groundwater in a salt lake basin by means of stable isotopes, hydrogeochemical and hydraulic data. *Journal of Hydrology*, 351 (1-2): 170-187.
- Linares, L. 1990. *Hidrogeología de la Laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 343 pp.
- Linares, L. y del Valle, M. 1986. Relaciones entre la laguna de Fuente de Piedra y la piezometría de los acuíferos de la cuenca (Málaga). *II Simposio sobre el agua en Andalucía*. 345-355.
- Linares, L., López-Geta, J.A., y Rubio Campos, J.C. 1989. Consecuencias hidrogeológicas de la explotación de los acuíferos en la cuenca de Fuente de Piedra (Málaga). En: *La sobreexplotación de acuíferos*. Almería. 521-575.
- López Geta, J. A. Linares Girela, L., Heredia, J., Ruiz, J.M. García de Domingo, A., y Martos-Rosillo, S. 2013. Cuatro décadas de apoyo científico del IGME a la gestión hídrica de la Reserva Natural de la laguna de Fuente de Piedra. *X Simposio de Hidrogeología*. Granada. 835-847.
- Martin-Algarra, A. y Vera, J.A. 2004. La Cordillera Bética y las Baleares en el contexto Mediterráneo occidental. En : *Geología de España* (Ed: J.A. Vera). Sociedad Geológica de España, Madrid. 352-354.
- Pedreira, A., Marín-Lechado, C., Martos-Rosillo, S and Roldán, F.J. 2012. Curved-fold and thrust accretion during the extrusion of a synorogenic viscous allochthonous sheet: The Estepa Range (External Zones, Western Betic Cordillera, Spain). *Tectonics*, vol.31. 17 pp.
- Rodriguez, M. 2002. *Contribución hidrogeológica y limnológica a la caracterización ambiental de zonas húmedas de Andalucía oriental*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 194 pp.
- Ruiz, P. 2012. *Evaluación de la recarga de los acuíferos carbonáticos de las sierras de Mollina – La Camorra y Humilladero (Málaga)*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Pablo de Olavide de Sevilla. 73 pp.
- Sanz de Galdeano, C., Lozano, J.A., and Puga, E. 2008. E “Trías de Antequera”: Naturaleza, origen y estructura. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 2 (3-4), 111-124.